

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

En Télécommunication  
Spécialité : Système de Télécommunications  
Présenté par

Amimoussi Abdelatif

&

Ali Mira Oussaid Mohamed Islam

# Optimisation d'un réseau 4G à l'aide de TDD Massive MIMO

Proposé par : Mme Zine Leila & Mr Hammadi Salim.

Année Universitaire 2022 – 2023

## Remerciements

Merci à notre DIEU tout puissant « ALLAH » qui nous a donné la force et nous a guidé pour réaliser ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à nos parents, nos frères, nos sœurs et nos amis les plus proches pour leurs mots et leurs actions d'encouragement, nous voudrions également remercier nos enseignants et professeurs de Département Électronique qui nous ont chargé de connaissances et nous ont propulsé vers cette étape de notre vie, notamment notre promotrice Mme. Zine Leila et notre ingénieur Mr Hammadi Salim pour l'aide à l'accomplissement de ce travail, pour leurs très grandes patiences et leurs compréhensions et ses compétences scientifiques.

On tient notamment à adresser l'expression de notre sincère reconnaissance aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

## Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail

A nos très chers parents tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que nous vous portons, ni la profonde gratitude que nous vous témoignons pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour nos instructions et notre bien-être.

C'est à travers vos encouragements que nous avons opté pour cette

Nous espérons avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en nous. Nous vous rendons hommage par ce modeste travail en guise de nos reconnaissances éternelles et de notre infini amour. Vous résumez si bien le mot parent qu'il serait superflu d'y ajouté quelque chose.

Que Dieu tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant le chemin de vos enfants.

A tous nos amis les plus proches. Qui n'ont pas cessé de nous conseiller, encourager et soutenir tout au long de nos études, que dieu les protèges et leur offre le bonheur.

## ملخص

أدى وصول تقنية LTE والاستخدام المكثف للبيانات في شبكات الاتصالات إلى زيادة هائلة في حركة مرور المعلومات المرسلية وأصبح الطيف هو أثمن الأصول لمشغلي الهواتف المحمولة.

مشروعنا هذا يركز على تحسين شبكة 4G بناءً على TDD MASSIVE MIMO. يساعد هذا الحل المقترح على تحسين الشبكة، وزيادة أداء KPI، وأفضل جودة للبيانات، وزيادة حركة المرور، ويغطي معظم قوانين المنطقة.

**الكلمات الرئيسية:** LTE, TDD, FDD, Massive MIMO, KPI

## Résumé

L'arrivée de la technologie LTE et l'utilisation massive des données dans les réseaux télécom provoque une augmentation exponentielle du trafic et le spectre devient l'atout le plus précieux des opérateurs de téléphonie mobile.

Notre projet consiste à optimiser le réseau 4G en appuyant sur la TDD Massive MIMO.

Cette solution aide à optimiser le réseau, augmenter la performance KPI, assurer la meilleure qualité de données, augmenter le trafic et couvrir le plus loin de la zone.

**Mots clés :** LTE, TDD, FDD, Massive MIMO, KPI.

## Abstract

The arrival of LTE technology and the massive use of data in telecom networks is causing an exponential increase in traffic and the spectrum is becoming the most precious asset of mobile operators.

Our project is to optimize the 4G network based on TDD Massive MIMO.

This solution helps to optimize the network, increase the KPI performance, the best quality of data, increased the traffic and covers the most laws of the zone.

**Keywords :** LTE, TDD, FDD, Massive MiMo, KPI.

## Listes des acronymes et abréviations

**2G** : Deuxième génération

**3G** : Troisième génération

**4G** : Quatrième génération

**BCCH**: broadcast channel

**BE**: BTS EnodeB

**BLER** : Block Error Ratio

**CQI**: Channel Quality indicator

**CCCH** : Common Control Channel

**CDMA** : Code division multiple access

**DL**: Downlink

**DCCH**: Dedicated Control Channel

**ERAB**: E-UTRAN Radio Access Bearer

**FDD**: frequency-division duplexing

**FDMA** : frequency division multiplexes access

**GSM** : global système mobile

**HSS**: Home Subscriber Server

**HO**: handover

**IMT-Advanced**: International Mobile  
Telecommunications-Advanced

**KPI**: key performance indicator

**LTE**: Long Term Evolution

**LTE-A**: Long Term Evolution-Advanced

**ME**: Mobile Equipment

**MME**: Mobility Management Entity

**MIMO**: Multiple-Input Multiple-Output

**MMS** : Multi-Média Service

**OFDMA:** *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

**OFDM:** *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*

**P-GW:** *Packet-Switch GetWay*

**PRACH:** *Physical Random Access Channel*

**PDCCH:** *Physical Downlink Control Channel*

**PRB:** *Physical Resource Block*

**PDCP:** *Pocket Data Convergence Protocol*

**QoS:** *Quality of service*

**QPSK:** *Quadrature Phase Shift Keying*

**QAM:** *Quadrature Amplitude Modulation*

**RF:** *radio frequency*

**RRC:** *radio resource controller*

**RAN:** *Radio Access Network*

**RAT:** *Radio Access Technologie*

**S-GW:** *Serving Gateway*

**SC-FDMA:** *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*

**SINR:** *Signal to interference plus noise ratio*

**SDCCH:** *Stand-alone Dedicated Control Channel*

**SRAN:** *single radio access network*

**SRS :** *Supplemental Restraint System*

**TM :** *Transmission Mode*

**TDD :** *Time Division Duplexing*

**TRX :** *transceiver*

**TDMA :** *time division Multiplexes Access*

**TDMA :** *Time-Division Multiple Access*

**UL :** *Uplink*

***UE : User Equipment***

***UIT : Union Internationale des Télécommunications System***

***WCDMA : Wideband Code Division Multiple Access***

## Liste des figures :

Figure 1- 1: Schéma synoptique de la TDD.....	4
Figure 1- 2 : schéma FDD. ....	6
Figure 1- 3: Architecture LTE .....	9
Figure 1- 4: Schéma synoptique de TDMA .....	10
Figure 1- 5: La technique d'OFDMA .....	12
Figure 1- 6: Schéma synoptique de OFDMA/SC-FDMA en 4G LTE . ....	13
Figure 2- 1: L'évolution de l'utilisation de l'internet dans le monde .....	17
Figure 2- 2: Les canaux de LTE. ....	22
Figure 2- 3: Les couche LTE . ....	23
Figure 2- 4: Différents types de Handover .....	26
Figure 3- 1: Massive MIMO . ....	33
Figure 3- 2: Les gains de multiplexage .....	33
Figure 3- 3: Massive MIMO 8T8R&64T64R .....	34
Figure 3- 4: Couplage des UE pour MU-MIMO .....	37
Figure 3- 5: 3D Beamforming .....	39
Figure 3- 6: Processus de formation de faisceau. ....	40
Figure 3- 7: Transmission TM9 .....	43
Figure 4- 1: La liste des sites à meilleure score.....	50
Figure 4- 2: Meilleurs scores des cellules.....	51
Figure 4- 3: Meilleur score d'ERBS .....	52
Figure 4- 4: Prédiction de couverture par niveau de signal DL .....	53
Figure 4- 5: Histogramme de couverture par niveau de signal (DL). ....	54
Figure 4- 6: Couverture par débit UL. ....	54
Figure 4- 7: Histogramme de couverture par débit (UL). ....	55
Figure 4- 8: Couverture par débit DL. ....	55
Figure 4- 9: Histogramme de couverture par débit (DL). ....	56
Figure 4- 10: Couverture par signal DL.....	57
Figure 4- 11: Histogramme de couverture par signal DL .....	57
Figure 4- 12: Couverture par débit UL(TDD). ....	58
Figure 4- 13: Histogramme de couverture par débit UL (TDD). ....	58
Figure 4- 14: Couverture par débit DL (TDD) .....	59
Figure 4- 15: Histogramme de couverture par débit DL (TDD). ....	59
Figure 4- 16: Volume de trafic DL.....	61
Figure 4- 17: La moyenne d'utilisateurs connectés. ....	61
Figure 4- 18: Débit DL moyen quotidien en Mbps. ....	62
Figure 4- 19: Débit moyen de téléchargement par heure. ....	62
Figure 4- 20: l'utilisation quotidienne moyenne de PRB. ....	63
Figure 4- 21 : Utilisation moyenne du PRB par heure. ....	63
Figure 4- 22: CELL-volume de trafic –DL. ....	64
Figure 4- 23: Le débit moyen (DL) cell01.....	64
Figure 4- 24: utilisation 4G PRB. ....	65
Figure 4- 25: CELL-volume de trafic –DL. ....	65
Figure 4- 26: Le débit moyen (DL) cell02.....	66
Figure 4- 27: Utilisation 4G PRB.....	66

Figure 4- 28: CELL-volume de trafic –DL. ....	66
Figure 4- 29: Le débit moyen (DL) cell03.....	67
Figure 4- 30: Utilisation 4G PRB.....	67
Figure 4- 31: Implémentation de TDD 8T8R et Massive MIMO. ....	68
Figure 4- 32: Volume de trafic(DL) après l'implémentation.....	69

## Liste des tableaux :

Tableau 1- 1: Evolution de 3G vers 4G.....	7
Tableau 3- 1: Technologies Massive MIMO .	35
Tableau 3- 2: Le fonctionnement basique de Massive MIMO	37
Tableau 3- 3: Paramètres de formation de faisceau 3D .	41
Tableau 3- 4: Paramètre de formation de faisceau MU	42
Tableau 3- 5: Paramétrage TM9	44
Tableau 3- 6: 4 Couches de MIMO Pour mesures TM9 et SRS.	45
Tableau 3- 7: Vérification de l'activation.	45
Tableau 3- 8: Vérification de message RRC_CONN_RECFIG.....	46
Tableau 4- 1: Différents paramétrages (TDD etTDD Massive MIMO)	49
Tableau 4- 2: Statistiques finales de site.	69

## SOMMAIRE :

Introduction générale.....	1
Chapitre1 : Généralités	
1.1 Introduction.....	3
1.2 TDD.....	3
1.2.1 Domaines d'utilisation de TDD.....	4
1.2.2 Bande passante de TDD.....	5
1.3 FDD.....	5
1.4 Comparaison entre TDD et FDD.....	6
1.5 LTE.....	7
1.6 Architecture LTE.....	8
1.7 Techniques d'accès et modulations.....	9
1.7.1 TDMA.....	9
1.7.2 FDMA.....	10
1.7.3 OFDMA.....	11
1.8 SC-FDMA.....	12
1.9 Exigences et objectifs pour LTE.....	13
1.10 Bandes passantes des canaux LTE.....	15
1.11 Conclusion.....	15
Chapitre2 : LTE (Long Term Evolution)	
2.1 Introduction.....	16
2.2 Déploiement du réseau LTE dans le monde.....	16
2.3 Comparaison entre LTE et les technologies sans fil précédentes.....	18
2.4 LTE-Avancé.....	18
2.5 Canaux LTE.....	19
2.5.1 Définition Canaux.....	19
2.5.2 Classification des canaux LTE.....	20
2.5.3 Canaux logiques.....	20
2.5.4 Canaux de transport.....	21
2.5.5 Canaux physiques.....	21
2.6 Les couches LTE.....	22
2.7 Handover.....	24
2.7.1 Définition Handover.....	24
2.7.2 Caractéristiques de Handover.....	24
2.7.3 Types de Handover.....	24
2.7.4 Handover inter-RAT.....	25
2.8 Indicateurs clés des performances KPI.....	26
2.9 Modes de transmission TM.....	30
2.10 Conclusion.....	31

## Chapitre3 : Massive MIMO

3.1	Introduction.....	32
3.2	Massive MIMO.....	32
3.2.1	Définition.....	32
3.2.2	Fonctionnement de Massive MIMO .....	33
3.2.3	Avantages de Massive MIMO .....	34
3.2.4	Évolution de Massive MIMO .....	35
3.3	Technologies clés du Massive MIMO .....	35
3.3.1	Fonctionnement basique de Massive MIMO.....	36
3.3.2	Réception à plusieurs antennes en liaison montante.....	37
3.4	MU-MIMO .....	38
3.4.1	Principes d'appariement des utilisateurs.....	38
3.4.2	Avantages de MU-MIMO et impact sur le réseau .....	38
3.5	Liaison descendante Transmission à plusieurs antennes.....	39
3.6	3D formation de faisceaux.....	39
3.6.1	Processus de formation de faisceaux .....	39
3.6.2	Avantages de la formation de faisceaux et impact sur le réseau .....	40
3.6.3	Paramètres .....	40
3.7	Formation de faisceaux MU .....	41
3.7.1	Avantages et impacts sur le réseau .....	41
3.7.2	Paramétrage .....	42
3.7.3	Formation de faisceau MU (MU Beamforming) : vérification de l'activation .....	42
3.8	Mode transmission TM9.....	43
3.8.1	Avantages et impacts sur le réseau .....	43
3.8.2	Paramètre .....	44
3.8.3	Vérification de l'activation.....	45
3.9	Conclusion.....	46
 Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G à l'aide de TDD Massive MIMO		
4.1	Introduction.....	47
4.2	Mobilis .....	47
4.3	Technologies fournies par Mobilis .....	47
4.3.1	2G .....	48
4.3.2	3G .....	48
4.3.3	4G.....	48
4.4	Optimisation du réseau 4G .....	49
4.4.1	Paramétrages (TDD et TDD Massive MIMO).....	49
4.5	Meilleure score des sites .....	49
4.6	Meilleurs scores des cellules .....	50
4.7	Meilleur score d'ERBS .....	51
4.8	Simulation Atoll.....	52

4.8.1	Simulation d'un site FDD 1800 Mhz.....	53
4.8.2	Simulation d'un site TDD 2100Mhz.....	56
4.9	Résultats de la simulation.....	60
4.10	TDD (implémentation et impact) .....	61
4.11	Résultats obtenus .....	63
4.12	L'impact de l'implémentation de TDD (par secteur / cellule).....	64
4.13	LTE TDD 8T8R et Massive MIMO .....	67
4.14	Conclusion.....	69
	Conclusion générale :.....	71
	Bibliographie.....	73

# Introduction générale

Dans notre projet de fin d'études, nous avons réalisé une étude sur un sujet crucial dans le domaine des communications sans fil. Nous nous sommes penchés sur l'optimisation des performances d'un réseau 4G en explorant l'utilisation de la technologie TDD (Time Division Duplexing) conjointement avec le massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

La TDD est une méthode de transmission de données qui permet d'utiliser une même fréquence pour l'émission et la réception, en allouant des créneaux de temps distincts pour chaque opération. Cette approche offre une grande flexibilité et une utilisation efficace du spectre radioélectrique. Le Massive MIMO, quant à lui, est une technique qui repose sur l'utilisation de multiples antennes d'émission et de réception pour améliorer les performances du réseau en augmentant la capacité, la couverture et la fiabilité des transmissions.

Dans notre étude, nous avons analysé les différentes étapes de déploiement et les paramètres clés nécessaires pour mettre en œuvre cette solution, en tenant compte des contraintes spécifiques liées au spectre radioélectrique et aux ressources disponibles.

Notre objectif principal était d'optimiser la qualité du service offert aux utilisateurs finaux en termes de débit, de latence et de capacité du réseau. Nous avons réalisé des simulations et des tests pour évaluer les performances du réseau optimisé par rapport à un réseau 4G conventionnel.

Les résultats obtenus ont permis d'identifier les gains potentiels en termes de performances et de démontrer l'efficacité de l'approche TDD massive MIMO.

Notre étude approfondie et validée par des simulations, nous a permis de mettre en évidence les avantages de l'utilisation de ces technologies combinées pour améliorer les performances des réseaux existants. Ces résultats pourraient être utiles aux opérateurs de télécommunications et aux fournisseurs de services pour optimiser leurs infrastructures et offrir une meilleure expérience pour utilisateur dans un contexte de déploiement 4G.

Notre mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons exposé des généralités sur les technique d'accès.

Puis dans le deuxième chapitre nous avons détaillé les notions théoriques de LTE.

Ensuite, dans le troisième chapitre nous avons parlé sur le fonctionnement de Massive MIMO.

Le dernier chapitre est consacré pour simulations et résultats.

En fin nous avons terminé notre mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre1 : Généralités**

### 1.1 Introduction

TDD massive MIMO est une technologie de communication sans fil qui utilise un grand nombre d'antennes à la station de base pour améliorer l'efficacité spectrale et la fiabilité des systèmes de communication. Massive MIMO est une forme de technologie MIMO qui utilise un grand nombre d'antennes à la station de base pour transmettre et recevoir simultanément des données vers plusieurs appareils utilisateurs, ce qui entraîne des améliorations significatives de la capacité et de la qualité de la communication sans fil.

Dans TDD massive MIMO, la station de base et les appareils utilisateurs communiquent entre eux à l'aide de techniques de duplexage temporel (TDD), qui permettent d'utiliser la même fréquence pour la transmission et la réception de données. Cette technique est particulièrement utile dans les environnements où le spectre disponible est limité, car elle permet une utilisation plus efficace de la bande passante disponible.

L'utilisation de TDD massive MIMO permet également une allocation dynamique des ressources, où la quantité de données de liaison montante et descendante peut être ajustée en fonction des besoins de communication des appareils utilisateurs. Cette flexibilité permet une utilisation plus efficace du spectre disponible et améliore les performances globales du système de communication.

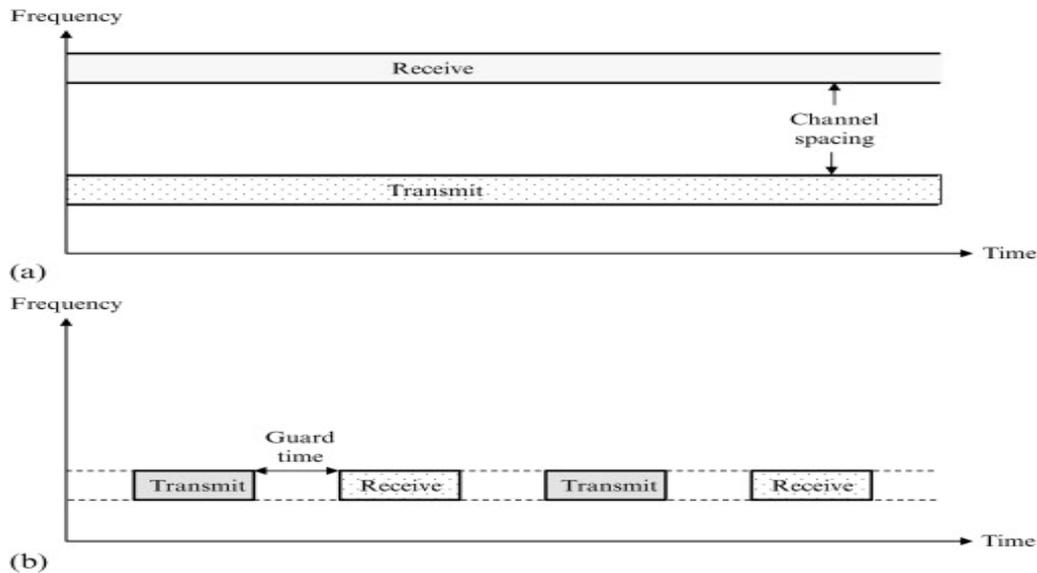
Dans l'ensemble, TDD massive MIMO est une technologie prometteuse qui peut améliorer considérablement les performances des systèmes de communication sans fil.

### 1.2 TDD

TDD est une technologie de communication sans fil utilisée pour transmettre et recevoir des données sur la même bande de fréquence. En TDD, la transmission et la réception se produisent à des moments différents, plutôt que simultanément. Le temps est divisé en plusieurs créneaux, et les créneaux sont alternés entre l'émission et la réception.

TDD présente certains avantages par rapport aux autres technologies de communication, telles que le duplexage par répartition en fréquence (FDD), notamment une plus grande flexibilité et évolutivité. Cependant, il peut être plus

difficile à mettre en œuvre et peut nécessiter du matériel et des logiciels plus complexes [1]. La figure 1-1 illustre le principe de la TDD.



**Figure 1- 1:** Schéma synoptique de la TDD[1].

### 1.2.1 Domaines d'utilisation de TDD

Le TDD est utilisé dans tous les domaines de communication nécessitant une utilisation efficace de la bande passante, une flexibilité accrue pour l'allocation des ressources et une adaptation rapide aux changements de trafic. Elle est utilisée dans un large éventail de domaines de communication. En voici quelques exemples :

- Télécommunications mobiles : Le TDD est largement utilisé dans les réseaux de télécommunications mobiles, en particulier pour les systèmes de communication de quatrième génération (4G) et de cinquième génération (5G).
- Réseaux locaux sans fil (WLAN) : Le TDD est utilisé dans les réseaux WLAN pour optimiser l'utilisation de la bande passante et permettre à plusieurs utilisateurs de partager le même canal de transmission.
- Réseaux de capteurs sans fil (WSN) : pour prolonger la durée de vie de la batterie des nœuds en permettant une utilisation plus efficace des ressources.
- Radiocommunications militaires : pour permettre la transmission de données à haute vitesse et garantir la sécurité des communications.

- Réseaux satellitaires : pour permettre une communication bidirectionnelle entre les satellites et les stations terrestres.
- Réseaux de télévision numérique : pour transmettre des signaux de télévision à haute définition à partir d'un émetteur central vers les antennes de réception des utilisateurs [2].

### **1.2.2 Bande passante de TDD**

La bande passante d'un système utilisant la technique TDD dépend de plusieurs facteurs, tels que la fréquence porteuse utilisée, la largeur de bande allouée à chaque canal et la durée de chaque intervalle de temps (slot) alloué à la transmission montante et descendante.

Dans les systèmes TDD, la bande passante est partagée entre la transmission montante et la transmission descendante, ce qui signifie que la bande passante totale disponible est divisée en deux parties égales pour chaque direction de transmission. Cela permet à un système TDD d'utiliser efficacement la bande passante disponible, car il peut allouer dynamiquement plus de temps pour la transmission dans la direction de trafic la plus importante à un moment donné.

Varier de quelques kilohertz à plusieurs gigahertz, selon l'application.

Par exemple, dans les systèmes de télécommunications mobiles 4G et 5G, la bande passante allouée à chaque canal peut varier de 1,4 MHz à 100 MHz ou plus.

### **1.3 FDD**

Le duplexage par répartition en fréquence (FDD) est une méthode de division du spectre des radiofréquences en deux bandes de fréquences distinctes : l'une pour la transmission liaison montante (Up-Link) et l'autre pour la réception liaison descendante (Down-Link) des données. Les fréquences montantes et descendantes sont séparées par une bande de fréquences spécifique appelée bande de garde, qui évite les interférences entre les deux bandes.

Dans les systèmes FDD, les canaux de liaison montante et descendante fonctionnent simultanément mais sur des bandes de fréquences distinctes, permettant une communication en duplex intégral, ce qui signifie que les données peuvent être transmises et reçues simultanément.

FDD est couramment utilisé dans les réseaux cellulaires, tels que GSM, 3G et 4G/LTE, ainsi que dans d'autres systèmes de communication sans fil. Il fournit une communication plus stable et fiable par rapport à d'autres méthodes telles que le duplexage par répartition dans le temps (TDD) car il élimine le besoin de synchronisation entre les transmissions de liaison montante et descendante [2].

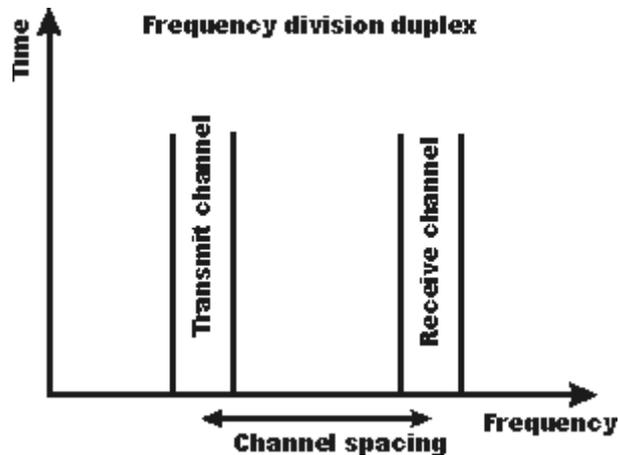


Figure 1- 2 : schéma FDD[2].

### 1.4 Comparaison entre TDD et FDD

La principale différence entre la TDD et la FDD réside dans la manière dont les signaux montants et descendants sont transmis dans un réseau de communication.

