

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications

**Par** : ZEDDAM Hafsa et MORSLI Salma

### **Sujet**

**Etude et conception d'un outil de dimensionnement  
et de mise en place d'un réseau 5G**

Soutenu publiquement, le 12 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

Mme/ HASSAINE Nawel

MCA

Université de Tlemcen

Présidente

M/ MOUSSAOUI Djilali

MCA

Université de Tlemcen

Examineur

M/ ZERROUKI Hadj

MCA

Université de Tlemcen

Encadreur



# *Dédicace*

*Avec l'aide d'Allah le tout puissant, ce travail est achevé.*

*Je le dédie à toutes personnes qui me sont chère ;*

*Au deux être les plus chers au monde qui ont donnés sens à mon existence, et qui m'ont soutenu nuits et jours durant tout mon parcours.*

*Ma très chère mère qui a consacré sa vie pour bâtir la mienne qui n'a cessé de nourrir l'ambition de me conduire au succès, je lui serai éternellement reconnaissante, merci maman.*

*Mon très cher père qui m'a donné un magnifique modèle de volonté, merci papa, Avec mes prières qu'ils soient toujours en bonne santé.*

*À mes adorables sœurs ; Hadjer, Hanane et Wahiba qui je le sais ma réussite est très importante pour vous, que Dieu vous paye Pour tous vos bienfaits.*

*À mes chers frères ; Omar, Mohamad et Hakim pour vous encouragement indéfectible. Surtout aux petits ; Assil, Maria et Amir.*

*À toute la famille Zeddham et Aissaoui.*

*À ma chère binôme Salma, pas de mots pour exprimer mes remerciements envers toi, pour son immense amour, son soutien et sa patience.*

*À tous ceux qui me sont chers.*



*Zeddham Hafsa*



# *Dédicace*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance que j'ai, tout simplement je dédie ce travail :*

*A mes chers parents qui n'ont pas cessés de m'encourager sans vous rien ne n'aurait été possible,  
Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai pour vous.  
J'espère que vous étiez fières de votre fille*

*A mes chers frères Salah et Mahmoud que dieu vous procure bonne santé et une longue vie.*

*A ma chère grand-mère Mimi Allah yerhmha et à mon grand-père que dieu le protège.*

*A ma famille et mes amis et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*A ma très chère binôme Sarah, pas de mots pour exprimer mes remerciements envers toi, pour ton soutien, tes encouragements que tu m'as donné pendant ces dernières années.*

*Je remercie Allah pour tout.*

*Et à tous ceux que j'aime beaucoup, et qui m'aiment.*



*Morsli Salma*



## Remerciements

*En premier lieu, nous remercions Allah le tout puissant pour la force, la santé et la sagesse qu'il nous a toujours donné et que sans lui rien n'aurait accompli.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier très chaleureusement Monsieur Zerrouki Hadj, Maître de Conférences à l'Université Abou Baker BelKaid -Tlemcen, qui a assuré l'encadrement de notre travail, où il a été une source de motivation et d'encouragement, et pour toutes les aides qu'il nous apportées du début jusqu'à la fin et pour sa gentillesse et sa disponibilité permanente ont toujours. Nous avons été honorés d'être parmi ses étudiantes et de bénéficier de votre riches formation, Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour nous un modèle.*

*Mos vifs remerciements vont également à Madame Hassaine Nawel, Maître de Conférences à l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen, qui malgré un emploi de temps fort chargé, a acceptée de juger ce travail et d'avoir acceptée de présider le jury de ce mémoire.*

*Nous remercions sincèrement Monsieur Moussaoui Djilali, Maître de Conférences à l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner notre mémoire, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury et d'avoir consacré une partie de son temps pour juger et évaluer le travail de ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos enseignants.*

*Finalement, Nous remercions et exprimons notre gratitude infinie à nos parents, nos frères et nos sœurs pour leurs soutiens et leurs encouragements durant tout le long de notre carrière d'études.*

## Résumé

Les réseaux et les services de télécommunications sont devenus des ressources indispensables pour la vie humaine. Les besoins grandissant en information et en débit entraînent la complexité des systèmes de télécommunication et des architectures réseau. De ce fait, les opérateurs de télécommunication doivent implémenter un réseau bien structuré et évolutif pour la croissance future et répondre aux besoins des utilisateurs.

Le présent projet de fin d'études contribue à l'étude de la mise en place des réseaux de nouvelles générations, faire une synthèse technique et analytique pour le déploiement de ces réseaux. Enfin, la conception d'un outil de dimensionnement de réseau 5G dans un contexte technique.

**Mots clés :** 5G, Relais, Réseaux mobiles, Dimensionnement, Couverture radio, Diagramme de Voronoi.

---

## Abstract

Telecommunications networks and services have become indispensable resources for human life. The growing needs for information and speed lead to the complexity of telecommunication systems and network architectures. Therefore, telecom operators must implement a well-structured and scalable network for future growth and meeting user needs.

This graduation project contributes to the study of the implementation of new generation networks, to make a technical and analytical synthesis for the deployment of these networks. Finally, the design of a 5G network dimensioning tool in a technical context.

**Key words:** 5G, Relay, Mobile networks, Dimensioning, Radio cover, Diagram of Voronoi.

أصبحت شبكات وخدمات الاتصالات السلكية واللاسلكية متطلبات لا غنى عنها لحياة الإنسان. حيث تؤدي الاحتياجات المتزايدة للمعلومات وسرعة التدفق إلى تعقيد أنظمة الاتصالات وبنى الشبكات. لذلك يجب على متعاملي ومشغلي الاتصالات إنشاء شبكة جيدة التنظيم، قابلة للتطوير والنمو المستقبلي وتلبي احتياجات المستخدمين.

يساهم مشروع التخرج هذا في دراسة تخطيط شبكات الجيل الجديد وعمل دراسة فنية وتحليلية لإنشاء هذه الشبكات. أخيرًا برمجة وتصميم أداة تحجيم شبكة الجيل الخامس (5G) في سياق تقني.

**الكلمات المفتاحية:** الجيل الخامس، مُنْأَوَب، شبكات المحمول، تحجيم، تغطية الراديو، مخطط Voronoi.

## Table des matières

Dédicaces .....	i
Remerciement .....	iii
Résumé et Abstract.....	iv
ملخص.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des abréviations.....	xiv
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Evolution des réseaux mobiles</b>	
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 La première génération (1G) .....</b>	<b>3</b>
I.2.1 Les standards de la 1G.....	3
<b>I.3 La deuxième génération (2G) .....</b>	<b>4</b>
I.3.1 Le réseau GSM.....	4
I.3.1.1 Le système cellulaire .....	5
I.3.1.2 Equipements et leurs fonctions dans un réseau GSM .....	5
I.3.1.3 Les bandes de fréquences .....	6
I.3.2 Le réseau GPRS.....	6
I.3.2.1 Les équipements d'un réseau GPRS .....	7
I.3.3 La norme EDGE.....	8
<b>I.4 La troisième génération (3G).....</b>	<b>8</b>
I.4.1 Le réseau UMTS.....	9
I.4.1.1 Le réseau d'accès UTRAN.....	9
I.4.1.2 Le réseau cœur .....	9
I.4.1.3 Techniques d'accès .....	10
I.4.2 La norme HSDPA .....	10
I.4.3 La norme HSUPA.....	10
<b>I.5 La quatrième génération (4G) .....</b>	<b>11</b>
I.5.1 Définition des réseaux LTE.....	11
I.5.2 La technologie LTE .....	11
I.5.3 Architecture du LTE .....	12
I.5.4 Le LTE Advanced .....	13
<b>I.6 La cinquième génération (5G) .....</b>	<b>14</b>
I.6.1 L'architecture de réseau 5G .....	14
<b>I.7 La sixième génération (6G) .....</b>	<b>15</b>
I.7.1 Les avantages de la 6G par rapport à la 5G .....	15
I.7.2 Quand l'internet 6G sera-t-il disponible ? .....	15
<b>I.8 Conclusion.....</b>	<b>16</b>

## Chapitre II : Etude technique du réseau 5G

<b>II.1 Introduction</b> .....	17
<b>II.2 Les exigences du réseau 5G</b> .....	17
II.2.1 Grande capacité .....	17
II.2.2 Débits très élevés .....	18
II.2.3 Très basse latence.....	18
II.2.4 Fiabilité et disponibilité du réseau .....	18
II.2.5 Coût très bas et basse consommation d'énergie .....	18
II.2.6 Efficacité énergétique des réseaux.....	19
<b>II.3 Architecture du réseau 5G</b> .....	19
II.3.1 Le réseau d'accès .....	19
II.3.1.1 Architectures du réseau d'accès pour le réseau 5G .....	19
II.3.1.2 Les nouveaux éléments du réseau d'accès de réseau 5G .....	20
II.3.2 L'architecture de réseau 5G et ses services.....	21
II.3.2.1 New Generation Radio Acces Network (NG-RAN).....	23
II.3.2.2 5G Core Network (5GC) .....	23
II.3.3 Architecture en couches du réseau 5G.....	24
II.3.3.1 La couche PHY et la couche MAC .....	25
<b>II.4 Fréquences et techniques de multiplexage</b> .....	25
II.4.1 Les Fréquences (cm-Waves, mm-Waves) .....	25
II.4.2 Le système GFDM .....	26
II.4.3 La technique GFDMA .....	27
II.4.4 La technologie MIMO .....	28
<b>II.5 Les techniques de modulation et codage</b> .....	28
II.5.1 Les types de modulation .....	28
II.5.1.1 Modulation BPSK .....	28
II.5.1.2 Modulation QPSK .....	29
II.5.1.3 Modulation QAM.....	29
II.5.2 Techniques de codage.....	30
II.5.2.1 Codage LDPC .....	30
II.5.2.2 Codage polaire.....	30
II.5.2.3 Turbo codes.....	31
<b>II.6 Technologie de relais pour le réseau 5G</b> .....	31
II.6.1 Relais multi-sauts.....	32
II.6.2 Relais mobile .....	33
II.6.3 Relais hétérogène.....	34
II.6.4 Relais multiple « backaul » .....	34
<b>II.7 Applications du réseau 5G</b> .....	35
<b>II.8 Conclusion</b> .....	35

## Chapitre III : Etude analytique de dimensionnement du réseau 5G

<b>III.1 Introduction</b> .....	37
<b>III.2 Les différents scénarios dans le 5G</b> .....	37
III.2.1 Scénarios pour les Macro cellules.....	37
III.2.1.1 eMBB (enhanced Mobile Broad Band) .....	37

III.2.1.2 BLUF (Basse Latence Ultra Fiable).....	37
III.2.1.3 AIRE (Accès à l'Internet pour les régions éloignées) .....	38
III.2.2 Scénarios pour les Micro cellules .....	38
III.2.2.1 UMi dans la gorge de la rue et dans une place ouverte .....	38
III.2.2.2 InH (dans un bureau ouvert ou fermé/ou dans les centres commerciaux) .....	39
III.2.2.3 Communication entre objets /ou communication entre les machine .....	39
<b>III.3 Dimensionnement d'un réseau 5G</b> .....	39
III.3.1 Processus de dimensionnement du réseau 5G.....	39
III.3.2 Choix de la bande de fréquence .....	40
III.3.3 Choix du type de dimensionnement .....	40
III.3.4 Modèles de propagation .....	41
III.3.4.1 Le modèle de propagation en espace libre .....	41
III.3.4.2 Modèle de propagation Alpha Beta Gama (UMi, UMa).....	41
III.3.4.3 Modèle Close-In (CI) .....	41
III.3.4.4 Modèle Close-In with Frequency weight (CIF) .....	42
III.3.4.5 Modèle Alpha Beta Gama et close-in F à double-pente .....	42
<b>III.4 Bilan de Liaison</b> .....	43
III.4.2 Puissance isotrope rayonnée équivalente .....	44
III.4.3 Sensibilité de réception.....	44
III.4.4 Affaiblissement maximum tolérable.....	45
<b>III.5 Dimensionnement selon la couverture</b> .....	45
III.5.1 Système de réseau d'accès 5G.....	45
III.5.2 Portée d'une station de base et d'une station de relais .....	46
III.5.3 Détermination du nombre de stations de relais à utiliser.....	47
III.5.4 Répartition des stations de relais dans une zone à couvrir.....	47
III.5.5 Contrôle d'admission d'utilisateur.....	48
III.5.6 Contrôle de puissance .....	49
III.5.7 Arrangement d'association d'utilisateurs basé par Voronoi.....	49
<b>III.6 Conclusion</b> .....	51
<b>Chapitre IV : Mise en place de l'outil de dimensionnement d'un réseau 5G</b>	
<b>IV.1 Introduction</b> .....	53
<b>IV.2 Description de l'outil de dimensionnement</b> .....	53
IV.2.1 Spécification des besoins.....	53
IV.2.1.1 Besoins fonctionnels.....	54
IV.2.1.2 Besoins non fonctionnels .....	54
<b>IV.3 Etude technique</b> .....	54
IV.3.1 Matériels de base .....	54
IV.3.2 Outils de conception.....	55
IV.3.3 Choix du langage de modélisation.....	55
IV.3.3.1 Langage HTML .....	55
IV.3.3.2 Langage CSS.....	56
IV.3.3.3 Langage JavaScript.....	57
IV.3.3.4 Langage jQuery.....	58
<b>IV.4 Présentation de l'outil "5G DimTool"</b> .....	58
IV.4.1 Interface d'accueil .....	58

IV.4.2 Interface d'authentification.....	59
IV.4.3 Interface principale.....	59
<b>IV.5 Simulation de dimensionnement.....</b>	<b>61</b>
IV.5.1 Calcul de pertes du chemin .....	61
IV.5.2 Calcul de la portée de SB/SR (Bilan de liaison).....	63
IV.5.3 Calcul de nombre des stations de relais à déployer.....	66
IV.5.4 Simulation de dimensionnement d'une zone .....	67
IV.5.5 Interface "About" .....	70
<b>IV.6 Conclusion.....</b>	<b>71</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>72</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>73</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Architecture simplifiée d'un réseau GSM.....	4
<b>Figure I.2</b> : Système cellulaire dans les réseaux mobiles .....	5
<b>Figure I.3</b> : Architecture d'un réseau GPRS.....	7
<b>Figure I.4</b> : Architecture générale d'un réseau UMTS.....	9
<b>Figure I.5</b> : Présentation générale sur le système LTE .....	12
<b>Figure I.6</b> : Architecture générale d'un LTE .....	12
<b>Figure I.7</b> : Techniques utilisées dans la technologie 5G.....	14
<b>Figure I.8</b> : Architecture de réseau 5G.....	14
<hr/>	
<b>Figure II.1</b> : Aperçu des technologies de RAN pour 5G.....	19
<b>Figure II.2</b> : Exemple d'un lien Backhaul 5G.....	20
<b>Figure II.3</b> : Communication dispositif à dispositif.....	21
<b>Figure II.4</b> : L'architecture de réseau 5G .....	22
<b>Figure II.5</b> : Session PDU et flux QOS : plan utilisateur (UP) .....	22
<b>Figure II.6</b> : La séparation fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC .....	23
<b>Figure II.7</b> : Architecture de NG-RAN .....	23
<b>Figure II.8</b> : Architecture du système 5G, no-roaming .....	24
<b>Figure II.9</b> : Architectures en couches du réseau 5G .....	25
<b>Figure II.10</b> : Couche PHY et couche MAC pour le réseau 5G .....	25
<b>Figure II.11</b> : Comparaison entre trame OFDM et GFDM.....	27
<b>Figure II.12</b> : Attribution des sous porteuses pour plusieurs utilisateurs en GFDMA.....	27
<b>Figure II.13</b> : Diagramme de constellation de BPSK .....	29
<b>Figure II.14</b> : Diagramme de constellation de QPSK .....	29
<b>Figure II.15</b> : Diagramme de constellation de 16-QAM.....	30
<b>Figure II.16</b> : Les différents scénarios utilisant les technologies des relais .....	32
<b>Figure II.17</b> : Relais multi-saut .....	32
<b>Figure II.18</b> : Relais mobile .....	33
<b>Figure II.19</b> : Relais hétérogènes .....	34
<b>Figure II.20</b> : Relais multiple « backhaul » .....	35
<hr/>	
<b>Figure III.1</b> : UMi dans la gorge de la rue.....	38
<b>Figure III.2</b> : UMi dans une place ouverte .....	38
<b>Figure III.3</b> : A l'intérieur d'un centre commercial .....	39
<b>Figure III.4</b> : Equilibrage des liens montants et descendants.....	43
<b>Figure III.5</b> : Exemple d'un système de réseau d'accès 5G .....	46
<b>Figure III.6</b> : Exemple de diagramme de Voronoi .....	48

<b>Figure IV.1</b> : Logo du langage HTML.....	56
<b>Figure IV.2</b> : Logo du langage CSS.....	56
<b>Figure IV.3</b> : Logo du langage JavaScript.....	57
<b>Figure IV.4</b> : Principe de fonctionnement d'un script coté client .....	57
<b>Figure IV.5</b> : Logo du langage jQuery .....	58
<b>Figure IV.6</b> : Interface d'accueil de l'outil "5G DimTool".....	58
<b>Figure IV.7</b> : Logo de l'outil "5G DimTool".....	59
<b>Figure IV.8</b> : (a) Interface d'authentification de l'outil "5G DimTool", (b) Message d'erreur.....	59
<b>Figure IV.9</b> : Interface principale de l'outil 5G DimTool .....	60
<b>Figure IV.10</b> : Quelques fenêtres "Error !" du programme défensif.....	61
<b>Figure IV.11</b> : Interface calculatrice des pertes du chemin.....	61
<b>Figure IV.12</b> : Variation du Path Loss en fonction de la portée pour différents modèles.....	63
<b>Figure IV.13</b> : Variation du Path Loss en fonction de la portée pour différents types de terrain.....	63
<b>Figure IV.14</b> : Interface calculatrice de bilan de liaison.....	64
<b>Figure IV.15</b> : Variation de maximum Path loss (dB) en fonction des portées.....	65
<b>Figure IV.16</b> : Calcule de nombre de stations de relais utilisées.....	66
<b>Figure IV.17</b> : Interface de lancement de dimensionnement d'une zone .....	67
<b>Figure IV.18</b> : Ajout des sites dans la zone de couverture .....	68
<b>Figure IV.19</b> : Diagramme de Voronoi pour le réseau sans fil hétérogènes .....	69
<b>Figure IV.20</b> : Association des utilisateurs pour le réseau sans fil hétérogène .....	70
<b>Figure IV.21</b> : Interface "About" de l'outil 5G DimTool.....	71

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Équipements GSM et leurs fonctions. ....	6
<b>Tableau I.2</b> : Allocation des fréquences (GSM, DCS) .....	6
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres des modèles CI, CIF, ABG pour différents environnements.....	43
<b>Tableau IV.1</b> : Pertes en chemin pour différents environnements avec une fréquence de 60 GHz.....	62
<b>Tableau IV.2</b> : Valeurs de PIRE, la sensibilité et l'affaiblissement selon la zone.....	65

## Liste des abréviations

**1G** : première génération.  
**2G** : deuxième génération.  
**3G** : troisième génération.  
**4G** : quatrième génération.  
**5G** : cinquième génération.  
**6G** : sixième génération.  
**5GC** : cinquième génération core.  
**3GPP** : 3rd Generation Partnership Project.

### A

**AUC** : Authentication Center.  
**AMPS** : Advanced Mobile Phone System.  
**AMC** : Adaptive Modulation and Coding.  
**AN** : Access Network.  
**ARQ** : Automatic Repeat reQuest.  
**AIRE** : Accès à l'Internet pour les Régions Eloignées.  
**APS** : Access Points.  
**ABG** : Alpha Beta Gama.

### B

**BSC** : Base Station Controller.  
**BTS** : Base Transceiver Station.  
**BSS** : Base Station Subsystem.  
**BLUF** : Basse Latence Ultra Fiable.  
**BG** : Border Gateway.  
**BS** : Base Station.  
**BPSK** : Binary Phase Shift Keying.  
**BER** : Bit Error Rate.

### C

**CT** : Cordless Téléphone.  
**CS** : Circuit Switched.  
**CDMA** : Code Division Multiple Access.  
**CoMP** : Cooperation Multi-Points.  
**CP** : Cycle Préfixe.  
**CIF** : Close-In with Frequency weight.  
**CI** : Close-In.  
**CSS** : Cascading Style Sheets.  
**CP** : Cycle Préfixe.

### D

**DCS** : Digital Cellular System.  
**D2D** : Device to Device.

### E

**EDGE** : Enhanced Data Rates for GSM Evolution.  
**EIR** : Equipment Identification Register.

**E-UTRAN** : Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network.

**ENodeB** : Evolved NodeB.  
**eMBB** : enhanced Mobile Broad Band.  
**EPS** : Evolved Packet System.  
**EU** : Equipement Utilisateur.  
**Eb/NO** : Ratio du signal sur bruit.

### F

**FDD** : Frequency Division-Duplexing.  
**FDMA** : Frequency Division Multiple Access.  
**FSPL** : Free Space Path Loss.  
**FEC** : Forward Error Correction.  
**FDD** : Frequency Domain Duplex.

### G

**GGSN** : Gateway GPRS Support Node.  
**GSM** : Global System for Mobile communications.  
**GPRS** : General Packet Radio Service.  
**GFDM** : Generalized Frequency Division Multiplexing.  
**GFDMA** : Generalized Frequency Division Multiple-Access.  
**GERAN** : GSM EDGE Radio Access Network.  
**gNB** : Next generation NodeB.  
**gNB-CU** : Next generation NodeB Centralized Unit.  
**Gs** : Gain de l'antenne.  
**Ge** : Gain d'antenne émetrice.

### H

**HSDPA** : High Speed Downlink Packet Access.  
**HSUPA** : High Speed Uplink Packet Access.  
**HLR** : Home Location Register.  
**HARQ** : Hybrid Automatic Repeat reQuest.  
**HTML** : Hyper Text Markup Language.  
**HTTP/2** : major revision of the HTTP network protocol.

### I

**IP** : Internet Protocol.  
**IA** : Intelligence Artificielle.  
**IMS** : IP Multimédia Subsystem.  
**IOT** : Internet Of things.  
**InH** : In Home.  
**ISO** : Interconnexion de Systèmes Ouverts.

### K

**K** : Nombre des antennes de transmission.

**L**

**LTE**: Long Term Evolution.  
**LOS** : Line-Of-Sight.  
**LAN**: local area network  
**LDPC** : Low-Density Parity-Check.  
**LSH** : Affaiblissement dû au « shadowing ».  
**Lenv** : Affaiblissement dû aux caractéristiques de l'environnement.

**M**

**MME**: Mobility Management Entity.  
**MSC**: Mobile services Switching Center.  
**MIMO**: Multi-Input Multiple-Output.  
**MU-MIMO**: Multi-Utilisateur MIMO  
**MS**: Mobile System.  
**MAC** : Moyenne de Contrôle d'Accès.  
**MTC** : Communication Entre les Machines.  
**Mgfade** : Marge de Fading.  
**Mglink** : Marge de Liaison.  
**MU** : Multi Utilisateurs.

**N**

**NR**: New Radio.  
**NG**: New Generation.  
**NG-RAN**: New Generation Radio Access Network.  
**NMT** : Nordic Mobile Telephone.  
**NLOS** : Non Line-Of-Sight.

**O**

**OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiplexing.  
**OFDMA**: Orthogonal Frequency Division Multiple Access.  
**OSI**: Open System Interconnection.

**P**

**PDP**: Packet Data Protocol.  
**PLMN**: Public Land Mobile Network.  
**PS**: Packet System.  
**PA** : Point d'Accès.  
**PMP** : Point-à-Multipoint.  
**PIRE** : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente.  
**PMC** : Puissance maximale de macro-cellules.  
**PPC** : Puissance maximale de petites cellules.  
**PL** : Path Loss.

**Q**

**QoS**: Quality of Service  
**QAM**: Quadrature Amplitude Modulation  
**QPSK**: Quadrature Phase Shift Keying.

**R**

**RAN** : Radio Access Network.  
**RAM**: *Random-access memory* i.  
**RSC** : Code Systématique récursifs.  
**RNC** : Radio Network Controller.  
**RNS** : Radio Network Subsystem.  
**RS** : Relay Station.  
**RLB** : Radio Link Budget.  
**RTCP** : Real-Time Transport Control Protocol.  
**RNIS**: *réseau numérique à intégration de services*.  
**RTC** : Réseau Téléphonique Commuté.

**S**

**SGSN**: Serving GPRS Support Node.  
**SC-FDMA**: Single-carrier Frequency Division Access.  
**SDN**: Software-Defined Networking.  
**SB** : Station de Base.  
**SR** : Station de Relais.

**T**

**TDMA**: Time Division Multiple Access.  
**TACS** : Total Access Communication System.  
**TDD**: Time Division Demultiplexed.  
**TS**: Time slot.  
**TCP**: Transmission Control Protocol.  
**TDD** : Time Division Duplex.

**U**

**UE**: User Equipment.  
**UL**: Uplink.  
**UMTS**: Universal Mobile Telecommunications System.  
**UTRAN**: Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network.  
**UTRA** : UMTS Terrestrial Radio Interface.  
**UIT** : Union Internationale des Télécommunication.  
**Uma** : Urbain Macro.  
**Umi** : Urbain Micro.

**V**

**VLR**: Visitor Location Register.  
**VoIP**: Voice over Internet Protocol.

**W**

**WCDMA**: Wideband Code Division Multiple Access.  
**WLAN**: A wireless Local Area Network.

## Introduction générale

La prolifération des appareils mobiles tels que les tablettes et les smartphones a engendré une explosion du trafic de données dans les réseaux cellulaires et sans fil. Cette tendance, observée à l'heure actuelle, est largement attribuée à la performance accrue de ces dispositifs, qui a conduit à l'évolution des habitudes de consommation. En effet, nous assistons à une multiplication des applications gourmandes en bande passante, utilisant des fonctionnalités de géolocalisation, telles que la visioconférence, le streaming vidéo, le cloud computing, l'information sur le trafic, etc. Par ailleurs, la perspective des communications sans fil entre objets, également connue sous le nom d'Internet des objets (*Internet Of Things*), devrait entraîner une augmentation considérable du volume de données transférées.

D'après les estimations les plus récentes, le volume de données numériques produites ou reproduites à l'échelle mondiale a connu une croissance spectaculaire au cours de la dernière décennie. En effet, il a été augmenté par plus de 30 fois, passant de 2 zettaoctets ( $10^{21}$  octets) en 2010 à 64 zettaoctets l'année dernière. Cependant, malgré cette augmentation considérable, cette quantité paraît relativement faible par rapport aux attentes pour les années à venir.

Les prévisions indiquent en effet que la quantité de données générées dans le monde devrait surpasser 180 zettaoctets d'ici 2025, ce qui représente une augmentation annuelle moyenne de voisinage de 40 % sur une période de cinq ans. Cette hausse exponentielle est principalement alimentée par la démocratisation croissante des objets connectés et le déploiement de la technologie 5G. Ces deux facteurs jouent un rôle clé dans ce "Big Bang" de la donnée, propulsant ainsi la production et la circulation des données vers de nouveaux sommets.

Une approche alternative consiste à déployer des points d'accès WiFi et des petites cellules (micro, femto et pico cellules) dans les zones urbaines denses et à l'intérieur des bâtiments afin de décharger une partie du trafic. De nombreuses solutions ont déjà été proposées pour accroître la capacité des réseaux, telles que l'agrégation de porteuses pour le LTE-Advanced, l'utilisation des bandes de télévision libres en UHF et VHF, l'utilisation de modulations complexes associées à la réduction de la taille des cellules, ainsi que l'exploitation de la diversité du canal de propagation par une architecture MIMO.

Cependant, bien que le déploiement de petites cellules et de points d'accès WiFi contribue à soulager la congestion des réseaux cellulaires, cela soulève de nombreuses questions techniques, économiques, sociales et environnementales. La première limitation à un déploiement massif de points d'accès WiFi réside dans l'agrégation et le routage du trafic, généralement supérieur à 10 Gbit/s, jusqu'au cœur du réseau, sans latence. Le déploiement d'un réseau filaire ou fibré nécessite

des travaux complexes en milieu urbain, tandis que les liens de "backhaul" sont limités en débit en raison des ressources spectrales restreintes entre 2 et 6 GHz.

Les canaux disponibles (ou sous licence) sont le plus souvent limités à 20 MHz (avec agrégation jusqu'à 100 MHz), ce qui nécessite une utilisation efficace du spectre pour atteindre des débits supérieurs à 1 Gbit/s. Bien que la réduction de la taille des cellules permette d'obtenir des rapports signal/bruit importants, l'efficacité spectrale est souvent limitée en pratique en raison des imperfections radio des fréquences de transmission et des conditions de propagation (multipath, interférences).

L'omniprésence des points d'accès visibles en zone urbaine (environ tous les 50 mètres) caractéristique du réseau d'accès de la 5G pourrait également susciter des préoccupations parmi une population de plus en plus soucieuse de l'environnement électromagnétique, même si les niveaux d'exposition aux normes WiFi sont faibles.

Le présent mémoire intitulé "*Etude et conception d'un outil de dimensionnement et de mise en place d'un réseau 5G*", propose une étude approfondie de la cinquième génération des réseaux mobiles et son dimensionnement, Il est subdivisé en quatre parties :

Le premier chapitre se concentrera sur l'évolution des réseaux mobiles, en commençant par la première génération jusqu'à la génération actuelle, et explorera les différents standards et technologies associés à chaque génération.

Le deuxième chapitre sera consacré à une étude technique approfondie des technologies du réseau 5G. Nous examinerons en détail ses objectifs, ses caractéristiques, son architecture et ses spécifications techniques.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons le processus de dimensionnement du réseau 5G, et expliquerons en détail les différentes règles caractéristiques des modèles de propagation nécessaires pour le dimensionnement axé sur la couverture d'un réseau 5G.

Lors du quatrième chapitre, nous aborderons la mise en place de l'outil de dimensionnement d'un réseau 5G. Nous procéderons à une étude conceptuelle approfondie de cet outil, en détaillant les besoins fonctionnels et non fonctionnels qui lui sont associés. De plus, nous spécifierons les langages de programmation et l'environnement utilisés dans le développement de notre outil. Cette approche méthodique nous a permis de simplifier considérablement la mise en œuvre de notre outil de dimensionnement du réseau 5G.

Finalement, nous concluons ce travail en résumant les connaissances acquises durant la phase de réalisation du ce projet ainsi que quelques perspectives quant à l'avenir de notre outil.

# Evolution des Réseaux Mobiles **I**

## I.1 Introduction

L'évolution des réseaux mobiles a connue plusieurs étapes importantes depuis l'introduction de la première génération (1G). Chaque génération de réseau mobile a apporté des améliorations significatives en termes de vitesse, de capacité et de fonctionnalités, permettant ainsi l'émergence de nouveaux services et applications.

La première génération (1G) était basée sur une technologie analogique et offrait des services de voix uniquement. Tandis que la deuxième génération (2G) a introduit une technologie numérique, qui permettait des transmissions de données à bas débit. La troisième génération (3G), a apporté une amélioration significative de la vitesse de transmission de données, permettant ainsi l'émergence de services tels que la vidéo en streaming et la navigation sur Internet.

Avec l'arrivée de la quatrième génération (4G), une vitesse de transmission encore plus élevée et des améliorations significatives de la capacité du réseau, permettant ainsi l'émergence de nouveaux services tels que la réalité virtuelle et les jeux en ligne. La cinquième génération (5G), c'est la nouvelle génération de réseau mobile. Elle apporte une vitesse encore plus élevée, une latence plus faible et une capacité considérablement améliorée.

Avec l'évolution constante des technologies, les réseaux mobiles continuent de s'améliorer, offrant ainsi des expériences toujours plus rapides et fluides pour les utilisateurs.

Dans ce chapitre, on va présenter chacune des générations citées ci-dessus, et donner leurs architectures brièvement ainsi que d'autres services relatives à ces générations.

## I.2 La première génération (1G)

Les systèmes cellulaires de la première génération sont caractérisés par des terminaux analogiques dotés d'une mobilité restreinte et de services limités. Deux standards ont été normalisés, le CT0 (*Cordless Téléphone*), particulièrement utilisé aux États-Unis et au Royaume-Uni, et le standard CT1 en Europe, spécialement en Allemagne et en Italie. Les réseaux cellulaires de la 1G ont été les premiers à admettre à un usager mobile d'utiliser un téléphone de façon continue, n'importe où dans la zone de service d'un opérateur [1].

### I.2.1 Les standards de la 1G

La première génération de systèmes cellulaires (1G) utilisait essentiellement les standards suivants : AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), lancé aux États-Unis, est un réseau analogique reposant sur la technologie FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). NMT (*Nordic Mobile Telephone*) a été principalement

créé dans les pays du nord et utilisés dans d'autres parties du monde. TACS (*Total Access Communications System*), qui se base sur la technologie AMPS, a été beaucoup employée en Grande Bretagne.

Les premiers équipements téléphoniques sans fil sont introduits avec le standard CT0 aux États-Unis et en Europe au milieu des années 70 pour remplacer les téléphones filaires. Ces terminaux fournissent des performances discrètes, le canal radio étant plein de parasites et de beaucoup d'interférences avec les équipements électriques de l'environnant qui perturbent la qualité des émissions.

Une autre génération de technologie sans fil, s'agit de CT1, est inventée au début des années 80 et est installée dans plusieurs pays européens. Malheureusement, chaque pays en exploite son marché par une version spécifique, ce qui oblige les fondateurs à concevoir autant de versions que de pays [1].

### 1.3 La deuxième génération (2G)

Les limitations de capacité, les problèmes de qualité de transmission et les limitations à des règles de communication mobile, plutôt nationales des premiers systèmes de communication sans fils analogiques, ont conduit au développement d'une 2<sup>ème</sup> génération de systèmes de réseaux mobiles cellulaires numériques. Il a développé avec GSM (*Global System for Mobile Communication*) une technologie d'accès radio cellulaire numérique de deuxième génération pour l'Europe, qui est devenu un succès mondial [2]. Au fil de temps, ce système a évolué sous l'acronyme générique GERAN (*GSM / EDGE Radio Access Network*).

#### 1.3.1 Le réseau GSM

Le réseau GSM (*Global System for Mobile communication*) a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC - réseau fixe).

- Le système GSM s'adapte par des interfaces avec le réseau téléphonique commuté et comprend des commutateurs.
- Le système GSM se différencie par un accès distinctif : c'est la liaison radio.

L'architecture générale de réseau GSM avec ses composantes sont illustrées à la figure I.1

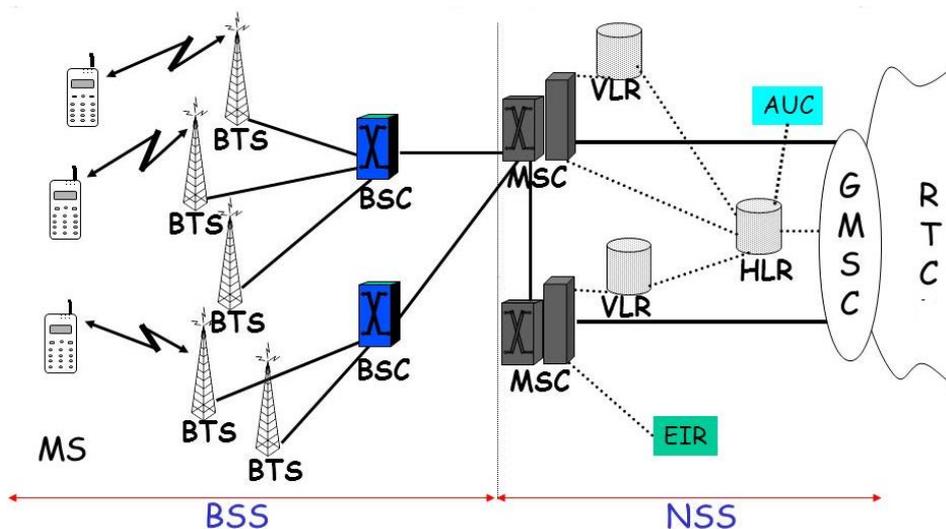


Figure I.1 : Architecture simplifiée d'un réseau GSM.

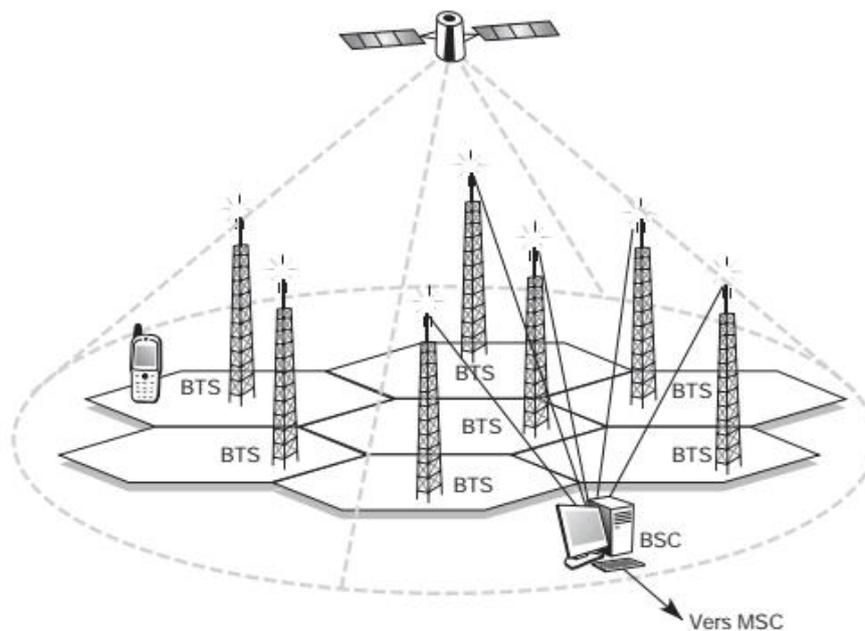
L'architecture du réseau GSM est composée de trois sous-systèmes [3] :

- **Le sous-système radio « BSS »** contenant la station mobile, la station de base (BTS) et son contrôleur (BSC) qui assure la transmission radioélectrique et la gestion de la ressource radio ;
- **Le sous-système réseau ou d'acheminement « NSS »** : Etablissement des appels et mobilité ;
- **Le sous-système opérationnel ou d'exploitation et de maintenance « OSS »** : admission sur réseau.

### I.3.1.1 Le système cellulaire

Dans un système réseau cellulaire, la région de couverture est décomposée en cellule, comme illustré à la figure I.2. La forme d'une cellule est généralement circulaire, mais elle est en réalité déterminée par la topographie de la région couverte par son antenne. Afin d'apporter plus de clarté, on peut représenter ces cellules par des hexagones. Au centre d'une cellule on retrouve un ou un ensemble d'émetteurs-récepteurs correspondant à une bande de fréquence.

La dimension d'une cellule est en fonction de la puissance de son émetteur-récepteur. Si un Émetteur-récepteur est très puissant, alors son champ d'action sera très vaste, mais sa bande de fréquence peut être rapidement saturée par des communications. Par contre, en utilisant des cellules de petites tailles, (émetteur-récepteur de faible puissance) alors la même bande de fréquence pourra être réutilisée plus loin, ce qui augmente le nombre de communications possibles.



**Figure I.2 :** Système cellulaire dans les réseaux mobiles.

Dans la conception d'un réseau cellulaire, il faut considérer les aspects suivants :

- La topographie (bâtiments, collines, montagnes, etc.) ;
- La densité de la population (ou de communications) pour établir la dimension de la cellule ;
- Deux cellules adjacentes ne peuvent utiliser la même bande de fréquence afin d'éviter les interférences ;
- La distance entre deux cellules ayant la même bande.

### I.3.1.2 Equipements et leurs fonctions dans un réseau GSM

Le tableau I.1 regroupe tous équipements et leurs fonctions dans un réseau GSM.

NOM	FONCTION
<b>BTS</b>	Station de base réceptionnant les appels entrant et sortant des ME.
<b>BSC</b>	Contrôleur des stations de base
<b>MSC</b>	Commutateur de réseau.
<b>HLR</b>	Base de données sur l'identité et la localisation des abonnés.
<b>AUC</b>	Centre d'authentification des terminaux sur le réseau.
<b>VLR</b>	Base de données sur les visiteurs du réseau.
<b>EIR</b>	Enregistreur des identités des équipements
<b>OMC</b>	Centre d'exploitation et de maintenance du réseau de l'opérateur.
<b>MS</b>	Station mobile
<b>SIM</b>	Carte SIM identifiant l'abonné sur un réseau défini

**Tableau I.1** : Équipements GSM et leurs fonctions.

### 1.3.1.3 Les bandes de fréquences

Les systèmes de téléphonie mobile qui se divisent en deux types de réseaux, GSM 900 et DCS (Digital Cellular System) 1800, fonctionnent respectivement à des fréquences voisines de 900 et 1800 MHz. Dans le réseau GSM 900, les fréquences de transmission du téléphone mobile vers l'antenne-relais sont situées entre 890 et 915 MHz, tandis que les fréquences de transmission dans la direction opposée se situent entre 935 et 960 MHz.

Dans la terminologie de réseau GSM, le lien de communication du téléphone mobile vers l'antenne-relais est appelé « Voie montante ou *Uplink* », par contre la transmission de l'antenne relais vers le téléphone mobile est, également, appelée « Voie descendante ou *Downlink* ».

La communication entre le téléphone mobile et la station de base (BTS) se fait toujours sur deux fréquences distinctes espacées de 45 MHz. En d'autres termes, lorsque la BTS envoie ses données, elles sont transmises à la fréquence  $f_1$ , le mobile enverra ses données vers la BTS à la fréquence  $f_1$  moins 45 MHz [4].

Spécification	GSM-900	GSM-1800
Bande-spectrale-canaux descendant	935 à 960 MHz	1805 à 1880 MHz
Bande spectrale - canaux montant	890 à 915 MHz	1710 à 1785 MHz
Espacement entre les canaux d'un couple	45 MHz	95 MHz
Nombre de canaux (multiplexage FDMA)	124	374
Largeur des canaux	200 MHz	200 MHz
Multiplexage TDMA	8	8
Nombre de canaux logiques	992	2992

**Tableau I.2** : Allocation des fréquences (GSM, DCS) [5].

### 1.3.2 Le réseau GPRS

Un réseau GPRS (*General Packet Radio Service*) est en premier lieu un réseau IP. Le réseau est donc constitué de routeurs IP. L'introduction de la mobilité nécessite par ailleurs la précision de deux nouvelles entités [6] :

- Le nœud de service – Le SGSN.
- Le nœud de passerelle – Le GGSN.
- Une troisième entité – Le BG qui joue un rôle supplémentaire de sécurité.

La mise en place d'un réseau GPRS va permettre à un opérateur de proposer de nouveaux services de type « Data » à ses clients. Le GPRS est en mode paquets.

L'architecture du GPRS est illustrée à la figure I.2. Cette architecture est composée de divers types de nœuds :

- Les SGSN (*Serving GPRS Support Node*), qui sont des routeurs connectés à un ou plusieurs BSS.
- Les GGSN (*Gateway GPRS Support Node*), qui sont des routeurs acheminant le trafic vers des réseaux de données GPRS ou externes.

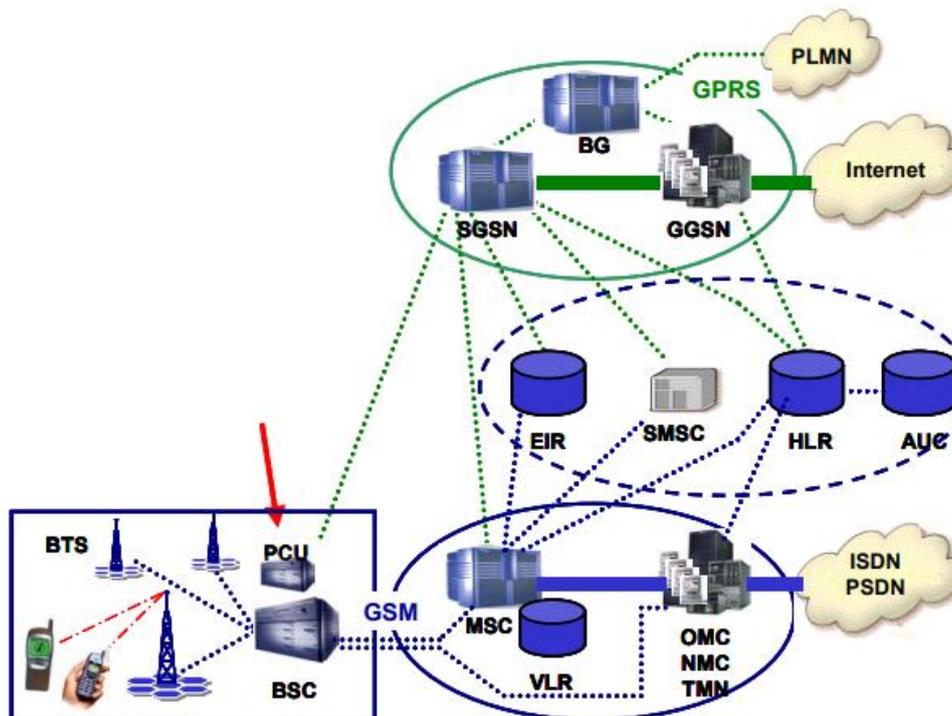


Figure I.3 : Architecture d'un réseau GPRS.

### I.3.2.1 Les équipements d'un réseau GPRS

#### a) Le nœud de service (SGSN)

Le nœud de service dénommé SGSN (*Serving GPRS Support Node*) est relié au BSS. Le SGSN est en liaison avec l'ensemble des éléments qui assurent et gèrent les transmissions radio mobile : BTS, BSC, HLR...

Le SGSN joue un rôle d'un routeur (*Gateway*), il gère les terminaux GPRS présents dans une zone donnée. Le SGSN est le « contrôleur » des terminaux GPRS qui se trouvent dans sa zone de surveillance.

#### b) Le nœud de passerelle (GGSN)

Le nœud de passerelle GPRS dénommé GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) est relié à un ou plusieurs réseaux de données (Internet, autre réseau GPRS ...). Le GGSN est un routeur qui permet de gérer les transmissions de paquets de données :

- Paquets entrants d'un réseau externe, envoyés vers le SGSN du destinataire.
- Paquets sortants vers un réseau externe, provenant d'un destinataire interne au réseau.

Les entités fonctionnelles SGSN et GGSN peuvent être facilement implantées dans un même matériel. L'ensemble comprenant les SGSN, les GGSN, les routeurs IP et les liaisons entre les équipements est appelé réseau fédérateur GPRS. Il convient de noter que chaque SGSN et chaque GGSN disposent au minimum d'une adresse IP fixe au sein du réseau [6].

### c) Le module BG pour la sécurité

Les recommandations introduisent le concept de BG (Border Gateway) qui permettent de connecter les réseaux GPRS via un réseau fédérateur et qui assurent les fonctions de sécurité pour la connexion entre ces réseaux.

Ces BG ne sont néanmoins pas spécifiées par les recommandations mais elles jouent le rôle d'interface avec les autres PLMN (*Public Land Mobile Network*) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux (entre 2 réseaux de 2 opérateurs concurrents par exemple).

### 1.3.3 La norme EDGE

La norme EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) est une évolution de la norme GSM, changeant le type de modulation et permettant ainsi d'augmenter le débit des données. Tout comme le standard GPRS, il est utilisé comme passage vers la troisième génération de réseaux mobiles (3G). On parle ainsi de 2.75G pour désigner la norme EDGE.

La technologie EDGE offre un débit maximum théorique de 59,2 kb/s (codage MCS9) par time slot, ce qui peut être comparé aux 20 kb/s offerts par le GPRS (codage CS4). Ceci est qui valent pour la plus part des terminaux EDGE à un débit max théorique de 236 kb/s. Cela permet à EDGE de se positionner comme un *bearer* intermédiaire en termes de performances, qui s'intercale entre le GPRS et l'UMTS.

L'un des avantages de la norme EDGE est sa capacité à s'intégrer rapidement aux réseaux GSM existants. En mode d'émission, un téléphone mobile EDGE utilise des bandes de fréquences qui, selon les opérateurs, occupent de 5 à 12,5 MHz dans la plage de 876 à 915 MHz (liaison montante). En mode de réception, les bandes de fréquences allouées s'étendent de 921 à 960 MHz (liaison descendante). Pour chaque opérateur, il y a une séparation duplex d'environ 30 à 40 MHz entre le canal d'émission et le canal de réception.

Ces bandes de fréquences sont divisées en portions de 200 kHz (écart entre les porteuses RF), ce qui correspond aux canaux de transmission. Dans la bande GSM 900, il y a environ 200 canaux au total, répartis entre les opérateurs. Chaque canal peut accueillir jusqu'à 8 transmissions simultanées en partage temporel. Les terminaux compatibles avec la norme EDGE peuvent également utiliser la bande GSM 1800, si elle est disponible chez l'opérateur.

### 1.4 La troisième génération (3G)

La troisième génération (3G) représente une évolution majeure par rapport à la 2G sur la base de communications «voix», se sont les services mobiles qui profitent de réseaux hauts débits largement supérieurs.

### 1.4.1 Le réseau UMTS

L'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) représente une évolution majeure du réseau mobile de deuxième génération, il reconnaît automatiquement la voix et les données et adapte le débit en fonction de l'information et la qualité de service requise [8].

L'UMTS repose sur la technique d'accès multiple W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) et les fréquences allouées pour l'UMTS sont 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz, l'UMTS permet théoriquement des débits de transfert de 1,920 Mbit/s, mais en pratique, autour de 384 Kbit/s.

L'UMTS comprend deux grandes parties, l'UTRAN et le réseau cœur. L'architecture générale d'un réseau UMTS se présente comme montre la figure I.4.