Dans un système FDD, la transmission montante et la transmission descendante sont séparées dans la fréquence. Cela signifie que des bandes de fréquences différentes sont utilisées pour la transmission montante et descendante, permettant ainsi une communication simultanée dans les deux directions.

De l'autre cote, dans un système TDD, la transmission montante et la transmission descendante sont séparées dans le temps. Une même fréquence de transmission est utilisée alternativement pour les signaux montants et descendants, avec une période de temps de commutation rapide entre les deux.

En termes d'avantages, la TDD offre une utilisation efficace de la bande passante, une flexibilité accrue pour l'allocation des ressources et une adaptation rapide aux changements de trafic. Elle est également adaptée aux applications à trafic asymétrique, où la demande de bande passante en amont est différente de celle en aval. En revanche, la FDD est plus adaptée aux applications à trafic symétrique, où la demande de bande passante en amont et en aval est similaire [12].

## 1.5 LTE

LTE est une norme de communication sans fil de quatrième génération (4G) utilisée par les réseaux de télécommunications mobiles. Elle est conçue pour offrir une connectivité de données plus rapide, plus fiable et plus efficace que les technologies de communication sans fil précédentes telles que la 3G.

La technologie LTE utilise des bandes de fréquences radioélectriques pour transmettre des données numériques entre les appareils mobiles et les stations de base cellulaires. Elle utilise également des techniques de modulation avancées pour accroître la capacité et la qualité de transmission des données.

La technologie LTE est souvent associée à d'autres technologies sans fil telles que le Wi-Fi et le Bluetooth pour offrir une connectivité sans fil de bout en bout. Elle est également utilisée pour la transmission de données sur les réseaux cellulaires, notamment pour la diffusion de vidéo en continu, les jeux en ligne, les appels vidéo et les applications de messagerie.

La technologie LTE offre plusieurs avantages par rapport aux technologies de communication sans fil précédentes, notamment une bande passante plus large, une latence plus faible, une meilleure qualité de transmission des données et une plus grande efficacité énergétique. Elle est également utilisée pour la technologie de communication machine-to-machine (M2M), l'Internet des objets et les applications de la ville intelligente.

Le tableau 1-1 présente l'évolution de 3G vers 4G

	<b>WCDMA (UMTS)</b>	<b>HSPA HSDPA/HSUPA</b>	<b>HSPA+</b>	<b>LTE</b>
<b>Max downlink speed bps</b>	384k	14M	28M	100M
<b>Max uplink speed bps</b>	128k	5.7M	11M	50M
<b>Latency round trip time approx.</b>	150ms	100ms	50ms (max)	~10ms
<b>3GPP releases</b>	Rel 99/4	Rel 5/6	Rel 7	Rel 8
<b>Approx. years of initial roll out</b>	2003/4	2005/6 HSDPA 2007/8 HSUPA	2008/9	2009/10
<b>Access methodology</b>	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA/SC- FDMA

**Tableau 1- 1:** Evolution de 3G vers 4G[14].

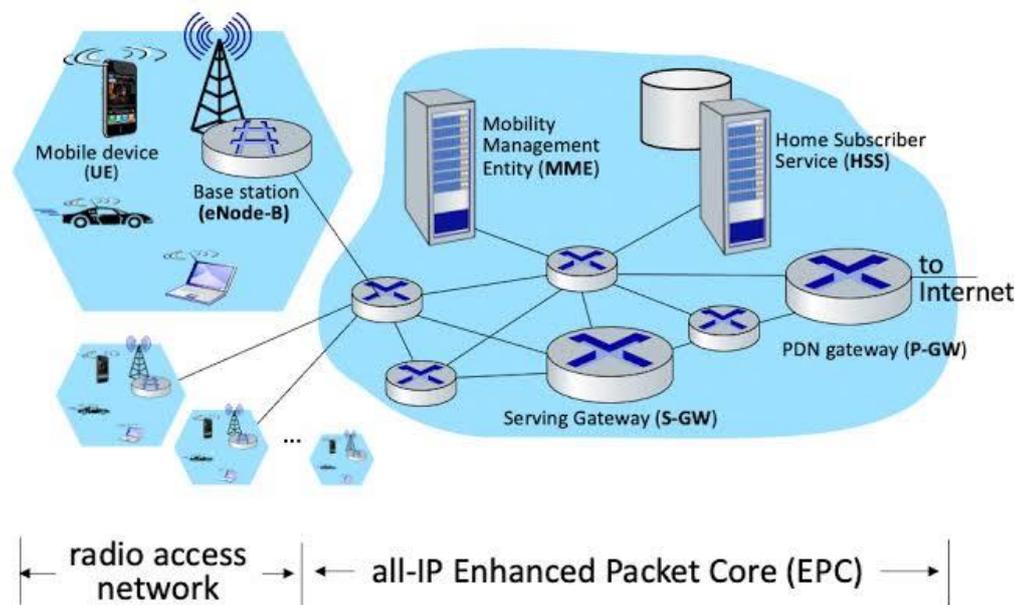
### 1.6 Architecture LTE

L'architecture LTE est constituée de plusieurs éléments clés qui fonctionnent ensembles pour fournir des services de communication mobile 4G haut débit. Voici les principaux éléments de l'architecture LTE :

- **Équipement utilisateur (UE) :** Il s'agit de l'appareil mobile ou de la carte SIM qui est utilisé pour se connecter au réseau LTE. Le terminal utilisateur doit être compatible avec la norme LTE pour pouvoir utiliser les services 4G.
- **Station de base LTE (eNodeB) :** C'est un élément important de l'architecture LTE, qui fournit une connectivité sans fil entre les équipements utilisateurs et le réseau mobile. L'eNodeB est responsable de la gestion de la signalisation et du traitement des données.
- **Contrôleur de mobilité (MME) :** Il s'agit d'un élément du cœur de réseau LTE qui est responsable de la gestion de la mobilité des terminaux utilisateurs, la gestion des sessions et de la sécurité.
- **Point d'accès au réseau (SGW) :** Il assure la connectivité entre les équipements utilisateurs et les serveurs de données. Le SGW est responsable de l'acheminement des paquets de données entre le terminal utilisateur et le réseau.
- **Passerelle de service de paquets (PGW) :** Il est responsable de la connexion entre le réseau LTE et les réseaux externes. Le PGW gère également le trafic de données, la gestion de la QoS (Quality of Service), la facturation et la sécurité.
- **Serveur de passerelle multimédia (MMS) :** Il gère la signalisation et le traitement des données pour les services multimédias tels que la vidéo en continu, la messagerie instantanée et la voix sur IP.
- **Serveur d'applications (AS) :** Il est responsable de la fourniture des services d'applications spécifiques à l'utilisateur. Il gère également la sécurité et la gestion des sessions pour les applications.

- Le serveur d'abonné domestique (HSS) : c'est la principale base de données d'abonnés utilisée dans le sous-système multimédia IP (IMS) qui nous donne des détails sur les abonnés. L'IMS permet aux utilisateurs de se voir accorder ou refuser l'accès à d'autres services en fonction de leur statut.

L'architecture LTE est conçue pour être évolutive et flexible, ce qui permet aux fournisseurs de services de communication mobile d'ajouter de nouveaux services et de répondre aux besoins des utilisateurs [4]. La figure 1.3 représente l'architecture de LTE.



**Figure 1- 3:** Architecture LTE [4].

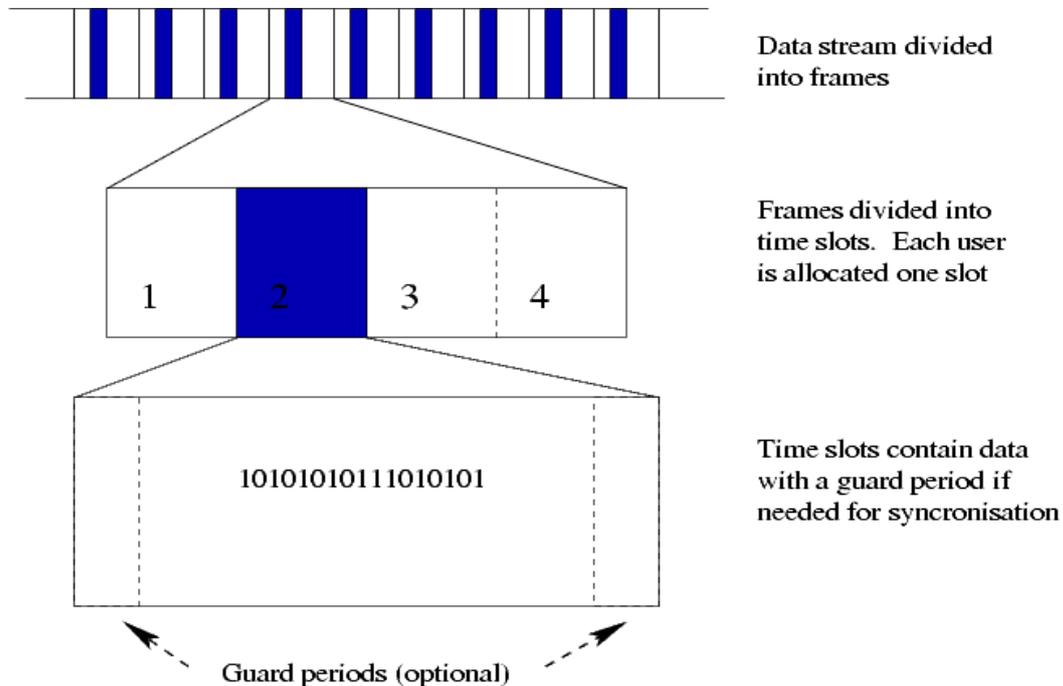
## 1.7 Techniques d'accès et modulations

### 1.7.1 TDMA

C'est une technique de modulation utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour partager une même bande de fréquence entre plusieurs utilisateurs. Cette technique divise le temps de transmission en intervalles de temps fixes, appelés "slots", et alloue chaque slot à un utilisateur différent pour transmettre des données.

Le principal avantage de la technique TDMA c'est de permettre une utilisation plus efficace de la bande passante en permettant à plusieurs utilisateurs de partager la même fréquence, tout en évitant les collisions et les interférences entre les

signaux des utilisateurs. Elle est souvent utilisée dans les systèmes de communication sans fil tels que les réseaux de téléphonie mobile 2G (GSM) et les réseaux de radio bidirectionnels [5]. La figure 1.4 illustre le schéma synoptique de la TDMA.



**Figure 1- 4:** Schéma synoptique de TDMA [5].

### 1.7.2 FDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access) est une technique de modulation utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour partager une même bande de fréquence entre plusieurs utilisateurs. Contrairement à la technique TDMA, la technique FDMA divise la bande de fréquence en canaux différents et alloue chaque canal à un utilisateur différent pour transmettre des données.

La technique FDMA présente un avantage majeur en permettant une utilisation optimale de la bande passante grâce au partage de fréquence entre plusieurs utilisateurs. Cette approche évite les collisions et les interférences entre les signaux des utilisateurs, ce qui en fait un choix courant pour les systèmes de communication sans fil tels que les réseaux de téléphonie mobile 1G (AMPS) et les réseaux de radio bidirectionnels. [5]

### **1.7.3 OFDMA**

C'est une technique de modulation qui permet de diviser une bande de fréquence en plusieurs sous-porteuses orthogonales, ce qui permet de transmettre plusieurs flux de données simultanément.

OFDMA est utilisée dans diverses normes de communication sans fil, telles que la norme LTE (4G), la norme WiMAX, et la norme IEEE 802.11a/g/n/ac/ax (Wi-Fi). Elle est également utilisée dans les réseaux de communication sans fil locaux et dans les réseaux de communication sans fil de grande distance.

La technique OFDMA est considérée comme un moyen efficace d'accroître la capacité et la qualité des systèmes de communication sans fil. Elle permet aux différents utilisateurs de partager la bande de fréquence de manière efficace et équitable, tout en réduisant les interférences et les perturbations [5].

#### **1.7.3.1 Principes de L'OFDMA**

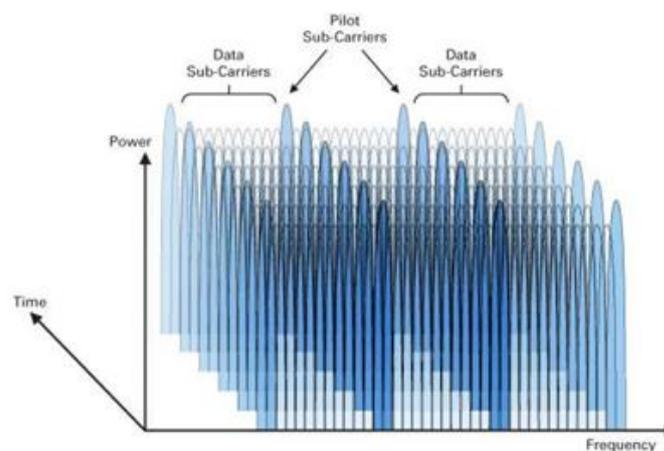
- L'OFDMA utilise des techniques de filtrage multi porteuses pour diviser la bande passante disponible en plusieurs zones locales plus petites (ou fenêtres de fréquence), et chaque zone est divisée en plusieurs tranches de temps.
- L'OFDMA attribue ensuite ces zones locales aux utilisateurs en fonction de leurs besoins, permettant à plusieurs utilisateurs d'utiliser simultanément différentes zones locales au sein d'une même sous-bande sans interférence.

#### **1.7.3.2 Avantages de L'OFDMA**

- L'OFDMA offre une plus grande capacité et une meilleure efficacité spectrale, ce qui signifie que plusieurs utilisateurs peuvent utiliser simultanément le même canal avec des débits de données plus élevés.
- L'OFDMA est également plus résistante aux interférences et au bruit, ce qui se traduit par une meilleure qualité de service et une meilleure couverture du réseau.

- L'OFDMA peut fournir une latence plus faible que les techniques d'accès multiples traditionnelles, ce qui est important pour les applications en temps réel telles que les jeux en ligne et les vidéoconférences.
- L'OFDMA est également capable de gérer des environnements avec des densités d'utilisateurs élevées et des charges de trafic élevées, ce qui le rend adapté aux réseaux sans fil de nouvelle génération tels que les réseaux mobiles 4G et 5G [6].

La figure 1.5 représente la technique OFDMA :



**Figure 1- 5:** La technique d'OFDMA [6].

### 1.8 SC-FDMA

C'est une technique de modulation utilisée dans les systèmes de communication sans fil, en particulier dans les normes de téléphonie mobile de 4<sup>ème</sup> génération (4G) et 5<sup>ème</sup> génération (5G). Cette modulation est similaire à la technique OFDMA qui divise la bande de fréquence en sous-porteuses, mais utilise une technique de transmission différente.

Pour la liaison montante LTE, un concept différent est utilisé pour la technique d'accès. Bien qu'utilisant toujours une forme de technologie OFDMA, la mise en œuvre du schéma SC-FDMA est d'affecter des ressources de communication à plusieurs utilisateurs. La principale différence avec les autres schémas est qu'il effectue l'opération DFT (Discrete Fourier Transform) avant de passer en modulation OFDM.

## Chapitre 1 : Généralités sur LTE

L'un des paramètres clés qui affectent tous les mobiles est celui de la durée de vie de la batterie. Même bien que les performances de la batterie s'améliorent tout le temps, il est toujours nécessaire de s'assurer que les mobiles consomment le moins de batterie possible. Avec la puissance RF amplificateur qui transmet le signal radiofréquence via l'antenne à la base, la station étant l'élément de puissance le plus élevé au sein du mobile ; il est nécessaire qu'elle fonctionne en mode aussi efficace que possible. Cela peut être considérablement affecté par la forme de modulation de fréquence radio et format du signal.

La figure 1.6 présente le schéma synoptique de OFDMA/SC-FDMA en 4G LTE.

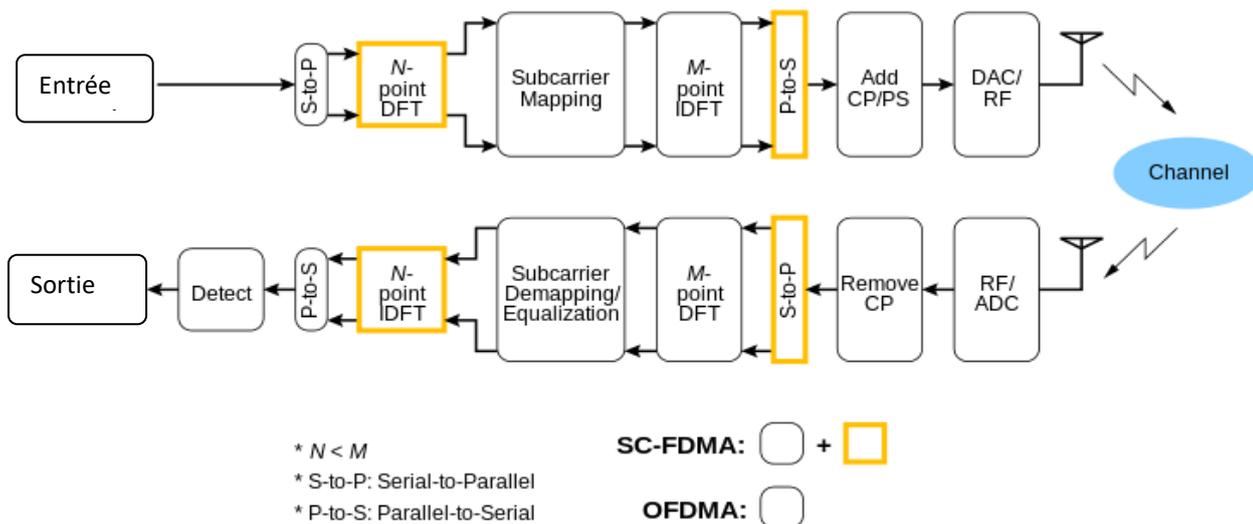


Figure 1- 6: Schéma synoptique de OFDMA/SC-FDMA en 4G LTE [6].

### 1.9 Exigences et objectifs pour LTE

Certaines principales exigences pour LTE liées au débit de données, à la latence et mobilité sont fournies ci-dessous :

- **Débit maximal :**

Débit de données de pointe DL instantané de 100 Mb/s dans un spectre DL(DownLink) de 20 MHz allocation (5 bps/Hz).

Débit de données de pointe UL instantané de 50 Mb/s (2,5 bps/Hz) dans un UL(UpLink) de 20 MHz attribution du spectre.

## Chapitre 1 : Généralités sur LTE

- **Latence du plan de contrôle :**

Temps de transition inférieur à 100 ms. d'un état campé.

- Temps de transition inférieur à 50 ms. entre un état dormant et un état actif.

- **Capacité du plan de contrôle :**

Au moins 200 utilisateurs par cellule dans l'état actif pour les attributions de spectre jusqu'à 5 MHz.

- **Latence du plan utilisateur :**

Moins de 5 ms en condition de déchargement (c'est-à-dire un seul utilisateur avec un seul flux de données) pour petit paquet IP.

- **Débit utilisateur :**

DL : débit utilisateur moyen par MHz, 3 à 4 fois la version 6 HSDPA.

UL : débit utilisateur moyen par MHz, 2 à 3 fois la version 6 Enhanced Uplink.

- **Efficacité du spectre :**

DL : Dans un réseau chargé, objectif d'efficacité spectrale (bits/sec/Hz/site), 3 à 4 fois la version 6 HSDPA.

UL : Dans un réseau chargé, cible pour l'efficacité du spectre (bits/sec/Hz/site), 2 à 3 fois Release 6 Enhanced Uplink.

- **Mobilité :**

E-UTRAN doit être optimisé pour une faible vitesse mobile de 0 à 15Km/h.

Une vitesse mobile plus élevée entre 15 et 120 km/h doit être prise en charge avec des performances.

La mobilité sur le réseau cellulaire doit être maintenue à des vitesses comprises entre 120 km/h à 350 km/h (voire jusqu'à 500 km/h selon la bande de fréquence).

- **Couverture :**

Les objectifs de débit, d'efficacité du spectre et de mobilité ci-dessus doivent être atteints pour cellules de 5 km, et avec une légère dégradation pour les cellules de 30 km. Les cellules vont jusqu'à 100 km ne devrait pas être exclues. [8]

### 1.10 Bandes passantes des canaux LTE

L'un des paramètres clés associés à l'utilisation de l'OFDM dans la LTE est le choix de bande passante disponible qui influence diverses décisions y compris le nombre de porteuses pouvant être acceptées dans le signal OFDM et à son tour, influence les paramètres y compris la longueur du symbole, etc.

LTE peut prendre en charge 6 types de bande passante et, évidemment, pour une bande passante plus élevée, nous allons obtenir une plus grande capacité de canal

(1,4 MHz- 20MHZ).

De plus, les sous-porteuses sont espacées de 15 kHz les unes des autres. Pour maintenir l'orthogonalité, cela donne un débit symbole de  $1/15 \text{ kHz} = 66,7 \mu\text{s}$ . Chaque sous-porteuse est capable de transporter des données à un débit maximum de 15 ksps (kilo symboles par deuxième). Cela donne à un système à bande passante de 20 MHz un débit de symboles brut de 18 Mbps. Cela est capable de fournir un débit de données brutes de 108 Mbps puisque chaque symbole modulé en 64QAM est capable de représenter six bits [8].

### 1.11 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les concepts de base des réseaux cellulaires 4G, en particulier la technique du duplex à répartition dans le temps (TDD) utilisée pour améliorer l'efficacité spectrale et réaliser une transmission en duplex intégral. Nous avons également discuté de différentes technologies d'accès multiple telles que les réseaux cellulaires TDMA, FDMA, OFDMA et SC-FDMA.

En résumé, ce chapitre fournit une base solide pour comprendre les concepts de base des réseaux cellulaires 4G et des techniques d'accès multiples. Ces concepts sont essentiels pour comprendre comment utiliser les techniques MIMO massives TDD pour améliorer l'efficacité et les performances des réseaux cellulaires 4G [9].

# **Chapitre2 : LTE (Long Term Evolution)**

### **2.1 Introduction**

Notre deuxième chapitre se concentre sur l'étude approfondie de la technologie LTE (Long Term Evolution) et ses différentes couches, ainsi que sur l'évolution vers LTE Advanced, les procédures de handover et les indicateurs clés de performance (KPI) (Key Performance Indicator) associés.

LTE, qui est un système de communication sans fil de quatrième génération (4G), a révolutionné les réseaux mobiles en offrant des débits de données élevés, une latence réduite et une meilleure efficacité spectrale. Cette technologie repose sur plusieurs couches, telles que la couche physique, la couche MAC (Media Access Control), la couche réseau et la couche d'application, qui coopèrent pour fournir des services de communication de qualité. Avec l'évolution vers LTE Advanced, les capacités du réseau sont encore améliorées, permettant des vitesses de téléchargement plus rapides, une meilleure gestion des ressources et une expérience utilisateur améliorée. Le handover, qui est la procédure de transfert transparent d'un utilisateur d'une cellule à une autre lorsqu'il se déplace, joue un rôle crucial dans la continuité des services.

Le principal avantage de LTE est sa vitesse de transmission de données, qui peut atteindre plusieurs centaines de Mbits/s. Cela permet aux utilisateurs de télécharger des fichiers volumineux, de regarder des vidéos en streaming et d'accéder rapidement aux applications en ligne, même lorsqu'ils sont en déplacement. En outre, le LTE offre une meilleure qualité de voix et de vidéo, une latence plus faible et une capacité réseau plus élevée que les réseaux sans fil précédents. Cela en fait une technologie essentielle pour les utilisateurs mobiles exigeants et les entreprises qui ont besoin d'une connectivité rapide et fiable pour leurs activités.