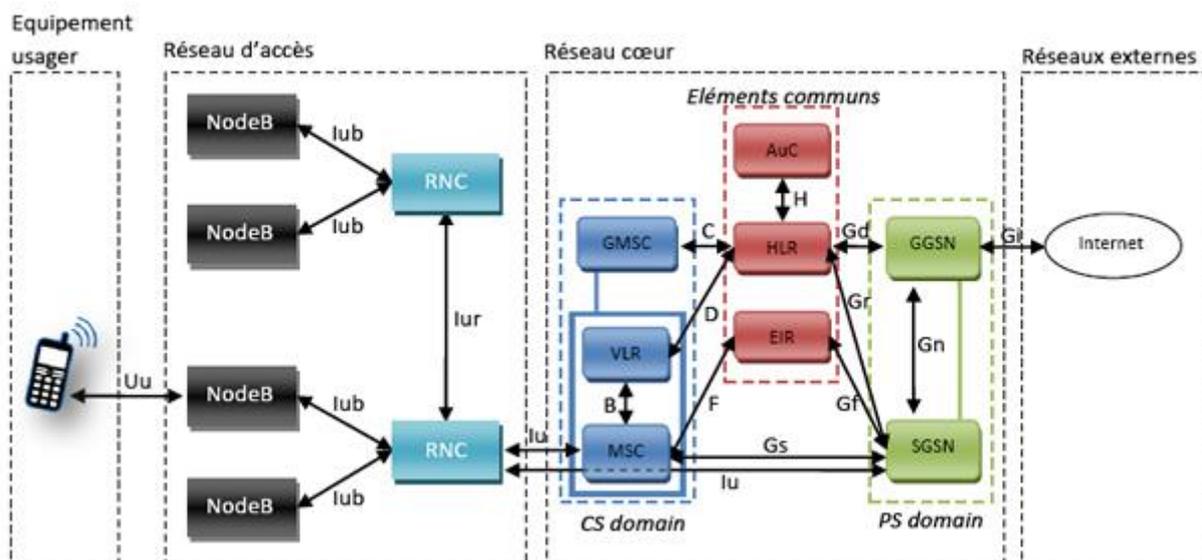


Figure I.4 : Architecture générale d'un réseau UMTS.

#### 1.4.1.1 Le réseau d'accès UTRAN

L'UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) est le réseau qui prend en charge le contrôle et la gestion des ressources radio, il permet l'échange d'information entre le terminal mobile et le réseau cœur. L'UTRAN est composé du RNC (*Radio Network Controller*) et de Nœud B correspondant respectivement aux BSC et BTS du réseau GSM. Ces deux entités forment le RNS (*Radio Network Subsystem*) [9].

- ❖ **Le Node B:** Assurer les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules de l'UTRAN.
- ❖ **Le RNC (Radio Network Controller):** Assure le routage des communications entre le Node B et le réseau cœur.

#### 1.4.1.2 Le réseau cœur

Le réseau cœur de l'UMTS est scindé en deux domaines de service.

- ❖ **Le CS (Circuit Switched) Domain :** tels que le RTCP ou RNIS.
- ❖ **Le PS (Packet Switched) Domain :** tels que le réseau Internet et d'autres réseaux publics ou privés de transmission de données.

### I.4.1.3 Techniques d'accès

Le partage des fréquences entre des différents utilisateurs est réalisé par des techniques d'accès permettant la gestion du spectre radio.

L'interface air définie par l'ETSI est appelée UTRA (*UMTS Terrestrial Radio Interface*). Elle comprend deux possibilités : le TD-CDMA et le W-CDMA. Le TD-CDMA est utilisé en TDD (*Time Domain Duplex*) pour les bandes UMTS non appariées, et le W-CDMA en FDD (*Frequency Domain Duplex*) pour les bandes UMTS appariées [8].

Le mode FDD est adapté à toutes les tailles de cellules mais n'est pas souple du tout dans un mode de transmission asymétrique, où la capacité dans un sens est différente de celle dans l'autre sens. Le mode TDD permet de bien prendre en considération les modes montants et descendants, c'est-à-dire les trafics asymétriques. Cependant, ce mode demande une synchronisation forte des stations de base et des petites cellules, en raison de temps de garde importants [9].

La technique d'accès W-CDMA utilise une bande passante de 5 MHz autorisant des débits de 144 et 384 Kbit/s. Des débits de 2 Mbit/s peuvent être atteints sous certaines conditions. Deux classes de CDMA, asynchrone et synchrone, ont été développées :

- Dans le schéma asynchrone, les stations de base ne sont pas synchronisées entre elles.
- Dans le mode synchrone, elles se synchronisent à quelques microsecondes près.

### I.4.2 La norme HSDPA

Pour offrir des à haut débit supérieurs à 2 Mbits/s par l'UMTS, le 3GPP a défini HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) dans la Release 5. Il s'agit d'une technologie d'accès radio qui permet d'atteindre des hauts débits dans le lien descendant supérieurs à 10 Mbits/s.

La technique HSDPA n'est que l'évolution logicielle de la technologie WCDMA de la Release 99. Elle est dotée d'un ensemble de propriétés dont la combinaison permet d'améliorer la capacité du réseau ainsi que le débit de données jusqu'à plus de 10 Mbits/s. Parmi ces propriétés, nous retrouvons des techniques connues et utilisées dans des standards d'évolution tel que le GSM/EDGE et que l'on résume dans les points suivants [10] :

- La technique de modulation et de codage adaptatifs AMC (*Adaptive Modulation and Coding*).
- Une méthode de retransmission hybride appelée H-ARQ (*Hybrid Automatic Repeat request*).
- Des algorithmes d'ordonnancement rapide de paquets (*Fast Packet Scheduling*).

### I.4.3 La norme HSUPA

Le HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) est une technologie de téléphonie mobile compatible avec la troisième génération (3G), dont les définitions ont été diffusées par le 3GPP dans la sixième édition du référentiel UMTS.

Le HSUPA est une évolution de la technologie HSDPA. Il est considéré comme son successeur direct. Le débit de transmission "Uplink" du HSUPA est également de l'ordre de 14 Mbit/s, tout comme celui du HSDPA. L'avantage du HSUPA réside dans sa capacité à transférer des contenus de grande taille, notamment des éléments multimédias, vers les téléphones mobiles et les interfaces de partage via les réseaux Internet 3G.

Le HSPA est une innovation qui facilite la prise en charge des applications Web 2.0 via les réseaux mobiles, ainsi que l'affichage de pages adaptées. La technologie d'adaptation des sites est réalisée grâce à des plateformes de développement collaboratif telles que MySpace.

## 1.5 La quatrième génération (4G)

La 4G est la quatrième génération de réseau mobile. Elle est la norme succédant à la 3G. La 4G c'est la norme des standards de réseau mobile permettant des débits jusqu'à 50 fois plus important que la première norme.

### 1.5.1 Définition des réseaux LTE

Les services de communications mobiles suivent une évolution similaire à celle des services fixes, avec une transition rapide vers un accès à très haut débit. Les réseaux 4G sont ceux qui répondent aux demandes croissantes des utilisateurs mobiles, aussi bien en termes de qualité des services offerts que de capacité de gestion du trafic par les réseaux.

Ces fréquences sont destinées au déploiement de réseaux mobiles à très haut débit, pour apporter au consommateur une capacité et une qualité de services supérieures aux offres actuelles d'internet mobile. La technologie LTE (*Long Term Evolution*) offre aux utilisateurs des débits de plusieurs dizaines de Mbit/s, largement supérieurs aux performances des technologies 3G et 3G+ (HSPA) actuellement déployées, ainsi que des latences plus faibles favorisant une meilleure interactivité.

Avec la technologie 4G, on observe une tendance vers la transmission de toutes les informations, à la fois la voix et les données, via le protocole IP (*Internet Protocol*), qui est le même protocole utilisé sur Internet. Pour les fournisseurs, c'est plus facile et moins cher à gérer et ça facilite aussi le développement d'application multimédia. Cette génération permet des vitesses de téléchargement plus rapides et des temps de latence plus courts [11].

Selon les critères de l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui établit les normes pour les réseaux cellulaires, le vrai 4G devrait offrir des vitesses de téléchargement de 100 Mbit/s pour un utilisateur en mouvement et de 1 Gbit/s en mode stationnaire.

### 1.5.2 La technologie LTE

La technologie LTE (*Long Term Evolution*) repose sur un réseau de transport utilisant la commutation de datagrammes IP. Contrairement à la 3G, qui a un mode d'acheminement de la voix en mode circuit, le LTE ne prévoit pas de mode d'acheminement spécifique pour la voix, à l'exception de la VoIP (Voice over IP).

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz), un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « *Downlink* », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s.

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées à même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et latence) par rapport aux réseaux 3G existants. Le multiplexage OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée [12].

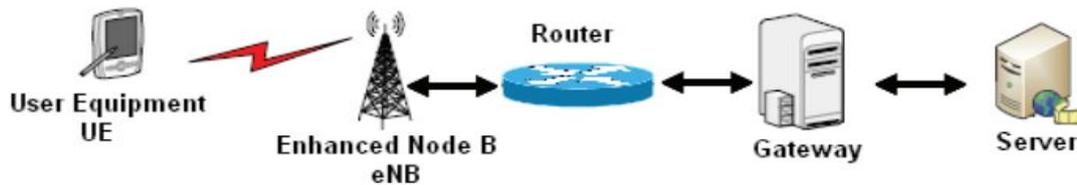


Figure I.5 : Présentation générale sur le système LTE.

### I.5.3 Architecture du LTE

La technologie LTE apporte une efficacité spectrale, une amélioration de débit ainsi qu'une augmentation de couverture. L'architecture générale d'un réseau LTE comporte deux générations de réseaux, c'est à dire la 3G et la LTE considère (4G) comme nous montre la figure I.6.

On remarque qu'il y a une grande différence entre les générations (3G et 4G) en ce qui concerne l'interface, les équipements c'est à dire qu'il y a eu une simplification. Par exemple seul l'eNodeB de la LTE a la même fonctionnalité que la partie UTRAN de la 3G.

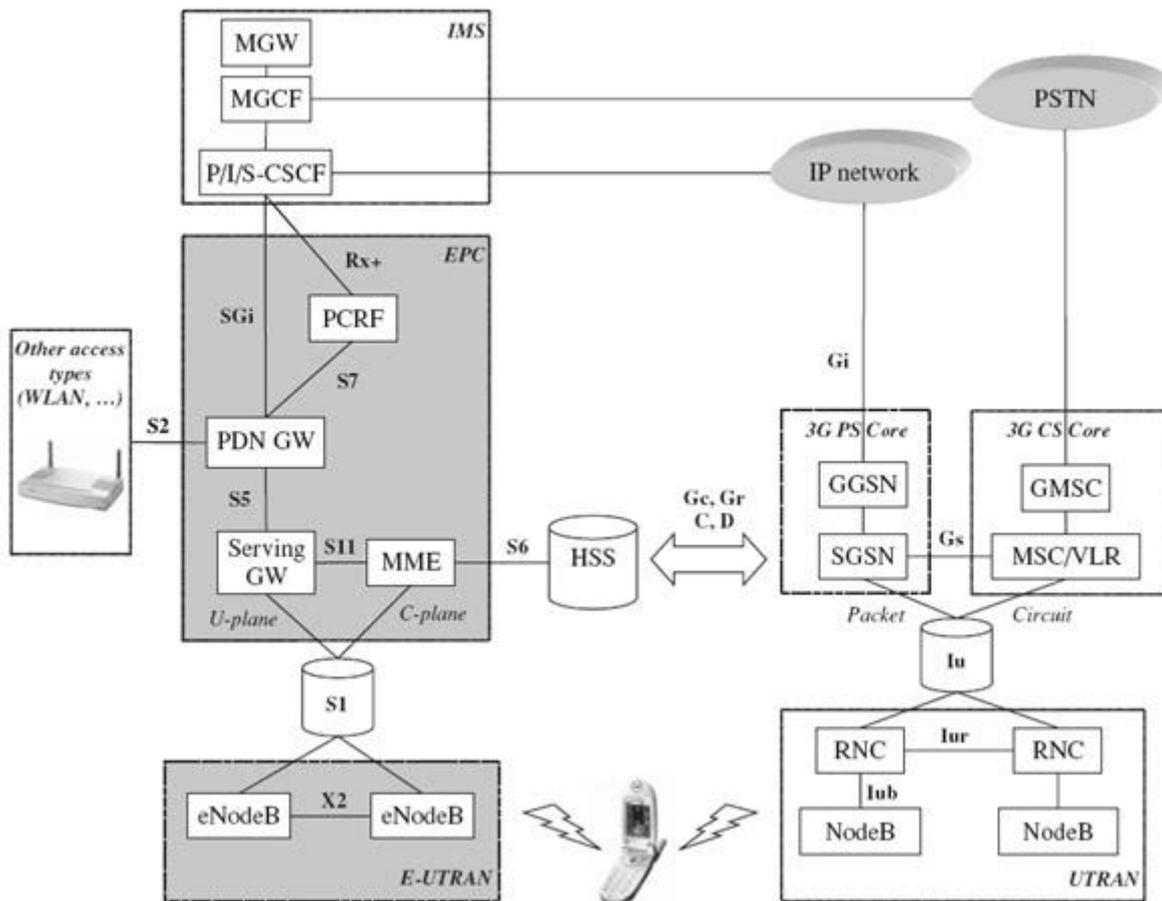


Figure I.6 : Architecture générale d'un LTE.

De même que ces précédentes, elle est caractérisée par son architecture connus sous le nom d'EPS (Evolved Packet System), qui comporte [12] :

- Un réseau d'accès : l'e-UTRAN (evolved UTRAN).
- Un réseau cœur : l'EPC (Evolved Packet Core), Réseau Tout-IP.

L'IMS (*IP Multimedia Subsystem*) est une architecture récemment appliquée dans les réseaux mobiles qui permettent aux opérateurs de télécommunications d'offrir des services sur IP à valeur ajoutée.

#### 1.5.4 Le LTE Advanced

LTE-Advanced est donc une évolution de la norme LTE avec des compléments fonctionnels qui permettent une introduction progressive des nouvelles fonctions dans les réseaux LTE préexistants. Les stations de base eNodeB, compatibles avec les normes LTE-Advanced restent compatibles avec les terminaux simplement LTE, y compris pour les bandes de fréquences agrégées (utilisées en mode « *Carrier Aggregation* »).

Les réseaux LTE-Advanced utilisent, comme le LTE, un « cœur de réseau » basé sur les protocoles IPv6 utilisé pour transmettre la voix (protocole VOLTE) et les données. Pour la partie radio e-UTRAN, le LTE-Advanced utilise les codages OFDMA (liaison descendante) et SC-FDMA (liaison montante) associés à des algorithmes de récupération d'erreur de type HARQ et à des Turbo codes.

Le HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) ou Hybrid ARQ est une technologie qui vise à assurer une transmission fiable des données sur un canal de communication susceptible de générer des erreurs de transmission. Cette technologie combine les principes de la retransmission automatique (ARQ) et de la correction d'erreurs en avant (FEC, *Forward Error Correction*).

Le LTE-Advanced propose également l'utilisation de deux modes de multiplexage : FDD (*Frequency Division Duplexing*) et TDD (*Time-Division Duplexing*). Dans le mode FDD, deux bandes de fréquences distinctes sont utilisées, l'une pour l'émission et l'autre pour la réception des données. Cela permet une séparation claire des flux de données dans le domaine fréquentiel.

En revanche, dans le mode TDD, une seule bande de fréquences est utilisée, mais les ressources radio sont allouées de manière temporelle pour l'émission et la réception des données. Cela signifie que le temps est divisé en créneaux, et pendant chaque créneau, le système alterne entre l'émission et la réception.

Le réseau 4G+ basé sur la norme LTE-Advanced permet d'atteindre des débits descendants de l'ordre du 1 Gbits/s. Une telle expérience utilisateur est possible grâce à l'introduction du « *carrier aggregation* » (agrégations de porteuses) qui permet d'atteindre une largeur de bande de 100 Mhz maximum contre 20 pour la norme LTE.

Concrètement, deux bandes de fréquences différentes (2600 Mhz et 800 Mhz par exemple) sont mixées afin d'offrir une plus grande capacité et donc de meilleurs débits. La technologie MIMO, déjà présente dans la précédente norme, connaît une évolution : il est possible d'utiliser jusqu'à 8 antennes côté base de transmission. Le MIMO est utilisé pour écouler plus de trafic.

Avec le réseau 4G+ et la norme LTE-Advanced, de nouvelles catégories de terminaux font leurs apparitions. Il faut investir dans un terminal de catégorie 6 minimum pour profiter du réseau 4G+.

Le « *Carrier Aggregation* » a ses limites ; en effet, de tels débits peuvent être atteints à condition d'être dans une zone couverte par les 2 bandes de fréquences. Exemple : si l'utilisateur sort du rayon de couverture 2600 Mhz, et qu'il ne reste qu'une couverture 4G 800 Mhz, le mobile repassera en 4G LTE avec un débit moindre [12].

## I.6 La cinquième génération (5G)

La 5G, ou 5G NR (*New Radio*) est, comme son nom l'indique, la 5ème génération de communications mobiles qui va donc succéder à la 4G LTE. La 5G promet de révolutionner la façon dont le monde communique. Elle utilise des antennes intelligentes grâce au *Beamforming* qui permet en effet de faire converger les ondes émises par une antenne vers un Smartphone en particulier [13].

La 5G utilise des fréquences de diffusion ultra-hautes (UHF entre 6-300 GHz), c-à-d les ondes millimétriques pour transférer rapidement d'énormes quantités de données. En sachant que la plage de diffusion est limitée, en survenant ce problème là en utilisant la technologie de *Beamforming* à travers MU-MIMO (multi-utilisateur MIMO), qui permet la diffusion continue des données sur plusieurs appareils et le processus *multi-cell handover* pour assurer des connexions solo de l'ordre de gigabit même en marche.

La figure I.7 montre les différentes techniques utilisées dans la technologie 5G.



Figure I.7 : Techniques utilisées dans la technologie 5G.

### I.6.1 L'architecture de réseau 5G

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G (AN) et d'un réseau cœur 5G. Le réseau d'accès lui-même est constitué de la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN), qui utilise la nouvelle interface radio 5G(NR), et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau cœur 5G. Les différentes entités de réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacents, qui prend en charge les fichiers QoS [13].

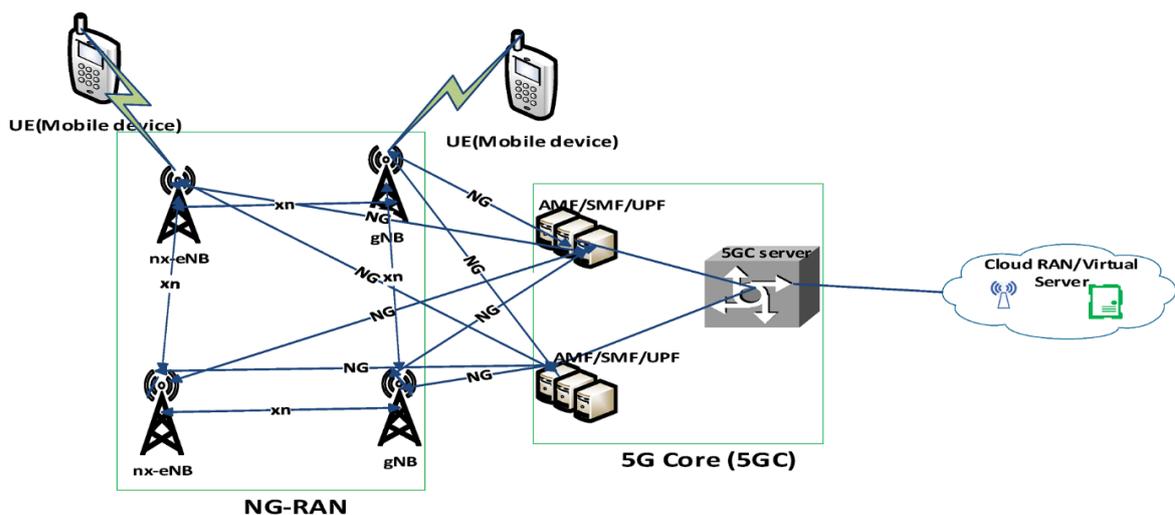


Figure I.8 : Architecture de réseau 5G.

Comme le montre la figure I.8, le réseau 5G connecte l'équipement d'utilisateur (UE) à des réseaux de données externes. LE NG est l'interface entre les stations de base et les serveurs de fonctions réseau 5G,

elle constitue par une séquence de tunnels (NG) dans le 5GC plus un ou plusieurs porteurs radios sur l'interface radio. Cet ensemble de "tubes" relie finement le UE à ses fonctions de contrôle ainsi que le réseau de données externe pour l'échange de trafic d'utilisateur.

le NG-RAN s'agit d'un ensemble de stations de bases 5G, appelées gNBs, qu'elles sont connectées au 5GC à travers un ensemble d'interfaces logiques. Les gNBs peuvent être interconnectées à travers l'interface Xn pour améliorer les fonctions de mobilité (*handover*) et de gestion (coordination d'interférences intercellulaires) [13].

## 1.7 La sixième génération (6G)

La 6G (sixième génération sans fil) est le successeur de la technologie cellulaire 5G. Les réseaux 6G seront capables d'utiliser des fréquences plus élevées que les réseaux 5G, offrant ainsi une capacité nettement supérieure et une latence considérablement réduite. L'un des objectifs clés de l'internet 6G sera de prendre en charge des communications avec une latence de l'ordre de la microseconde, soit une vitesse 1000 fois plus rapide ou 1/1000 de la latence actuelle d'une milliseconde [14].

Le marché de la technologie 6G est également prometteur en ce qui concerne l'amélioration de l'imagerie, de la technologie de présence et de la localisation associée à l'intelligence artificielle (IA). L'infrastructure du 6G sera capable de prendre des décisions autonomes concernant le placement optimal des ressources informatiques, y compris le stockage, le traitement et le partage des données.

### 1.7.1 Les avantages de la 6G par rapport à la 5G

La 6G devrait permettre des débits de données de 1 téraoctet par seconde. Les points d'accès pourront servir plusieurs clients simultanément grâce à l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence. Le niveau de capacité et de latence offert par les réseaux 6G permettra d'étendre les performances des applications existantes de la 5G. Cela ouvrira également de nouvelles possibilités pour prendre en charge des applications innovantes dans les domaines de la connectivité sans fil, de la cognition, de la détection et de l'imagerie.

Les fréquences plus élevées de la 6G permettront des taux d'échantillonnage beaucoup plus rapides, en plus d'offrir un débit nettement meilleur et des taux de données plus élevés. La combinaison d'ondes sub-millimétriques, qui correspondent à des longueurs d'onde inférieures à un millimètre, avec la sélectivité de fréquence pour déterminer les taux d'absorption électromagnétique relatifs, présente un potentiel important pour les avancées dans la technologie de détection sans fil.

L'informatique périphérique mobile (MEC) sera intégrée à tous les réseaux 6G, alors qu'elle doit être ajoutée aux réseaux 5G existants. L'intégration transparente de l'informatique de périphérie (*Edge Computing*) et de l'informatique centrale (*Cloud Computing*) est prévue dans le cadre d'une infrastructure combinée de communications et d'informatique. Cette convergence devrait être réalisée plus efficacement avec le déploiement des réseaux 6G. Cette approche offrira de nombreux avantages potentiels lorsque la technologie 6G deviendra opérationnelle, notamment un meilleur accès aux capacités d'IA [14].

### 1.7.2 Quand l'internet 6G sera-t-il disponible ?

La commercialisation de l'internet 6G est prévue pour l'année 2030. Cette technologie repose davantage sur le réseau d'accès radio (RAN) distribué et l'utilisation du spectre Térakhertz (THz) afin d'augmenter la capacité, réduire la latence et améliorer le partage du spectre. Bien que des discussions

préliminaires aient eu lieu pour définir les caractéristiques de la 6G, les activités de recherche et développement (R&D) ont sérieusement commencé en 2020.

La Chine, par exemple, a déjà lancé un satellite de test 6G équipé d'un système THz, tandis que des géants technologiques tels que *Huawei Technologies* et *China Global* prévoient également de lancer des satellites 6G similaires d'ici la fin de l'année 2023. Il est essentiel de résoudre de nombreux problèmes liés au déploiement des ondes millimétriques pour la 5G dans les délais impartis. L'objectif est de permettre aux concepteurs de réseaux de relever les défis associés à la 6G.

## I.8 Conclusion

Les réseaux mobiles sont des réseaux sans fil dans lesquels au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaisons filaires. Grâce à ce type de réseau, les utilisateurs abonnés ont la possibilité de rester connectés au réseau même lorsqu'ils se déplacent à l'intérieur d'une zone géographique, ce qui est communément appelé « mobilité ». Ces réseaux reposent sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques et utilisent l'interface radio comme support de transmission.

Les réseaux de communication mobile ont toujours connu une évolution continue et rapide depuis leur lancement en tant que réseaux téléphoniques. D'une génération à l'autre, les services se sont multipliés et diversifiés pour inclure les données dans un premier temps puis la vidéo et de nombreux autres services au fur et à mesure, ce que nous avons détaillé dans le présent chapitre.

Dans le chapitre suivant, nous focalisons sur le nouveau réseau 5G, qui apparaisse de nouveaux types d'objets communicants à côté des utilisateurs cellulaires classiques, où ce qu'on appelle maintenant l'internet des objets (IoT Internet of Things).

# Etude Technique du Réseau 5G II

## II.1 Introduction

La 5G est la dernière génération actuelle des réseaux mobiles sans fil qui offre des vitesses de téléchargements plus rapides, une plus grande capacité de réseau et des connexions plus fiables pour les utilisateurs mobiles et les objets connectés. La technologie 5G est conçue pour répondre à la demande croissante de données mobiles et permettre de nouvelles applications et de nouveaux services qui n'étaient pas possibles avec les réseaux précédents. Cette évolution va être déployée à chaque objet physique dans le monde et il sera connecté sur internet sous le nouveau concept « IoT » (*Internet of Things* ou Internet des objets).

La 5G ne représente pas une évolution des réseaux précédents mais elle correspond à une nouvelle fondation technologique développée pour but de soutenir les demandes croissantes des clients. Pour la première fois, l'infrastructure physique sera séparée de l'infrastructure logique ou "virtuelle". Un réseau de type « SDN » (*Software Defined Networks*) se permet le contrôle du réseau internet et de lui rendre programmable directement sous une infrastructure d'une manière à supporter des nouvelles applications ainsi que des nouveaux services d'internet.

Ce chapitre va présenter une introduction à la 5G en commençant par une explication de ses exigences, découvrir son architecture physique et en couches, ensuite une description des techniques de multiplexage de modulation et de codage sera effectuée et finalement ça va conclure par les la technologie des relais pour la 5G.

## II.2 Les exigences du réseau 5G

Pour permettre la connexion d'une très large gamme d'applications avec de nouvelles fonctionnalités et exigences, les capacités du réseau d'accès radio 5G doivent dépasser de loin celles des générations précédentes de communications mobiles.

Ces possibilités incluront la capacité massive de système, débits très élevés, la latence très basse, la fiabilité et la haute disponibilité, la consommation de coût et d'énergie de dispositif très basse, et les réseaux de rendement optimum.

### II.2.1 Grande capacité

On s'attend à ce que la demande de trafic des systèmes de communication mobile augmente considérablement [15]. Pour prendre en charge ce trafic de manière accessible, les réseaux 5G doivent fournir des données à moindre coût que les réseaux actuels. De plus, une augmentation de la consommation de données entraînera une augmentation de la consommation d'énergie du réseau. Par conséquent, la 5G doit consommer moins d'énergie que les réseaux cellulaires courants.

L'augmentation exponentielle des appareils connectés, comme le déploiement de milliards de capteurs sans fil et d'appareils similaires pour connecter des machines à grande échelle, imposera aux réseaux de prendre en charge de nouveaux paradigmes de gestion des appareils et des connexions sans compromettre la sécurité. Chaque appareil produit ou consomme certaines données, car elles sont limitées individuellement, voire collectivement impact sur le volume global du trafic. Cependant, le nombre d'appareils éventuellement connectés met sérieusement à l'épreuve les capacités du réseau et le contrôle des connexions.

### II.2.2 Débits très élevés

Chaque génération de communications mobiles à des vitesses plus élevées que la génération précédente. Dans le passé, l'essentiel de l'attention s'est porté sur le débit maximal qu'une technologie d'accès radio peut supporter dans des conditions idéales. Cependant, une possibilité plus importante est le débit qui peut réellement être fourni dans des conditions réelles dans différents scénarios de réseau 5G [16] :

- Dans certains scénarios tels qu'un environnement extérieur, intérieur et dense, le débit d'information dépassera 10 Gbps.
- Les débits de plusieurs 100 Mbps devraient généralement être réalisables dans les environnements urbains et suburbains.
- Les débits au moins de 10 Mbps devraient être accessibles presque partout, y compris des secteurs ruraux peu abondamment peuplés dans les pays développés et en voie de développement.

### II.2.3 Très basse latence

La nécessité de prendre en charge de nouvelles applications entraînera une très faible latence. Certains envisagent des cas d'utilisation de la 5G, tels que la sécurité routière et le contrôle des infrastructures critiques et des processus industriels, qui peuvent nécessiter une latence plus faible que les systèmes de communication mobiles actuels.

De nombreux services alloueront la capacité informatique et le stockage à proximité de l'interface hertzienne. Cela créera de nouvelles possibilités de communication en temps réel et permettra la fiabilité du service dans des scénarios allant du divertissement au contrôle des processus industriels.

Le temps de réponse des réseaux 5G sera divisé par 10 pour permettre le développement de nouveaux usages comme la voiture autonome ou la télémédecine [15].

### II.2.4 Fiabilité et disponibilité du réseau

Les réseaux 5G doivent également prendre en charge des connexions avec une fiabilité et une disponibilité élevée. Pour des services critiques, tels que la commande de l'infrastructure critique et la sécurité routière, la connectivité avec certaines caractéristiques, telles qu'une latence maximum spécifique devrait avoir des spécificités. Plutôt, la perte de connectivité et la déviation de la qualité des conditions de service doivent être extrêmement rares.

### II.2.5 Coût très bas et basse consommation d'énergie

Les dispositifs mobiles peu coûteux et à énergie réduite ont été un besoin du marché principal depuis les jours tôt de communication mobile. Cependant, pour permettre la vision des milliards de capteurs sans fil reliés, des déclencheurs et les dispositifs semblables, une autre étape doit être prise en termes de

consommation de coût et d'énergie de dispositif. Il devrait être possible que les dispositifs 5G soient disponible au coût très bas et avec une vie de batterie de plusieurs années sans recharge.

### II.2.6 Efficacité énergétique des réseaux

Trois raisons principales expliquent l'émergence récente de l'efficacité énergétique côté réseau [16] :

- l'efficacité énergétique est un composant important en réduisant le coût opérationnel, aussi bien qu'un conducteur pour de meilleurs nœuds dimensionnés, menant à abaisser le coût total de la propriété.
- l'efficacité énergétique permet les déploiements de réseaux protégés avec les surtensions qui se fondent sur les panneaux solaires comme alimentations d'énergie, permettant de ce fait à la connectivité sans fil d'atteindre même les régions les plus éloignées.
- l'efficacité énergétique est essentielle à réaliser l'ambition des opérateurs de fournir l'accès sans fil d'une manière soutenable et ressource plus efficace.

L'importance de ces facteurs augmentera plus loin dans l'ère 5G, et l'efficacité énergétique sera donc une condition importante dans la conception d'accès radio du réseau 5G.

## II.3 Architecture du réseau 5G

### II.3.1 Le réseau d'accès

#### II.3.1.1 Architectures du réseau d'accès pour le réseau 5G

Historiquement, les réseaux cellulaires consistaient en une station de base desservant un grand nombre d'utilisateurs. Cependant, les architectures de réseaux cellulaires modernes deviendront de plus en plus hétérogènes, pour de bonnes raisons.

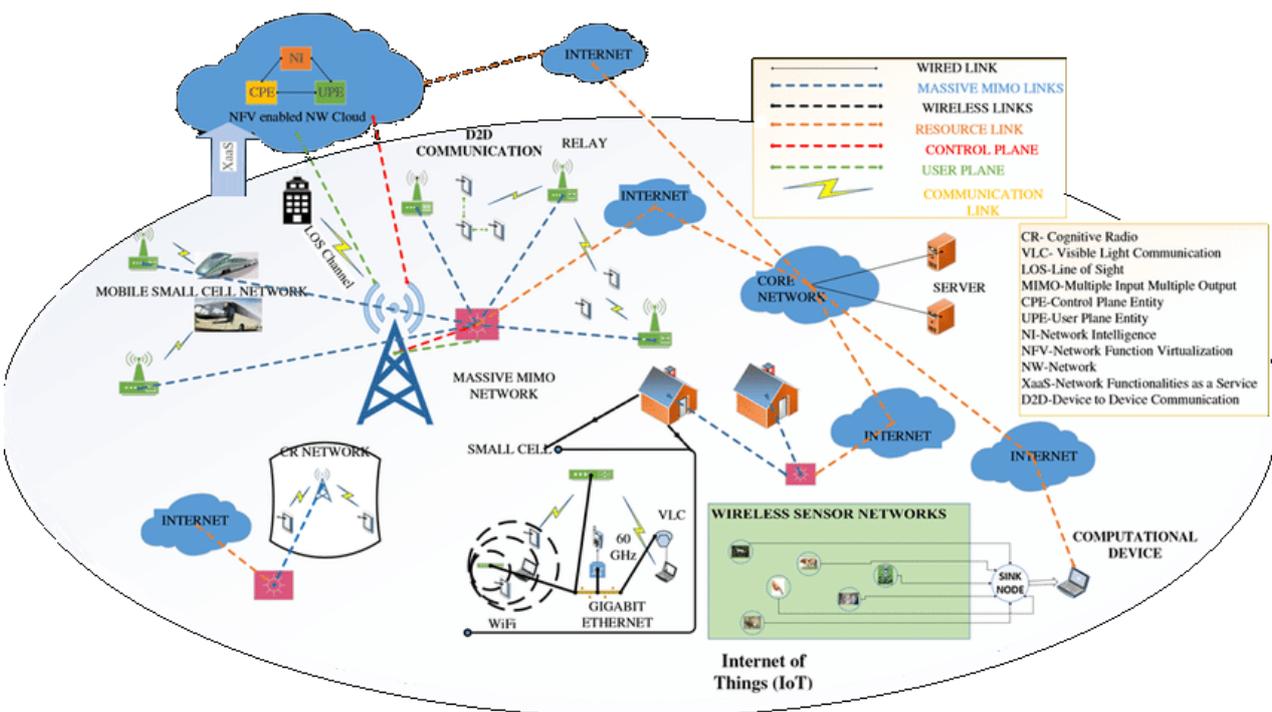


Figure II.1 : Aperçu des technologies de RAN pour 5G.

Dans ces réseaux hétérogènes, également connus sous le nom de “HetNets”, les stations de base (macro-cellule) sont souvent augmentées avec un grand nombre de petites cellules comme les femto-cellules en utilisant des relais. Ces petites cellules sont en fait des stations de base miniatures qui peuvent être utilisées afin d’améliorer la couverture dans des environnements difficiles et d’augmenter la capacité du réseau.

En fait, ces évolutions dans la topologie réseau sont plus avantageuses dans la communication sans fil car on peut maintenant, grâce à la réduction de la taille des cellules, songer à utiliser une gamme de fréquences plus élevées qui n’étaient pas viables, à l’époque, à cause des problèmes de propagation sur la distance [17].

L’architecture de la technologie du réseau 5G se compose principalement donc de stations de base (BS : *Base Station*), des relais (RS : *Relay Station*) et des stations mobiles (MS : *Mobile Station*). La station de base joue le rôle d’une antenne centrale chargée de communiquer et de desservir les relais, et les relais qui, à leur tour, servent les clients. La figure II.1 représente l’architecture générale d’un réseau d’accès radio RAN (*Radio Access Network*) du réseau 5G [17] :

### II.3.1.2 Les nouveaux éléments du réseau d’accès de réseau 5G

#### a) Intégration d’accès « Backhaul »

Le principe de fonctionnement des réseaux courants est simple :

- Une station émettrice (station de base) émet des ondes radio (hertziennes), qui sera captée par les abonnés. Pourtant pour le réseau 5G, on introduit l’accès « Backhaul ».
- La communication entre la station de base et les abonnés peut prolonger avec une/ou plusieurs stations de relais qui jouent le même rôle que la station de base.
- C’est le lien entre une station de base et un relais ou entre deux relais qu’on dit « Backhaul », comme montre la figure II.2.
- Les solutions « Backhaul » fonctionnent typiquement dans des conditions de ligne de vue directe (LOS : *Line-Of-Sight*) en utilisant la technologie par radio de propriété industrielle qui utilise les plus hautes bandes de fréquence.

À l’avenir, le lien d’accès entre station de base et EU (ou abonnés) se prolongera également à des fréquences plus élevées.

En outre, pour soutenir des déploiements de basse puissance denses, le « Backhaul » sans fil devra se prolonger à la couverture non ligne de vue (NLOS : *Non Line-Of-Sight*), conditions semblables pour accéder à des liens.

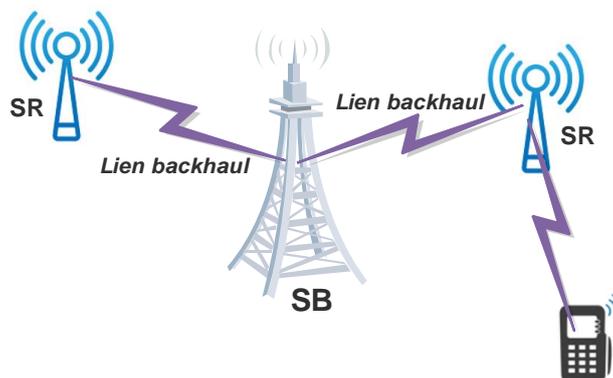


Figure II.2 : Exemple d’un lien Backhaul 5G.

Pour 5G, le lien d'accès sans fil et le « Backhaul » sans fil ne devraient pas donc être vu en tant que deux entités séparées avec les solutions techniques séparées. Plutôt, le « Backhaul » et l'accès devraient être vus en tant que solution intégrée d'accès sans fil capable à employer la même technologie de base et utiliser le même spectre. Ceci mènera à une utilisation globale plus efficace de spectre aussi bien que l'opération réduite et effort de gestion.

### b) Communication directe entre dispositifs (ou EUs ou objets)

La possibilité de communication directe entre dispositifs ou « Device to Device » (D2D) a été récemment présentée en tant que prolongation selon les caractéristiques de LTE, alors que le réseau 5G aussi l'utilise en tant que relais pour prolonger l'assurance de réseau. La communication D2D dans le contexte de 5G devrait être une partie intégrale de la solution globale d'accès sans fil, plutôt qu'une solution autonome.

La communication directe entre dispositifs peut être employée pour débarquer le trafic, d'augmenter l'efficacité globale du réseau d'accès sans fil. En outre, afin d'éviter l'interférence non contrôlée à d'autres liens, la communication directe entre dispositifs devrait être sous la commande de réseau. Ceci est particulièrement important pour le cas de communication D2D dans le spectre autorisé [17].

La figure II.3 montre un modèle de réseau 5G et partage de sous-bandes dans les communications dispositif à dispositif ou D2D.

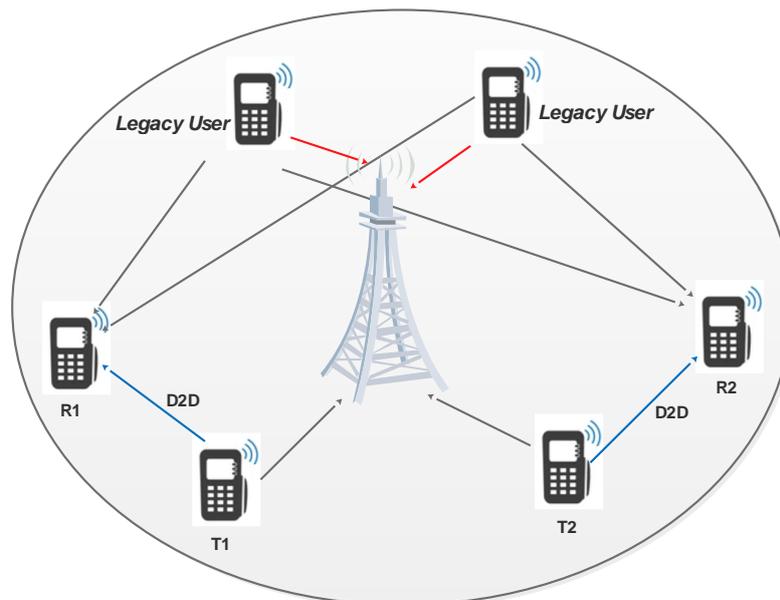


Figure II.3 : Communication dispositif à dispositif.

### II.3.2 L'architecture de réseau 5G et ses services

Un réseau 5G est composé d'un réseau d'accès 5G (AN : Access Network) et d'un réseau cœur 5G. Le réseau d'accès lui-même est constitué de la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN : New Generation Radio Access Network), qui utilise la nouvelle interface radio 5G (NR : New Radio), et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau cœur 5G. Les différentes entités de réseau sont connectées par un réseau de transport TCP/IP sous-jacents, qui prend en charge les fichiers QOS [18].

Comme le montre la figure II.4, le réseau 5G connecte l'équipement d'utilisateur (UE : User Equipment) à des réseaux de données externes. La session PDU représente le service de connectivité 5G, elle constitue par une séquence de tunnels NG dans le 5GC plus un ou plusieurs porteurs radios sur l'interface radio. Cet

ensemble de "tubes" relie finement le UE à ses fonctions de contrôle ainsi que le réseau de données externe pour l'échange de trafic d'utilisateur.

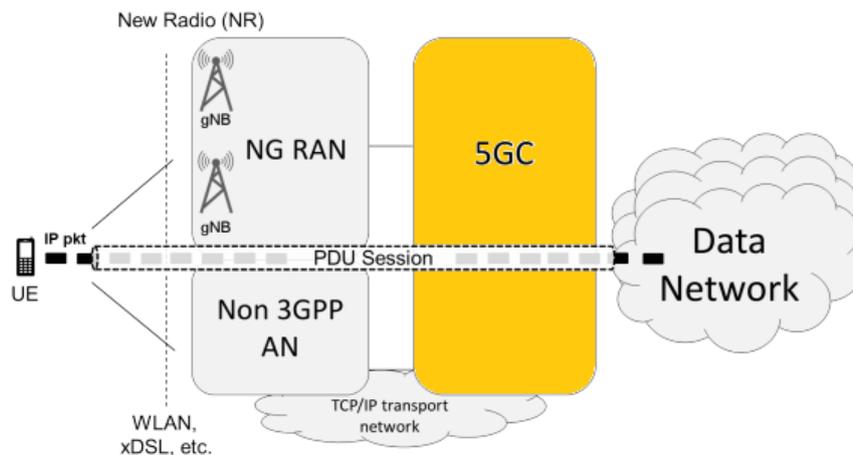


Figure II.4 : L'architecture de réseau 5G.

Une session PDU est très similaire à un porteurs EPS à LTE, sauf pour le modèle QOS et les unités de données des utilisateurs supportées. En effet, une session PDU peut transporter non seulement les paquets IP de l'utilisateur mais aussi l'Ethernet où les cadres non survenus, permettant ainsi une communication de la couche-2 entre les groupes d'UE.

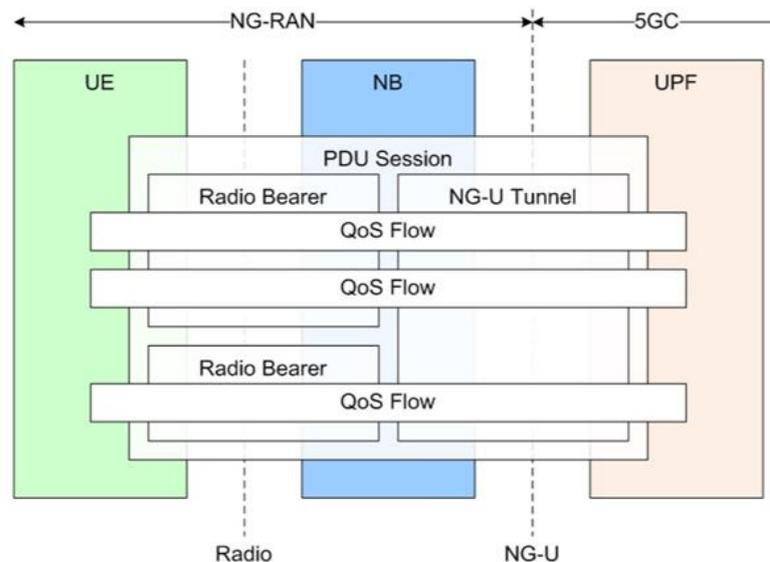


Figure II.5 : Session PDU et flux QoS : plan utilisateur (UP).

Le modèle 5G est basée sur le nouveau concept de flux de QOS, où un flux est la plus grande granularité de la différenciation QOS [1]. Les différents flux de QOS peuvent appartenir à une seule session PDU comme montre la figure II.5.

La figure II.6 montre les divisions entre les fonctions 5G exécutées dans le NG-RAN et le 5G cœur, en bordure, le NG-RAN est le responsable de l'établissement, la maintenance et la libération des parties des sessions PDU qui traversent l'interface radio. Il face le problème de l'insuffisance physique (ex : interférences, réduction énergétique etc.), les handover inter gNB, et le multiplexage de la session (planification). Les fonctions de 5GC gèrent les parties restantes des parties PDU ainsi que tous les autres processus non liés à l'accès radio (gestion de la mobilité, sécurité adresses IP, allocation etc.) [18].

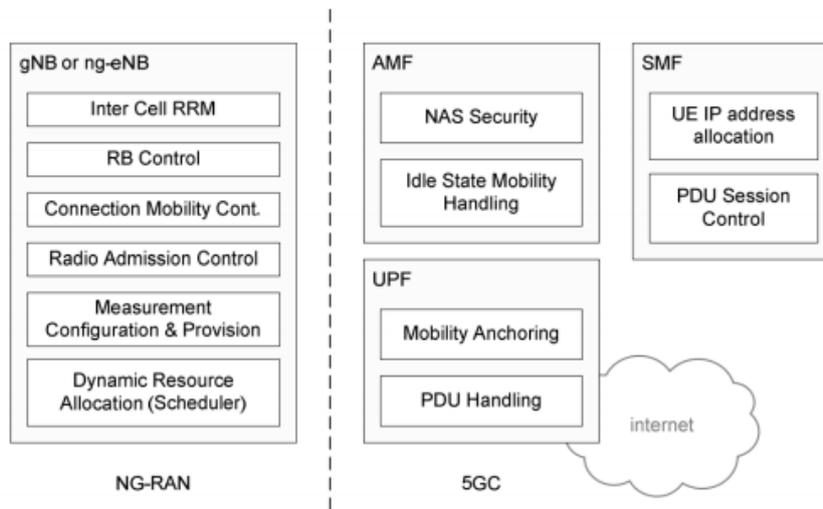


Figure II.6 : La séparation fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC.

### II.3.2.1 New Generation Radio Acces Network (NG-RAN)

Le NG-RAN s’agit d’un ensemble de stations de bases 5G, appelées gNBs, qu’elles sont connectées au 5GC à travers un ensemble d’interfaces logiques. Les gNBs peuvent être interconnectées à travers l’interface Xn pour améliorer les fonctions de mobilité (handover) et de gestion (coordination d’interférences intercellulaires). L’architecture de NG-RAN est représentée dans la figure II.7,

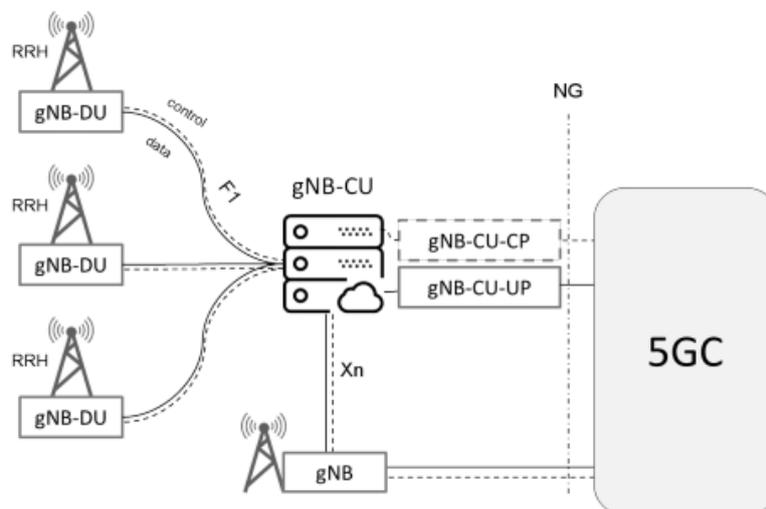


Figure II.7 : Architecture de NG-RAN.

Le fonctionnement de la gNB est parfois réparti. Dans ce cas, l’architecture résultante est formée par une unité centrale (gNB-CU) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) et connecter à une carte radio distante (RRH). L’unit centrale est encore divisée en deux parties, une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l’autre pour les fonctions de plan d’utilisateur (gNB-CU-UP).

### II.3.2.2 5G Core Network (5GC)

La décomposition des fonctions exécutées par les nœuds de réseau des générations précédentes a conduit à une architecture 5G complètement définis en termes de fonctions de réseau exposées sous formes de services. Comme se produit dans le NG-RAN, il y a une séparation entre les plans contrôle et utilisateur.

Dans le plan utilisateur il e trouve une ou plusieurs fonctions UP (UPFs), qui effectuent principalement le transfert de paquets entre les différents tunnels de NG-U (Figure II.5) qui forment la session PDU. Toutes les autres fonctions du réseau appartiennent au plan contrôle [18].

Un autre changement radical par rapport aux générations précédentes est la modélisation d'interface, qui a été passé de " l'orientation-bit point-à-point " (bit-oriented point-to-point) vers " l'orientation-web basé-service " (web-oriented service-based). En effet, 5GC à une architecture basée sur le service applicable par tout, les procédures sont définies comme des services de sorte qu'il est possible de les réutiliser comme montre la figure II.8.