### **2.2 Déploiement du réseau LTE dans le monde**

Le déploiement du réseau LTE a été rapide et étendu dans le monde entier. Selon les données de l'observatoire de l'UIT sur les télécommunications/TIC en 2021, il y avait plus de 5,2 milliards d'abonnements mobiles haut débit LTE dans le monde à la fin de 2020. Les régions qui ont connu la plus forte croissance de

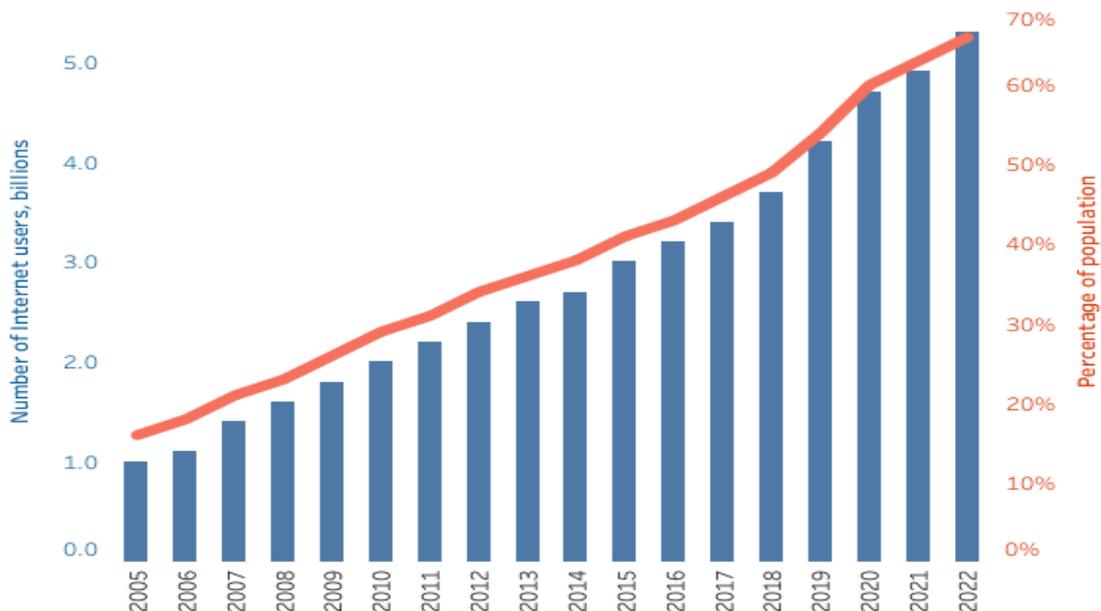
## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

l'adoption du LTE ces dernières années sont l'Asie pacifique, l'Amérique latine, les Caraïbes et l'Afrique.

Les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud et la Chine sont parmi les pays qui ont été les plus avancés dans le déploiement du LTE et ont maintenant des réseaux LTE bien établis. En Europe, les déploiements ont été plus lents en raison de la fragmentation du marché et de la complexité des réglementations. Cependant, la plupart des pays européens ont maintenant des réseaux LTE en place.

Le déploiement du LTE a été motivé par la demande croissante des utilisateurs pour des vitesses de données plus rapides, une meilleure qualité de voix et de vidéo et une connectivité plus fiable pour les applications mobiles. Le LTE est également considéré comme un élément clé de la transition vers les réseaux 5G, qui offriront des vitesses de données encore plus élevées et une connectivité plus étendue pour les applications IoT (Internet Of Things) et d'autres cas d'utilisation [8]. La figure 2.1 indique l'évolution de l'utilisation de l'internet dans le monde.

### Individuals using the Internet



Source: ITU

**Figure 2- 1:** L'évolution de l'utilisation de l'internet dans le monde [10].

### **2.3 Comparaison entre LTE et les technologies sans fil précédentes**

Le LTE offre des avantages significatifs par rapport aux technologies sans fil précédentes telles que la 2G et la 3G. Voici quelques différences clés entre le LTE et les technologies sans fil précédentes :

- **Vitesse** : Le LTE est beaucoup plus rapide que les technologies sans fil précédentes. Les vitesses de données du LTE peuvent atteindre plusieurs centaines de mégabits par seconde, alors que les technologies 2G et 3G ont des vitesses de données beaucoup plus lentes.
- **Latence** : La latence est la durée entre l'envoi et la réception de données sur un réseau. Le LTE a une latence beaucoup plus faible que les technologies 2G et 3G, ce qui signifie que les données sont transmises beaucoup plus rapidement.
- **Capacité** : Le LTE est capable de gérer beaucoup plus de trafic que les technologies sans fil précédentes. Cela signifie que le réseau LTE peut prendre en charge un plus grand nombre d'utilisateurs et d'applications simultanément.
- **Qualité de la voix** : Le LTE offre une qualité de voix nettement améliorée par rapport aux technologies 2G et 3G. Les appels en LTE utilisent la voix sur IP (VoIP), qui est une technologie de voix numérique, offrant une qualité audio plus claire et plus fiable.
- **Sécurité** : Le LTE offre une sécurité améliorée par rapport aux technologies sans fil précédentes. Cette technique utilise un cryptage de bout en bout pour protéger les données en transit, ce qui rend les réseaux LTE plus sûrs pour les utilisateurs.

### **2.4 LTE-Avancé**

Cette technique est une évolution du réseau LTE qui apporte des améliorations significatives en termes de débit, de capacité, de fiabilité et d'efficacité énergétique. Voici quelques-unes des améliorations clés apportées par le LTE-avancé (LTE-Advanced) :

## **Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)**

- Débit plus élevé : Le LTE-A peut atteindre des vitesses de téléchargement allant jusqu'à 1 Gbps, soit une amélioration significative par rapport au LTE, qui offre un débit maximum de 300 Mbps.
- Agrégation de porteuses : Le LTE-A utilise la technique d'agrégation de porteuses, qui permet de combiner plusieurs bandes de fréquences pour augmenter le débit global du réseau.
- MIMO multi-antennes : Le LTE-A utilise la technologie MIMO qui permet de transmettre plusieurs flux de données simultanément en utilisant plusieurs antennes pour améliorer la qualité de la transmission et la capacité globale du réseau.
- Réseau hétérogène : Le LTE-A permet de combiner plusieurs types de cellules hétérogènes, y compris des petites cellules pour une couverture plus dense et des macro-cellules pour une couverture plus large.
- QoS améliorée : Le LTE-A offre une qualité de service (QoS) améliorée, ce qui permet aux utilisateurs de bénéficier d'une expérience utilisateur plus cohérente, avec moins d'interruptions ou de déconnexions.
- Efficacité énergétique : Le LTE-A utilise des techniques d'économie d'énergie pour prolonger la durée de vie de la batterie des appareils, ce qui est particulièrement important pour les appareils IoT qui peuvent fonctionner sur batterie pendant des années [10].

### **2.5 Canaux LTE**

#### **2.5.1 Définition Canaux**

Les flux d'informations entre les différentes couches de protocoles sont appelés canaux. Ceux-ci sont utilisés pour séparer les différents types de données et leur permettre d'être transportés à travers différentes couches. Ces canaux fournissent des interfaces à chaque couche de la pile de protocoles LTE et permettent une séparation ordonnée et définie des données.

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

En fait, LTE utilise plusieurs types différents de canaux logiques, de transport et physiques, qui peuvent être distingués par le type d'informations qu'ils transportent et par la manière dont les informations sont traitées.

### 2.5.2 Classification des canaux LTE

- Canaux logiques (Quel type d'information)
- Canaux de transport (comment ces informations sont transportées)
- Canaux physiques (où envoyer ces informations)

### 2.5.3 Canaux logiques

Le réseau LTE utilise différents types de canaux logiques pour transférer les données entre les terminaux mobiles et les stations de base. Ces canaux sont classés en deux catégories principales : **les canaux de contrôle** et **les canaux de données**.

**Les canaux de contrôle** sont utilisés pour la transmission d'informations liées au contrôle de la connexion entre les terminaux mobiles et les stations de base. Ces canaux comprennent le canal de signalisation de contrôle de liaison montante (UL-SCH), le canal de signalisation de contrôle de liaison descendante (DL-SCH), le canal de commande de planification de liaison montante (UL-CCH) et le canal de commande de planification de liaison descendante (DL-CCH). Les canaux de contrôle sont utilisés pour la signalisation, la planification des ressources radio, la gestion de l'allocation de la bande passante et la gestion de la qualité de service (QoS) pour les connexions LTE.

**Les canaux de données**, quant à eux, sont utilisés pour la transmission de données utilisateur entre les terminaux mobiles et les stations de base. Les canaux de données comprennent le canal de transport de liaison montante (UL-TS), le canal de transport de liaison descendante (DL-TS) et le canal de contrôle de flux de liaison montante (UL-CCCH). Les canaux de données sont utilisés pour la transmission des données des applications, telles que la voix, la vidéo, la messagerie et les données Internet. Ces canaux sont également utilisés pour le contrôle de flux et la gestion de la QoS pour les connexions LTE.

### 2.5.4 Canaux de transport

Le réseau LTE utilise des canaux de transport pour acheminer les données de l'utilisateur et de contrôle entre les terminaux mobiles et les stations de base. Les canaux de transport se divisent en deux catégories : **les canaux de transport de liaison montante (UL) et les canaux de transport de liaison descendante (DL)**.

- **Les canaux de transport de liaison montante** : sont utilisés pour transmettre les données des terminaux mobiles vers les stations de base. Ils comprennent le canal de transport physique (UL-PHY), le canal de transport logique (UL-TS) et le canal de contrôle de flux (UL-CCCH). Le canal de transport physique est utilisé pour transmettre les données sur le support physique, le canal de transport logique est responsable de la segmentation et du réassemblage des données de l'application et le canal de contrôle de flux est utilisé pour contrôler le flux de données et assurer la qualité de service requise.
- **Les canaux de transport de liaison descendante** : sont utilisés pour transmettre les données des stations de base vers les terminaux mobiles. Ils comprennent le canal de transport physique (DL-PHY) et le canal de transport logique (DL-TS). Le canal de transport physique est responsable de la transmission des données sur le support physique, tandis que le canal de transport logique est responsable de la segmentation et du réassemblage des données de l'application.

### 2.5.5 Canaux physiques

Les canaux physiques sont utilisés en LTE pour transmettre les informations de manière fiable entre les terminaux mobiles et les stations de base. Ces canaux sont utilisés pour la communication à la fois de liaison montante et de liaison descendante et sont divisés en plusieurs types en fonction de leur fonction et de leur utilisation. Les canaux physiques sont utilisés pour la communication en temps réel et sont donc très importants pour le fonctionnement efficace du réseau.

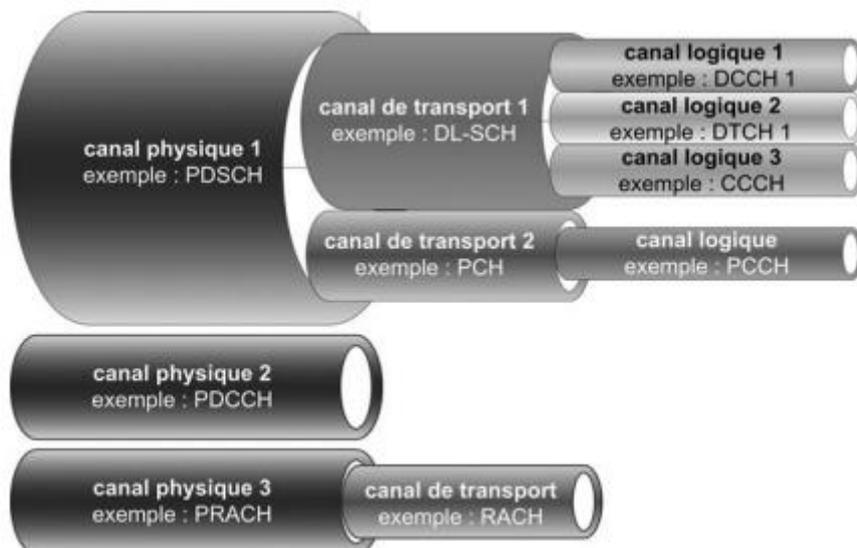
**Les canaux physiques de liaison montante** : comprennent le canal de transport physique (UL-PHY) et le canal de contrôle de puissance de liaison (UL-

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

PCCH). Le canal de transport physique est utilisé pour transmettre les données entre le terminal mobile et la station de base, tandis que le canal de contrôle de puissance est utilisé pour contrôler la puissance de transmission des terminaux mobiles.

**Les canaux physiques de liaison descendante** : comprennent le canal de transport physique (DL-PHY), le canal de contrôle de planification (DL-PCCH), le canal de contrôle de ressources (DL-BCCH) et le canal de commande de planification (DL-DCCH). Le canal de transport physique est utilisé pour transmettre les données de la station de base au terminal mobile. Les canaux de contrôle de planification, de ressources et de commande sont utilisés pour la gestion et le contrôle des ressources du réseau [11].

La figure 2.2 représente les canaux de LTE :



**Figure 2- 2:** Les canaux de LTE[11].

### 2.6 Les couches LTE

Le LTE fonctionne sur un système à couches entre l'utilisateur (UE), l'eNodeB (eNB) et le Mobile Management Entity (MME), Chaque couche communique avec son équivalente du même niveau.

Les différentes couches présentes sont :

- La couche physique (**PHY**) : cette couche est responsable de la modulation et de la démodulation des signaux, de la gestion de la bande passante et de la transmission des données sur les canaux physiques. Elle gère également les opérations de codage et de décodage des données.

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

- **MAC** (Media Access Control) et **RLC** (Radio Link Control) constituant la couche de Liaison de données.

La sous-couche MAC est chargée de l'interface entre les couches supérieures et la couche physique. La sous-couche RLC fiabilise la transmission de données en mode paquet.

- - **PDCP** (Packet Data Control Protocol) : Cette couche est chargée de la compression et de la décompression des données pour leur acheminement sur le réseau. Elle se trouve côté utilisateur ("user plane").

- **RRC** (Radio Resource Control) : Comme son nom l'indique, le RRC est chargé de contrôler les ressources afin de garantir la Qualité de Service (QoS). Deux états sont possibles : **RRC\_IDLE** (pas d'équipement connecté) ou **RRC\_CONNECTED** qui est un protocole en mode connecté qui fonctionne en 3 étapes :

Une demande est effectuée par l'utilisateur au réseau **E-UTRA (RRC CONNECTION REQUEST)**, qui accepte (**RRC CONNECTION SETUP**) ou refuse la connexion (**RRC CONNECTION REJECT**).

En cas d'acceptation, l'utilisateur renvoie un **RRC CONNECTION SETUP COMPLETE** et la connexion est établie.

- **NAS (Non-Access Stratum)** est la couche réseau communiquant entre l'utilisateur et le MME, gérant l'établissement des appels et la gestion de la mobilité. [9]

La figure 2.3 illustre les différentes couches de LTE.

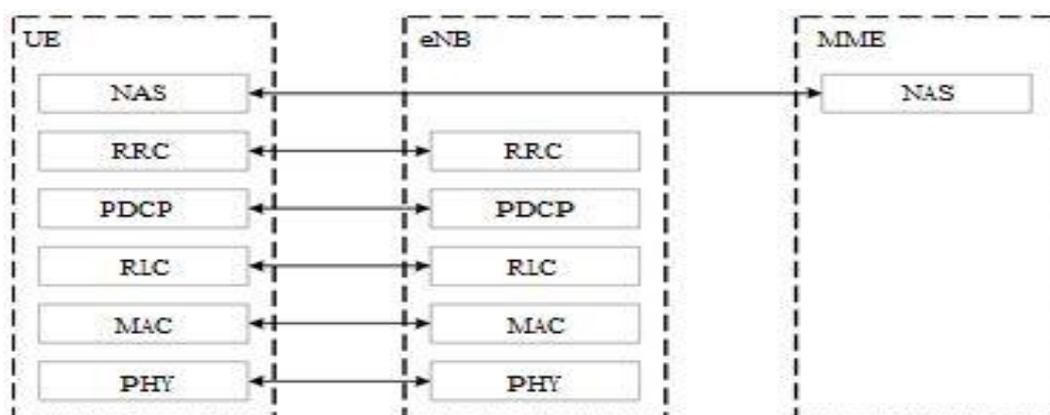


Figure 2- 3: Les couche LTE [11].

### 2.7 Handover

#### 2.7.1 Définition Handover

Le handover est l'un des procédures clés pour garantir la libre circulation des utilisateurs à travers le réseau tout en étant connecté et en se voyant offrir une qualité prestations de service. Puisque son taux de réussite est un indicateur clé de la satisfaction des utilisateurs.

L'utilisateur peut changer de cellule radio sans interruption de la conversation ou du transfert des données.

#### 2.7.2 Caractéristiques de Handover

Pour réaliser le handover, le système LTE utilise une combinaison de mesures de qualité de signal et de gestion de ressources radio pour déterminer la meilleure station de base pour l'utilisateur. Les mesures de qualité de signal sont utilisées pour évaluer la force du signal et les interférences pour déterminer si un handover est nécessaire. Une fois qu'un handover est déclenché, la nouvelle station de base prend en charge la connexion de l'utilisateur et alloue les ressources radio nécessaires pour assurer une transmission de données sans interruption. Le handover en LTE est une caractéristique clé pour garantir une expérience de téléphonie mobile sans interruption et de haute qualité pour les utilisateurs.

#### 2.7.3 Types de Handover

Il existe 3 types de hand over :

##### 2.7.3.1 Intra-LTE Handovers

Les cellules source et cible font partie du même réseau LTE. Il existe principalement deux types de HO intra-LTE possible :

- **Intra-LTE HO à l'aide de l'interface X2 :**

X2 est l'interface entre deux eNodeB (source et cible) dans ce cas. Lorsque l'interface X2 est présente, le HO est terminé sans implication d'EPC (Evolved Packet Core). La libération des ressources au niveau de la source eNodeB est déclenchée par la cible eNodeB.

## **Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)**

- **Intra-LTE HO à l'aide de l'interface S1 :**

Dans le cas où l'interface X2 n'est pas disponible et que les sources eNodeB et cible font partie du même MME / SGW, le transfert est effectué via l'interface S1. Le S-eNodeB initie le transfert intercellulaire en envoyant un message requis à cet effet sur le point de référence S1-MME.

### **2.7.3.2 Inter-LTE Handovers**

Le transfert s'effectue vers d'autres nœuds LTE, deux types de HO inter-LTE sont possibles :

- **Handover inter-MME**

Dans le transfert inter-MME, deux MME sont impliqués dans le transfert (source et cible). La MME source est responsable de l'eNodeB source et le MME cible est responsable de l'eNodeB cible. Le transfert inter-MME a lieu lorsque l'UE se déplace entre deux MME différentes mais est connecté au même SGW.

- **Handover inter-MME / SGW**

C'est la même chose qu'inter-MME mais la seule différence est qu'ici, l'UE doit passer d'un MME / SGW à un autre. La source eNodeB fait partie d'un MME / SGW et la cible eNodeB se trouve dans un autre MME / SGW.

### **2.7.4 Handover inter-RAT**

Transfert entre différentes technologies radio. Par exemple, transfert de LTE vers WCDMA. En cas de transfert entre E-UTRAN et UTRAN, l'eNodeB source est connecté aux sources MME et SGW et le contrôleur RNC (Radio Network Controller) cible est connecté aux cibles SGSN et SGW. Les ressources nécessaires sont d'abord réservées dans le système UTRAN et le transfert est effectué [13].

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

Les différents types de Handover peuvent être schématisés par la figure 2.4.

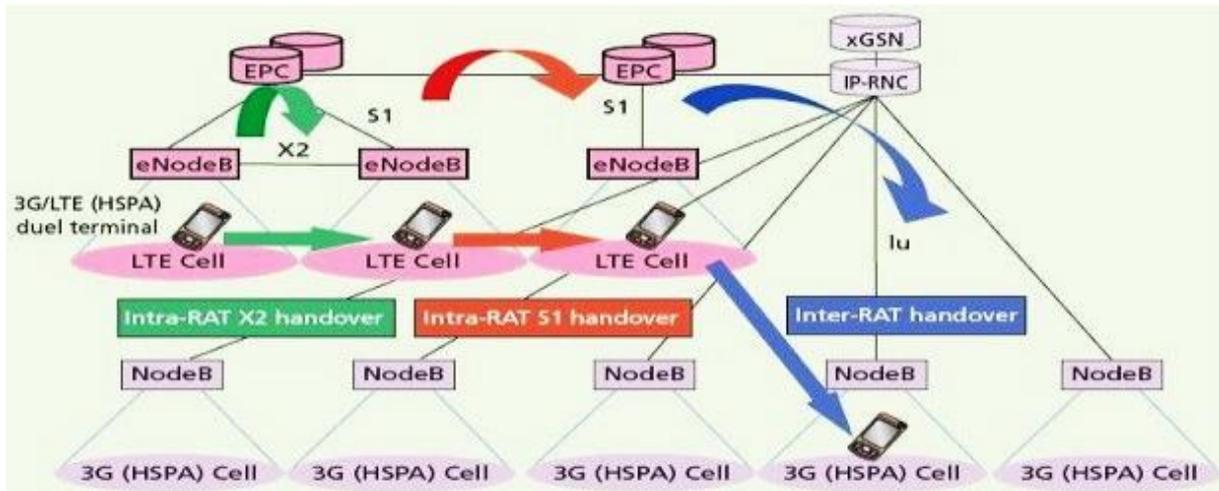


Figure 2- 4: Différents types de Handover [13].

### 2.8 Indicateurs clés des performances KPI

Les KPI sont des valeurs qui sont négociées entre l'opérateur et l'entreprise qui s'occupe de la partie performance du réseau avec des niveaux de valeurs bien définis (seuil). Le but est de vérifier les performances du réseau.

Dans le processus d'optimisation, il faut vérifier la valeur du KPI afin de surveiller et optimiser les performances du réseau radio afin de fournir une meilleure qualité aux abonnés ou de mieux utiliser les ressources réseaux installées.

Les indicateurs de performance clés utilisés dans notre travail peuvent généralement être classés dans la catégorie suivante :

KPI LTE	Indicateur	Formules
Accessibilité	➤ Taux de réussite de la configuration RRC	<b>RRC_SSC_Service</b> = $\frac{\text{Taux de succes de connexion au service}}{\text{Taux de tentative de connexion}} * 100\%$
	➤ ERAB setup success rate ➤ indique la probabilité de succès de l'accès ERAB à	– <b>RAB_SSRService</b> $\frac{\text{Taux de succes de connexion au service}}{\text{Taux de tentative de connexion}} * 100\%$

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

	tous les services.	
<b>Durabilité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Call drop rate</li> <li>➤ Le taux de perte d'appels LTE. Ce KPI mesure l'impact sur l'utilisateur final</li> </ul>	$service_{CDR} = \frac{ERABAbnormal\ Releas}{E_{RAB}Releas} * 100\%$
<b>Mobilité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Intra-Frequency HO Out Success Rate</li> <li>➤ Ce KPI indique le taux de réussite du transfert inter-fréquence de la cellule locale ou du réseau radio au cellule ou réseau radio voisin.</li> </ul>	$IntraFreqHO = \frac{IntraFreqHOOutSuccess}{IntraFreqHOOutAttemp} * 100\%$

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

➤ Inter-Frequency HO Out Success Rate

$$\text{IntraFreqHO} = \frac{\text{IntraFreqHOOutSuccess}}{\text{IntraFreqHOOutAttempt}} * 100\%$$

➤ Indique le taux de réussite du transfert inter-fréquence de la cellule locale ou du réseau radio à la cellule ou au réseau radio voisin.

➤ Handover In Success Rate

$$\text{HOIn}_{SR} = \frac{\text{HOIn}_{Success}}{\text{HOIn}_{Attempt}} * 100\%$$

➤ Indique le taux de réussite du transfert des cellules voisines

## Chapitre 2 : LTE (Long Term Evolution)

	<p>inter ou intra-eNodeB vers la cellule locale ou le réseau radio.</p>	
	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Inter-RAT HO Out Success Rate</li><li>➤ Indique le taux de réussite des transferts d'une cellule LTE ou d'un réseau radio vers des réseaux WCDMA</li></ul>	$InterRATHO = \frac{InterFreqHO\_Success}{InterFreqHO\_Attemp} * 100\%$
<b>Intégrité</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Cell DL Average Throughput</li><li>➤ Indique le débit moyen d'une liaison descendante d'une cellule.</li></ul>	$CellDLAvrThp = \frac{CellDLTrafficVolume}{1000(ms) * CellDLTrafficVolume} * 100\%$

### 2.9 Modes de transmission TM

Ce sont des techniques utilisées dans les réseaux de communication mobile pour transmettre des données entre les stations de base et les appareils mobiles. Voici une brève description de chaque mode de transmission :

- TM1 (Transmission Mode 1) : utilisée pour la communication de données à courte portée, notamment pour les appels téléphoniques vocaux.
- TM2 (Transmission Mode 2) : utilisée pour les transmissions de données à plus longue portée, avec une qualité de service plus élevée que TM1.
- TM3 (Transmission Mode 3) : utilisée pour les transmissions de données à longue portée et avec une qualité de service élevée, en particulier pour la transmission de données de signalisation.
- TM4 (Transmission Mode 4) : utilisée pour les transmissions de données à longue portée et pour les applications nécessitant une bande passante plus élevée que TM3.
- TM5 (Transmission Mode 5) : utilisée pour les transmissions de données à courte portée à haute vitesse, notamment pour les téléchargements de fichiers et la diffusion vidéo.
- TM6 (Transmission Mode 6) : utilisée pour les transmissions de données en mode d'économie d'énergie, en particulier pour les applications de surveillance à faible consommation d'énergie.
- TM7 (Transmission Mode 7) : utilisée pour les transmissions de données à très haute vitesse, notamment pour les applications de diffusion de vidéo haute définition.
- TM8 (Transmission Mode 8) : utilisée pour les transmissions de données à très haute vitesse en mode d'économie d'énergie, en particulier pour les applications de diffusion de vidéo en temps réel.