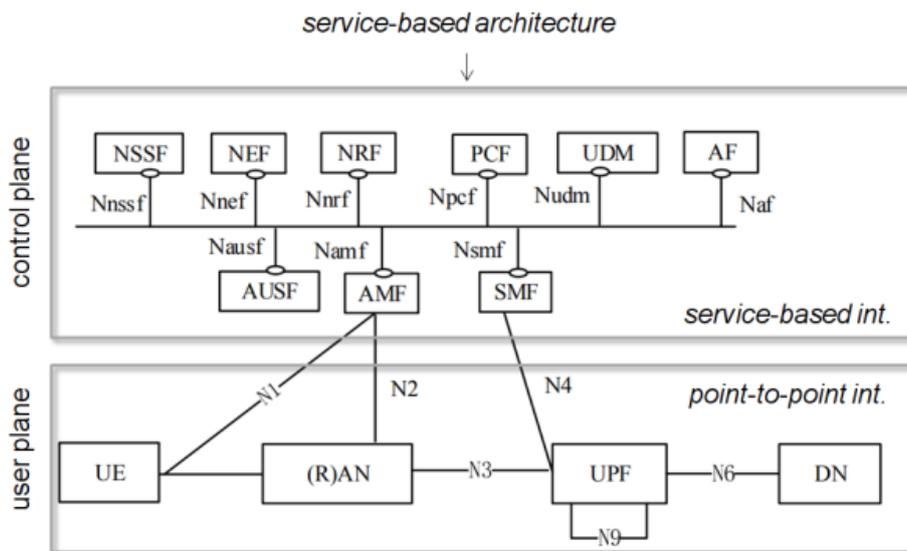


Figure II.8 : Architecture du système 5G, no-roaming.

Il existe une interface point-à-point normalisée, soit réelle où logique, entre toute paire d'entités de réseau 2g, 3G et 4g en interaction. Cette interface utilise un protocole spécial orienté-bit. Dans le core 5G, les interactions entre les entités du plan contrôle utilisent des interfaces basées sur les services prises en charge par des outils web tels que HTTP/2, REST et JSON.

### II.3.3 Architecture en couches du réseau 5G

L'architecture en couche du réseau 5G se divise en 4 parties comme montre la figure II.9.

- ❖ **Couche d'architecture sans fil ouvert :** (ou *Open Wireless Architecture*). Cette couche fonctionne comme la couche physique et la couche liaison de données de pile d'OSI (*Open System Interconnexion*).
- ❖ **Couche réseau :** Cette couche est employée pour conduire des données d'une source dotée d'une adresse IP à une destination possédant une adresse IP aussi. Elle est divisée en couches réseau inférieures et supérieures.
- ❖ **Couche transport :** Elle combine la fonctionnalité de la couche transport et de la couche session.
- ❖ **Couche application :** Elle marque les données selon le format approprié et exigé. Elle fait également le chiffage et le déchiffage des données. Elle choisit le meilleur raccordement sans fil pour le service donné.

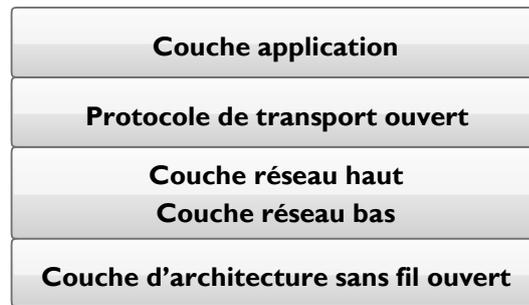


Figure II.9 : Architectures en couches du réseau 5G.

### II.3.3.1 La couche PHY et la couche MAC

La couche PHY et la couche MAC sont deux des couches les plus importantes du modèle OSI qui jouent un rôle crucial dans la transmission de données sur les réseaux de communication. Dans le contexte de la technologie 5G, ces couches sont encore plus importantes car elles utilisent des technologies de pointe pour améliorer la capacité du réseau, la qualité de la transmission et l'accès rapide des utilisateurs finaux.

Dans la figure II.10, des exemples spécifiques pour 5G pour chaque module sont énumérés au-dessous de chaque bloc. Ces derniers seront détaillés dans la section suivante.

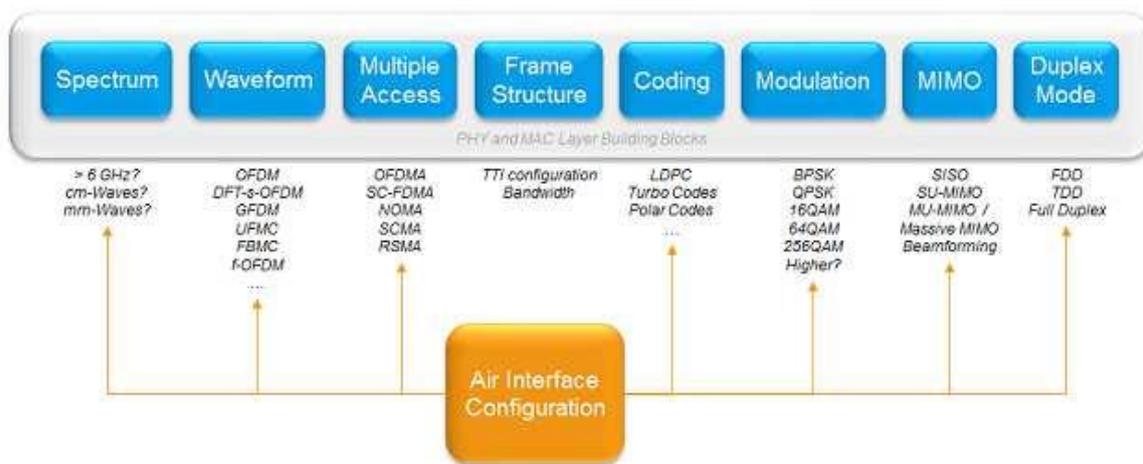


Figure II.10 : Couche PHY et couche MAC pour le réseau 5G.

## II.4 Fréquences et techniques de multiplexage

### II.4.1 Les Fréquences (cm-Waves, mm-Waves)

Les fréquences utilisées dans la technologie 5G sont réparties en deux catégories principales : les ondes millimétriques (mm-Waves) et les ondes centimétriques (cm-Waves).

- ❖ **Les ondes millimétriques** ont une fréquence de plusieurs dizaines de GHz, généralement dans la plage de 24 à 100 GHz. Ces fréquences élevées permettent une transmission de données à très haute vitesse, car elles ont une bande passante beaucoup plus large que les fréquences plus basses. Cependant, ces ondes ont une portée plus courte et ont tendance à être bloquées par des obstacles physiques tels que les murs, les arbres, etc. Par conséquent, elles nécessitent une densité plus élevée de stations de base pour assurer une couverture adéquate.

- ❖ **Les ondes centimétriques**, quant à elles, ont une fréquence inférieure à celle des ondes millimétriques, généralement dans la plage de 1 à 6 GHz. Ces fréquences ont une portée plus grande que les ondes millimétriques et peuvent facilement pénétrer à travers les obstacles physiques tels que les murs et les bâtiments. Cependant, elles ont une bande passante plus étroite que les ondes millimétriques, ce qui limite leur capacité à transmettre de grandes quantités de données à très haute vitesse.

Dans la technologie 5G, les deux types d'ondes sont utilisés en combinaison pour fournir une expérience de communication sans fil plus efficace. Les ondes millimétriques sont utilisées pour fournir une bande passante très élevée dans des zones densément peuplées telles que les centres-villes, les stades, les aéroports, etc.

Les ondes centimétriques, quant à elles, sont utilisées pour fournir une couverture à grande échelle dans les zones rurales et suburbaines où les distances de couverture sont plus grandes. En combinant les deux types d'ondes, les opérateurs de réseaux 5G peuvent offrir une couverture étendue et une capacité élevée de transmission de données pour une variété d'applications et d'utilisateurs.

#### II.4.2 Le système GFDM

Les réseaux 5G utilisent le multiplexage par répartition en fréquence généralisé (GFDM). Il s'agit d'un nouveau schéma de modulation de couche physique pour les systèmes de communication sans fil. Le système GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) [19] est une modulation non orthogonale qui offre plus de degrés de liberté grâce à l'utilisation d'un grand nombre de filtres.

Il surmonte les limitations de l'OFDM tout en préservant la plupart des avantages de lui. Les radiations hors bandes du signal GFDM transmis sont contrôlées par un filtre de mise en forme ajustable, qui est appliqué à chacune des porteuses.

Dans le GFDM, la structure des données est ajustable à deux dimensions : on regroupe les symboles des données dans un bloc pour lequel le nombre de porteuses et les durées temporelles sont ajustables.

La taille des blocs est variable, ce qui permet de pouvoir implémenter de longs filtres ou de réduire le nombre total des sous-porteuses.

Similairement à l'OFDM, le GFDM utilise aussi un préfixe cyclique pour combattre les ISI, sauf que le préfixe cyclique est utilisé pour chaque bloc, et la durée de chaque bloc peut être plusieurs fois la durée de la période symbole, et donc le préfixe cyclique est utilisé moins fréquemment que dans l'OFDM. Par conséquent, il est possible de réduire la latence sur la couche physique (PHY) de systèmes de communications.

GFDM semble comme arrangement potentiel pour accomplir les conditions et les défis des réseaux de la radio 5G. Il y a un effort continu de fournir une meilleure efficacité spectrale afin d'augmenter le taux de transmission de données. Le nombre de symboles de données transmis sont beaucoup plus que dans une trame OFDM de LTE, dans la même quantité de temps (dans une trame LTE il y a 14 symboles d'OFDM tandis que 15 symboles pour le GFDM).

Un autre aspect qui peut être vu de même sur la figure II.11 est la durée de symbole de GFDM qui est 7,5 fois plus petite que la durée de slot de LTE. En outre, si nous considérons la démodulation indépendante

pour chaque symbole, la latence est réduite par un facteur de 15 (comparé à la structure d'armature de LTE qui exige de deux slots de 0,5 ms pour démoduler les données) [20].

Dans la figure II.11, les différences entre la structure de trame LTE (OFDM) et la structure de trame proposée pour la 5G (GFDM) peuvent être observées.

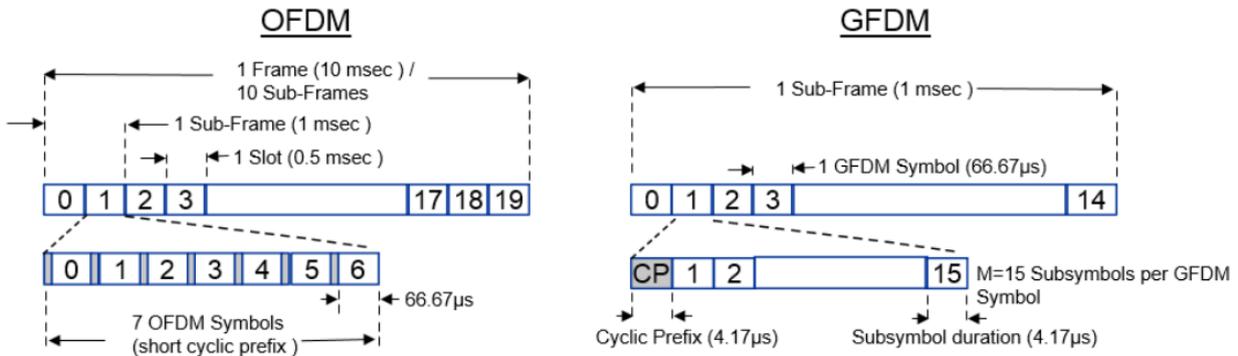


Figure II.11 : Comparaison entre trame OFDM et GFDM.

### II.4.3 La technique GFDM

GFDM est une technique de modulation pour attribuer des sous-porteuses à chaque utilisateur. C'est un nouvel arrangement d'attribution des sous-porteuses. Pour cette technique, l'attribution de sous-porteuses pour les utilisateurs peut changer dans la largeur de bande entière à la différence de l'arrangement hybride d'attribution [20].

Le nombre de sous-porteuses dans une trame dans l'arrangement proposé est fixe pour tous les utilisateurs ; cependant, elle peut changer pour les différentes trames. Supposons que le nombre de sous-porteuse de chaque utilisateur est  $I_L$  pour une trame considérée, tel que :

$$I_L = 2^x \tag{II.1}$$

Où  $x$  : est le nombre de bloc de sous porteuses assignées pour chaque utilisateur ( $x = 0, 1, \dots, \log_2(M)$ ) avec  $1 \leq x \leq \log_2(M) - 1$ , et  $M$  est le nombre des sous-porteuses pour chaque utilisateur.

Il faut noter que dans cet arrangement, la trame entière est subdivisée en blocs de sous-porteuses de longueur  $I_L$ . Avec le nombre de blocs est indiqué par  $m_1, m_2, \dots, m$  et le nombre de sous porteuse dans un bloc est indiqué par  $I_1, I_2, \dots, I_L$ .

Pour  $I_L = 2$  chaque utilisateur est donc assigné par 2 sous-porteuses consécutives dans la largeur de bande comme illustré sur la figure suivante.



Figure II.12 : Attribution des sous porteuses pour plusieurs utilisateurs en GFDM.

Par conséquent, si on a  $S$  utilisateurs, le total bande passante peut s'écrire donc comme ceci :

$$N = SM \tag{II.2}$$

## II.4.4 La technologie MIMO

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) est une technologie de communication sans fil qui utilise plusieurs antennes en émission et en réception pour améliorer la qualité et la fiabilité de la transmission des données. La technologie permet à plusieurs flux de données d'être transmis simultanément sur la même fréquence radio à l'aide de plusieurs antennes, ce qui augmente la capacité et la qualité des communications. Selon le nombre d'antennes utilisées par l'émetteur et le récepteur, les systèmes MIMO peuvent être classés en plusieurs types. Les types de systèmes MIMO les plus courants incluent [21] :

- **MIMO de diversité** : utilisation de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur ou du récepteur pour assurer la redondance du signal et améliorer la fiabilité des communications.
- **MIMO de multiplexage spatial** : qui utilise plusieurs antennes à l'émetteur et au récepteur pour transmettre plusieurs flux de données simultanément sur différentes voies spatiales.
- **MIMO de formation de faisceau** : qui utilise plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur pour concentrer les signaux dans des directions spécifiques et améliorer la qualité de la communication.

La technologie MIMO est utilisée dans de nombreuses applications de communication sans fil, notamment les réseaux Wi-Fi, les réseaux cellulaires 4G/5G et les systèmes de communication par satellite. Elle est devenue une technologie essentielle pour les réseaux sans fil modernes car elle améliore la qualité et la fiabilité des transmissions de données tout en utilisant efficacement la bande passante radio disponible.

Les avantages des communications multi-antenne sont nombreux : elles augmentent le rapport signal à bruit du signal reçu, et donc la capacité du canal. Cette capacité est fortement liée aux gains en diversité et en multiplexage. L'ajout de relais dans des communications multi-antenne augmente aussi la capacité. Les communications multi-antenne sont très efficaces pour réduire les interférences grâce à la diversité.

Massive MIMO, qui est une extension de MIMO, s'étend au-delà des systèmes hérités en ajoutant un nombre beaucoup plus élevé d'antennes sur la station de base. Le nombre "massif" d'antennes aide à concentrer l'énergie, ce qui apporte des améliorations drastiques en termes de débit et d'efficacité.

Parallèlement à l'augmentation du nombre d'antennes, le réseau et les appareils mobiles mettent en œuvre des conceptions plus complexes pour coordonner les opérations MIMO. C'est tout pour dire que ces avancées visent toutes à atteindre les améliorations de performances nécessaires pour soutenir les expériences 5G que les consommateurs attendent dans cette nouvelle ère [21].

## II.5 Les techniques de modulation et codage

### II.5.1 Les types de modulation

#### II.5.1.1 Modulation BPSK

La modulation BPSK est la forme la plus simple de la technique de modulation PSK. Elle utilise deux phases, l'une représentant la logique 1 et l'autre la logique 0. Lorsqu'un changement d'état se produit dans le signal numérique d'entrée (c'est-à-dire de 1 à 0 ou de 0 à 1), la phase de la porteuse de sortie se déplace entre deux angles séparés par  $180^\circ$ . Par conséquent, la modulation BPSK est également appelée modulation par inversion de phase (PRK) ou 2-PSK [22].

Un signal BPSK peut être défini par la formule suivante :

$$BPSK(t) = A_0 * \sin \left[ 2\pi f_0 * t + \begin{cases} 0 & \text{if } m(t) = "1" \\ \pi & \text{if } m(t) = "0" \end{cases} \right] \quad (II.3)$$

Où  $m(t)$  est l'information binaire. La figure II.13 schématise le diagramme de constellation de BPSK.

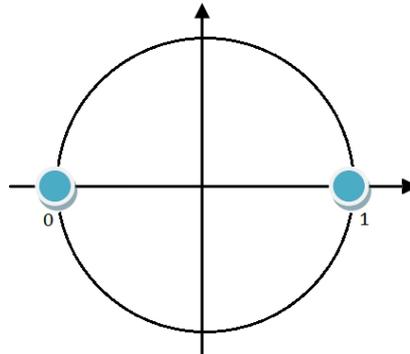


Figure II.13 : Diagramme de constellation de BPSK.

### II.5.1.2 Modulation QPSK

La modulation QPSK est une méthode de modulation PSK M-aire dans laquelle deux bits consécutifs dans les données séquence sont regroupés (Figure II.14). Cette technique permet de réduire le débit ou le taux de signalisation, ce qui a pour effet de réduire la bande passante nécessaire pour transmettre le signal sur le canal [22].

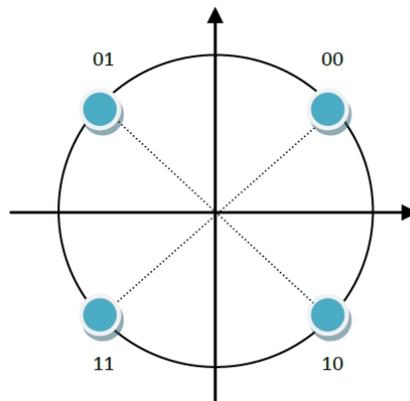


Figure II.14 : Diagramme de constellation de QPSK.

### II.5.1.3 Modulation QAM

Les modulations d'amplitude en quadrature (QAM : Quadrature Amplitude Modulation) représentent une évolution des modulations MPSK. Cette technique implique que l'amplitude et/ou la phase de la porteuse change à chaque variation de symbole.

La QAM permet d'augmenter considérablement le débit de données, en particulier avec des ordres de modulation élevés. Les formats couramment utilisés dans les systèmes de communication mobile 5G incluent 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM et 1024 QAM [23].

Cependant, une augmentation de l'ordre de modulation se traduit généralement par une pénalité de résistance au bruit. Pour cette raison, la modulation 1024 QAM est utilisée uniquement lorsque la qualité de la liaison est bonne, et est réduite à 256 QAM, puis 46QAM, etc., au fur et à mesure que la liaison se dégrade. Il s'agit donc d'un compromis entre le débit de données et la résistance au bruit [24].

Les constellations en 16-QAM ont l'allure suivante (Figure II.15).

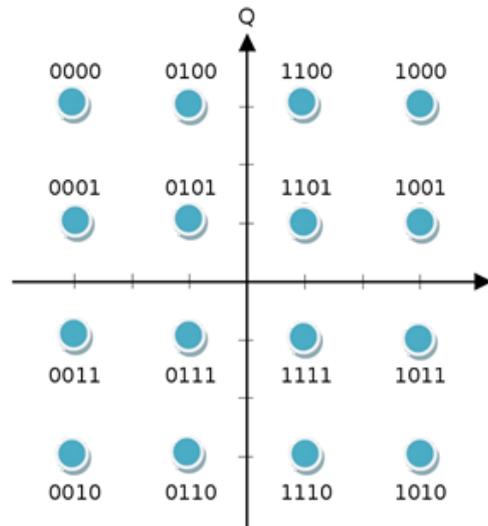


Figure II.15 : Diagramme de constellation de 16-QAM.

## II.5.2 Techniques de codage

Le codage des canaux est nécessaire pour corriger les erreurs de transmission causées par le bruit, les interférences et la faible intensité du signal. Les systèmes 3G et 4G utilisaient déjà le turbo code pour la correction d'erreurs.

La 5G introduit les deux schémas de codage de canaux permettant d'atteindre la capacité, les codes LDPC et Polar, qui n'étaient pas utilisés dans les générations précédentes de systèmes de communication mobile. Par conséquent, dans les systèmes de communication 5G, le codage des canaux a été séparé en codage canal des informations utilisateur (codage LDPC) et codage canal des informations de contrôle (codage Polar).

### II.5.2.1 Codage LDPC

Les codes LDPC (*Low-Density Parity-Check*), inventés en 1963 par Gallager, sont des codes en blocs linéaires. Le nom de LDPC vient des caractéristiques de la matrice de contrôle de parité, qui est composée plus de 0 que de 1. Parmi les avantages principaux de ce type de codage est qu'ils fournissent des performances très proches de la capacité pour beaucoup de canaux différents, aussi une complexité linéaire avec le temps dans le processus du décodage.

On peut décrire un code LDPC sous deux manières différentes : la description matricielle (comme tout code en blocs linéaire) ou sous la description graphique (le graphe de Tanner). Construire un code LDPC ayant de bonne performance n'est pas vraiment difficile parce qu'il y a une grande chance pour que des codes choisis complètement au hasard soient bons. Le problème donc provient de la complexité du bloc codeur [24].

### II.5.2.2 Codage polaire

Le code polaire, inventé par Arıkan en 2008, est une classe spéciale de codes correcteurs d'erreurs qui peut atteindre de manière prouvée la capacité du canal. Une architecture de codage fondée sur le circuit de la transformée de Fourier rapide discrète, consistant à fixer un certain nombre de bits d'entrée à 0, un algorithme de d'encodage permettant de calculer la probabilité d'un bit d'entrée connaissant les bits d'entrée précédents et les probabilités que les bits de sortie valent 1 [24].

### II.5.2.3 Turbo codes

Les turbo-codes utilisent la composition avec entrelacement de deux codes. Il s'agit souvent de codes systématiques récurrents (RSC) dans lesquels des bits de sortie sont réinjectés en entrée du codeur ; le décodage tire parti de cette propriété, d'où le nom turbo. Le fait de réinjecter des bits de sortie dans les bits d'entrée est un procédé itératif et la correction se fait alors par tour, dans chaque tour les erreurs sont de plus en plus corrigées.

Plus précisément, les corrections portent seulement sur peu de bits sont effectuées à chaque tour. Le mot corrigé étant alors réinjecté par le turbo. A partir de ce dernier une nouvelle passe de correction est initiée. Comme le mot a été déjà corrigé, les anciennes erreurs peuvent dorénavant porter sur moins de bits et être mieux corrigées.

Pratiquement le nombre d'erreurs mal corrigées ou même non détectées est drastiquement réduit. Si des mots très particuliers peuvent toujours échapper à la correction, le système d'entrelacement permet de répartir les erreurs de manière Pseudo – aléatoire, uniformément dans les mots code. Ainsi, le comportement pratique en moyenne des turbo-codes sur des entrées quelconques est très bon [25].

En résumé, le code Turbo est un type de code correcteur d'erreurs linéaires utilisé dans les systèmes de communication sans fil, y compris la 5G. Il combine deux codes convolutifs à l'aide d'un code de permutation pour améliorer la qualité de la transmission. Le décodeur turbo utilise un algorithme itératif pour détecter et corriger les erreurs de transmission, offrant une performance de correction d'erreur élevée avec une complexité de décodage raisonnable.

## II.6 Technologie de relais pour le réseau 5G

Le relais peut jouer un rôle crucial dans les réseaux cellulaires en offrant plusieurs fonctionnalités telles que l'amélioration de la topologie du réseau, l'accroissement de la robustesse du réseau et la réduction de la consommation d'énergie. Les stations de relais sont des nœuds de faible puissance qui peuvent être déployés en tandem avec des stations de base, pour former de petites cellules permettant d'améliorer la qualité et la capacité du réseau.

L'un des aspects les plus attractifs des relais est la possibilité d'utiliser des liaisons sans fil "backhaul" entre les stations de base et les relais, ce qui facilite le déploiement dans des zones à faible couverture. La communication entre les stations de base et les stations de relais est similaire à celle entre les stations de base et les équipements utilisateurs (EUs), utilisant une connexion point-à-multipoint (PMP), créant ainsi plusieurs chemins d'un SB vers différents SRs. Un SR peut également établir une connectivité PMP avec les EUs.

Le 3GPP a examiné plusieurs scénarios dans lesquels la technologie de relais peut être utile, et la façon dont les relais peuvent contribuer à atteindre les avantages mentionnés précédemment peut être factorisée. La figure II.16 montre les différents scénarios de déploiement.

- Le scénario (a) est important pour les opérateurs qui cherchent à étendre la couverture du réseau aux régions montagneuses et peu peuplées, en utilisant la communication multi-sauts de relais.
- Dans le scénario (b), les stations de relais sont installées sur des véhicules (tels que des trains et des autobus) pour améliorer la couverture et réduire la complexité de la gestion des stations mobiles.
- Le scénario (c) implique un déploiement hétérogène de relais, dans lequel les liens "backhaul" et les réseaux WLAN sont utilisés pour les connexions d'accès.

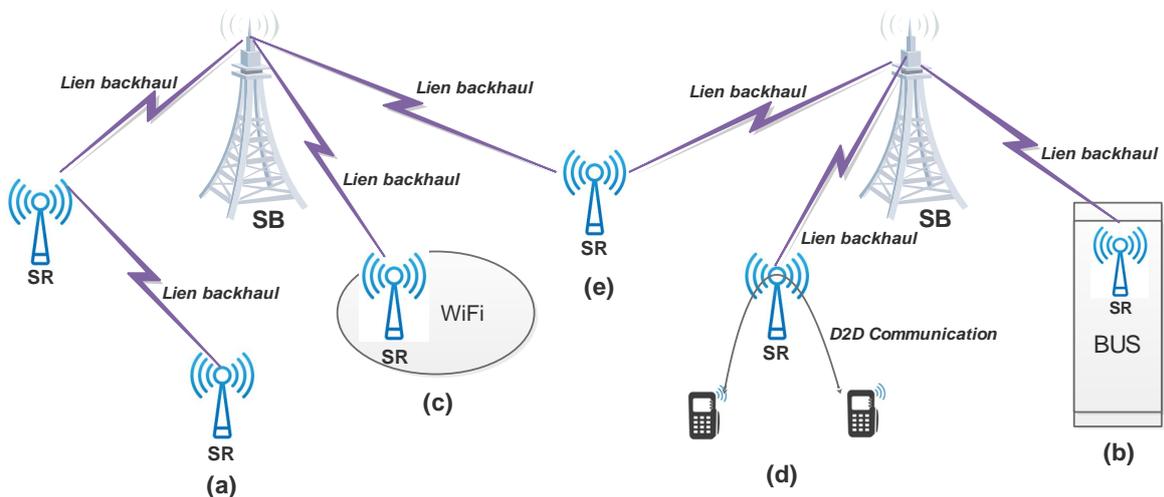


Figure II.16 : Les différents scénarios utilisant les technologies des relais.

- Dans le scénario (d), les stations de relais sont utilisées pour relayer les communications entre dispositifs (D2D) et pour décongestionner les stations de base.
- Dans le scénario (e), les relais sont connectés à plusieurs stations de base pour améliorer la couverture et équilibrer la charge sur l'ensemble des stations.

Dans chacun de ces scénarios, le type de relais utilisé peut varier en fonction des conditions spécifiques de chaque situation.

### II.6.1 Relais multi-sauts

Il y a quelques années, l'architecture de réseau cellulaire multi-saut a été proposée et étudiée pour la première fois. Les projets de recherche ont démontré les avantages de cette architecture en termes de capacité système, de fiabilité de service et de connectivité du réseau. Le concept de l'architecture multi-saut peut être considéré comme une combinaison de réseaux ad-hoc mobiles et de réseaux cellulaires. La technique d'utilisation de relais multi-sauts est schématisée par la figure II.17.

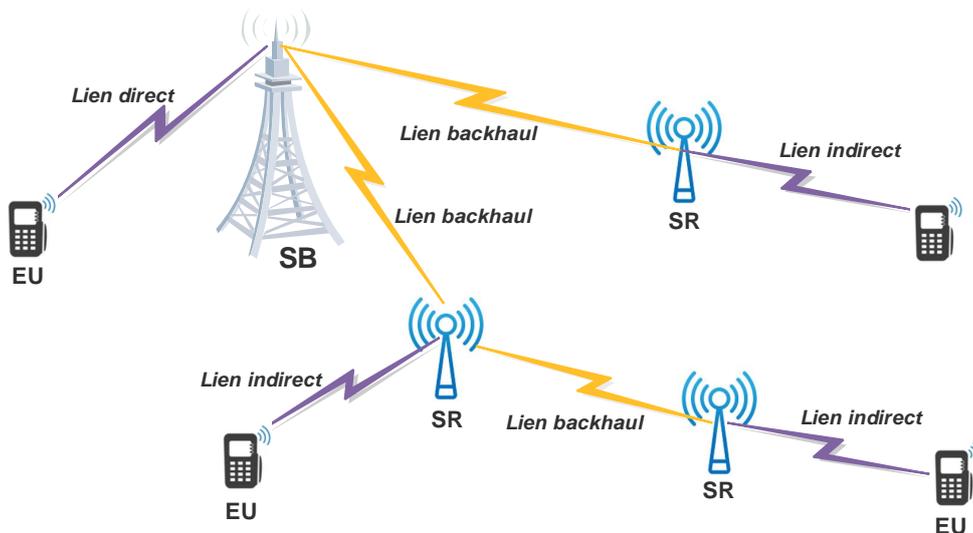


Figure II.17 : Relais multi-saut.

Bien que le 3GPP supporte actuellement une technologie de relais à un seul saut, dans laquelle le lien radio entre la station de base (SB) et l'équipement utilisateur (EU) n'utilise qu'une seule station de relais fixe ou mobile, l'utilisation de relais multi-sauts permet d'étendre les liens radio entre les SB et les EUs sur plus

de deux sauts. On peut s'attendre à ce que les conditions de propagation soient meilleures pour chaque saut que pour le lien direct utilisé dans les réseaux cellulaires conventionnels.

L'amélioration de la capacité d'assurance et de réseau est la principale motivation pour intégrer les relais multi-sauts dans le réseau 5G. Ceci vient de la réduction de la « *Path Loss* » due à l'emploi des sauts multiples pour transmettre les données vers ou provenant de la station de base correspondante. Une meilleure exécution en termes de sortie, perte de paquet, et retard peut être réalisé en soutenant la fonctionnalité multi-sauts [26].

Cependant, cette technique d'utilisation de relais multi-sauts exige plus de ressources radio pour transmettre des données par différents sauts et des interférences sont également créées à un plus grand nombre de transmissions simultanées dans un réseau. Les nouveaux arrangements d'attribution de mobilité et de ressource sont ainsi importants pour réaliser une haute QoS tout en augmentant la capacité entière de réseau.

Intégrer des relais multi-sauts dans le réseau 5G est principalement motivé par l'amélioration de la capacité d'assurance et de réseau. Cette amélioration résulte de la réduction de la perte de signal « *Path Loss* » due à l'utilisation de plusieurs sauts pour transmettre les données vers ou depuis la station de base correspondante. La fonctionnalité multi-sauts permet une meilleure performance en termes de sortie, de perte de paquets et de retard [26].

Cependant, cette technique requiert plus de ressources radio pour transmettre des données à travers différents sauts, ce qui peut créer des interférences lors de transmissions simultanées dans le réseau. Afin de garantir un haut niveau de qualité de service tout en augmentant la capacité globale du réseau, de nouveaux arrangements pour la mobilité et l'attribution des ressources sont nécessaires.

### II.6.2 Relais mobile

En raison de la forte utilisation des téléphones portables, le nombre d'utilisateurs utilisant des services sans fil à large bande dans les transports en commun augmente rapidement. La meilleure solution pour répondre à ces utilisateurs est d'installer des stations de relais mobiles, en particulier pour les utilisateurs se déplaçant en voiture (Figure II.18).

En pratique, étant donné que la position des véhicules n'est pas connue à l'avance, l'utilisation de relais mobiles est plus économique et applicable pour les utilisateurs en déplacement [27].

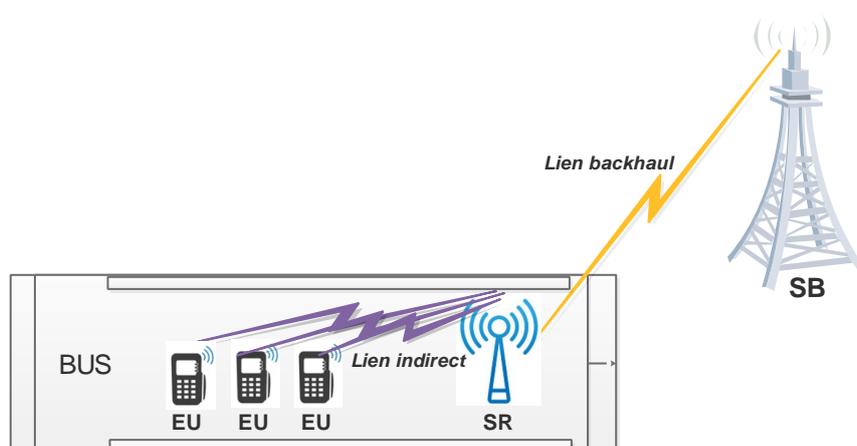


Figure II.18 : Relais mobile.

Dans une étude récente de 3GPP, le déploiement d'un scénario de relais mobile a été considéré comme une solution rentable pour répondre aux besoins des utilisateurs de données intensives dans les transports en commun.

### II.6.3 Relais hétérogène

Le réseau WiFi est actuellement très répandu, et la plupart des dispositifs mobiles et des ordinateurs portables sont équipés pour l'utiliser. Le relais hétérogène est une solution intéressante pour couvrir une zone locale spécifique avec du WiFi sur le lien d'accès "backhaul", comme représenté sur la figure II.19.

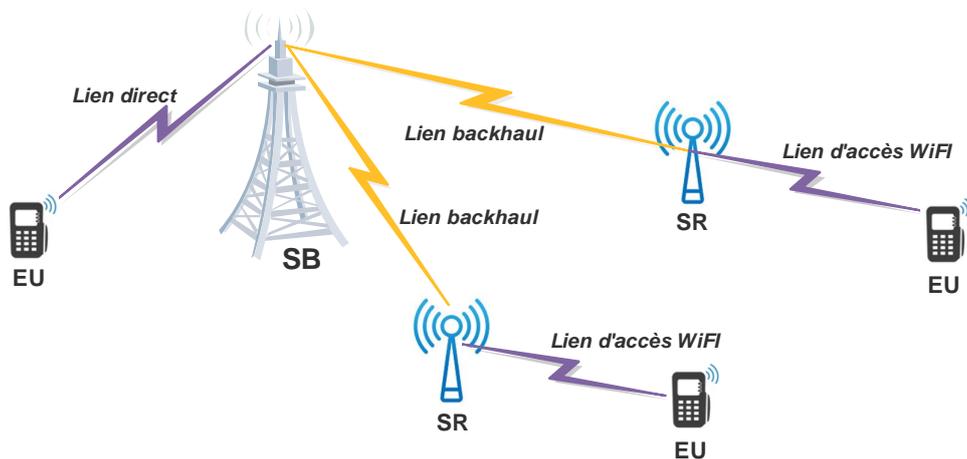


Figure II.19 : Relais hétérogènes.

L'avantage principal de l'utilisation du WiFi pour le lien d'accès est la capacité de desservir tous les utilisateurs mobiles sans avoir à souscrire au propriétaire de l'opérateur du lien "backhaul", ce qui permet d'optimiser le nombre de relais nécessaires au lieu d'en avoir plusieurs pour chaque opérateur.

De plus, les réseaux WiFi opèrent sur des bandes de fréquences radio ouvertes (ISM) pour les industries, les sciences et la médecine, ce qui rend impossible la coordination des interférences de la même manière que pour les bandes de fréquences dédiées et possédées par les opérateurs. Il est donc difficile pour les opérateurs d'offrir une qualité de service (QoS) similaire à celle de leurs propres réseaux cellulaires [28].

### II.6.4 Relais multiple « backaul »

Lorsque nous parlons de relais, le scénario courant implique une communication point à multipoint entre les stations relais (SR) et la station de base (SB), où plusieurs SR peuvent être connectés à une SB, mais chaque SR est connecté à une seule SB. Cette architecture de déploiement de relais est simple et directe, mais elle peut présenter des limitations en termes de capacité disponible sur le lien "backhaul", surtout lorsqu'il y a une cellule voisine légèrement chargée [29].

En revanche, le déploiement multiple de relais "backhaul" permet de créer plusieurs connexions entre les SR et les SB, où chaque SR peut être connecté à plusieurs SBs, comme illustré sur la figure II.20.

Bien que ce scénario de déploiement de relais soit complètement transparent pour les utilisateurs finaux et rende le système plus flexible en créant des solutions de rechange pour le partage de charge, cela nécessite des modifications au niveau de la SB, de la SR et du noyau de réseau.

Le changement le plus crucial concerne le mécanisme de coopération entre les SB, les SR et le noyau du réseau, afin de contrôler les données "uplink" qui arrivent via plusieurs interfaces SI au noyau de réseau, ainsi que les données "downlink" qui arrivent via plusieurs interfaces vers les stations relais.

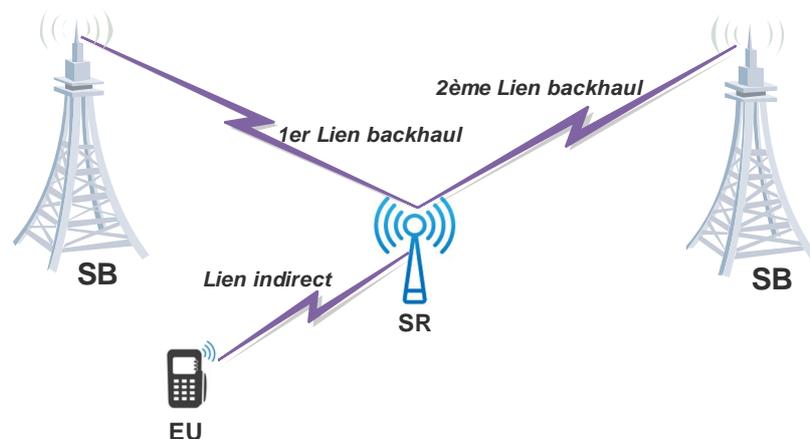


Figure II.20 : Relais multiple « backhaul ».

## II.7 Applications du réseau 5G

Contrairement aux réseaux mobiles actuels, le réseau 5G ne sera pas exclusivement axé sur la téléphonie. Cette particularité est un véritable défi et représentera la force de cette technologie. En effet, il existe plusieurs applications majeures qui nécessiteront le réseau 5G :

- La ville intelligente (smart-city) qui pourra bénéficier d'une infrastructure plus efficace, optimisée et contrôlée grâce à des réseaux de capteurs complexes.
- La maison connectée, qui grâce à la domotique et aux capteurs, pourra être gérée efficacement en termes de ressources, tout en étant utilisée et sécurisée à distance.
- Les transports connectés, notamment avec l'arrivée des voitures autonomes, qui permettront de sécuriser et d'optimiser le réseau routier.
- La santé connectée avec des avancées majeures telles que la chirurgie à distance pour les patients et les personnes à risques.

D'autres applications moins révolutionnaires mais tout aussi importantes seront également développées dans les domaines de l'industrie, la logistique et la sécurité. Le divertissement reste également une source d'applications futures pour l'utilisateur, telles que la réalité virtuelle, le jeu en réseau, le streaming vidéo en ultra haute définition, la télévision interactive en haute définition et de nombreuses autres applications inattendues.

L'amélioration du réseau mobile et de la qualité de l'expérience utilisateur sont bien entendu des objectifs clés de la 5G [30] : tout et tout le monde sera connecté partout, tout le temps.

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu l'architecture d'un réseau 5G et ces composants principaux, nous avons parlé des techniques utilisées et ces grands avantages pour l'amélioration de la capacité et la qualité de la liaison de transmission, à savoir la GFDM, MIMO et les différents types de codage. Nous avons aussi souligné certains des nouveaux services et leurs impacts technologiques.

En résumé, GFDM représente une nouvelle forme de modulation de la couche physique pour les systèmes de communication sans fil, qui offre une capacité de transmission de données supérieure à celle d'OFDM. GFDM a pour objectif de corriger plusieurs lacunes d'OFDM, telles que la forte fuite spectrale, la nécessité d'une synchronisation stricte et le rapport crête à moyen élevé de puissance.

Les relais multi-sauts peuvent offrir de nombreux avantages en prolongeant la couverture dans les zones montagneuses ou peu peuplées, où d'autres types de stations de base ne peuvent pas être utilisées. Les relais hétérogènes peuvent améliorer la couverture tout en économisant de la bande passante sur le lien d'accès. Les relais mobiles peuvent augmenter le débit des utilisateurs mobiles et leur vitesse de transmission. Ces déploiements sont susceptibles d'être largement utilisés dans les réseaux 5G et les futures technologies de communication sans fil.

Dans le prochain chapitre, nous examinerons comment dimensionner un réseau 5G en utilisant différents scénarios, différents modèles de propagation pour plusieurs types de terrain.

# Etude Analytique de Dimensionnement du Réseau 5G

## III

### III.1 Introduction

Le dimensionnement d'un réseau joue un rôle crucial dans l'orientation des stratégies adoptées par les opérateurs. Il peut être considéré comme un élément essentiel pour garantir le succès du déploiement d'un réseau. L'objectif de cette opération est de minimiser le coût de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau, en tenant compte de la répartition d'abonnés, de la situation géographique de la zone à couvrir et des contraintes de qualité de services. Pour dimensionner une zone, la première étape consiste à analyser le bilan de liaison afin d'estimer l'affaiblissement maximal entre l'abonné et la station de base.

Ce chapitre traite les principes de dimensionnement du réseau 5G, notamment la détermination de la portée maximale à l'aide de modèles de canaux (modèles de propagation) adaptés au type de terrain étudié, pour prédire la couverture d'une station de base ou d'un relais. Le bilan de liaison est également examiné. Avant cela, il est important de comprendre les environnements physiques et les types de cellules.

### III.2 Les différents scénarios dans le 5G

Dans le réseau 5G, la caractéristique principale est la prise en charge de services qui diffèrent considérablement en termes de conditions de communication. Ces services peuvent être regroupés dans des scénarios d'application partageant des conditions similaires en matière de débit, de latence et de fiabilité [31].

Dans ce qui suit, nous citons les scénarios qu'on doit considérer dans le réseau 5G.

#### III.2.1 Scénarios pour les Macro cellules

##### III.2.1.1 eMBB (enhanced Mobile Broad Band)

Ce scénario se déroule en milieu urbain et peut être considéré comme une évolution des réseaux 4G actuels, car son objectif principal est de fournir un débit plus élevé allant jusqu'à 10 Gbps. La latence de bout en bout ne devrait pas dépasser 10 ms pour le trafic multimédia. Les techniques principales considérées pour répondre à ces conditions sont les ondes millimétriques combinées à la technologie MIMO [32], ou les multipoints coopératifs (CoMP) [33] et une efficacité spectrale très élevée [34].

Le rayon de la cellule pour le Macro Urbain (UMa : *Urbain Macro*) peut atteindre jusqu'à 1000 m et peut être utilisé dans les zones urbaines. Les points d'accès sont installés au sol (par exemple, à une hauteur de 15 à 35 mètres). Les équipements utilisateurs (EUs) sont à l'extérieur ou à l'intérieur d'une maison et déployés à tous les planchers.

##### III.2.1.2 BLUF (Basse Latence Ultra Fiable)

Le BLUF vise pour les services à basse latence, où la basse latence de bout en bout doit être moins de 1 ms. Cette condition signifie que la taille globale de trame doit être limitée, et implique un contrôle d'erreur directe (FEC : *Forward Error Correction*) [35]. C'est une situation très particulière, puisqu'un FEC robuste doit

garantir un BER bas et la demande automatique de répétition (ARQ : *Automatic Repeat reQuest*) ne peut pas être utilisée à cause de la condition de latence [36].

### III.2.1.3 AIRE (Accès à l'Internet pour les régions éloignées)

AIRE exige une grande assurance cellulaire afin d'augmenter le nombre d'abonnés par cellule dans des secteurs ruraux et peu peuplés. L'attribution dynamique et réduction en fragments de spectre est un dispositif principal dans ce scénario.

La couche PHY doit être basée sur une forme d'onde qui exploite le CP (*Cyclic Prefix*) afin de réaliser une haute efficacité spectrale dans les canaux avec le long retard. En outre, le débit maximal et la latence de bout en bout qu'il peut fournir devraient être comparables à l'évolution à long terme (LTE), c'est à dire 100 Mbps et latence de 50 à 100ms

## III.2.2 Scénarios pour les Micro cellules

### III.2.2.1 UMi dans la gorge de la rue et dans une place ouverte

Les scénarios Micro Urbain (UMi : *Urbain Micro*) sont présents dans des zones telles que les gorges de rues et les places ouvertes, comme on peut le voir respectivement dans la Figure III.1 et la Figure III.2.



Figure III.1 : UMi dans la gorge de la rue.



Figure III.2 : UMi dans une place ouverte.

Le rayon de la cellule pour UMi est généralement inférieur à 100 mètres et les points d'accès (APs : Access Points) sont installés sur le sol, à une hauteur comprise entre 3 et 20 mètres. Les UEs sont à l'extérieur au niveau du sol ou à l'intérieur déployé à tous les planchers.

### III.2.2.2 InH (dans un bureau ouvert ou fermé/ou dans les centres commerciaux)

Le scénario InH (*In Home*) englobe des environnements tels que les bureaux ouverts et fermés, les couloirs de bureau et les centres commerciaux. Dans un environnement de bureau typique, les zones sont composées de bureaux ouverts, de cloisons, de bureaux fermés et de couloirs, lesquels peuvent être construits avec divers matériaux tels que du béton et du verre.

Dans ce contexte, les points d'accès sont habituellement installés à une hauteur de 2 ou 3 mètres sur les murs ou les plafonds. Dans les centres commerciaux, les points d'accès sont installés à une hauteur de 3 mètres sur les murs ou les plafonds des couloirs et des magasins. La densité des points d'accès peut varier d'un par étage ou par pièce en fonction de la bande de fréquences et de la puissance utilisée.



Figure III.3 : A l'intérieur d'un centre commercial.

### III.2.2.3 Communication entre objets /ou communication entre les machine

La communication entre objets jouera un rôle principal dans la définition des réseaux 5G. Ce scénario provoque des nouveaux revenus pour les opérateurs de télécommunication. Le nombre de dispositifs reliés au réseau (plus de 50.000 dispositifs par cellule) [31], et la durée de vie de la batterie (au-dessus de 10 ans) sont les conditions clef de ce scénario.

La basse consommation d'énergie, le procédé de synchronisation libre et l'accès aléatoire au canal sont quelques dispositifs que la couche PHY doit fournir pour ce scénario. Le débit considéré est entre 1 kbps à 10 Mbps. Les conditions de latence changent de 1 à 100ms pour couvrir une large étendue des applications, et pour répondre aux exigences des industries.

## III.3 Dimensionnement d'un réseau 5G

### III.3.1 Processus de dimensionnement du réseau 5G

Le but du dimensionnement d'un réseau sans fil consiste à minimiser les coûts de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau tout en garantissant la couverture radio, la taille des cellules et la topologie du

réseau, tout en respectant les contraintes de qualité de service (QoS), compte tenu d'une répartition d'abonnés, d'une situation géographique et des données de propagation.

Cette étape est essentielle dans la conception d'un réseau cellulaire, car elle permet aux concepteurs de trouver la meilleure disposition des sites radio en fonction des caractéristiques de l'environnement à couvrir, de la densité et de la demande en trafic des abonnés à desservir, des spécifications des équipements et de la bande de fréquences.

L'objectif est de dimensionner le réseau en conciliant les coûts et les contraintes de QoS, en utilisant des données de départ obtenues à partir de statistiques et d'estimations pour assurer une couverture complète de la zone considérée pour divers services.

### III.3.2 Choix de la bande de fréquence

Les réseaux de télécommunications mobiles actuels bénéficient d'une largeur de bande dédiée d'environ 500 MHz, variant de 450 MHz à 3,6 GHz selon les pays. Bien qu'il n'y ait pas encore de standard officiel pour la 5G, il est possible d'avoir une idée des bandes de fréquences qui seront utilisées. Les bandes primaires devraient être situées entre 450 MHz et 3,6 GHz, avec une possible utilisation de bandes non-licenciées telles que la bande 5 GHz.

En novembre 2015, lors de la Conférence mondiale des radiocommunications (CMR-2015) de l'Union internationale des télécommunications (UIT), institution des Nations unies pour les technologies de l'information et de la communication, il a été décidé de mettre à disposition la bande L (1427-1518 MHz) et la bande C (3,4-3,6 GHz) pour la 5G et d'utiliser la bande 700 MHz pour les communications mobiles à l'échelle mondiale [31]. Toutefois, étant donné les spécifications attendues, la 5G nécessitera une largeur de bande plus importante [37]. L'utilisation de bandes de fréquences millimétriques en complément constitue une solution. Ces bandes de fréquences, situées au-dessus de 6 GHz et utilisées pour des applications d'imagerie et de radar, ne souffrent pas de l'encombrement spectral observé dans les bandes autour et en dessous de 3 GHz.

Les fréquences millimétriques ont longtemps été considérées comme inadaptées aux communications mobiles en raison de leur faible encombrement spectral. En effet, à mesure que la fréquence augmente, l'atténuation des ondes dans l'air augmente également, ce qui peut être exacerbé par des pics d'absorption de l'eau et de l'oxygène à certaines fréquences. De plus, avec des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, la pénétration des ondes dans les objets est très faible, ce qui est idéal pour l'imagerie mais beaucoup moins adapté aux communications mobiles en milieu urbain. Enfin, les fréquences millimétriques sont sujettes à un bruit de phase important.