- TM9 (Transmission Mode 9) : utilisée pour les transmissions de données en mode MIMO ce qui permet d'augmenter le débit de données et d'améliorer la qualité de la connexion.

### **2.10 Conclusion**

En conclusion, LTE (Long-Term Evolution) est une technologie de communication sans fil de quatrième génération (4G) qui offre des avantages significatifs en termes de vitesse, de capacité et de qualité de service. Les canaux LTE, tels que les canaux de contrôle et les canaux de données, sont spécifiquement conçus pour optimiser l'utilisation de la bande passante et permettre des communications fiables et efficaces.

Le handover, ou transfert intercellulaire, est un mécanisme essentiel dans les réseaux LTE. Il permet le transfert transparent d'une communication en cours d'une cellule à une autre lorsqu'un utilisateur se déplace dans une zone de couverture différente. Le handover contribue à maintenir la continuité de la communication et à éviter les interruptions indésirables.

Les KPI (Key Performance Indicators) sont des indicateurs clés de performance utilisés pour évaluer et mesurer l'efficacité et la qualité des réseaux LTE. Ils comprennent des mesures telles que le débit de données, la latence, la capacité du réseau, la couverture, la qualité du signal, etc. Les KPI permettent aux opérateurs de surveiller et d'optimiser les performances du réseau afin de fournir une expérience utilisateur satisfaisante.

En somme, LTE offre des performances améliorées grâce à ses canaux dédiés et à ses fonctionnalités avancées telles que le handover. Les KPI jouent un rôle crucial en fournissant des mesures pour évaluer la performance du réseau. Ces aspects combinés contribuent à offrir des communications mobiles rapides, fiables et de haute qualité aux utilisateurs dans le contexte de l'évolution constante des technologies de communication sans fil.

# **Chapitre3 : Massive MIMO**

### **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux techniques clés pour optimiser un réseau 4G : la technique massive MIMO et le beamforming. Nous avons discuté les caractéristiques de la technique massive MIMO, notamment ses avantages potentiels pour augmenter la capacité et la couverture du réseau, réduire l'interférence et améliorer l'efficacité énergétique. Nous avons également abordé les difficultés liées à la mise en œuvre de cette technique, y compris la complexité du traitement du signal et la nécessité d'utiliser des équipements spécialisés.

De plus, nous avons examiné en détail la technique de beamforming qui consiste à diriger un faisceau d'ondes radioélectriques vers un utilisateur spécifique, plutôt que de diffuser le signal de manière uniforme. Nous avons expliqué comment le beamforming peut améliorer les performances du réseau en réduisant l'interférence et en augmentant la capacité, tout en soulignant les défis liés à sa mise en œuvre, tels que la nécessité d'avoir des informations précises sur la localisation de l'utilisateur. Dans l'ensemble, notre chapitre a permis aux lecteurs de mieux comprendre ces deux techniques importantes pour l'optimisation d'un réseau 4G, et de se préparer à explorer les sujets abordés dans les chapitres suivants de notre projet.

### **3.2 Massive MIMO**

#### **3.2.1 Définition**

Massive MIMO est largement considéré comme une mise à jour clé de la technologie à antennes multiples à l'ère 4G et 5G. Il comporte l'utilisation de réseaux d'antennes massifs (jusqu'à 64 réseaux d'antennes) sur un seul eNodeB (Evolved Node B).

C'est une technologie de communication sans fil de pointe qui utilise un grand nombre d'antennes pour améliorer les performances du réseau. Contrairement aux systèmes MIMO traditionnels qui utilisent un petit nombre d'antennes, le Massive MIMO utilise des dizaines ou des centaines d'antennes pour transmettre et recevoir des signaux simultanés. Cette technologie permet d'améliorer considérablement la capacité du réseau et la qualité de service offerte aux utilisateurs. En utilisant des

algorithmes de traitement de signal avancés, le Massive MIMO est capable d'éliminer les interférences et de maximiser l'efficacité spectrale [15].

La figure 3.1 illustre le principe de la technologie massive MIMO.

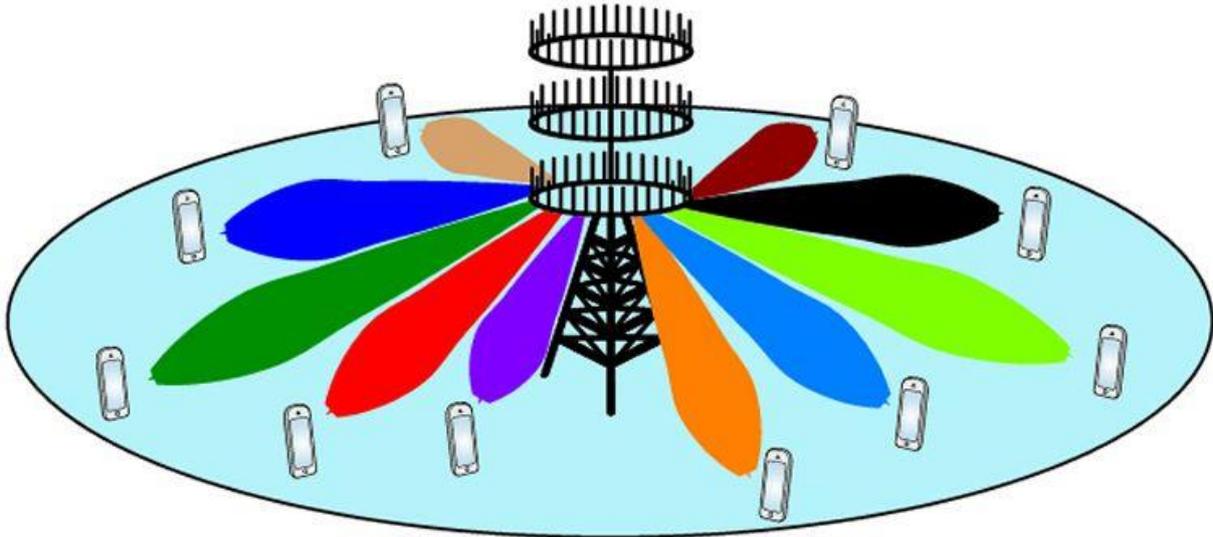


Figure 3- 1: Massive MIMO [15].

### 3.2.2 Fonctionnement de Massive MIMO

Cette fonction augmente les gains de multiplexage (voir figure 3.2). Massive MIMO prend en charge jusqu'à 16 couches pour la liaison descendante MU beamforming, qui fournit environ 7 fois plus de débit de pointe théorique en liaison descendante comparée à de 2x2 MIMO dans les scénarios de mise en réseau 8T8R.

- Trois "hauts " ; assure un volume de trafic élevé, interférences élevées et couverture de sol élevée.

Une couverture élevée fait référence à la limitation de la liaison montante.

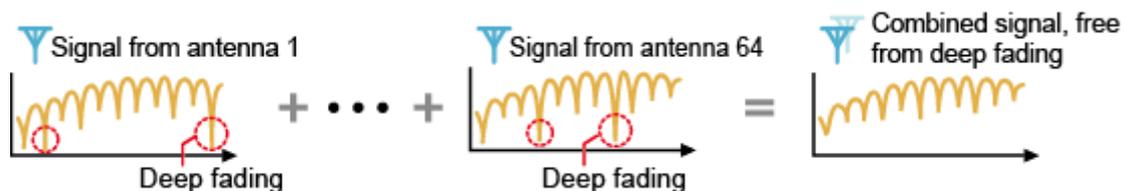


Figure 3- 2: Les gains de multiplexage [14].

Le Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output massif) offre des avantages en termes de diversité de réception grâce à l'utilisation d'un grand nombre d'antennes dans un réseau. Plus il y a d'antennes, plus les capacités de combinaison et de rejet d'interférence (IRC) sont fortes, ce qui permet d'améliorer la réception et les performances de démodulation. La diversité de réception supprime efficacement les effets de l'atténuation sévère, ce qui se traduit par une réception améliorée.

La Figure 3.3 illustre le concept de Massive MIMO 8T8R & 64T64R.



**Figure 3- 3:** Massive MIMO 8T8R&64T64R [14].

- Le beamforming 3D est l'abréviation de beamforming tridimensionnel. Son adoption des antennes réseau augmente le nombre d'antennes logiques sur le plan vertical, ce qui permet de mettre en œuvre formation de faisceaux dans le plan vertical.
- Massive MIMO permet à l'eNodeB d'ajuster les faisceaux de diffusion et faisceaux de trafic de liaison descendante à la fois horizontalement et verticalement. Il réalise une meilleure liaison montante et descendante, performances de couverture plus robuste que les technologies à antennes multiples 8T8R. Les gains sont plus significatifs sur le plan vertical. Massive MIMO ce qui améliore également le débit des cellules en liaison descendante et l'efficacité spectrale [15].

### **3.2.3 Avantages de Massive MIMO**

Massive MIMO peut relever efficacement les défis de trois "hauts " et une limitation sur réseaux LTE.

En dehors de cela, MIMO massif présente les avantages suivants en termes de réseau, évolution technologique et solutions de sites.

- Massive MIMO applique les technologies 5G aux réseaux 4G, améliorant considérablement les performances et la capacité. En outre, avec des avantages significatifs dans le matériel (architecture et performances), le MIMO massif prend en charge une évolution fluide vers le réseau 5G.
- En ce qui concerne les solutions de site, une forte intégration des RRU (Remote Radio Units) avec les antennes est mise en place. Cela permet d'obtenir un grand nombre d'antennes de réception et d'émission, ainsi que des canaux de

traitement RF, tout en limitant l'augmentation de la taille du site. Malgré l'augmentation du nombre d'antennes et de canaux RF, le poids global de l'intégration ne s'accroît pas, ce qui réduit considérablement les exigences d'installation en ingénierie pour les antennes et les équipements associés. Le concept de Massive MIMO permet la prise en charge du beamforming en 3D et présente des exigences faibles en termes d'inclinaison. De plus, il offre la possibilité d'utiliser des housses de camouflage ou de protection pour les climatiseurs, favorisant ainsi le camouflage des sites et leur intégration harmonieuse dans l'environnement.

### 3.2.4 Évolution de Massive MIMO

Les sites Massive MIMO introduisent de nouvelles technologies basées sur le site distribué traditionnel pour optimiser la structure du site et améliorer ainsi, ses performances.

### 3.3 Technologies clés du Massive MIMO

Les tableaux ci-dessous, contient les différentes technologies Massive MIMO avec leurs paramètres [15].

Dimension	Technologie
<b>Fonctionnement basique</b>	Formation de faisceau de diffusion, détection de défaut d'antenne, gestion flexible de l'unité active, adaptation, mode de transmission, allocation SRS dynamique et formation de faisceaux de puissance.
<b>réception à plusieurs antennes en liaison montante</b>	Réception en diversité et MU-MIMO
<b>réception à plusieurs antennes en liaison descendante</b>	Formation de faisceaux 3D, formation de faisceaux MU, TM9, SDMA fractionné multi-utilisateurs, pré codage hybride TM9 et POOCH SDMA
<b>Optimisation de performance</b>	Amélioration massive de la capacité POOCH de direction de charge MIMO, optimisation de la surcharge de liaison montante, SRS NI suppression conjointe, mesure du domaine temporel SRS et SDNR, et optimisation du poids de la formation de faisceaux

**Tableau 3- 1:** Technologies Massive MIMO [14].

### 3.3.1 Fonctionnement basique de Massive MIMO

Nom de la fonction	Principe	Paramètre
<b>Broadcast beamforming</b>	permet à l'eNodeB d'appliquer une pondération sur les faisceaux de diffusion pour ajuster leur périmètre de couverture.	BfAnt.CoverageScenario
<b>Détection de défaut d'antenne</b>	permet à l'eNodeB de vérifier périodiquement les défauts d'antenne.	Aucun
<b>Gestion flexible des unités actives</b>	La gestion flexible des unités actives est prise en charge.	Aucun
<b>Mode de transmission adaptatif</b>	permet aux UE de fonctionner dans un mode de transmission qui offre l'efficacité spectrale la plus élevée *pour un ensemble donné de conditions de canal.	CellBfMimoParaCfg. BfMimoAdaptiveSwitch
<b>Allocation de SRS dynamique</b>	Lorsque cette fonctionnalité est activée, les cellules MIMO massives effectuent les opérations suivantes pour allouer les ressources SRS et améliorer les performances de formation de faisceau : <ul style="list-style-type: none"><li>• Allouer des ressources SRS à longue période aux UE exécutant des services de pulsation SRS dynamiques.</li><li>• Économiser les ressources SRS à court terme et permettre à l'eNodeB d'allouer davantage de ressources SRS à courte période aux UE effectuant un trafic intense prestations de service.</li><li>• Conserver la politique SRS pour les UE effectuant des services normaux.</li></ul>	SrvBasedSRSAdjA lgo option of the SRSCfg.SrsCfgPolicySwitch parameter
<b>Puissance Beamforming</b>	La formation de faisceaux de puissance permet à l'eNodeB d'ajuster les phases et les amplitudes en	Aucun

	fonction des poids des faisceaux dans Massive MIMO.	
--	---	--

**Tableau 3- 2:** Le fonctionnement basique de Massive MIMO [14].

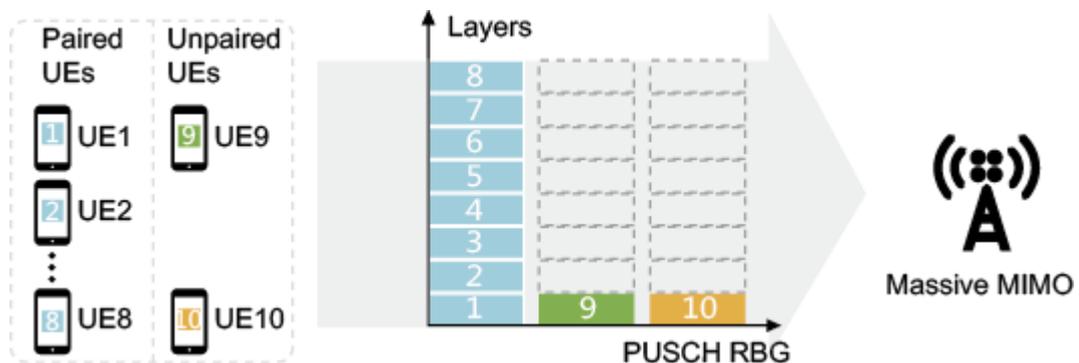
### 3.3.2 Réception à plusieurs antennes en liaison montante

#### 3.3.2.1 Diversité de réception d'antennes multiples en liaison montante

- L'eNodeB reçoit des signaux via plusieurs antennes, puis combine ces signaux reçus en utilisant un algorithme de combinaison de signaux spécifié. De cette façon, le SINR est maximisé [15]
- La diversité et les gains de réseau sont atteints. Les gains sont proportionnels au nombre d'antennes de réception.
- Signalisation d'algorithmes de combinaison :
  - MRC rapport maximum combinaison.
  - IRC : rejet des interférences combinaison

#### 3.3.2.2 MU-MIMO

- Lorsque MU-MIMO est activé, l'eNodeB tente de coupler les UE pour MU-MIMO dans chaque intervalle de temps de transmission TTI.
- Les UE jumelés utilisent la même ressource temps-fréquence pour la transmission en liaison montante.
- MU-MIMO améliore le débit cellulaire moyen (voir la figure 3.4).



**Figure 3- 4:** Couplage des UE pour MU-MIMO [14].

### 3.4 MU-MIMO

#### 3.4.1 Principes d'appariement des utilisateurs

- **Ne sélectionnez pas d'équipements d'utilisateur à haut débit pour le couplage MU-MIMO.**
  - Les UE à haut débit ne sont pas sélectionnées pour appariement MU-MIMO en raison de leur environnement de canal en constante évolution et de la mauvaise stabilité de leur qualité radio. L'appairage de tels UE peut détériorer les performances du système.
  
- **Sélectionner les UE qui ont des SINR élevés et des canaux**
  - Approximativement orthogonaux. Interférence entre ces UE peuvent être efficacement atténués. Par conséquent, ces UE conviennent à l'appariement MU-MIMO.
  
- **Ne pas sélectionner les UE avec de faibles SINR et des canaux fortement corrélés**
  - Interférence entre ces UE ne peut pas être efficacement atténuée et l'appariement de ces UE peut entraîner une détérioration des performances du système [15].

#### 3.4.2 Avantages de MU-MIMO et impact sur le réseau

L'appariement des utilisateurs augmente les gains de multiplexage Massive MIMO, prend en charge jusqu'à huit couches pour la liaison montante MU-MIMO.

Si la liaison montante MU-MIMO à 4 couches ou la liaison montante MU-MIMO à 8 couches est activée :

- Le BLER (In-Band Loopback Error Rate) du PUSCH peut augmenter.
- Lorsque la reconstruction d'une cellule 4T/8T se transforme en une cellule Massive MIMO, il est possible d'observer une augmentation des liaisons IBLER (In-Band Loopback Error Rate) à la fois en montant et en descendant.

Si liaison montante 2x32 MU-MIMO, 2x64 MU-MIMO, MU-MIMO 4 couches à 8 couches est activé, La probabilité d'échecs d'allocation d'élément de canal de contrôle de liaison montante, (CCE) peut augmenter [15].

### 3.5 Liaison descendante Transmission à plusieurs antennes

Les technologies de transmission à antennes multiples en liaison descendante sont répertoriées comme suit :

- 3D formation de faisceaux (3D Beamforming)
- MU- formation de faisceaux (MU-Beamforming)
- TM9

### 3.6 3D formation de faisceaux

La formation de faisceau 3D flexible DL est également appelée formation de faisceau 3D. Son adoption d'un réseau d'antennes, augmente le nombre d'antennes logiques sur le plan vertical, ce qui le rend possible de mettre en œuvre la formation de faisceaux dans le plan vertical ; voir figure 3.6.

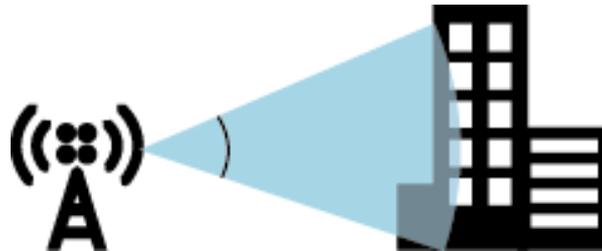


Figure 3- 5: 3D Beamforming [14].

#### 3.6.1 Processus de formation de faisceaux

Le processus de formation de faisceaux est réalisé par les opérations suivantes :

1. Étalonnage des canaux : la réciprocité entre les canaux de liaison montante et descendante est assurée.
2. Poids de calcul : le poids de formation de faisceau est calculé.
3. Pondération et formation de faisceau : un faisceau étroit ciblé vers l'UE est formée. De cette façon, tteeNodeB différencie les UE horizontalement et verticalement.

4. Démodulation : les données PDSCH sont démodulées. Voir figure 3.7.

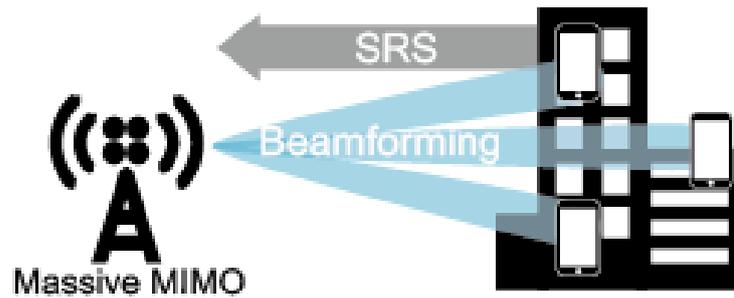


Figure 3- 6: Processus de formation de faisceau.

### 3.6.2 Avantages de la formation de faisceaux et impact sur le réseau

- Avantages :

Cette fonctionnalité présente l'avantage d'augmenter les gains de formation de faisceaux.

La formation de faisceaux en 3D permet d'obtenir de meilleures performances en termes de couverture des liaisons montantes et descendantes par rapport aux techniques d'antennes multiplex 8T8R. Les gains sont particulièrement significatifs sur le plan vertical. De plus, le beamforming en 3D contribue à augmenter le débit cellulaire et l'efficacité spectrale de la liaison descendante.

- Aucune incidence sur le réseau :

### 3.6.3 Paramètres

Le tableau 3.3 indique les paramètres de formation de faisceau 3D.

Nom du paramètre	Paramètre ID	Note de réglage
<b>CRS Port Number</b>	Ceil.CrsPortNum	Set this parameter to CRS_PORT_2.
<b>TDD SRS Configuration Mode</b>	SRSCfg.TddSrsCfgMode	Set this parameter to ACCESS ENHANCED.
<b>BF algorithm switch</b>	CellAlgoSwitch.BfAlgoSwitch	Select the BfSwitch option.

<b>Beamforming maximum number of layers</b>	CellBf.MaxBfRankPara	Set this parameter to SINGLE_LAYER_BF.
<b>BfMIMO adaptive switch</b>	CellBfMimoP_araCfg.BfMimoAdaptiveSwitch	Set this parameter to MIMO_BF_ADAPTIVE.
<b>Bf Mimo Adaptive Without Tm2</b>	CellEfMirnaParaCfg.BfMimoAdapWithoutTm2	Set this parameter to ON.
<b>BfMIMO Adaptive with TM4</b>	CeilBfMimoParaCfg.BfMimoAdapVWithTm4Switch	Set this parameter to OFF.

**Tableau 3- 3:** Paramètres de formation de faisceau 3D [14].

### 3.7 Formation de faisceaux MU

Massive MIMO permet de multiplexer spatialement les flux de données multicouches sur la même liaison descendante ressources et données multiflux à transmettre en même temps, améliorant la liaison descendante moyenne à travers la moyenne du Débit de cellule.

Le nombre maximum de couches d'appariement est de 16.

#### 3.7.1 Avantages et impacts sur le réseau

##### ➤ Avantages

- Cette fonctionnalité augmente les gains de multiplexage.
- Massive MIMO prend en charge jusqu'à 16 couches pour la liaison descendante MU par la formation de faisceaux, qui délivre environ sept fois plus de débit théorique de crête de liaison descendante comparée à celle de 2x2 MIMO dans les scénarios de mise en réseau 818R.

##### ➤ Impacts sur le réseau

- Le BLER du PDSCH Peut augmenter.
- La fonction de planification étendue adaptative dans le domaine temporel de la liaison descendante améliore le taux perçu par l'utilisateur des services de liaison descendante à fort trafic.
- L'indice MCS spécifique à la formation de faisceaux MU. Cette fonction d'optimisation de la sélection réduit l'IBLER.

## Chapitre 3 : Massive MIMO

- Suite à la reconstruction d'une cellule 4T/8T en une cellule Massive MIMO, il est possible d'observer une augmentation de l'IBLER (In-Band Loopback Error Rate) des liaisons montantes et descendantes [15].

### 3.7.2 Paramétrage

Le tableau 3.4 indique les paramètres de formation de faisceau MU (MU Beamforming).