Cependant, ces obstacles sont maintenant surmontables grâce à des solutions telles que l'utilisation de larges réseaux d'antennes pour pallier aux problèmes d'atténuation [38]. Le "backhaul", comme nous l'avons vu précédemment, est également une solution viable à ces fréquences et constitue un axe de recherche important [39].

### III.3.3 Choix du type de dimensionnement

Le déploiement d'un réseau de télécommunication peut être limité soit par la portée, soit par la capacité. Dans le contexte des services fixes, la disponibilité limitée du spectre attribué restreindra la plupart des déploiements en termes de capacité plutôt que de portée, à l'exception des zones rurales où la densité de

population est faible, et surtout dans les zones où il y a une grande perte de propagation. Cependant, en général, les opérateurs, lors de la première phase de déploiement, essaient d'assurer une couverture aussi complète que possible, étant donné le faible nombre d'abonnés et le manque de pertinence des prévisions.

Une fois que la demande en trafic augmente, l'opérateur passe à l'étape de densification en ajoutant des canaux (si le spectre le permet) ou des stations de base supplémentaires. C'est pourquoi l'utilisation de technologies de relais est plus avantageuse, car plus on augmente le nombre de relais utilisés, plus la capacité du réseau augmente également.

### III.3.4 Modèles de propagation

Les modèles de propagation ont pour but de simuler la propagation des ondes radio d'un point à un autre dans un environnement donné

#### III.3.4.1 Le modèle de propagation en espace libre

En télécommunications, l'affaiblissement en espace libre (FSPL) est la diminution idéale par propagation d'un signal à l'intérieur d'un espace où il n'y aurait que les deux antennes d'émission et de réception. L'affaiblissement total est donné par l'équation suivante ;

$$FSPL(f, 1m) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (III.1)$$

Avec,  $d$  : distance entre deux antennes dans l'espace libre (m)

$\lambda$  : Longueur d'onde (m)

Ou encore un affaiblissement en espace libre avec le sol :

$$PL = 40 \log(d) - 20 \log(h_T) - 20 \log(h_R) \quad (III.2)$$

$h_T$  : Hauteur d'antenne de transmission

$h_R$  : Hauteur du récepteur

#### III.3.4.2 Modèle de propagation Alpha Beta Gama (UMi, UMa)

Le modèle de propagation Alpha Beta Gama (ABG) est une méthode utilisée pour les cellules à grande échelle dans les fréquences supérieures à 6 GHz. Cette méthode utilise une équation mathématique connue sous le nom de modèle ABG pour simuler la propagation des ondes radio dans l'environnement.

$$PL^{ABG}(f, d)[dB] = 10\alpha \log_{10}\left(\frac{d}{1m}\right) + \beta + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{f}{1GHz}\right) + X_6^{ABG} \quad (III.3)$$

$\alpha$  et  $\gamma$  sont les coefficients montrant la dépendance de Path Loss à l'égard de la distance et la fréquence, respectivement.

$\beta$  : Valeur excentrée optimisée pour Path Loss en dB.

$d$  : Distance en mètre entre l'émetteur et le récepteur.

$f$  : La fréquence porteuse en GHz.

$X_6^{ABG}$  : Effet de masque.

#### III.3.4.3 Modèle Close-In (CI)

Les modèles CI sont des modèles génériques de propagation à grande échelle qui décrivent les pertes de trajet à toutes les fréquences appropriées dans un scénario donné.

L'équation pour le modèle CI est donnée par :

$$PL^{ABG} = (F, d)[dB] = FSPL(f, 1m) + 10n \log_{10}(d) + X_6^{CI} \quad (III.4)$$

$n$  : Exposant de Path Loss,

$10n$  : Décivant le Path Loss en dB en termes de décennies des distances commençant à 1 m,

$d$  : Distance de séparation entre l'émetteur et récepteur,

### III.3.4.4 Modèle Close-In with Frequency weight (CIF)

Le modèle d'affaiblissement sur le trajet CIF est un modèle multifréquence qui utilise le même ancrage d'affaiblissement sur le trajet en espace libre (FSPL) à 1m que celui du modèle CI. Le modèle CIF est présenté comme suite :

$$PL^{CIF}(F, d)[dB] = FSPL(F, 1m)[dB] + 10n(1 + b(\frac{f-f_0}{f_0})) \log_{10}(\frac{d}{1m}) + X_6^{CL} \quad (III.5)$$

Avec :

$n$  : Dénote l'exposant de la Path Loss (PLE),

$b$  : Paramètre d'optimisation qui capture la pente, ou dépendance linéaire de fréquence avec l'exposant de Path Loss (par exemple, des augmentations de Path Loss comme augmentations de  $f$  quand  $b$  est positif).

$f_0$  : Fréquence de référence fixe. Le modèle de CIF retourne au modèle de CI quand  $b = 0$  pour des fréquences multiples, ou quand une seule fréquence  $f = f_0$  est modélée.

### III.3.4.5 Modèle Alpha Beta Gama et close-in F à double-pente

Pour les zones InH (*In Home*), l'utilisation d'un modèle de Path Loss à double pente pourrait offrir un ajustement précis pour les différentes zones. En ce qui concerne NLOS, il est possible de considérer un modèle double-pente ABG et un modèle double-pente CIF pour évaluer les performances de la technologie 5G.

Ces modèles nécessitent l'optimisation de cinq paramètres. En revanche, pour InH-Office, un modèle de simple pente CIF peut être considéré comme le point de référence, car il utilise uniquement deux paramètres d'optimisation. Pour les scénarios InH tels qu'un centre commercial ou de grandes distances d'intérieur (supérieures à 50 m), un modèle à double pente pourrait être plus adapté.

$$PL_{Dual}^{ABG}(d) = \begin{cases} 10\alpha_1(d) + \beta_1 + 10\gamma \log_{10}(f) & 1 < d \leq d_{BP} \\ 10\alpha_1 \log_{10}(d_{BP}) + \beta_1 + 10\gamma \log_{10}(f) + 10\alpha_2 \log_{10}(\frac{d}{d_{BP}}) & d > d_{BP} \end{cases} \quad (III.6)$$

$$PL_{Dual}^{CF}(d) = \begin{cases} FSPL(f, 1m) + 10n_1 \left(1 + b_1 \left(\frac{f-f_0}{f_0}\right)\right) \log_{10}(\frac{d}{1m}) & 1 < d \leq d_{BP} \\ FSPL(f, 1m) + 10n_1 \left(1 + b_1 \left(\frac{f-f_0}{f_0}\right)\right) \log_{10}(\frac{d_{BP}}{1m}) + 10n_2 \left(1 + b_2 \left(\frac{f-f_0}{f_0}\right)\right) \log_{10}(\frac{d}{d_{BP}}) & \end{cases} \quad (III.7)$$

Les paramètres de modèle de propagation selon l'environnement sont inscrits dans le tableau III.1 :

Scénario	Paramètres de modèle de propagation CI/CIF	Paramètres de modèle de propagation ABG
UMa-LOS	$n = 2.0$ ; SF = 4.1dB	NA
UMa-nLOS	$n = 3.0$ ; SF = 6.8dB	$\alpha = 3.4$ ; $\beta = 19.2$ ; $\gamma = 2.3$ ; SF = 6.5dB

UMi-LOS Gorge de la rue	$n = 1.98$ ; SF = 3.1dB	NA
UMi-nLOS Gorge de la rue	$n = 3.19$ ; SF = 8.2dB	$\alpha = 3.48$ ; $\beta = 21.02$ ; $\gamma = 2.34$ ; SF = 7.8dB
UMi-LOS Place ouverte	$n = 1.85$ ; SF = 4.2dB	NA
UMi-nLOS Place ouverte	$n = 2.89$ ; SF = 7.1dB	$\alpha = 4.14$ ; $\beta = 3.66$ ; $\gamma = 2.43$ ; SF = 7.0dB
InH-Indoor-LOS	$n = 1.73$ ; SF = 3.02dB	NA
InH-Indoor-nLOS Simple pente	$n = 3.19$ ; $b = 0.06$ ; $f_0 = 24.02\text{GHz}$ ; SF = 8.29dB	$\alpha = 3.83$ ; $\beta = 17.30$ ; $\gamma = 2.49$ ; SF = 8.03dB
InH-Indoor-nLOS Double pentes	$n_1 = 2.51$ ; $b_1 = 0.12$ ; $n_2 = 4.25$ ; $f_0 = 24.1\text{GHz}$ ; $b_2 = 0.04$ ; $d_{BP} = 7.8\text{m}$ ; SF = 7.65dB ;	$\alpha_1 = 1.7$ ; $\beta_1 = 33.0$ ; $\gamma = 2.49$ ; $d_{BP} = 6.9\text{m}$ ; $\alpha_2 = 4.17$ ; SF = 7.78dB
InH Centres commerciaux-LOS	$n = 1.73$ ; SF = 2.01dB	NA
InH Centres commerciaux-nLOS Simple pente	$n = 2.59$ ; $b = 0.01$ ; $f_0 = 39.5\text{GHz}$ ; SF = 7.40dB	$\alpha = 3.21$ ; $\beta = 18.09$ ; $\gamma = 2.24$ ; SF = 6.97dB
InH Centres commerciaux-nLOS double pentes	$n_1 = 2.43$ ; $b_1 = -0.01$ ; $n_2 = 8.36$ ; $f_0 = 39.5\text{GHz}$ ; $b_2 = 0.39$ ; $d_{BP} = 110\text{m}$ ; SF = 6.26dB ;	$\alpha_1 = 2.9$ ; $\beta_1 = 22.17$ ; $\gamma = 2.24$ ; $d_{BP} = 147.0\text{m}$ $\alpha_2$ $= 11.47$ ; SF = 6.36dB

Tableau III.1 : Paramètres des modèles de propagations CI, CIF, ABG pour différents environnements.

### III.4 Bilan de Liaison

La liaison montante et la liaison descendante nécessitent un équilibrage de puissance, pour lequel les paramètres de liaison doivent être ajustés pour les équilibrer [40]. Une liaison équilibrée signifie que le système fonctionne de manière symétrique à tous les points de la zone de couverture, comme illustré dans la Figure III.4.



Figure III.4 : Equilibrage des liens montants et descendants.

Le but d'un bilan de liaison est de calculer l'atténuation maximale autorisée sur le trajet entre une station de base ou une station relais et un récepteur pour un service donné. L'atténuation maximale du trajet est ensuite utilisée pour sélectionner des antennes et des configurations pour la station de base ou la station relais et pour planifier la puissance de sortie de la station de base ou de la station relais sur différents canaux [40].

L'atténuation maximale du trajet détermine la portée de chaque station de base (SB) ou répéteur et donc sa couverture et le nombre de stations de base ou de répéteurs nécessaires pour couvrir une zone donnée.

### III.4.2 Puissance isotrope rayonnée équivalente

L'élément de base qui doit être calculé pour le bilan de liaison à l'émetteur est la puissance isotrope rayonnée équivalente ou (PIRE), qui dépend de la chaîne équipement-câble-antenne. Ainsi, l'appareil émetteur émet un signal d'une certaine puissance, notée  $P_e$ , le câble reliant l'appareil à l'antenne perd une partie, notée  $L$ , et l'antenne fournit également une puissance supplémentaire, notée  $G_e$ .

En exprimant ces puissances en dB, la PIRE peut être obtenue par simple addition [40] :

$$\text{PIRE} = \text{Puissance d'émission} - \text{Perte de câble} + \text{Gain d'antenne émettrice}$$

Soit :

$$\text{PIRE} = P_e - L + G_e \quad (\text{III.8})$$

Dans les systèmes de radiocommunication, la PIRE est la qualité de la puissance qui doit être transmise par une antenne isotrope (distribuant la puissance de manière égale dans toutes les directions) pour produire la densité de puissance maximale observée dans la direction du gain d'antenne maximal. Pour les décibels, c'est une unité exprimant des ratios, autrement dit le gain  $G$ . Pour la puissance, le calcul est le suivant :

$$G[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (\text{III.9})$$

Pour un appareil émetteur, il s'agit de décibels par rapport aux milliwatts (dBm) : Dans la formule précédente,  $P_2 = 1 \text{ mW}$ ,  $P_1$  est la puissance émise, qui doit également être convertie en mW pour l'appareil. Pour les antennes, il s'agit de décibels par rapport à l'isotropie (dBi). Isotrope est une antenne théorique parfaite qui émet uniformément dans toutes les directions. Par conséquent, dBi est le gain d'une antenne par rapport à une antenne isotrope émettant la même énergie. La perte du câble est exprimée en décibels par mètre (dB/m), donc la perte totale due au câble est calculée comme suit :

$$\text{Pertes câble} = \text{Longueur câble} \times \text{Perte par mètre.}$$

### III.4.3 Sensibilité de réception

Pour que le récepteur comprenne le signal reçu, ce dernier doit avoir une sensibilité suffisante. Aussi, ce qu'il faut considérer, c'est l'ensemble appareil-câble-antenne. La sensibilité effective  $S_{RX}$  est la somme de la sensibilité de l'équipement (autre caractéristique de la puissance) et du gain d'antenne  $G_s$ , duquel on déduit la perte du câble  $L$ . Le gain d'antenne et la perte de câble sont utilisés dans les calculs de puissance précédents.

La puissance effective du signal reçu doit être supérieure à la sensibilité du composant, sinon le signal ne peut pas être utilisé. Par conséquent, l'élément de base qui doit être calculé pour le bilan de liaison côté récepteur est la puissance ou la sensibilité minimale reçue du récepteur.

La sensibilité du récepteur est définie comme la quantité de puissance en dBm qu'un détecteur doit recevoir pour atteindre une performance de bande de base spécifique, telle qu'un taux d'erreur sur les bits ou un rapport signal sur bruit spécifié [39].

La sensibilité du récepteur (en dBm) sera calculée à l'aide de la formule suivante :

$$S_{RX} = \left( \frac{E_b}{N_0} \right) - 10 \log \left( \frac{w}{R_b} \right) + NW + NF \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$S_{RX}$  : La sensibilité du récepteur.

$\frac{E_b}{N_0}$  : Rapport du signal sur bruit (en dB).

$w$  : Bande passante du système (MHz).

$R_b$  : Débit symbole (bps).

$NW$  : Puissance de bruit thermique.

$NF$  : Bruit au niveau du récepteur.

#### III.4.4 Affaiblissement maximum tolérable

La différence entre la puissance de l'émetteur et la sensibilité du récepteur donne la perte maximale qui peut être tolérée. Puisqu'il y a 2 stations qui sont à la fois émettrices et réceptrices, on calcule pour les deux cas, et on prend le plus petit des deux.

Nous considérons la marge de liaison  $MG_{link}$ , la marge d'évanouissement (*Fading* en Anglais)  $MG_{fade}$ , l'atténuation due à l'ombre (*Shadowing* en Anglais)  $L_{SH}$ , et l'atténuation due aux caractéristiques environnementales  $L_{env}$ , qui sont soustraites de l'atténuation maximale tolérable, on peut calculer l'affaiblissement en ligne  $PL$ , pour "Perte en Ligne", comme suit [39].

$$PL = PIRE - S_{RX} + G_S - L_{SH} - L_{env} - L_r - MG_{link} - MG_{fade} \quad (III.11)$$

#### III.5 Dimensionnement selon la couverture

Le dimensionnement basé sur la couverture consiste à déterminer le nombre de stations nécessaires pour couvrir une zone donnée. Nous allons estimer le taux de perte de chemin (*Path Loss*) en fonction du bilan de liaison (RLB : Radio Link Budget). Pour cela, il est nécessaire de choisir un modèle de propagation approprié.

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

##### III.5.1 Système de réseau d'accès 5G

Au chapitre précédent, nous avons examiné la composition du réseau d'accès de la 5G, qui est formé de réseaux hétérogènes (HetNet : Macro-cellule et femto-cellule). Pour garantir la disponibilité des ressources et augmenter la capacité du réseau, des stations de base sont utilisées en conjonction avec des stations de relais pour couvrir une zone (Figure III.5). Ainsi, une macro-cellule couvre entièrement la zone géographique et est également couverte par plusieurs SR formant un réseau multi-sauts.

Une distance minimale entre deux stations voisines est prise en compte pour distribuer efficacement les petites cellules dans des secteurs ciblés, en fonction de la puissance et du domaine de transmission couverts.

Il est supposé que les macro-cellules et les petites cellules transmettent respectivement une puissance maximale de PMC et de PPC, où PPC est inférieure à PMC. Des modèles de canal de propagation différents sont utilisés pour les transmissions de macro et de petites cellules.

Une station de relais ne peut avoir qu'un seul parent, mais peut avoir plusieurs relais d'enfant. Chaque station (SB ou SR) dessert un ensemble d'utilisateurs qui sont supposés être répartis uniformément dans le secteur géographique. Les liens qui relient une station de base avec une station de relais et une station de

relais avec une autre station de relais sont appelés respectivement backhaul central et backhaul de distribution.

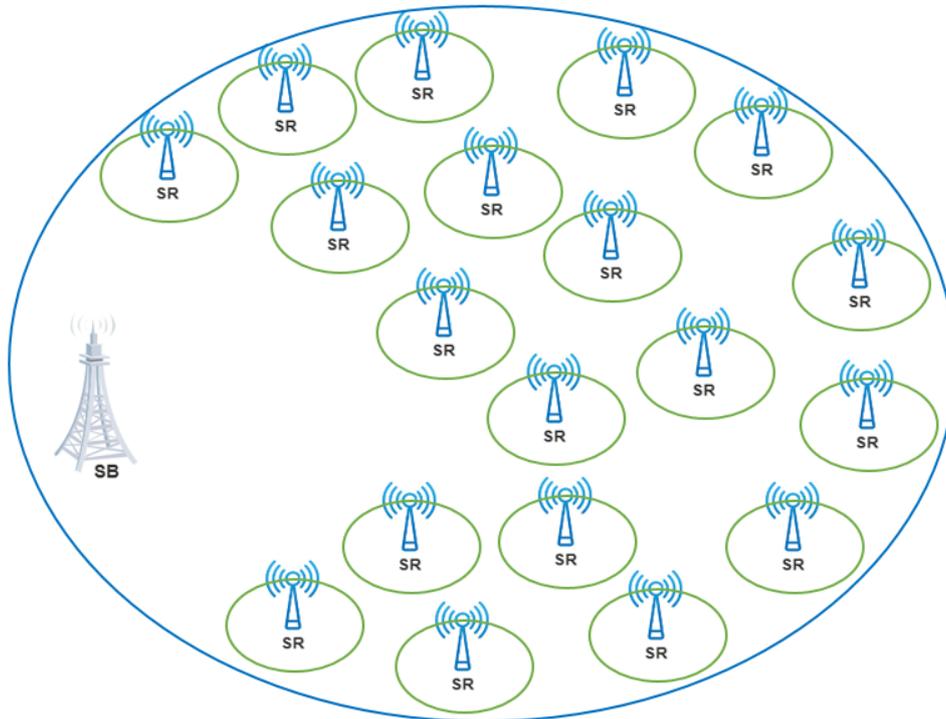


Figure III.5 : Exemple d'un système de réseau d'accès 5G.

### III.5.2 Portée d'une station de base et d'une station de relais

Imaginons que les petites cellules utilisent une antenne omnidirectionnelle et doivent couvrir une zone en forme de cercle. Pour minimiser les interférences, les stations voisines doivent être affectées à des groupes de canaux différents. Ainsi, les rayons de couverture ou les portées des stations de base et des stations de relais doivent être calculés pour déterminer leur emplacement. Il est également important de prendre en compte la puissance de transmission des SB et des relais, car le rayon de la cellule dépend de cette puissance.

Voici la relation entre la puissance de transmission d'une SB ou d'une SR et son rayon :

$$P_{OP} = a \cdot P_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^\alpha + b \tag{III.12}$$

Le coefficient de Path Loss  $\alpha$  est utilisé dans cette formule, où  $P_0 = 40$  Watts (W) représente une puissance de transmission normalisée avec un rayon d'assurance  $r_0 = 1$  km [37] [41].

Pour les macro-cellules, les paramètres de puissance de fonctionnement des SB sont configurés comme suit :  $a = 21.45$ ,  $b = 354,44$  W et  $a = 7.84$ ,  $b = 71,50$  W pour les petites cellules.

Le rayon de couverture d'une station de base ou d'une station de relais est calculé en utilisant la formule suivante :

$$r = \sqrt{\frac{r_0^\alpha (P_{Tx} - b)}{\alpha P_0}} \tag{III.13}$$

Ce rayon est essentiel pour déterminer la distance minimale entre deux relais voisins, afin de les répartir efficacement dans des secteurs ciblés.

### III.5.3 Détermination du nombre de stations de relais à utiliser

Pour couvrir une surface, il est nécessaire de déterminer le nombre de stations de base requis. Pour cela, il est important de considérer les rayons de couverture ou les portées d'une station de base et des stations de relais afin d'éviter les interférences entre les sites.

Tout d'abord, il faut estimer l'affaiblissement de parcours maximum en utilisant le bilan de liaison. Ensuite, la portée maximale ou le rayon de couverture maximale doit être calculé en utilisant les modèles de propagation appropriés au type de terrain étudié. L'étape suivante consiste à déterminer le nombre de stations de base en utilisant la formule suivante :

$$N_{SR} = \frac{S_{Total} - C_{SB}}{C_{SR}} \quad (III.14)$$

Avec :

$N_{SR}$  : Nombre des stations de relais requis pour la couverture

$S_{Total}$  : Surface totale à couvrir

$C_{SB}$  : Couverture de la station de base sur sa puissance maximale

$C_{SR}$  : Couverture de la station de relais sur sa puissance maximale telle que

Ou :

$$C_{SB} = 2.6 \times r_{SB}^2 \quad (III.15)$$

$$C_{SR} = 2.6 \times r_{SR}^2 \quad (III.16)$$

### III.5.4 Répartition des stations de relais dans une zone à couvrir

Le diagramme de Voronoi peut être utilisé pour répartir efficacement les stations de base et les stations de relais dans une zone donnée. Ce diagramme a été inventé par le mathématicien russe Voronoi au début du XX<sup>e</sup> siècle et consiste à diviser un plan E en zones convexes définies comme l'ensemble des points les plus proches d'un objet :  $Zone(objet(i)) = \{x \text{ élément de } E \text{ tel que } d(x, objet(i)) \leq d(x, objet(j)) \text{ quelque soit } j \neq i\}$ .

Chaque zone de Voronoi est un polygone convexe qui peut être utilisé pour décomposer un plan euclidien en régions basées sur la distance de points spécifiques dans le plan. Les points utilisés dans ce processus sont appelés les emplacements et les régions qui en résultent sont appelées les cellules de Voronoi [42].

Comme vu sur la figure III.6, un plan euclidien contenant plusieurs emplacements prédéfinis, le diagramme de Voronoi divise le plan en cellules de sorte que chaque cellule contienne exactement un emplacement. Chaque point dans la cellule doit être plus proche de l'emplacement correspondant que de tout autre emplacement du plan.

Les frontières des cellules, appelées bords de Voronoi, représentent des points équidistants des deux emplacements les plus proches. Les sommets de Voronoi, où les frontières multiples se rejoignent, sont équidistants de leurs trois emplacements les plus proches.

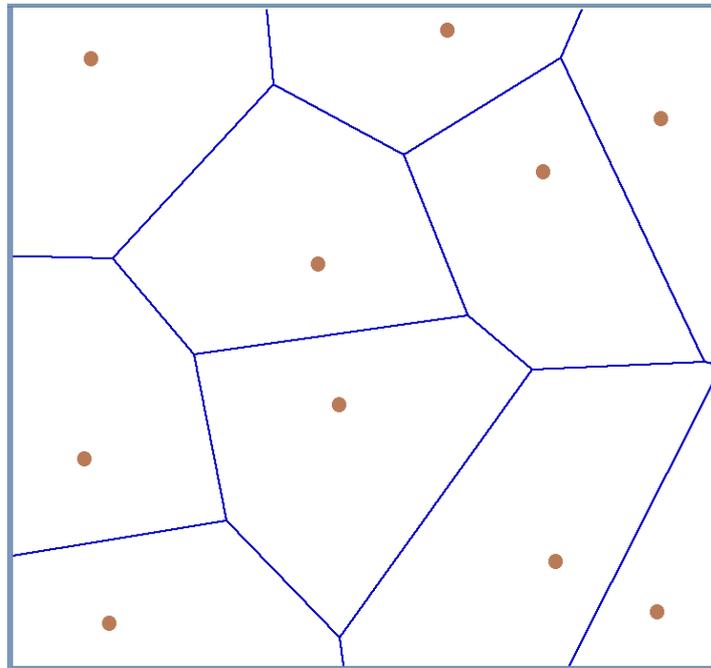


Figure III.6 : Exemple de diagramme de Voronoï.