Nom du paramètre	ID de paramètre	Note de réglage
<b>MUBF Algorithm Switch</b>	CeltAlgoSwitch.MuBfAlgoSwitch	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sélectionner l'option MuBfSwitch.</li><li>• Sélectionner l'option HargRetranPairSwitch de ce paramètre si la formation de faisceau MU est requise pendant la retransmission HARQ.</li><li>• Désélectionner l'option MubfResAdjSwitch de ce paramètre si le paramètre TxRxMode est défini sur 32T32R ou 64T64R.</li></ul>
<b>Max Number of MUBF Layers</b>	CellBf.HighOrderMubfMaxLayer	Formation de faisceaux MU à 8 couches en liaison descendante : régler ce paramètre sur HUIT COUCHES. <ul style="list-style-type: none"><li>• Formation de faisceau MU à 16 couches en liaison descendante : régler ce paramètre sur SEIZE COUCHES.</li></ul>
<b>Massive MIMO MUBF Pairing Rule</b>	CellBf.MassiveMIMOMubfPairRule	Définir ce paramètre sur MU_CORR_PAIR_RULE.
<b>Massive MIMO Algorithm Optimization Switch</b>	CellIMMAAlgo.MMAAlgoOptSwitch	<ul style="list-style-type: none"><li>• Il est recommandé de sélectionner l'option MU_PAIRING_MCS_EXACT_SWITCH dans les scénarios de mobilité à faible vitesse.<ul style="list-style-type: none"><li>• Il est recommandé que le l'option MU_PAIRING_VOLTE_SWITCH doit être sélectionnée lorsque le nombre d'UE VoLTE est important.</li></ul></li><li>• Il est recommandé de désélectionner l'option MU_PAIRING_VOLTE_SWITCH lorsque le nombre de VoLTE UEs est petit.</li></ul>

Tableau 3- 4: Paramètre de formation de faisceau MU [14].

### 3.7.3 Formation de faisceau MU (MU Beamforming) : vérification de l'activation

- Utiliser MAE-Access pour effectuer le suivi de la signalisation.

- Si la valeur mesurée de l'un des objets surveillés n'est pas égale à 0, la formation de faisceau MU a été activée.

- Nombre de Massive MIMO MUBF Pairing TM7 RB (Num).
- Nombre de RB d'appariement Massive MIMO MUBF disponibles (Num).
- Nombre de Massive MIMO MUBF Success Pairing RB (Num) dans xLayer.

### 3.8 Mode transmission TM9

En mode transmission TM9, l'eNodeB transmet jusqu'à huit flux de données en utilisant la même ressource temps-fréquence de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM). La commutation adaptative entre les rangs (rangs 1 à 8) est prise en charge en fonction des conditions de l'UE et des environnements de canal [14].

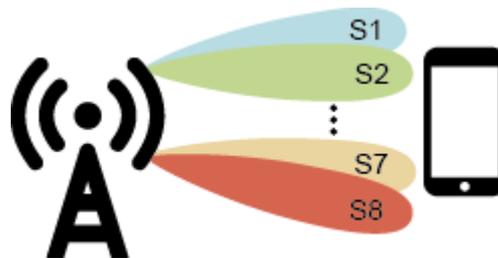


Figure 3- 7: Transmission TM9 [14]

#### 3.8.1 Avantages et impacts sur le réseau

➤ Avantages :

- Il permet d'augmenter à la fois le débit cellulaire maximal et le débit cellulaire moyen.

➤ Incidences sur le réseau :

- L'utilisation du MIMO à 4 couches en liaison descendante basé sur les retours TM9 et PMI peut entraîner des impacts négatifs en raison de l'augmentation des frais généraux.
- L'utilisation du MIMO à 4 couches en liaison descendante basé sur la mesure TM9 et SRS permet d'augmenter le débit cellulaire en liaison descendante et le débit des utilisateurs en liaison descendante (y compris les paquets en

attente), mais peut réduire le débit des utilisateurs en liaison descendante (à l'exception des paquets en attente).

- L'utilisation de la liaison descendante 8x8 MIMO peut entraîner une détérioration des performances des utilisateurs qui ne prennent pas en charge les CSI-RS à 8 ports [16].

### 3.8.2 Paramètre

En utilisant les mesures TM9 et SRS, le MIMO à 2 couches, ainsi que le MIMO à 2/4/8 couches basé sur le retour TM9 et PMI, peuvent être mis en place.

Nom du paramètre	ID de paramètre	Note de réglage
<b>Commutateur MIMO amélioré</b>	CellAlgoSwitch.EnhMIMOSwitch	Sélectionner l'option TM9Switch.
<b>nombre maximal de couches MIMO</b>	CellIDIschAlgo.MaxMimoRankPara	Définir ce paramètre sur SW_MAX SM RANK 2 lorsque TM9 à 2 couches est requis, SW_MAX SM RANK-4 lorsque TM9 à 4 couches est requis ou SW_MAX_SM_RANK_8 lorsque TM9 à 8 couches est requis.
<b>Commutateur de stratégie de planification de sous-trame CSI-RS</b>	CellIDIschAlgo.CsiRsSfSchStrSwitch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si TM9 est activé, il est recommandé de désélectionner l'option UnCfgCsiRsUESchSwitch.</li> <li>• Si le précodage hybride TM9 est désactivé et que le taux de pénétration de l'UE compatible TM9 est faible, il est recommandé de sélectionner l'option UnCfgCsiRsUEDeOrderSchSwth.</li> <li>• Si le précodage hybride TM9 est activé, désélectionner l'option UnCfgCsiRsUEDeOrderSchSwth.</li> </ul>
<b>Commutateur CSI-RS</b>	CellCsiRsParaCfg.CsiRsSwitch	Définir ce paramètre sur FIXED_CFG.
<b>Numéro de port CsiR</b>	CellCsiRsParaCfg.CsiRsPortNum	Définir ce paramètre sur CSI-RS_PORT_4 ou CSI-RS_PORT_8.
<b>CSI-RS Période</b>	CellCsiRsParaCfg.CsiRsPeriod	Régler ce paramètre sur ms80. La cellule se réinitialisera si la valeur est modifiée.

**Tableau 3- 5: Paramétrage TM9 [14].**

- MIMO à 4 couches basé sur les mesures TM9 et SRS.

Nom du paramètre	ID de Paramètre	Note De Réglage
<b>Commutateur MIMO amélioré</b>	CellAlgoSwitch.EnhMIMOSwitch	Select the <b>TM9Switch</b> option.
<b>Beamforming nombre maximum de couches</b>	CellBf.MaxBfRankPara	Définir ce paramètre sur <b>FOUR_LAYER_BF</b> .
<b>Commutateur d'algorithme BF à double flux</b>	CellBf.DualStreamBfAlgoSw	Pour améliorer les performances de TM9, il est recommandé de sélectionner l'option <b>ACK_FEEDBACK_IN JAUX_MODE_SW</b> .
<b>Commutateur d'algorithme Harq</b>	CellAlgoSwitch.HarqAlgoSwitch	Pour améliorer les performances de TM9, il est recommandé de sélectionner l'option <b>TddAckFbModeCfgOptSwitch</b> .

**Tableau 3- 6:** 4 Couches de MIMO Pour mesures TM9 et SRS [14].

### 3.8.3 Vérification de l'activation

- Pour vérifier l'activation de TM9, nous allons utiliser la méthode suivante :

Nous utiliserons des compteurs pour déterminer si le compteur en question a une valeur différente de zéro. Si c'est le cas, cela indique que TM9 est activé [15].

ID de compteur	Nom du compteur	Description du compteur
<b>1526732723</b>	L.Traffic.User.TM9.Avg	Nombre moyen d'UE TM9 dans une cellule

**Tableau 3- 7:** Vérification de l'activation[14].

- Utilisation de la signalisation : vérification du message RRC\_CONN\_RECFG.

IE	Résultat	Signification
<b>Mode de transmission</b>	TM9	TM9 a pris effet.
<b>maxLayersMIMO-r10</b>	deux couches/quatre couches/huit couches	Un maximum de deux, quatre ou huit couches sont prises en charge.

**Tableau 3- 8:** Vérification de message RRC\_CONN\_RECFG[14].

### 3.9 Conclusion

L'utilisation de la technologie Massive MIMO avec des fonctionnalités telles que le TM9 Beamforming et le MU-MIMO offre des avantages significatifs dans les systèmes de communication sans fil. Le TM9 Beamforming permet une formation de faisceaux précise en utilisant des informations de retour, améliorant ainsi la qualité et la portée des communications. Le MU-MIMO permet la transmission simultanée de données à plusieurs utilisateurs, ce qui augmente l'efficacité spectrale et la capacité du réseau.

En combinant ces fonctionnalités, Massive MIMO optimise l'utilisation des ressources radio et améliore les performances du réseau. Il offre une meilleure couverture, une plus grande capacité et une expérience utilisateur améliorée, notamment avec des débits plus élevés et une réduction des interférences. De plus, il permet une meilleure gestion du trafic et une utilisation plus efficace de la bande passante disponible.

La combinaison de Massive MIMO avec TM9 Beamforming et MU-MIMO présente une avancée significative dans les réseaux de communication sans fil, ouvrant la voie à des applications avancées telles que la 5G et l'Internet des objets. Ces technologies contribuent à une connectivité plus rapide, plus fiable et plus performante, répondant aux besoins croissants de communication dans notre société connectée.

# **Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G à l'aide de TDD Massive MIMO**

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons focalisé notre travail sur l'optimisation d'un réseau 4G à l'aide de TDD massive MIMO.

Afin d'atteindre notre objectif, nous nous avons présenté au sein de l'opérateur Mobilis qui nous a facilité et l'acquisition et le traitement des données du réseau.

Nous allons exposer les différentes étapes d'étude et simulation dont nous avons suivies dans le but d'assurer une meilleure optimisation.

On va voir l'impact de la technologie étudiée.

### 4.2 Mobilis

L'opérateur Mobilis DZ est une entreprise principale de télécommunications Algérienne qui fournit des services de téléphonie mobile, fixe et internet. Mobilis est l'un des trois principaux opérateurs de téléphonie mobile en Algérie.

Mobilis propose des services de téléphonie mobile prépayée et post payée, ainsi que des offres de données mobiles et d'internet haut débit. L'opérateur propose également des services de téléphonie fixe, de vidéoconférence, de sécurité et de surveillance, ainsi que des solutions pour les entreprises.

Mobilis est une filiale d'Algérie Télécom créée en 2003 et depuis, elle a connu une croissance rapide pour devenir l'un des principaux acteurs du marché des télécommunications en Algérie.

### 4.3 Technologies fournies par Mobilis

Mobilis utilise une gamme de technologies pour fournir ses services de télécommunications.

Voici quelques-unes des principales technologies qu'elle utilise :

- Réseau GSM : Mobilis utilise la technologie de communication mobile GSM (Global System for Mobile Communications) pour fournir des services de téléphonie mobile. Cette technologie est la plus couramment utilisée dans le monde pour les réseaux de téléphonie mobile.

### **4.3.1 2G**

La bande de fréquence 900/1800 MHz est utilisée pour le réseau 2G. Dans la bande 900 MHz, l'opérateur utilise une antenne à deux émetteurs-récepteurs (2TRX) pour permettre la communication entre les utilisateurs et la station de base. Dans la bande 1800 MHz, l'opérateur utilise une antenne à huit émetteurs-récepteurs (8TRX) pour permettre une capacité de communication plus élevée.

La bande de fréquence 900 MHz est principalement utilisée pour fournir Une couverture plus étendue, tandis que la bande de fréquence 1800 MHz est utilisée pour fournir une capacité de communication plus élevée dans les zones densément peuplées.

Les antennes utilisées dans chaque bande sont adaptées aux besoins spécifiques de la bande de fréquence pour fournir une qualité de signal optimale.

### **4.3.2 3G**

Mobilis utilise la technologie 3G pour offrir des services de données mobiles à haut débit aux utilisateurs en Algérie. La bande de fréquence 900/2100 MHz est utilisée pour fournir cette technologie.

Pour permettre la communication entre les utilisateurs et la station de base, Mobilis utilise une fréquence de 5 MHz dans la bande de fréquence 900 MHz et une autre fréquence de 5 MHz dans la bande de fréquence 2100 MHz.

La bande de fréquence 900 MHz est utilisée pour offrir une couverture plus large aux utilisateurs, tandis que la bande de fréquence 2100 MHz est utilisée pour fournir une capacité de communication plus élevée dans les zones densément peuplées. Les antennes utilisées dans chaque bande sont optimisées pour fournir un signal de qualité maximale à partir de la bande de fréquence respective.

### **4.3.3 4G**

Mobilis utilise la technologie 4G pour offrir des services de données mobiles à haut débit à ses utilisateurs en Algérie. Pour cela, l'opérateur utilise une combinaison de bandes de fréquence, notamment la bande 1800/2100/2300 MHz. Dans la bande de fréquence 900/1800 MHz, l'opérateur utilise une fréquence de 15 MHz pour la communication entre les utilisateurs et la station de base, en mode duplexage fréquentiel (FDD).

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

Dans la bande de fréquence 2300 MHz, Mobilis utilise des fréquences de 10 MHz et 20 MHz pour la communication en mode duplexage par répartition dans le temps (TDD). La bande de fréquence 1800 MHz est principalement utilisée pour fournir une capacité de communication plus élevée dans les zones densément peuplées.

### 4.4 Optimisation du réseau 4G

#### 4.4.1 Paramétrages (TDD et TDD Massive MIMO)

Pour choisir les sites (EnodeB), nous allons établir les technologies (TDD) et (TDD Massive MIMO), il faut donc respecter et suivre certains critères. Le tableau ci-dessous, représente les différents critères à suivre :

TDD Suitability Setting			TDD Massive MIMO Suitability Setting		
KPI Criterion	Threshold	Weight	KPI Criterion	Threshold	Weight
MIN DL PRB Utilization(%)	80	7	MIN DL PRB Utilization(%)	80	7
MIN CQI	9	2	MIN CQI	9	7
MIN RRC Connected Users	100	5	MIN RRC Connected Users	100	5
MIN DL Data Traffic (kb)	20 000 000	2	MIN DL Data Traffic (kb)	20 000 000	2
MAX DL User Throughput(kbps)	2 000	7	MAX DL User Throughput(kbps)	2 000	7

**Tableau 4- 1:** Différents paramétrages (TDD etTDD Massive MIMO) [8].

### 4.5 Meilleure score des sites

Pour compléter l'étape précédente, nous allons établir une liste des sites avec leurs différents critères, cette étape nous aide dans le choix des sites prioritaires nécessitant l'adoption de la technique (TDD, Massive MIMO).

Les critères sont :

- Cell availability\_sys
- PRB\_usage%
- Avr\_sim\_RRC\_connected d\_User
- DL user throughpute Mbps
- Avg DL volume

Nous allons calculer le score de chaque critère de tous les sites dans la liste (voir figure). Il est à noter que le score signifie le classement.

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

A la fin, nous allons sommer les scores et mettre la valeur dans la case de score\_site,

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	ERBS Id	EUTRANCell Id	earfcn	earfcnd	tac	Cell Availability_Sys	PRB_Usage %	Avg_Sim_RR C_Connecte d_User	DL User Throughput(Mbps)	Avg DL Volume	Score_PRB	Score_RRC	Score_Throug hput	Score_Tr affic	Score_cell	Score_Site
2	Site1	Cellm		1680	18402	99,99248012	92,08127626	130,1826368	0,734869186	274,3367377	16391	16397	16430	16444	65298	#N/A
3	Site1	Celln		1680	18402	99,99248012	91,81564767	145,0591878	0,496472808	214,4792695	16382	16405	16486	16214	65487	#N/A
4	Site1	Cello		1680	18402	99,99248012	88,95760049	92,33495782	1,148284952	227,678757	16308	16271	16246	16294	65119	#N/A
5	631L	34631M		1680	34401		100	87,35301787	128,5345818	1,327157133	16244	16394	16168	16492	65298	65191,5
6	531L	34631N		1680	34401		100	86,37245272	110,1570017	1,455756906	16203	16360	16090	16432	65085	65191,5
7	207L	19207N		1680	19403		100	91,02465081	111,311808	0,872690172	16361	16364	16384	16296	65405	65115
8	207L	19207O		1680	19403		100	91,0426764	105,038262	0,941841258	16364	16339	16355	16273	65331	65115
9	207L	19207M		1680	19403		100	86,5072814	81,9783613	0,994013232	16206	16194	16321	15888	64609	65115
10	509L	19509O		1680	19403		100	90,50783921	129,0312114	0,998348209	16345	16395	16320	16456	65516	65104
11	509L	19509M		1680	19403		100	87,4436713	90,96998698	1,549906576	16248	16264	16045	16392	64949	65104
12	509L	19509N		1680	19403		100	88,02526812	82,26474248	1,404199264	16265	16195	16124	16263	64847	65104
13	636L	34636N		1680	34401		100	91,71909409	126,9827814	0,658330763	16379	16390	16450	16420	65639	65075
14	636L	34636O		1680	34401		100	88,61841451	89,26304411	0,893573996	16289	16248	16378	16178	65093	65075
15	636L	34636M		1680	34401		100	83,67433176	75,58358641	1,835654532	16074	16128	15904	16387	64493	65075
16	1017L	251017M		1680	25402		100	93,43839853	150,0919731	0,570495288	16409	16406	16472	16425	65712	64963,33333
17	1017L	251017N		1680	25402		100	91,12583905	95,86299596	1,000185749	16367	16293	16317	16289	65266	64963,33333
18	1017L	251017O		1680	25402		100	92,36842489	74,35872047	0,655926222	16397	16105	16453	14957	63912	64963,33333
19	699L	44699M		1680	44402	99,99088937	92,26054499	105,7095469	0,604488353	204,2815166	16395	16341	16464	16126	65326	64925,66667
20	699L	44699O		1680	44402	99,99084117	91,93741223	84,2297638	0,779620514	191,9771792	16388	16206	16414	15990	64998	64925,66667
21	699L	44699N		1680	44402	99,99088937	91,54082217	80,52356712	0,623063989	159,8862676	16374	16179	16459	15441	64453	64925,66667
21	699L	44699M		1680	44402	99,99088937	91,54082217	80,52356712	0,623063989	159,8862676	16374	16179	16459	15441	64453	64925,66667
22	601L	44601N		1680	44402	99,99488812	86,97853801	123,0575666	0,871607902	294,4168906	16223	16385	16385	16474	65467	64921
23	601L	44601M		1680	44402	99,99488812	89,66738086	90,77188465	0,8518555	203,6733452	16331	16263	16393	16121	65108	64921
24	601L	44601O		1680	44402	99,99488812	83,24408958	68,43004678	1,584667128	202,8320796	16038	16009	16031	16110	64188	64921
25	581L	19581M		1680	19405	99,25639913	91,64438507	123,996363	0,929499407	266,4598496	16378	16387	16366	16423	65554	64783
26	581L	19581N		1680	19405	99,25635093	88,56831505	97,61587852	1,315981953	265,8760299	16284	16301	16171	16422	65178	64783
27	581L	19581O		1680	19405	99,25620631	80,74896569	61,81864305	1,934485399	192,9975797	15898	15855	15857	16007	63617	64783
28	715L	18715O		1680	18401		100	91,03510661	127,1345728	0,834449925	16362	16391	16400	16411	65564	64773
29	715L	18715N		1680	18401		100	91,04118605	86,32598396	0,987133333	16363	16225	16325	16102	65015	64773
30	715L	18715M		1680	18401	99,98820743	82,97011717	65,50403083	2,401975932	205,2074475	16028	15943	15629	16140	63740	64773
31	652L	42652O		1680	42401		100	92,87170428	131,557168	0,627821753	16403	16398	16457	16319	65577	64746,33333
32	652L	42652M		1680	42401		100	90,85088401	115,2724549	1,07998843	16354	16374	16276	16402	65406	64746,33333
33	652L	42652N		1680	42401		100	77,46697937	63,41308367	2,218902956	15692	15896	15719	15949	63256	64746,33333
34	745L	25745M		1680	25402		100	89,11823209	107,7384213	0,929729959	16315	16352	16365	16440	65472	64734,5
35	745L	25745N		1680	25402		100	90,8523598	104,2080453	0,75199338	16355	16337	16424	16283	65399	64734,5
36	745L	25745K		1680	25402		100	88,40904621	88,91525669	0,792845146	16281	16247	16412	15960	64900	64734,5
37	745L	25745O		1680	25402		100	81,46252223	52,90785249	1,705230866	15949	15575	15972	15671	63167	64734,5
38	301L	06301O		1680	6401		100	92,57767782	121,7498481	0,863842437	16401	16384	16387	16227	65399	64720
39	301L	06301M		1680	6401		100	91,60797776	99,44789497	1,070916097	16376	16310	16288	16044	65018	64720
40	301L	06301N		1680	6401		100	86,9333285	74,92354118	1,592065113	16221	16113	16023	15386	63743	64720
41	773L	02773M		1680	2401	99,94446857	88,33610408	142,5689976	0,954565445	289,0022052	16277	16404	16345	16466	65492	64700,33333
42	773L	02773N		1680	2401	99,94437208	82,80467606	96,35736452	1,841964645	263,5592822	16016	16294	15896	16415	64621	64700,33333

**Figure 4- 1:** La liste des sites à meilleure score

### 4.6 Meilleurs scores des cellules

Comme il est montré sur la figure 4-1, dans cette liste, nous allons avoir un nombre des cellules de chaque site, chaque cellule a un code différent qui l'identifie (le nom de chaque cellule) et en face de chacune, il se trouve le score (le classement de la cellule), de la mieux classé vers la moins classé. Cette étape est nécessaire pour choisir les cellules prioritaires pour ajouter (TDD et Massive MIMO).

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

3	Étiquettes de lignes	Average of Score_cell	22	302L	57351,33333
4	717	43910,33333	23	304L	38875,83333
5	4708	51854	24	306T	28472,83333
6	3800	26863,25	25	308L	63846,66667
7	4674	55243	26	4102U	54888,66667
8	4726	31289	27	4211U	5283
9	4737	43842,66667	28	4605U	51287,33333
10	1001L	45234	29	4614U	16705,16667
11	1002L	52140,83333	30	4635U	38058,5
12	1003L	50273,5	31	4643U	49407,5
13	1004L	26579,66667	32	4664U	53628,33333
14	101L	46445,16667	33	4671U	58005,33333
15	201L	49944,5	34	4673U	49942
16	202L	42261	35	4674U	31278
17	205L	39617,83333	36	4699U	44094,83333
18	207L	42298,83333	37	4703U	47518,66667
19	208L	56502,33333	38	4725U	39908,16667
20	209L	36036,33333	39	4737U	61237,66667
21	300L	58700	40	4740U	48898,75
22	302L	57351,33333	41	4766U	56796
			42	510L	15060
			43	511L	44863

**Figure 4- 2: Meilleurs scores des cellules**

### 4.7 Meilleur score d'ERBS

Il s'agit d'un terme utilisé dans le domaine des communications mobiles pour désigner une station de base étendue. Une ERBS est une installation utilisée dans les réseaux de téléphonie mobile pour fournir une couverture et une connectivité dans des zones géographiques étendues.

Dans la figure ci-dessous on a le meilleur score d'ERBS dans chaque site :

1	ERBS Id	Score_Site	24	636L	64003,5
2	621L	65422,66667	25	116L	63992
3	631L	65191,5	26	667L	63986,66667
4	207L	65115	27	323L	63970,66667
5	509L	65104	28	650L	63932,33333
6	636L	65075	29	726L	63849,33333
7	1017L	64963,33333	30	308L	63846,66667
8	699L	64925,66667	31	717L	63841
9	601L	64921	32	103L	63744,66667
10	581L	64783	33	616L	63711
11	715L	64773	34	707L	63627,33333
12	652L	64746,33333	35	1006T	63597,66667
13	745L	64734,5	36	705L	63594,33333
14	301L	64720	37	687L	63507
15	773L	64700,33333	38	304L	63502,33333
16	601L	64420,33333	39	710L	63435,33333
17	624L	64385,33333	40	201L	63431,5
18	629L	64356,66667	41	300L	63395,33333
19	616L	64262	42	103L	63250
20	606L	64259,33333	43	720L	63230,66667
21	1328L	64240	44	586L	63210,33333
22	662L	64235,5	45	615L	63201
23	715L	64158	46	591L	63198

**Figure 4- 3:** Meilleur score d'ERBS

### 4.8 Simulation Atoll

Atoll est un logiciel de dimensionnement et de planification de réseaux cellulaires qui peut être utilisé sur tout le cycle de vie des réseaux (du design à l'expansion et l'optimisation).

Nous avons fait plusieurs simulations avec le logiciel atoll sur différentes fréquences (2100, 1800) khz en utilisant les technologie FDD & TDD selon les paramètres suivants :

- i) Les paramètres de site :
  - Des coordonnées obtenu avec Google earth
  - Modèle de station : 10MHZ-TDD/FDD-dense urban (3 sectors)
    - LONGITUDE X :(6,1581) E
    - LALTITUDE Y : (35,5453336) N
  - WILAYA : BATNA (05)

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- S1 interface de débit
  - S1 interface débit DL MAX : 950 000 Kbps
  - S1 interface de débit UL MAX : 950 000 Kbps
- Hauteur d'appui de site : 50 m.
- Type de support: building roof.

ii) Paramètre de cellule :

- Transmetteur : (CELL0\_1, CELL0\_2, CELL0\_3)
- Mode : (Active)
- Type de transmetteur (intra\_net)
- Antenne (65 deg 18dBi 4tilt 2100Mhz/1800Mhz)
- Nombre de port d'antenne de transmission (8)
- Nombre de port d'antenne de réception (8)

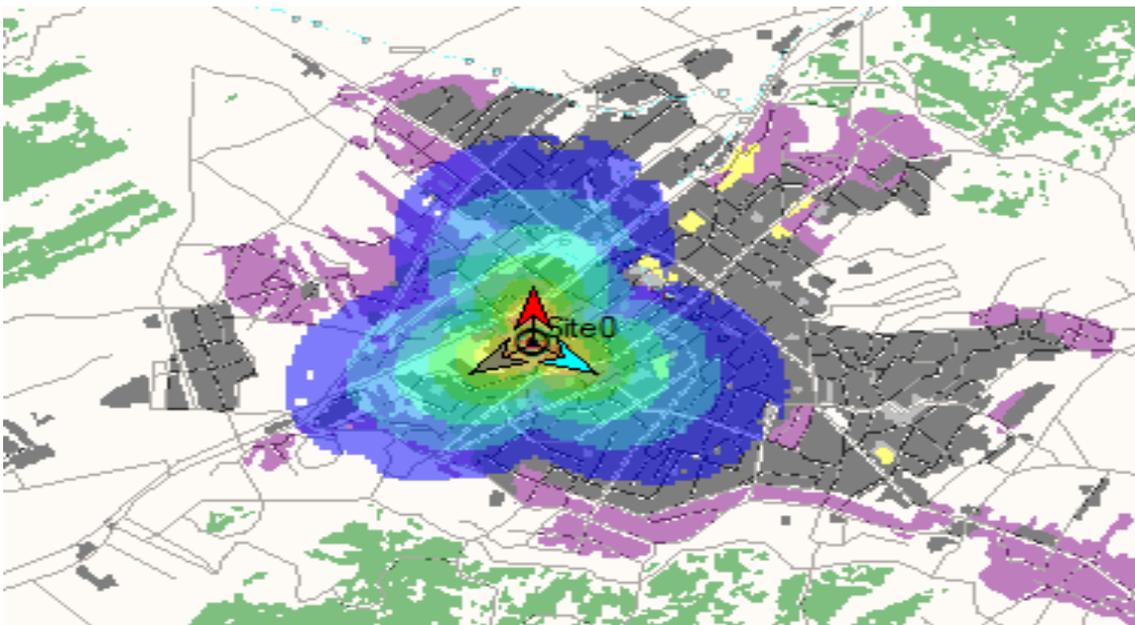
### 4.8.1 Simulation d'un site FDD 1800 Mhz

Dans cette étape nous avons simulé un site (FDD) avec une fréquence de 1800khz en adoptant les paramètres précédant.

Nous allons faire des calculs (prédiction) de couverture par débit (UL) et couverture par débit (DL) et couverture par signal (DL)

Les figures ci-dessous illustrent les résultats de notre simulation :

- **Couverture par niveau de signal DL :**



**Figure 4- 4:** Prédiction de couverture par niveau de signal DL.

- **Histogramme de couverture par niveau de signal (DL)**

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

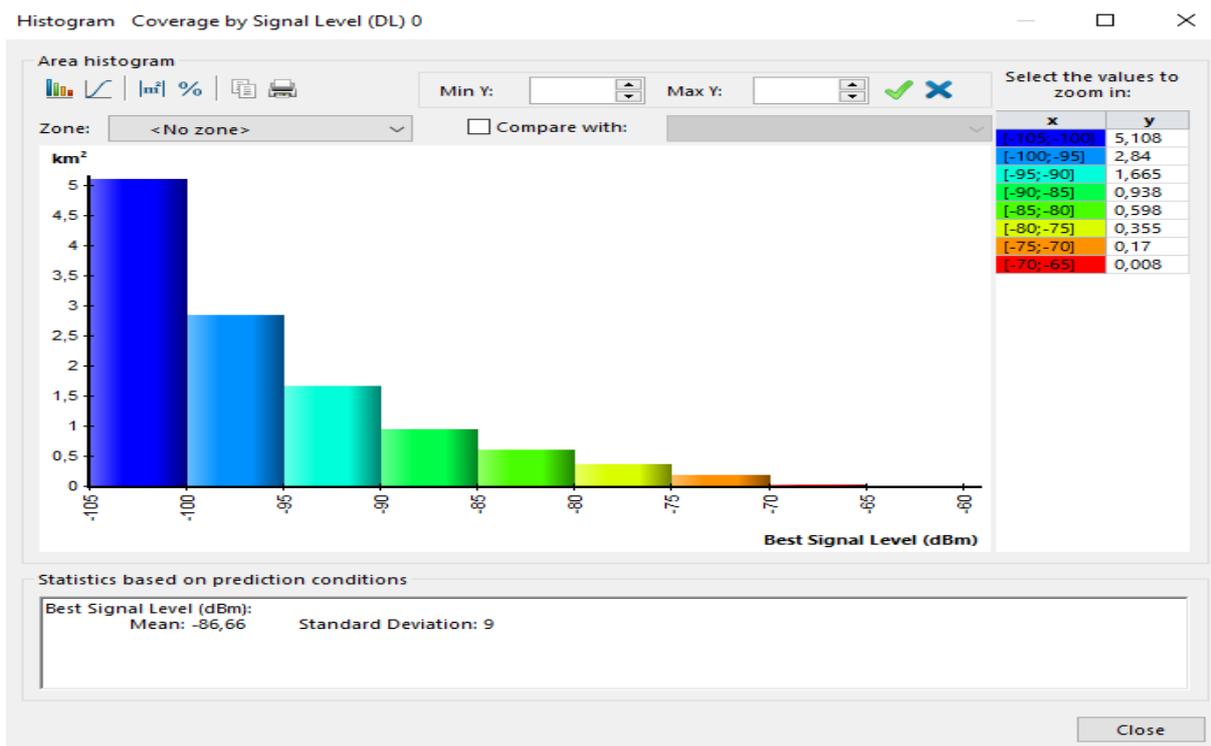


Figure 4- 5: Histogramme de couverture par niveau de signal (DL).

### ▪ Couverture par débit UL :

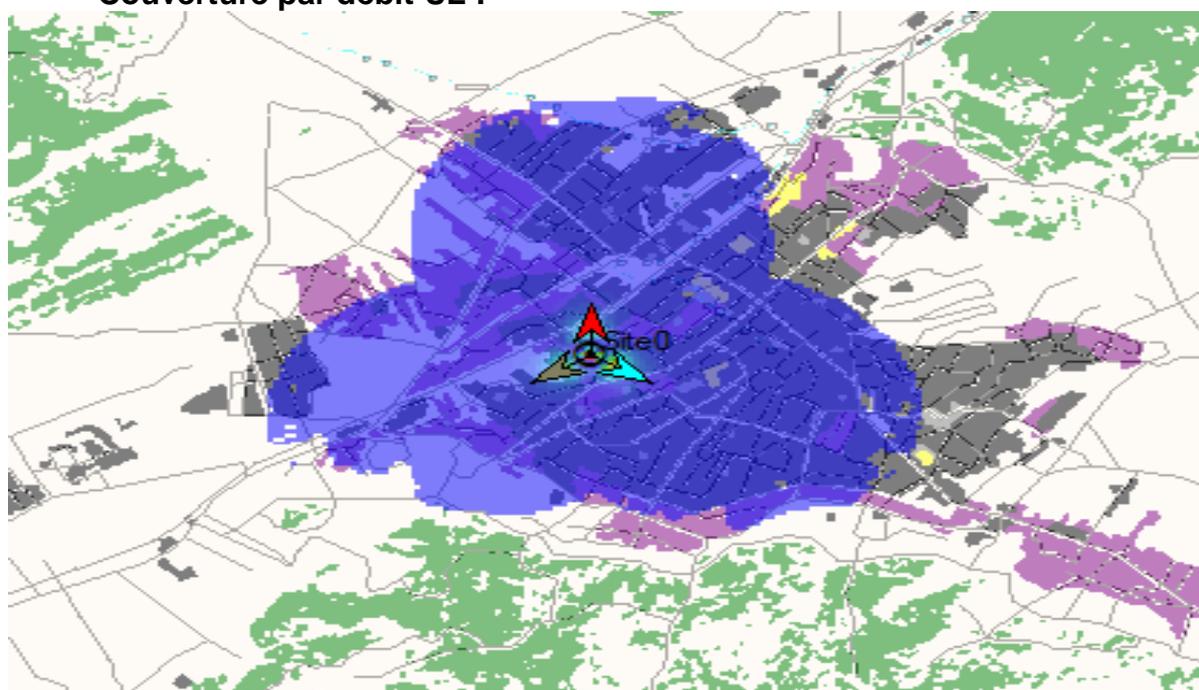
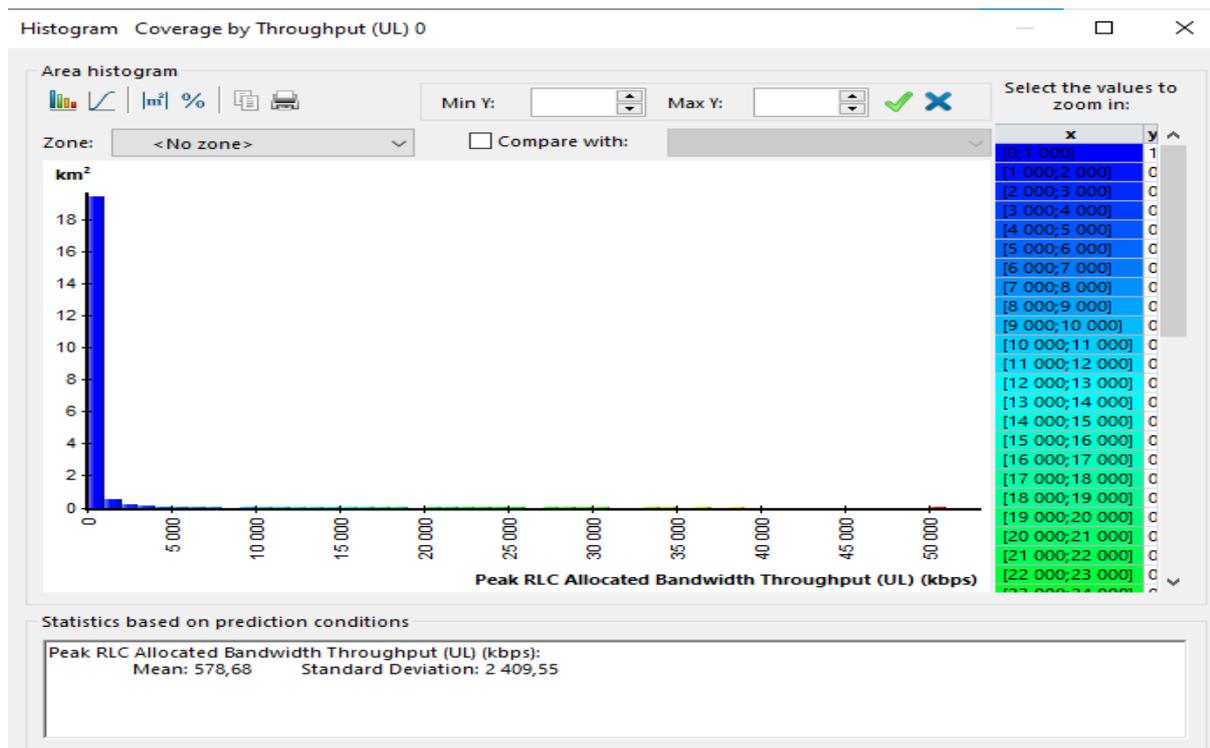


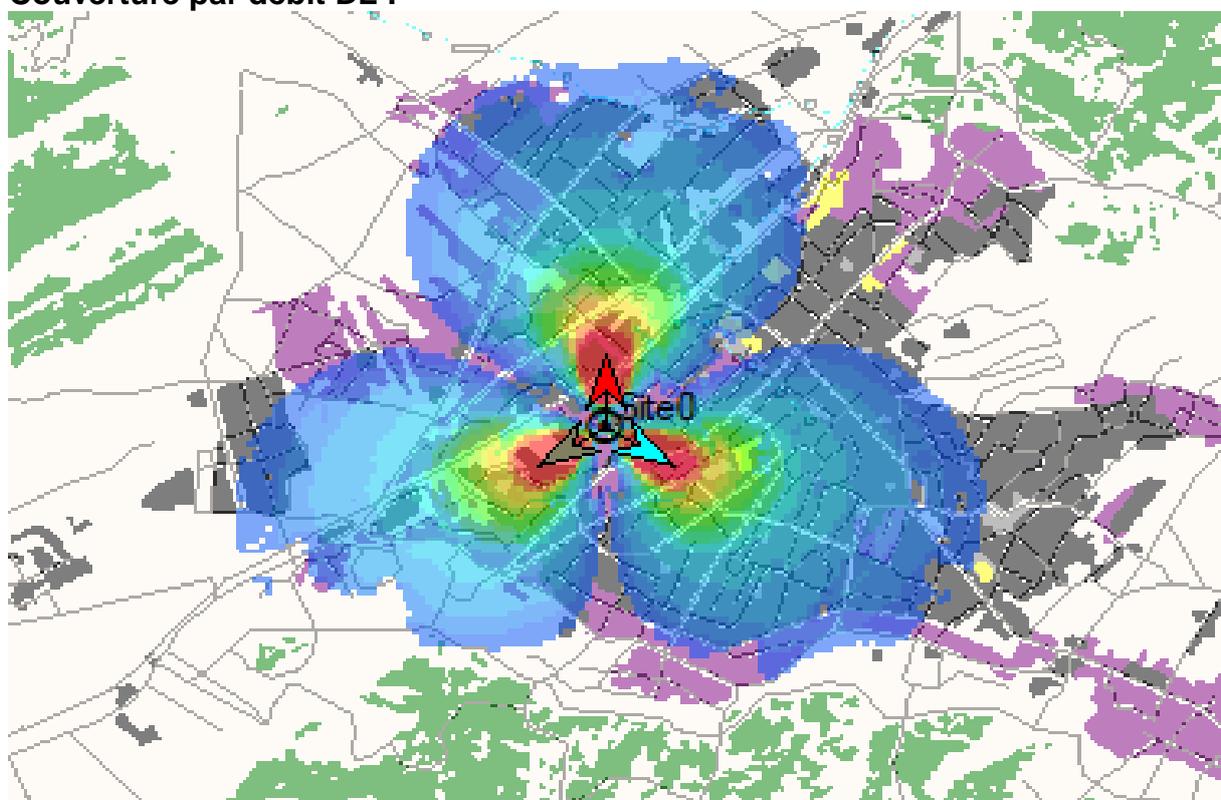
Figure 4- 6: Couverture par débit UL.

### ▪ Histogramme de couverture par débit (UL) :



**Figure 4- 7:** Histogramme de couverture par débit (UL).

**Couverture par débit DL :**



**Figure 4- 8:** Couverture par débit DL.

### ▪ Histogramme de couverture par débit DL :

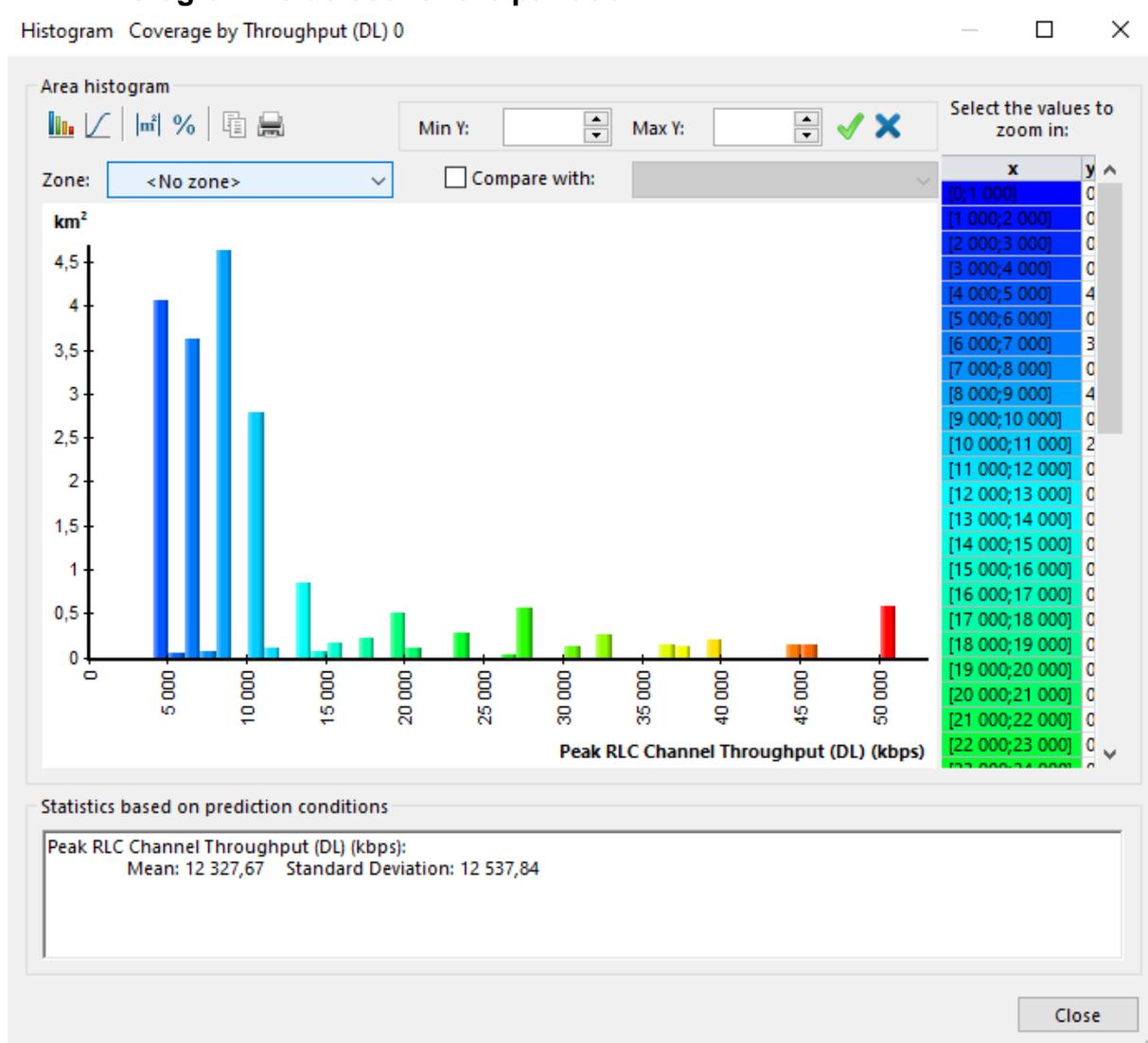


Figure 4- 9: Histogramme de couverture par débit (DL).

### 4.8.2 Simulation d'un site TDD 2100Mhz

Dans cette étape nous allons simuler un site TDD avec une fréquence de 2100Mhz avec les paramètres précédant.

Nous allons faire des calculs (prédiction) de couverture par débit UL et couverture par débit DL et couverture par signal DL.

Les figures ci-dessous montrent les résultats de notre simulation :

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- couverture par signal DL :

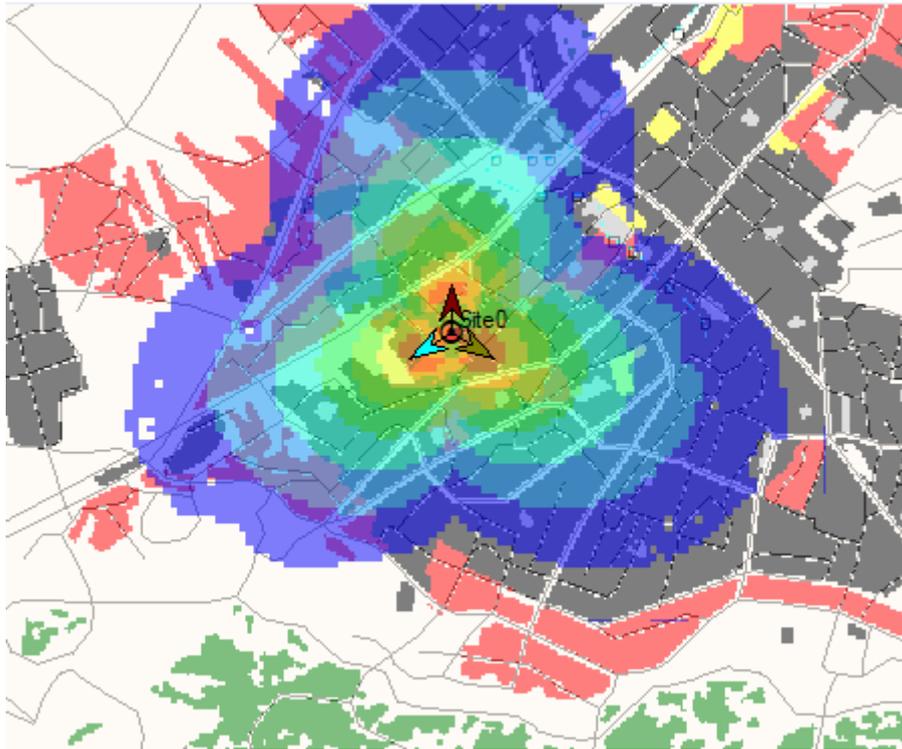


Figure 4- 10: Couverture par signal DL.

- Histogramme de couverture par signal DL :

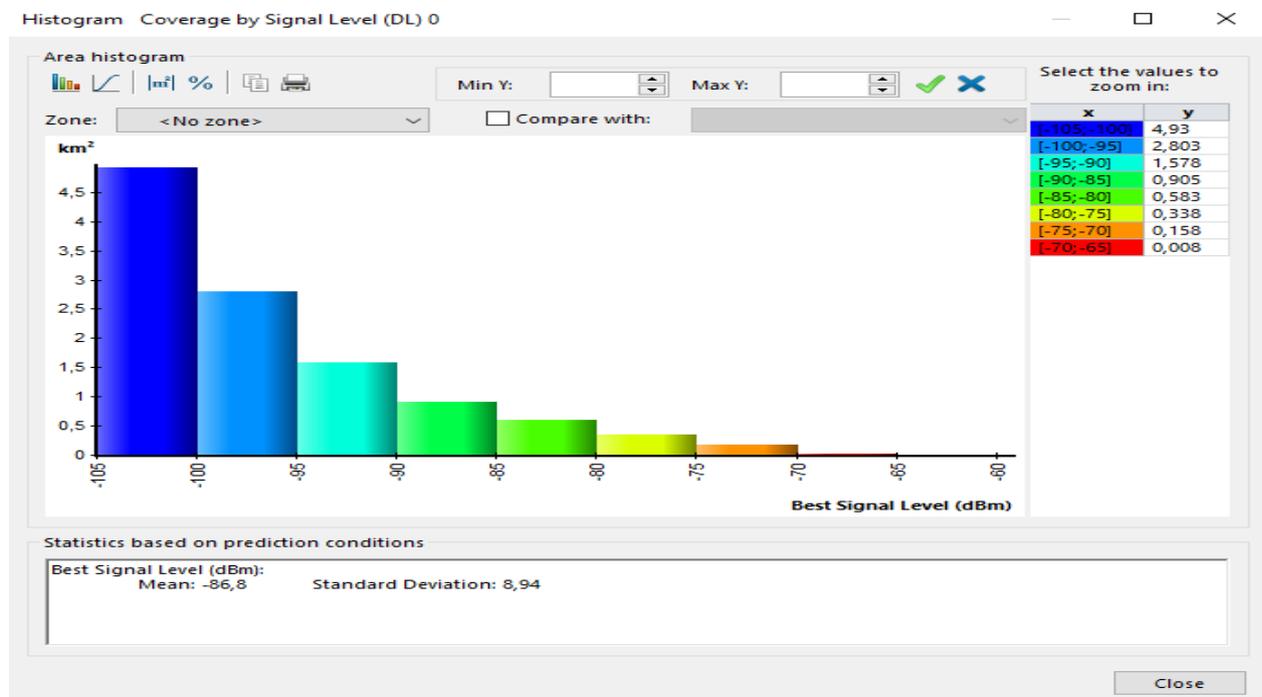
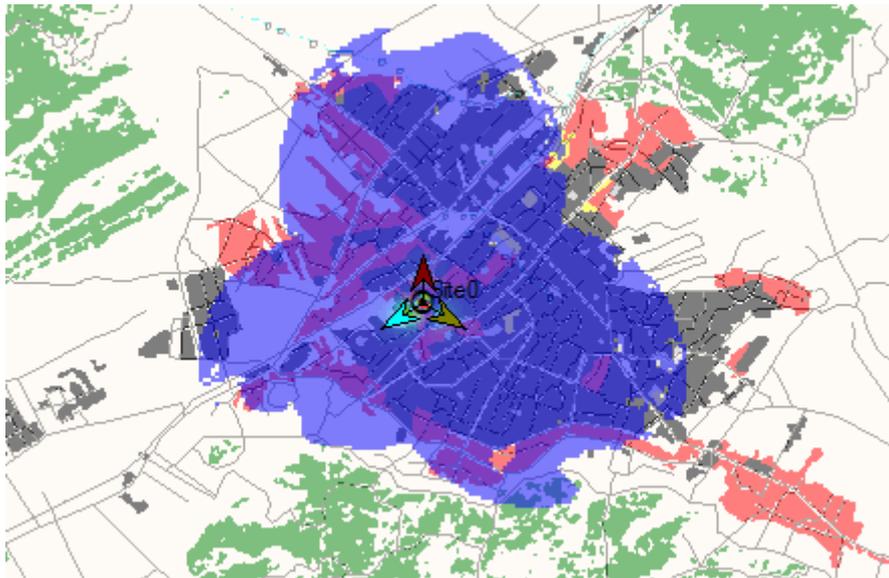


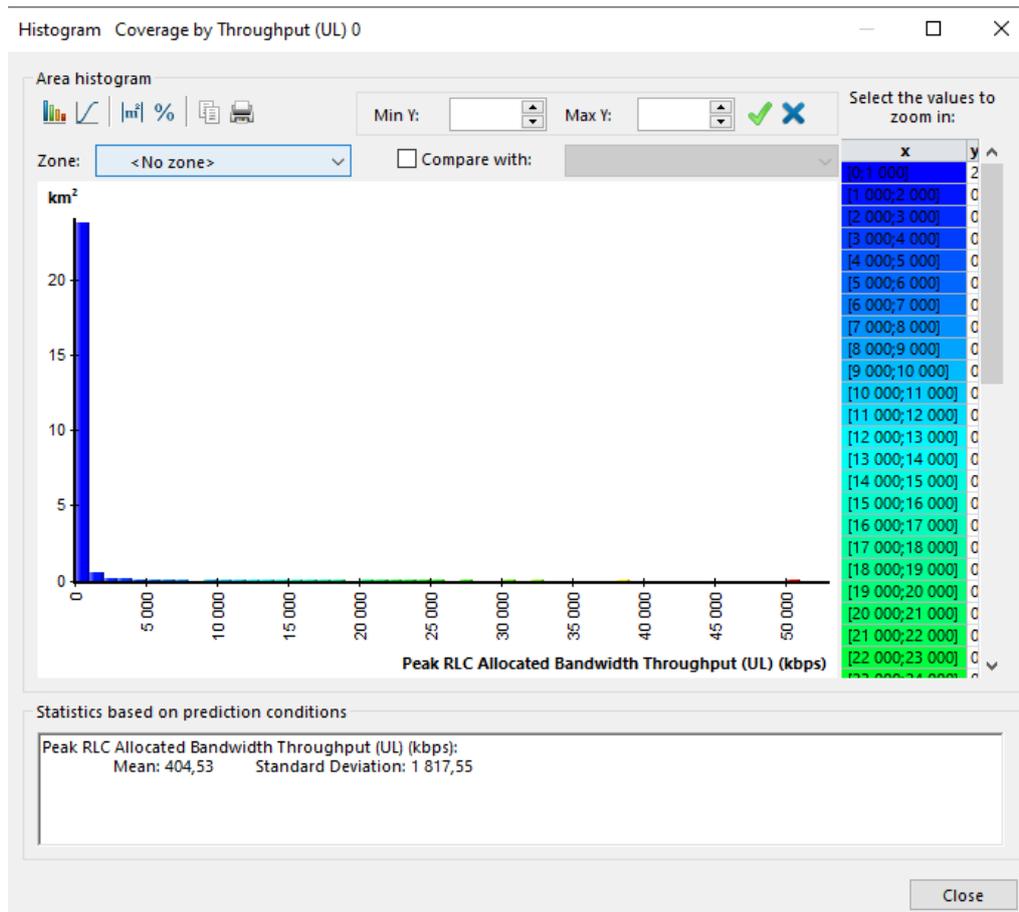
Figure 4- 11: Histogramme de couverture par signal DL

▪ **Couverture par débit UL(TDD) :**



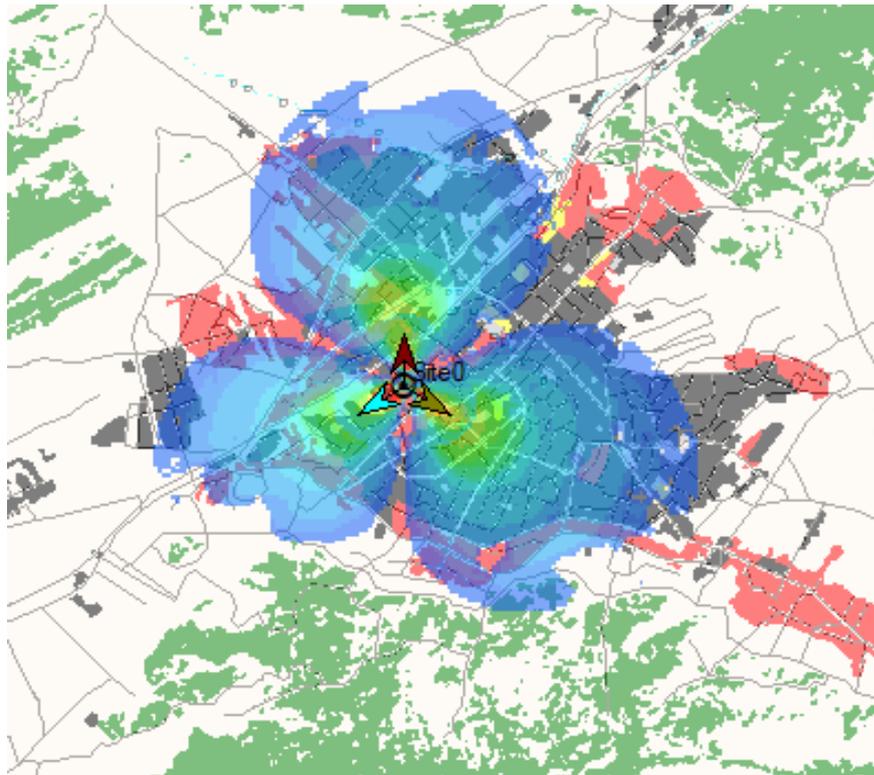
**Figure 4- 12:** Couverture par débit UL(TDD).

▪ **Histogramme couverture par débit UL (TDD) :**



**Figure 4- 13:** Histogramme de couverture par débit UL (TDD).

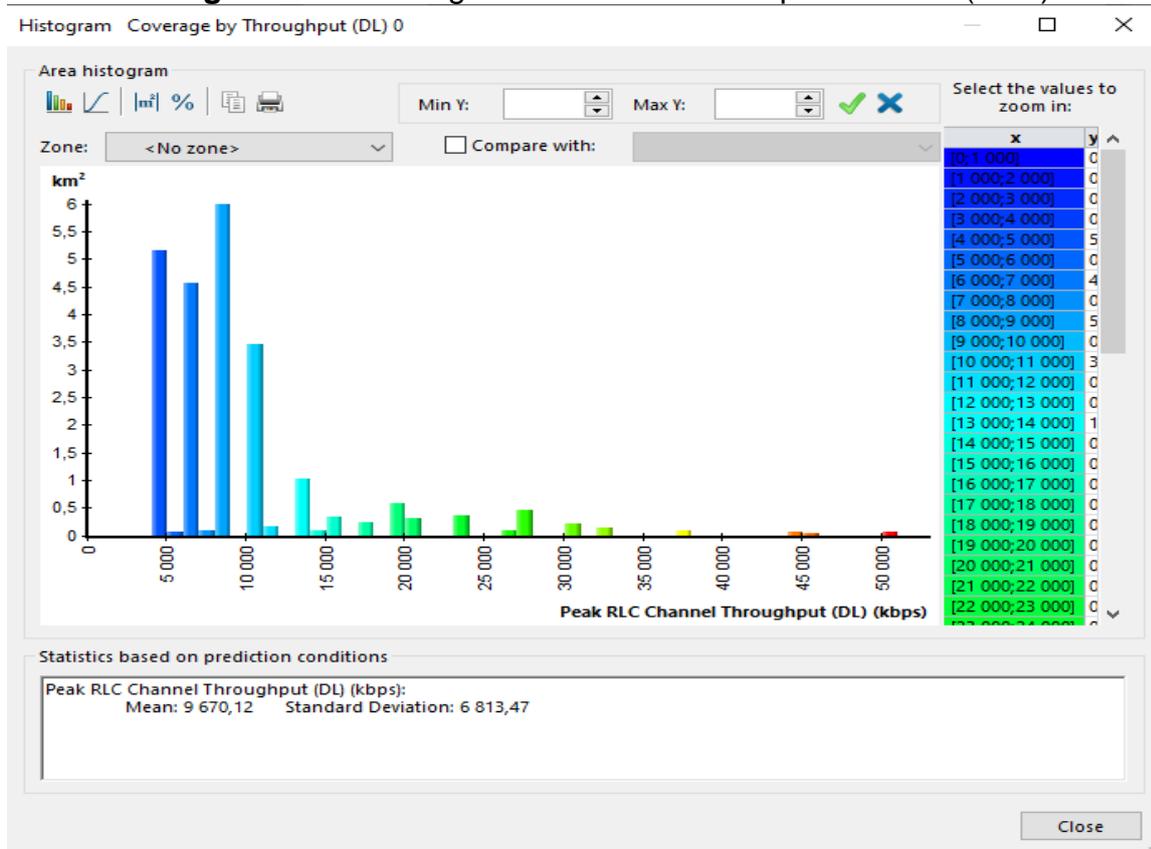
▪ **Couverture par débit DL :**



**Figure 4- 14: Couverture par débit DL (TDD)**

- **Histogramme de couverture par débit DL(TDD) :**

**Figure 4- 15: Histogramme de couverture par débit DL (TDD).**



### 4.9 Résultats de la simulation

Avant de commencer la travaille par Atoll on passe par plusieurs étapes pour étapes on choisir le model de projet que nous allons valider par simulation. Nous avons pris (LTE) comme model l'étape suivante, nous allons vers le menu, nous choisissons document/propriétés en suite, cordonnées, nous allons modifier dans les cases « projection » & « affichage ».

Pour la projection Nous choisissons (WGS84/UTM zone 31N) et (WGS 84) pour affichage avec le format des degrés (xx.xxxxxS).

Ces étapes sont nécessaires pour L'importation de la mappe (la cartographie de l'Algérie) ; Ensuite, nous allons importer les données suivantes.

- Clutter
- Height
- Ortho
- Victor

Nous allons sélectionner les index dans chaque document qui se trouve dans le fichier (planète Alegria).

La prochaine étape opte pour la planification et l'optimisation de notre (BTS) (**Notre simulation avec Atoll**).

A la fin de cette étape, on obtient les différents résultats de la couverture de chaque (BTS) FDD/TDD, La couverture de (débit de signal, débit DL, débit UL). Les résultats de simulation ont montré que :

-Notre réseau 4G a des exigences de trafic asymétrique, c'est à dire que le débit de liaison descendante (DL) diffère du débit de liaison montante (UL), TDD peut être une meilleure option, elle offre une flexibilité pour ajuster la répartition du temps entre UL et le DL en fonction des besoins du trafic. Cela permet d'allouer plus de ressources de temps à la direction du trafic avec une demande plus élevée.

- Concernant l'utilisation de la bande de fréquence : FDD alloue des plages de fréquences distinctes pour UL et DL, ce qui garantit une séparation claire entre les deux directions du trafic, cela présente un avantage pour des applications nécessitant des débits symétriques ou une isolation maximale entre les deux signaux UL et DL.

### 4.10 TDD (implémentation et impact)

Après l'implémentation de la TDD dans un site, nous remarquons les différents résultats de l'impact de la TDD selon la figure ci-dessous.

- Volume de trafic DL :



**Figure 4- 16:** Volume de trafic DL

- Avant la mise en place de la TDD entre le 26 février 2023 et le 19 mars 2023, le nombre d'utilisateurs était de 27 000 utilisateurs.
- Après la mise en place de la TDD entre le 19 mars 2023 et le 24 avril 2023, le trafic a connu une augmentation significative de 53,23 %, ce qui est l'équivalent d'une augmentation de 15 000 utilisateurs.

La figure suivante représente la moyenne d'utilisateurs connectés :



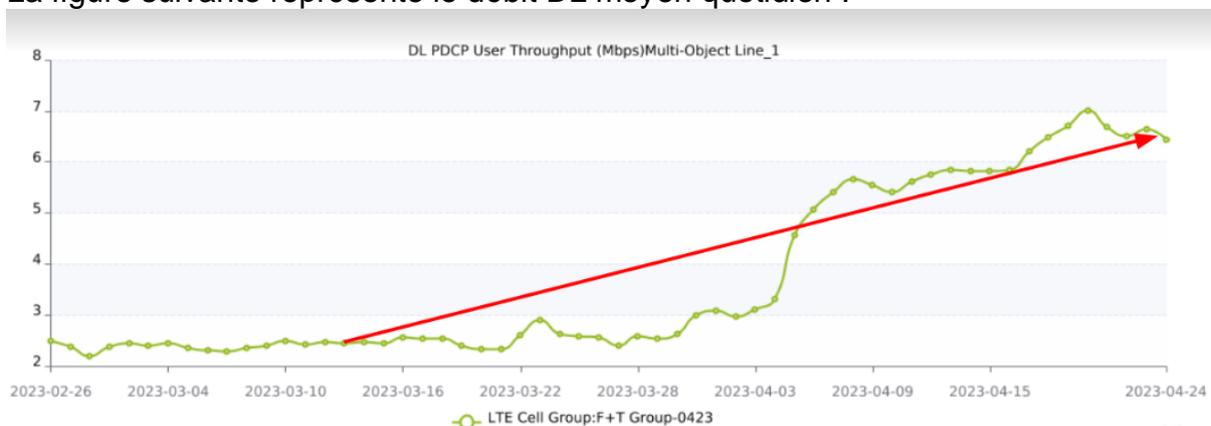
**Figure 4- 17:** La moyenne d'utilisateurs connectés.

- Avant la mise en œuvre de la TDD dans la période du 26 février 2023 au 14 mars 2023, le pic du nombre d'utilisateurs connectés était de 10 500 UE's.

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- Après la mise en œuvre de la TDD dans la période du 14 mars 2023 au 24 avril 2023, le trafic a connu une augmentation notable de 27,3 %, ce qui équivaut à une hausse de 4 500 utilisateurs.

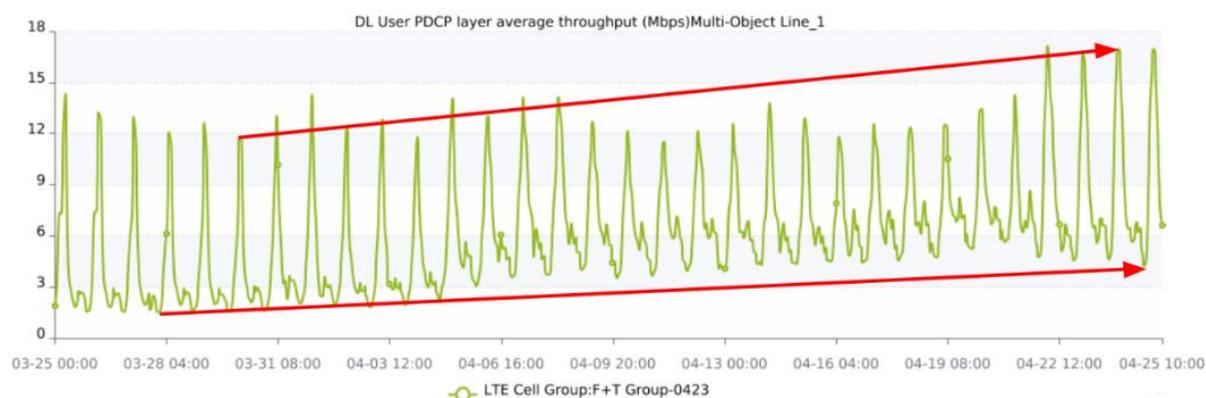
La figure suivante représente le débit DL moyen quotidien :



**Figure 4- 18:** Débit DL moyen quotidien en Mbps.

- Entre le 26 février 2023 et le 13 mars 2023, avant l'adoption de la TDD, la vitesse de débit était de 2,6 Mbps.
- Après l'introduction de TDD du 13 mars 2023 au 24 avril 2023, on a observé une augmentation significative de 3.8 Mbps en termes de vitesse de débit du 2.6 jusqu'à 6.4 Mbps.

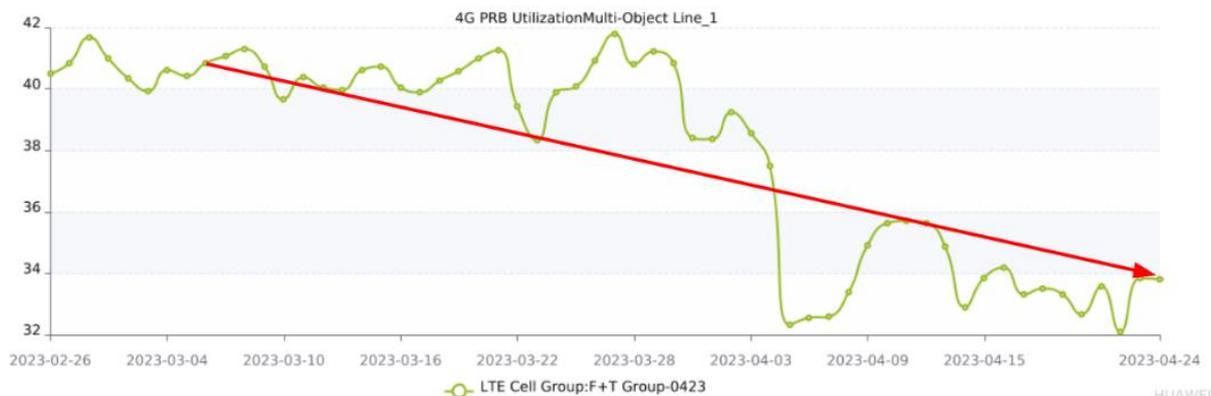
La figure suivante présente le débit moyen de téléchargement par heure :



**Figure 4- 19:** Débit moyen de téléchargement par heure.

- Augmentation du débit minimum de téléchargement sur la bande horizontale (BH) de 1,4 Mbps à 4,6 Mbps.
- Augmentation du débit maximum de téléchargement sur la bande horizontale (BH) de 11,8 Mbps à 16,9 Mbps.

La figure suivante indique l'utilisation quotidienne moyenne de PRB :



**Figure 4- 20:** l'utilisation quotidienne moyenne de PRB.

- Entre le 26 février 2023 et le 07 mars 2023, avant l'adoption de TDD, l'utilisation quotidienne moyenne de PRB est très grande de 39.8%
- Après l'ajute de TDD du 07 mars 2023 au 24 avril 2023, on a observé une diminution significative de 33.8%
- Diminution de l'utilisation quotidienne moyenne des PRB de 39,8 % à 33,8 %

La figure suivante représente l'utilisation moyenne du PRB par heure :



**Figure 4- 21 :** Utilisation moyenne du PRB par heure.

Il est constaté une diminution de l'utilisation du PRB sur BH de 55,06 % à 46,9 %

### **4.11 Résultats obtenus**

- Un énorme volume de trafic de données LTE a été observé, dépassant 53,23%.
- Le nombre d'utilisateurs connectés a augmenté de 27,3%.
- Une amélioration du débit de téléchargement (le débit DL) a été constatée.

- Une diminution de l'utilisation moyenne des PRB.

### 4.12 L'impact de l'implémentation de TDD (par secteur / cellule)

#### Les KPIs de chaque cellule :

Après l'implémentation de notre site qui contient 03 cellules, nous avons ajouté la TDD. Les figures suivantes représentent les kPIs de chaque cellule.

- **Secteur/cell 01**
  - CELL-volume de trafic –DL :

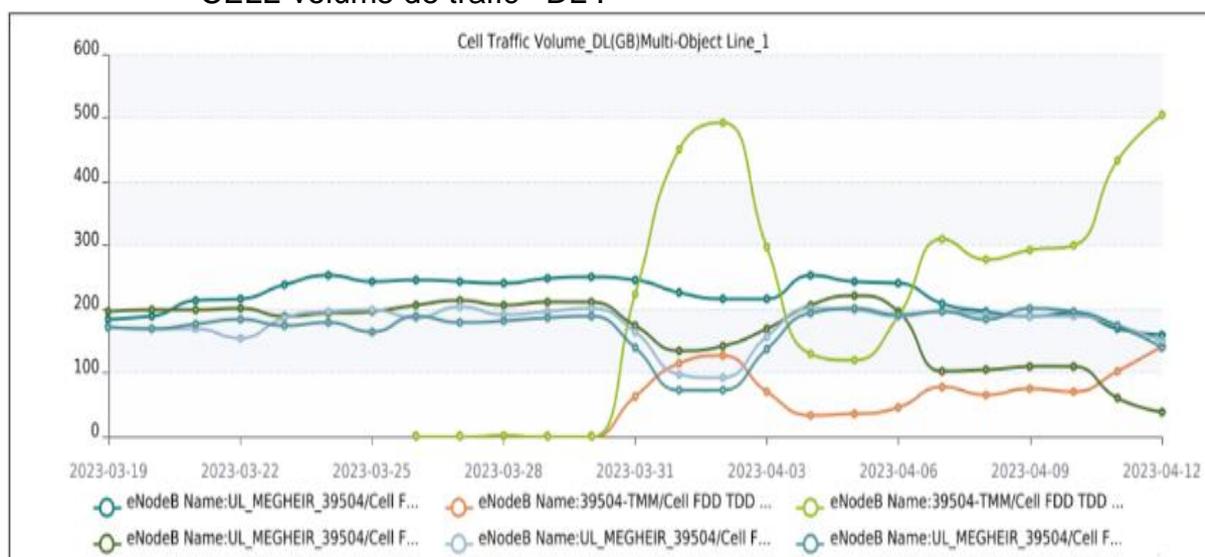


Figure 4- 22: CELL-volume de trafic –DL.

- Le débit moyen (DL) cell01 :

#### KPIs of 39504 Sector 1

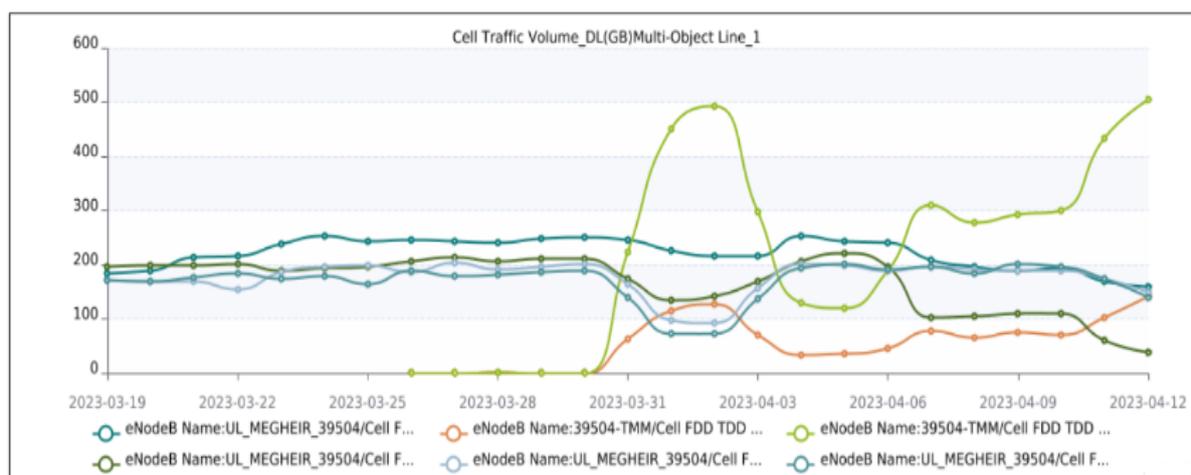


Figure 4- 23: Le débit moyen (DL) cell01.

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- Utilisation 4G PRB:

KPIs of 39504 Sector 1

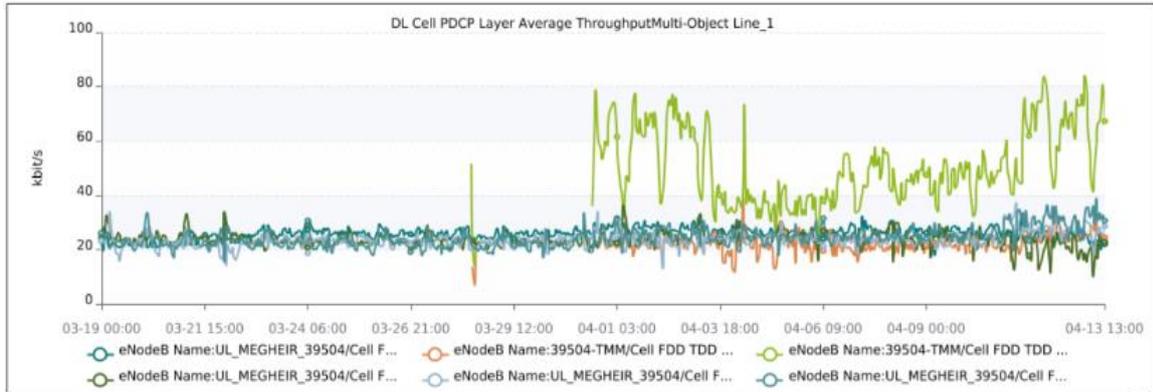


Figure 4- 24: utilisation 4G PRB.

- Secteur/cell 02
- CELL-volume de trafic –DL :

KPIs of 39504 Sector 2

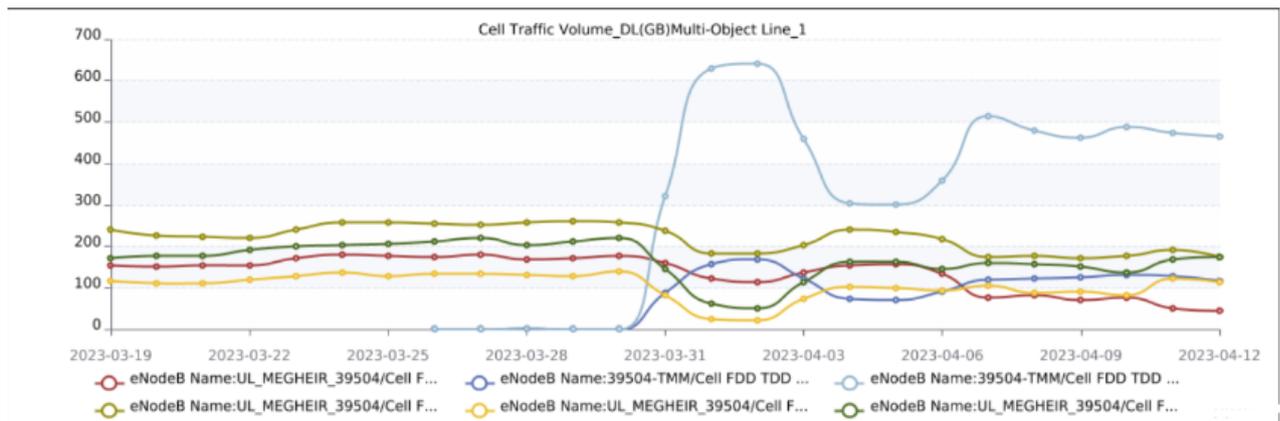


Figure 4- 25: CELL-volume de trafic –DL.

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- Le débit moyen (DL) cell02 :

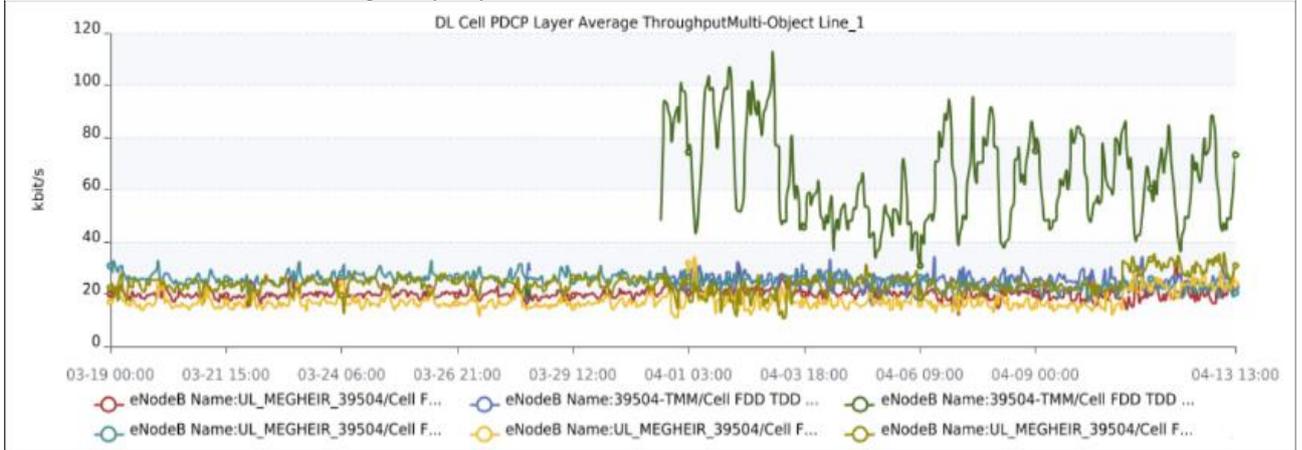


Figure 4- 26: Le débit moyen (DL) cell02

- Utilisation 4G PRB :

KPIs of 39504 Sector 2

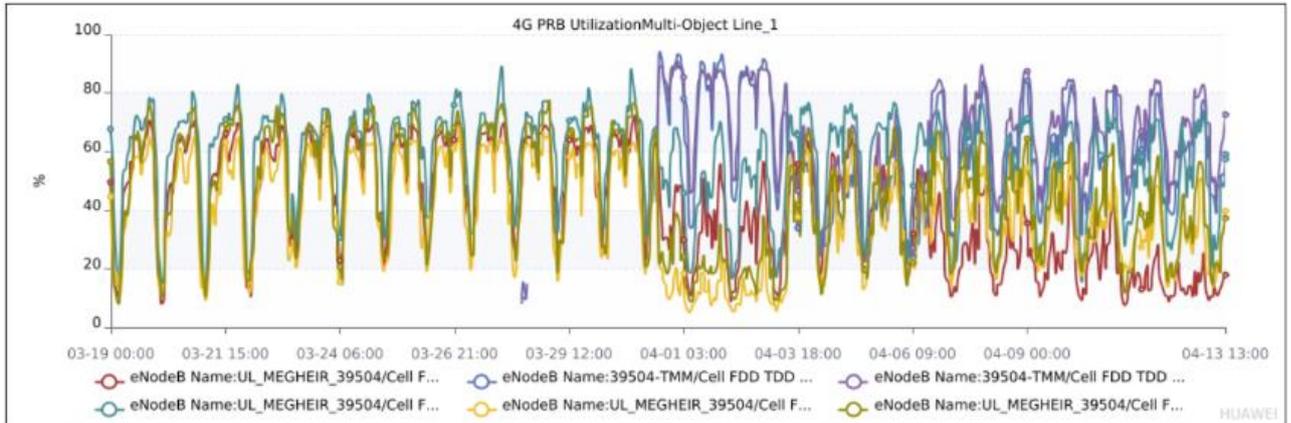


Figure 4- 27: Utilisation 4G PRB.

- Secteur/cell 02

- CELL-volume de trafic –DL :

KPIs of 39504 Sector 3

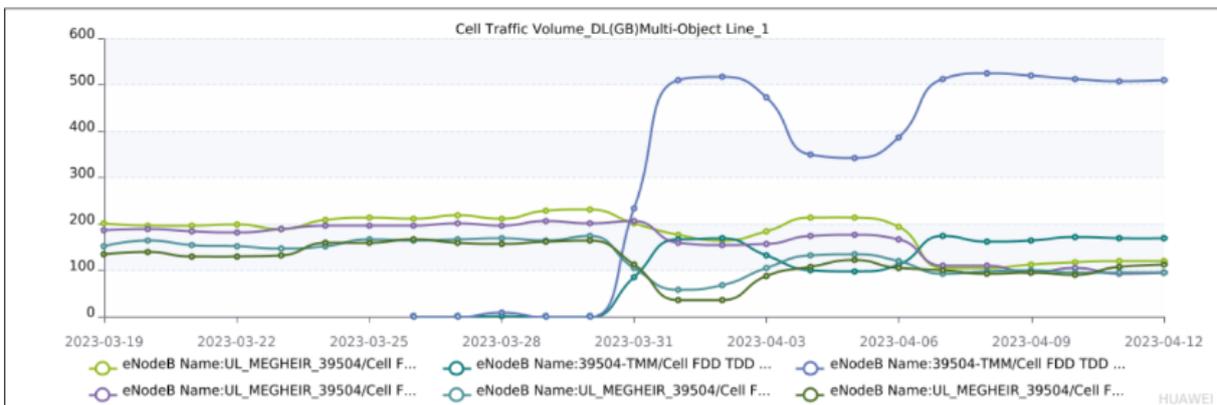
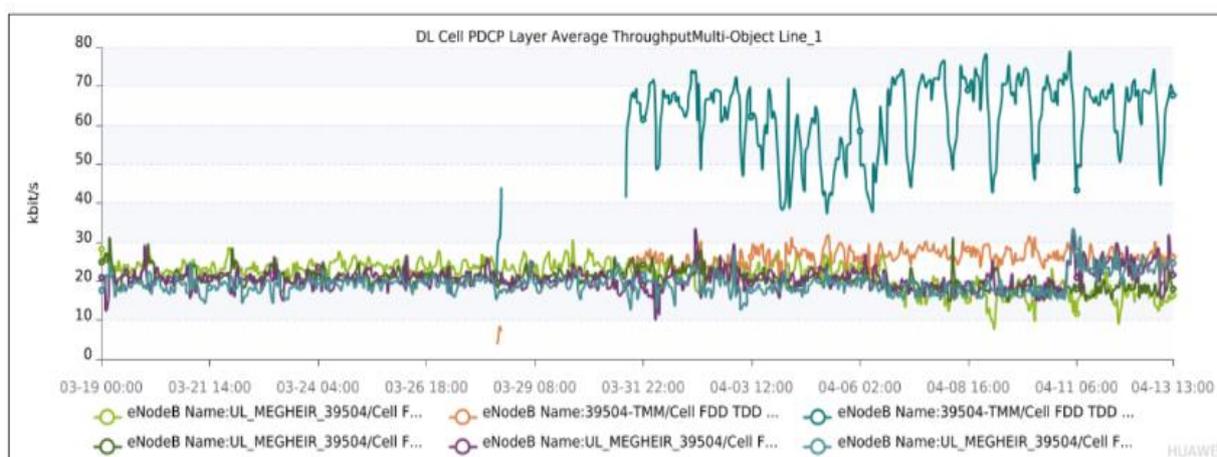


Figure 4- 28: CELL-volume de trafic –DL.

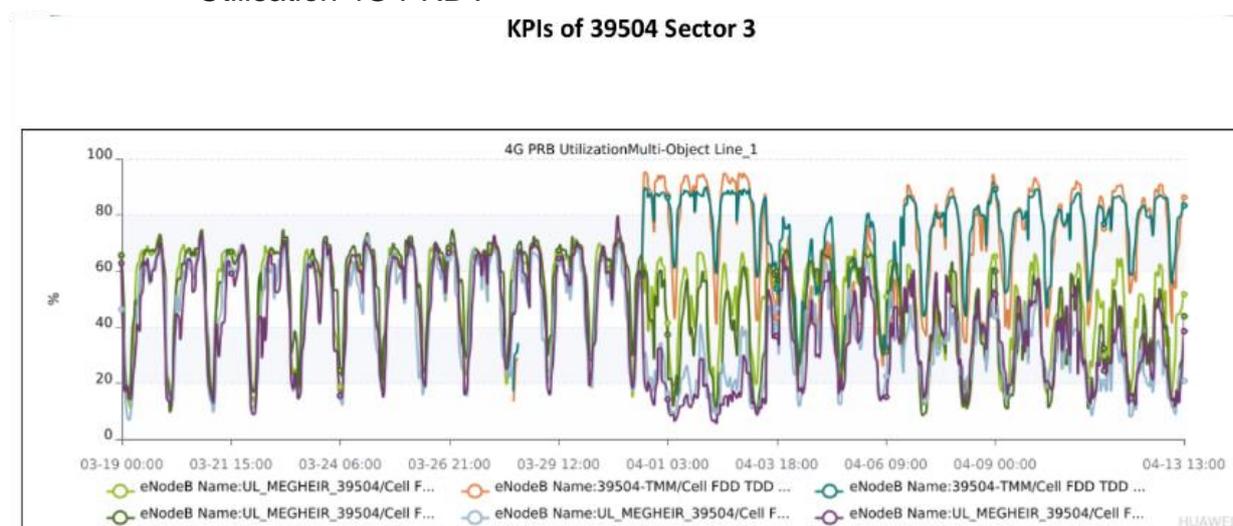
## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- Le débit moyen (DL) cell03 :  
KPIs of 39504 Sector 3



**Figure 4- 29:** Le débit moyen (DL) cell03.

- Utilisation 4G PRB :



**Figure 4- 30:** Utilisation 4G PRB.

Il a été remarqué que :

- La TDD a été mise en place sur le site 39504.
- Une énorme quantité de trafic gagnée a été remarquée dépassant 42,7%.
- Un bon débit DL a été obtenu.
- Un équilibre du trafic est nécessaire pour réduire l'utilisation du PRB.

### **4.13 LTE TDD 8T8R et Massive MIMO**

Les résultats de simulation de la planification de site après l'ajout des technologies TDD 8T8R et Massive MIMO sont illustrés dans les figures suivantes.

La figure ci-dessous montre :

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

- Volume de Trafic (DL)
- Trafic moyen d'utilisateur
- Utilisateur PRB (DL)



Figure 4- 31: Implémentation de TDD 8T8R et Massive MIMO.

### Constatations :

Une augmentation de plus de 107% a été constatée dans le débit de téléchargement (DL) des utilisateurs.

Le volume de trafic (DL) a augmenté de plus de 76%.

Il a été observé une augmentation de plus de 58% dans le trafic moyen des utilisateurs.

Il y a eu une diminution de plus de 20% dans l'utilisation des ressources physiques de blocs (PRB) par les utilisateurs en téléchargement (DL).

## Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO

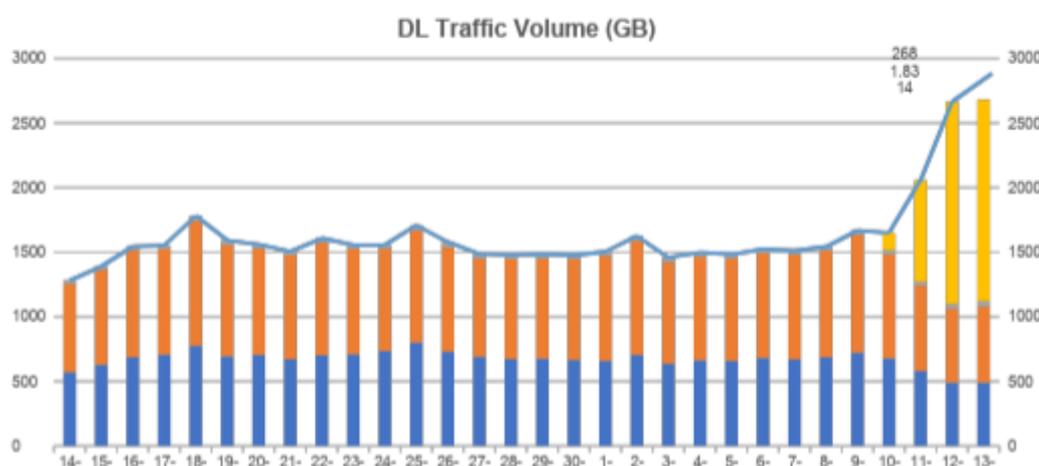
- Après le déploiement de LTE TDD Massive MIMO, une amélioration de 107% a été constatée au niveau de l'expérience utilisateur, tandis que la capacité du réseau a augmenté de 20%

Le tableau ci-dessous indique les statistiques finales du site avant/après l'implémentation TDD 8T8R Massive MIMO :

Date	10-04-2023	10-05-2023
Somme du volume de trafic DL	1522.8156	2664.4941
Moyenne du débit moyen de l'utilisateur DL (Mbps)	3.2872Mbps	6.8057Mbps
Somme de la moyenne utilisateur du trafic	523.5509	830.0629
Moyenne de DL_PRB Utilisation (%)	64.1671%	50.7927%

**Tableau 4- 2:** Statistiques finales de site.

La figure ci-dessous représente le volume du trafic.



**Figure 4- 32:** Volume de trafic(DL) après l'implémentation.

- Il est constaté que le trafic est augmenté d'une façon très remarquable.

### 4.14 Conclusion

Pour résumer, notre objectif principal était d'améliorer la sélection des sites et des cellules les plus adaptés pour les réseaux de communication. Nous avons atteint cet objectif en utilisant la simulation Atoll et en évaluant les effets de l'implémentation du TDD Massive MIMO.

## **Chapitre 4 : Optimisation du réseau 4G a l'aide de TDD Massive MIMO**

Grâce à l'utilisation de la simulation Atoll, nous avons pu examiner en détail différentes configurations de sites et de cellules. Cela nous a permis de prendre des décisions éclairées afin d'optimiser la couverture, la capacité et la qualité de service du réseau. Nous avons pris en compte des facteurs tels que la densité du trafic, les interférences potentielles et les performances de propagation pour sélectionner les sites les plus appropriés.

L'intégration du TDD Massive MIMO a joué un rôle crucial dans notre projet. Cette technologie prometteuse présente des avantages significatifs en termes de capacité et d'efficacité spectrale. Grâce à une utilisation intelligente des antennes et à la formation de faisceaux adaptative, TDD Massive MIMO améliore la performance du réseau en permettant une communication simultanée avec plusieurs utilisateurs.

Nos résultats ont montré que l'implémentation du TDD Massive MIMO a entraîné une augmentation notable du débit cellulaire et une réduction des interférences, améliorant ainsi l'expérience utilisateur. De plus, cette technologie a permis une utilisation plus efficace des ressources radio disponibles, contribuant ainsi à une meilleure efficacité du réseau.

En conclusion, notre projet a souligné l'importance de sélectionner les sites et les cellules de manière avisée à l'aide de la simulation Atoll, ainsi que les avantages positifs de l'implémentation du TDD Massive MIMO sur les performances du réseau. Ces résultats peuvent servir de guide aux opérateurs de télécommunications lors de la prise de décisions stratégiques pour optimiser leurs déploiements et offrir une connectivité de haute qualité aux utilisateurs finaux.

# Conclusion générale :

En conclusion, notre projet visait à optimiser la sélection des meilleurs sites et cellules pour les réseaux de communication ainsi que d'évaluation de l'impact de l'implémentation du TDD Massive MIMO. Pour ce faire, une simulation par ordinateur a été réalisée.

Afin d'atteindre notre objectif, nous avons bénéficié d'un stage au sein de l'entreprise Mobilis. Cette contribution nous a permis d'effectuer les différentes configurations et tests qui garantissent le bon déroulement de notre projet.

Dans les premiers chapitres de notre mémoire, nous avons exposé les notions théoriques de TDD, FDD, Massive MIMO, KPI...ect.

Dans la partie pratique de notre travail, nous avons utilisé les différents outils fournis par Mobilis pour implémenter la solution TDD Massive MIMO sur différents sites certifiés, ainsi, nous avons utilisé le logiciel Atoll pour valider cette solution.

Grâce à l'utilisation de la simulation Atoll, nous avons pu réaliser une analyse approfondie des différentes configurations de sites et de cellules. Cela nous a permis de prendre des décisions éclairées pour maximiser la couverture, la capacité et la qualité de service du réseau. Nous avons évalué des paramètres tels que la densité du trafic, les interférences potentielles et les performances de propagation afin de sélectionner les sites les plus appropriés.

L'implémentation du TDD Massive MIMO a été une étape cruciale de notre projet. Cette technologie prometteuse offre des avantages significatifs en termes de capacité et d'efficacité spectrale. Grâce à une utilisation intelligente des antennes et à la formation de faisceaux adaptative, TDD Massive MIMO a permis d'améliorer la performance du réseau en fournissant une communication simultanée à plusieurs utilisateurs.

Nous avons constaté que l'implémentation du TDD Massive MIMO a entraîné une augmentation notable du débit cellulaire et une réduction des interférences, ce qui a amélioré l'expérience utilisateur. De plus, cette technologie a permis une meilleure utilisation des ressources radio disponibles, ce qui a contribué à une meilleure efficacité du réseau.

En conclusion, notre projet a mis en évidence l'importance de choisir les meilleurs sites et cellules en utilisant la simulation Atoll, ainsi que l'impact positif de l'implémentation du TDD Massive MIMO sur les performances du réseau. Ces résultats peuvent guider les opérateurs de télécommunications dans la prise de décisions stratégiques pour optimiser leurs déploiements et offrir une connectivité de haute qualité aux utilisateurs finaux.

Le domaine d'optimisation reste ouvert, vu l'augmentation incessible du nombre d'utilisateurs ; et pourra être une matière riche pour les futurs travaux.

Notre stage au sein de l'organisme Mobilis nous a permis d'approfondir et enrichir nos connaissances acquises durant notre formation universitaire et de mieux s'intégrer dans le milieu professionnel.

# Bibliographie

- [1] **Ohta, Yasuharu.** *Time-Domain Synchronous CDMA for TDD-CDMA Mobile Communication.* 1995.
- [2] **Theodore S.Rappaport, Jeffrey G.andrews.** *Wireless Communicatoin Principales and practice.* 2019.
- [3] **Ahmadi, Sassan.** *LTE-advanced:A Practical Systems Approach To Understanding 3GPP LTE Releases 10 And 11 Radio Access Technologies.* 2013.
- [4] **Y.Bouguen É.Hardouin F.Xavier, .** *LTE et les réseaux 4G.*, Groupe Eyrolles, : s.n., 2012.
- [5] **Technologies, Agilent.** *LTE and Evolution to 4G wireless:Design and Mesurement challenges.* 2009.
- [6] **Hui Liu, Guossen Yue, Ekram Hossain.** *BOOK OFDMA-Based Broadband Wireless Networks: Design and Oprtimization.* 2010.
- [7] **Zhang, Yan.** *SC-FDMA For Mobile.* 2009.
- [8] **Huawei.** *Technologies Co Ltd .*
- [9] **Chris Johnson,** *Long term evolution in bullets 2nd edition,* . s.l. : CreateSpace Independent Publishing Platform,, 2012.
- [10] **Sharma, P.** *Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1 G to 5 G,* . s.l. : semanticscholar, 2013.
- [11] **Abdi, Amira. .** *Mémoire LTE: Long Term Evolution,*.. 20 juin 2012.
- [12] **Toskala, Harri Holma & Antti.** *LTE for UMTS-Evolution to LTE-Advanced.* 2009.
- [13] **Holger Claussen, David M.Guevorkian et Ahmed R.S.Bahai.** *Handover in GSM,UMTS and LTE:Performance and Evaluation Aspects.* 2010.
- [14] **Huawei Technologies Co., Ltd.** *KPI Optimization.*
- [15] **Huawei, EARFCN formula, BOOK [Operation and maintenance],.** publié le 30-03-2018.
- [16] **A.Khaled.** *Radio Link Failure, [LTE KPI Optimization],.* Publier le 11 October 2017.

[17] **H.Tounsi..** *Optimisation de la couverture radio du réseau 4G* . s.l. : Tunisie Mémoire Telecom, 2014.