### III.5.5 Contrôle d'admission d'utilisateur

Pour un utilisateur  $j$  connecté à une station  $i$ , la sortie réalisable  $r_{ij}$  dépend de la ressource allouée  $\gamma_{ij}$ . Pour la calculer, il convient de multiplier la largeur de bande assignée à l'utilisateur par l'efficacité spectrale :

$$r_{ij} = \gamma_{ij} A_{ij} \tag{III.17}$$

La largeur de bande assignée et l'efficacité spectrale dans le lien entre la station  $i$  et l'utilisateur  $j$  sont représentées respectivement par  $\gamma_{ij}$  et  $A_{ij}$ . De plus, la capacité maximale du secteur d'assurance de la station  $i$  est limitée à  $C_i$ , ce qui signifie que tous les utilisateurs rattachés à cette station ne peuvent pas dépasser cette limite de capacité.

$$\sum_{j \in n_i} \gamma_{ij} \leq C_i, \forall i \tag{III.18}$$

$n_i$  : Ensemble d'utilisateurs attachés à la station  $i$ .

On peut exprimer la sortie obtenue pour l'utilisateur  $j$  dans le système en considération de la manière suivante :

$$r_j = \sum_{i \in N_s} x_{ij} \gamma_{ij} \tag{III.19}$$

$x_{ij} = 1$  si l'utilisateur  $j$  est relié à une station  $i$  et  $x_{ij} = 0$  autrement.

$$\sum_{i \in N_s} x_{ij} = 1, x_{ij} \in \{0,1\}, \forall j \tag{III.20}$$

La sortie minimale requise pour l'utilisateur  $j$  qui est autorisé à accéder au système peut être définie par une contrainte de qualité de service (QoS) qui prend la forme suivante :

$$r_j \geq r_{min} \tag{III.21}$$

Dans cette section, l'objectif est de maximiser le nombre d'utilisateurs qui peuvent être admis dans le système.

En somme, le défi de contrôle d'admission dans les environnements hétérogènes peut être exprimé à travers les formulations d'optimisation ci-dessous :

$$\begin{aligned} & \max_j \sum_{i,j} x_{ij} \\ \text{Si et seulement si } & \sum_{j \in n_i} \gamma_{ij} \leq C_i, \quad \forall i \text{ et } r_j \geq r_{min}, \quad \forall j \end{aligned} \quad (III.22)$$

### III.5.6 Contrôle de puissance

L'efficacité spectrale réalisée pour l'utilisateur  $j$  de la station  $i$  est exprimée par :

$$A_{ij} = \log_2(1 + P_{ij}) \quad (III.23)$$

Ou  $P_{ij}$  est la puissance reçue par l'utilisateur  $j$  de la station  $i$  qui est exprimée par :

$$P_{i,j} = \frac{p_i^{max}}{PL_j^i(N_0+I_j)} \quad (III.24)$$

Avec :

$p_i^{max}$  : Niveau de puissance maximum de transmission de la station  $i$

$PL_j^i$  : Path Loss du canal sans fil entre la station  $i$  et l'utilisateur  $j$  selon les conditions des scenarios vus précédemment.

$N_0$  : Bruit moyen par sous porteuse.

$I_j$  : Interférence reçue par l'utilisateur  $j$  de stations voisines.

Notons par  $P_{thr}$  le niveau de puissance minimale requise pour qu'un utilisateur  $j$  puisse être connecté à la station  $i$ . Ainsi, nous pouvons exprimer la contrainte suivante :

$$P_{i,j} \geq P_{thr}, \quad \forall j \in n_i \quad (III.25)$$

Dans la mesure où l'objectif est de minimiser la puissance maximale de transmission, la problématique de contrôle de puissance dans les environnements hétérogènes peut être abordée à travers l'optimisation du problème suivant :

$$\begin{aligned} & \min \sum_i P_i^{max} \\ \text{Si et seulement si } & P_{i,j} \geq P_{thr}, \quad \forall j \in n_i \text{ et } P_i^{max} \leq P_{SC'} \quad \forall i \in n_S \end{aligned} \quad (III.26)$$

### III.5.7 Arrangement d'association d'utilisateurs basé par Voronoi

Nous utilisons un modèle analytique qui permet de décrire le phénomène d'accès des utilisateurs vers les stations. En l'absence de contraintes de ressources, chaque utilisateur serait naturellement relié à la station la plus proche, à l'image de la force d'attraction entre des charges électriques de signes opposés.

Pour illustrer cette analogie, supposons que les stations ont des charges négatives égales, tandis que les utilisateurs ont des charges positives égales, en faisant abstraction des interactions entre les utilisateurs. Dans ce contexte, des forces de coulomb s'exercent entre chaque utilisateur et chaque station.

Dans des conditions normales, chaque utilisateur sera donc attiré vers la station la plus proche. Pour déterminer quelle station attire un utilisateur donné, il convient de calculer le potentiel électrostatique résultant de toutes les stations

$$\phi(X, Y) = \sum_i \frac{q_i}{\sqrt{(X-X_i)^2 + (Y-Y_i)^2}} \quad (III.27)$$

$q_i$  : Charge de la station  $i$  et  $X, Y, X_i, Y_i$  sont respectivement les coordonnées de l'utilisateur et de la station  $i$ .

Chaque utilisateur est susceptible d'être dans la zone d'attraction d'une des stations.

Toutefois, pour répondre à nos objectifs, il est nécessaire de prendre en compte deux facteurs. D'une part, les ressources de chaque station sont limitées et décrites par les variables  $C_i$ . Le nombre maximal d'utilisateurs pouvant être connectés à une station est grossièrement proportionnel à  $C_i$ . D'autre part, il convient de tenir compte de la bande passante minimale requise pour obtenir une sortie acceptable. Cette bande passante minimale peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$(Y_{ij})_{min} = \frac{r_{min}}{A_{i,j}} \quad (III.28)$$

En utilisant l'équation (III.18) et l'équation (III.28), on obtient :

$$\sum_i (Y_{ij})_{min} = r_{min} \sum_j \frac{1}{A_{i,j}} \leq C_i, \quad \forall i \quad (III.29)$$

Pour une station donnée  $i$ , il convient de calculer dans l'ordre croissant toutes les distances  $d_{i,j}$  entre cette station et les utilisateurs. Ensuite, il faut trouver un utilisateur  $n_i$  qui satisfait les conditions suivantes :

$$r_{min} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{A_{i,j}(d_{i,j})} \leq C_i \quad (III.30)$$

$$\text{et } r_{min} \sum_{j=1}^{n_i+1} \frac{1}{A_{i,j}(d_{i,j})} > C_i \quad (III.31)$$

Nous constatons ainsi que le premier utilisateur  $n_i$  se trouvant à proximité de la station  $i$  ne peut être connecté à celle-ci, car cela épuiserait les ressources de la station. Pour déterminer les utilisateurs qui peuvent être connectés à la station  $i$ , il convient de prendre en compte la distance maximale  $R_i = d_{i,j}$  entre la station  $i$  et un utilisateur  $j$ , qui peut être connecté à cette station en respectant les conditions (III.30) et (III.31).

Nous appelons  $R_i$  le rayon d'attraction de la station  $i$ . Il dépend à la fois de la valeur de  $C_i$  et de la distribution des utilisateurs à proximité de la station.

En utilisant notre analogie électrostatique simplifiée, nous pouvons dire qu'un utilisateur  $j$  sera attiré par la station  $i$  si sa distance ( $d_{i,j}$ ) est inférieure ou égale à  $R_i$ . Plus la valeur de  $R_i$  est grande, plus la station attirera d'utilisateurs. Si nous attribuons une charge  $q_i = R_i$  à la station  $i$  alors le potentiel à une distance  $d_{i,j}$  sera :

$$\phi_i(d_{i,j}) = \frac{R_i}{d_{i,j}} \quad (III.32)$$

La condition qui attire les utilisateurs vers une station est exprimée par  $\phi_i(d_{i,j}) \geq 1$  et est appliquée à chaque station. Les ressources de la station et la distribution d'utilisateurs dans la proximité sont prises en compte dans la valeur  $R_i$ . Si un utilisateur se trouve dans la région d'attraction de plusieurs stations, la volonté extérieure potentielle détermine les régions d'attraction de chaque station. Plus précisément, l'endroit où le

potentiel est maximal le long des lignes reliant chaque paire de stations voisines déterminera un point où la frontière des régions d'attraction passe. Pour y parvenir, nous utilisons le diagramme de Voronoi, une méthode de géométrie informatique pour mettre en œuvre un algorithme d'association d'utilisateurs dans un secteur bidimensionnel.

Le diagramme de Voronoi résout le problème en divisant la région en plusieurs sous-domaines, également appelés cellules de Voronoi. Pour associer des utilisateurs dans un réseau sans fil hétérogène, nous utilisons le diagramme de Voronoi avec des modifications appropriées pour prendre en compte la disponibilité de ressources. Nous utilisons la métrique  $R_i / d_{i,j}$  au lieu de la métrique habituelle  $d_{i,j}$ .

Ainsi, une fois que le diagramme de Voronoi est exécuté, la cellule optimisée correspondra à un petit secteur d'assurance de cellules.

Dans un plan euclidien bidimensionnel, nous pouvons définir le diagramme de Voronoi  $V$  de  $N_S$  stations comme une subdivision de la région en  $N_S$  cellules de Voronoi. En utilisant le potentiel défini dans l'équation (III.32) de  $\phi_i$ , la cellule de Voronoi  $v_i$  pour une station  $i$  peut être exprimée comme suit :

$$v_i = \{(X, Y) \in R^2 \mid \forall k \neq i \phi_i(d_{i,XY}) > \phi_k(d_{k,XY})\} \quad (III.33)$$

$XY$  : Les coordonnées cartésiennes des positions dans la cellule de Voronoi  $v_i$  indiquent que tous les utilisateurs situés à l'intérieur de cette cellule sont desservis par la station  $i$ .

Ensuite, le diagramme complet de Voronoi  $V$  pour toutes les stations dans la région de la surface peut être exprimé de la manière suivante :

$$V = \bigcup_{i=1}^{N_S} v_i \quad (III.34)$$

Ensuite, la résolution du problème (III.22) pour calculer l'association d'utilisateurs  $x_{i,j}$  qui maximise le nombre d'utilisateurs admis dans le système peut être exprimée de manière simple comme suit :

$$\max \sum_{i,j} x_{i,j} = \sum_i n_i \quad (III.35)$$

En minimisant la puissance requise maximum de la station  $i$ , le dernier utilisateur dans la cellule de Voronoi  $v_i$  devrait être couvert par la petite cellule située à l'emplacement de la cellule de Voronoi. Supposons que la zone de couverture des petites cellules soit un cercle, avec la station  $i$  comme centre et  $R_i$  comme rayon. En combinant (III.24) et l'équation (III.26), nous pouvons voir que la puissance de transmission maximale minutieuse pour chaque station  $i$  peut être exprimée de la manière suivante :

$$(P_i^{max})_{min} = (N_0 + I_j) P_{thr} P L^i(R_i) \quad (III.36)$$

### III.6 Conclusion

Le dimensionnement des réseaux mobiles est un défi complexe qui nécessite de considérer à la fois des aspects théoriques et pratiques. L'objectif est de trouver la meilleure architecture cellulaire en prenant en compte plusieurs critères, notamment la qualité de la couverture pour garantir une connectivité radio dans tous les points de la zone à couvrir. Ainsi l'absorption de la charge pour que le réseau doit être capable de supporter le trafic associé à chaque cellule.

La mobilité est un critère important pour faciliter la transition d'une cellule à une autre sans perte de communication "Handoff". Les stations de base doivent être capables de connaître leurs voisins pour

permettre la mobilité des utilisateurs. Enfin, l'évolutivité du réseau cellulaire qui consiste à la potentialité l'intégration de nouvelles stations de base.

Dans notre étude de dimensionnement du réseau 5G, nous avons fait en considérant deux grands plans : le plan de couverture et le plan de capacité. L'analyse de la couverture reste une étape critique dans la conception du réseau 5G.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons les étapes de conception de l'outil de dimensionnement d'un réseau 5G et la simulation de tout ce qui a été présenté précédemment.

# Mise en Place de l'Outil de Dimensionnement d'un Réseau 5G

## IV

### IV.1 Introduction

Le dimensionnement d'un réseau 5G est crucial pour offrir une couverture optimale de la zone de déploiement, tout en maintenant un équilibre satisfaisant entre la qualité de service fournie et le coût de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau.

Dans le précédent chapitre, nous avons exposé les étapes générales de dimensionnement d'un tel réseau, qui conduisent à des résultats fiables et interprétables. Dans ce dernier chapitre de notre projet de fin d'études, nous donnerons tout d'abord une description de notre outil de dimensionnement nommé "5G DimTool", là où nous précisons les besoins fonctionnels et non fonctionnels, ainsi les langages de programmation et l'environnement utilisés pour développer notre outil de dimensionnement.

Ensuite, nous présenterons nos résultats des simulations réalisées à l'aide de notre outil de dimensionnement. Les étapes à suivre pour réaliser ces simulations sont illustrées par les différentes interfaces à l'aide des captures d'écran. Enfin conclure par présenter un exemple de dimensionnement d'un réseau 5G sur une zone bien déterminée.

### IV.2 Description de l'outil de dimensionnement

Pour la réalisation de notre outil de dimensionnement, nous avons opté pour le langage HTML qui, par défaut, permet l'affichage des éléments du contenu de la page Web et fournit la structure de base des sites ou des plateformes Web, améliorée et modifiée par d'autres technologies telles que CSS et JavaScript. Le CSS est utilisé pour contrôler la présentation, la mise en forme et la mise en page. Tandis que le JavaScript est utilisé pour contrôler le comportement de différents éléments pour produire un outil de grande qualité. Cela permet à l'opérateur de calculer et de vérifier les paramètres de dimensionnement du réseau 5G, pour offrir une meilleure qualité de service à ses clients.

Nous allons présenter notre outil ainsi que ses entrées et sorties tout en mentionnant ses besoins fonctionnels et non fonctionnels. D'autant plus que nous allons faire une étude conceptuelle de notre outil de dimensionnement en se basant sur les langages de développement Web ; le langage HTML, le langage CSS et le langage JavaScript.

#### IV.2.1 Spécification des besoins

L'objectif de notre outil est de dimensionner la couverture radio d'une zone spécifique, en utilisant différents modèles de propagations telles que le modèle en Espace libre, CI, CIF et ABG. Les paramètres d'entrée nécessaires pour la configuration sont déterminés par l'opérateur, le constructeur d'équipements et les exigences des clients.

#### IV.2.1.1 Besoins fonctionnels

L'outil doit offrir des interfaces graphiques bien structurées, pour simplifier le maximum possible la saisie des données relatives à la phase de pré-dimensionnement. Calcul de dimensionnement du réseau suivant les algorithmes et les équations établis dans le chapitre III, basant sur des modèles analytiques et des algorithmes bien étudiés.

Pour dimensionner le réseau 5G par notre outil, on doit :

- Saisir les paramètres d'entrée.
- Choisir un modèle de propagation selon le scénario à étudier.
- Calculer la perte de trajet totale (*Path Loss*) de la liaison.
- Calculer le rayon de la cellule de couverture.
- Calculer le nombre de stations relais nécessaire pour la couverture de la zone à étudier.

L'équipe responsable de la planification de la zone en question doit :

- Analyser les différents résultats de simulation fournis par l'outil pour chaque modèle de planification.
- Recommander à l'opérateur du réseau le modèle qu'il doit utiliser pour la planification d'une zone bien déterminée.

#### IV.2.1.2 Besoins non fonctionnels

Les besoins non fonctionnels sont des exigences qui ne concernent pas le comportement du système, mais plutôt les contraintes internes et externes qui lui sont applicables. Voici les besoins non fonctionnels de notre outil de dimensionnement :

- L'ergonomie : l'outil offre une interface graphique conviviale et facile à utiliser sans la nécessiter des connaissances approfondies.
- Fiabilité : Accès rapide et directe
- Le code de langage de programmation doit être clair pour permettre des futures améliorations.
- Garantir aux utilisateurs l'intégrité et la cohérence des données à chaque insertion.

### IV.3 Etude technique

La phase d'étude technique consiste à ajuster la conception en fonction de l'architecture technique. Elle a pour objectif de décrire au plan fonctionnel la solution à réaliser d'une manière détaillée, ainsi que la description des traitements. Cette étude, qui suit l'étude détaillée, constitue le complément de spécification informatique nécessaire pour assurer la réalisation du futur système.

Pour la réalisation de notre outil, nous avons eu recours à plusieurs moyens matériels et logiciels :

#### IV.3.1 Matériels de base

Les différentes étapes de réalisation de notre projet sont réalisées sur une machine présentant les caractéristiques suivantes :

- Processeur Intel (R) Core (TM) i7 8328M CPU @ 1.80 GHz.
- Disque dur de capacité : 500Go SSD.
- Mémoire RAM : 8 Go.

- Système d'exploitation : Windows 10 Edition professionnelle avec 64 bits.

### IV.3.2 Outils de conception

Notre outil est une plateforme Web, donc c'est un fichier texte d'un certain type d'extension. Ce fichier texte contient du code (langage de programmation) et du texte. Quel que soit la manière de construire, générer, créer une page Web (de façon statique ou dynamique), une page Web ne pourra que contenir du code que le navigateur Web sera capable d'interpréter et du texte.

Il n'existe que quelques langages par défaut que tous les navigateurs Web sont capable d'interpréter (de comprendre). Les plus utilisés étant le langage HTML, le langage CSS et le langage JavaScript.

### IV.3.3 Choix du langage de modélisation

Dans cette partie, nous allons donner quelques définitions et particularités des outils logiciels que nous avons choisis pour la conception de notre projet. Nous avons opté pour l'utilisation de HTML (*HyperText Markup Language*) pour la présentation des pages, de CSS (*Cascading Style Sheets*) pour la mise en forme graphique et de JavaScript pour les automatisations exécutées côté client.

#### IV.3.3.1 Langage HTML

Le langage HTML, abréviation de *HyperText Markup Language*, est un code utilisé pour structurer tous les éléments d'une page Web. Contrairement au CSS et au JavaScript, il ne définit pas le style de la page ni n'ajoute d'interactivité complexe. Les principales fonctions du HTML sont les suivantes [43] :

- Afficher du contenu, tel que du texte ou des images.
- Créer des liens hypertexte pour relier les pages entre elles.
- Structurer le document en utilisant des balises pour indiquer les titres, les paragraphes, etc.
- Indiquer au navigateur ce qu'il doit afficher sur la page Web.
- Améliorer l'indexation des pages Web dans les moteurs de recherche en utilisant des balises et des mots clés pertinents.

Le langage HTML utilise des balises (ou "*tags*" en anglais) pour décrire la structure d'un document texte. Les balises permettent de :

- Définir la structure correcte du document.
- Indiquer au navigateur comment afficher le document.
- Intégrer différents médias, tels que des images, des vidéos ou des fichiers audio.

HTML propose plusieurs balises pour délimiter les différentes zones d'une page Web, notamment [43] :

- `<header>` pour l'en-tête.
- `<footer>` pour le pied de page.
- `<nav>` pour les liens principaux de navigation.
- `<section>` pour les différentes sections de la page.
- `<aside>` pour les informations complémentaires.
- `<article>` pour les articles indépendants.



**Figure IV.1 :** Logo du langage HTML.

Le HTML est principalement utilisé pour structurer de manière sémantique et logique le contenu des pages Web, ainsi que pour formater ce contenu. Il permet également d'inclure des ressources multimédias telles que des images, des formulaires de saisie et des programmes informatiques. Grâce à sa capacité à créer des documents interopérables, le HTML répond aux exigences d'accessibilité du Web, ce qui le rend compatible avec une grande variété d'appareils [43].

#### IV.3.3.2 Langage CSS

Si HTML représente les blocs de construction d'un site Web, le CSS est un moyen de façonner et d'améliorer ces blocs. Le CSS est un langage de feuille de style utilisé pour spécifier la façon dont différentes parties d'une page Web apparaissent aux utilisateurs. En d'autres termes, c'est un moyen d'ajouter du style et une mise en forme supplémentaire à ce que vous avez déjà construit avec HTML.

Par exemple, vous avez peut-être utilisé HTML pour ajouter du texte d'en-tête, et vous voulez maintenant que cet en-tête ait une police plus agréable, une couleur d'arrière-plan ou d'autres éléments de mise en forme qui le rendent plus élégant, professionnel et élégant. C'est là que CSS entre en jeu. Le CSS aide également les sites Web à s'adapter à différents types d'appareils et tailles d'écran afin que vos pages s'affichent aussi bien sur les smartphones, les tablettes ou les ordinateurs de bureau.



**Figure IV.2 :** Logo du langage CSS.

Pour comprendre la différence entre HTML et CSS, il est important de comprendre leur histoire. Lorsque HTML a été inventé en 1990, il n'était conçu que pour informer le contenu structurel d'un document (par exemple, séparer les titres du corps du texte). Cependant, lorsque des éléments stylistiques comme les polices et les couleurs ont été développés, HTML n'a pas pu s'adapter. Pour résoudre ce problème, CSS a été inventé comme un ensemble de règles qui peuvent attribuer des propriétés à des éléments HTML, en s'appuyant sur le langage de balisage existant pour créer une page Web plus complexe [44].

Une règle CSS se compose de deux éléments distincts :

- Le sélecteur : il identifie l'élément HTML qui sera affecté par la règle CSS.
- La déclaration : elle contient une propriété et une valeur. La propriété indique quelle caractéristique de l'élément HTML sera modifiée, tandis que la valeur spécifie la nouvelle valeur de cette caractéristique.

### IV.3.3.3 Langage JavaScript

JavaScript est le plus complexe des trois langages frontaux abordés dans cet article, s'appuyant à la fois sur HTML et CSS. Si vous essayez de comparer les langues, pensez-y comme ceci : Alors que HTML crée la structure de base d'un site Web, CSS ajoute du style à cette structure, et JavaScript prend tout ce travail et le rend interactif et plus complexe fonctionnellement [44].



Figure IV.3 : Logo du langage JavaScript.

Le langage JavaScript est essentiel pour créer des pages Web interactives. Il est largement utilisé sur la majorité des sites Web et est pris en charge par la plupart des navigateurs Web grâce à leur moteur d'interprétation JavaScript intégré. Voici quelques exemples des possibilités offertes par JavaScript :

- Un système de chat, comme celui utilisé sur Facebook.
- Une suggestion de recherche en temps réel lors de la frappe dans un champ de texte, comme celle proposée par Google.
- Un lecteur de musique ou de vidéo puissant, comparable à celui de YouTube.
- Des jeux 3D exploitant la balise <canvas>, comme Torus ou Tetris.
- Des fonctions de calcul mathématiques, telles que celles utilisées dans notre outil.
- Et bien d'autres encore...



Figure IV.4 : Principe de fonctionnement d'un script côté client.

Le JavaScript est un langage côté client (*Client-Side*), ce qui signifie que les scripts sont exécutés par le navigateur chez l'utilisateur (le client). C'est différent des langages de script *Server-Side* qui sont exécutés par le serveur Web, comme c'est le cas pour des langages tels que le PHP [43]. La figure IV.4 montre le principe de fonctionnement d'un script coté client.

#### IV.3.3.4 Langage jQuery

jQuery est une bibliothèque JavaScript libre, gratuite et multiplateforme, conçue en 2006 pour simplifier l'écriture de scripts. Compatible avec tous les navigateurs Web courants tels que Microsoft Edge, Internet Explorer, Safari, Chrome et Firefox, jQuery est aujourd'hui le Framework JavaScript le plus répandu et le plus utilisé. Il permet de manipuler les codes HTML, CSS et JavaScript côté client [45].



Figure IV.5 : Logo du langage jQuery.

### IV.4 Présentation de l'outil "5G DimTool"

Dans le but de proposer un outil de dimensionnement du réseau 5G qui soit à la fois plus performant, moins complexe et simple d'utilisation, une plateforme Web avec des interfaces graphiques a été conçue. L'outil 5G DimTool© implémente toutes les techniques et les modèles analytiques présentés dans le chapitre précédent. Dans la suite de cette section nous présenterons quelques interfaces de notre outil.

#### IV.4.1 Interface d'accueil

Lorsque l'utilisateur lance notre outil, il se trouve face à une page d'accueil qui se compose de deux options : "Login" et "Exit", telle que présente la Figure IV.6 et du logo de notre outil (Figure IV.7).



Figure IV.6 : Interface d'accueil de l'outil "5G DimTool".



Figure IV.7 : Logo de l'outil "5G DimTool".

Le bouton "Login" permet d'entrer dans l'interface d'authentification, qui sert à authentifier les utilisateurs de l'outil "5G DimTool" au moyen d'un identifiant et un mot de passe, le bouton "Exit" pour quitter l'application.

#### IV.4.2 Interface d'authentification

En cliquant sur le bouton "Login" on obtient donc l'interface qui permet l'authentification des utilisateurs pour l'accès à notre outil. Il s'agit de la deuxième interface qui apparaît lors de l'exécution de l'application. Cette interface permet aux utilisateurs de s'authentifier à l'aide d'un identifiant ou nom d'utilisateur (*Username*) et d'un mot de passe (*Password*) puis en cliquant sur le bouton "Connect", comme montre la figure IV.8 (a). Cela permet de faire la distinction entre les utilisateurs réguliers et les administrateurs qui ont tous les droits d'accès à l'outil "5G DimTool".

Si le nom d'utilisateur et/ou le mot de passe sont incorrects, un message d'erreur s'affichera indiquant que les informations saisies sont incorrectes et donnant le droit de se ré-authentifier à nouveau. Comme indiqué sur la figure IV.8 (b).

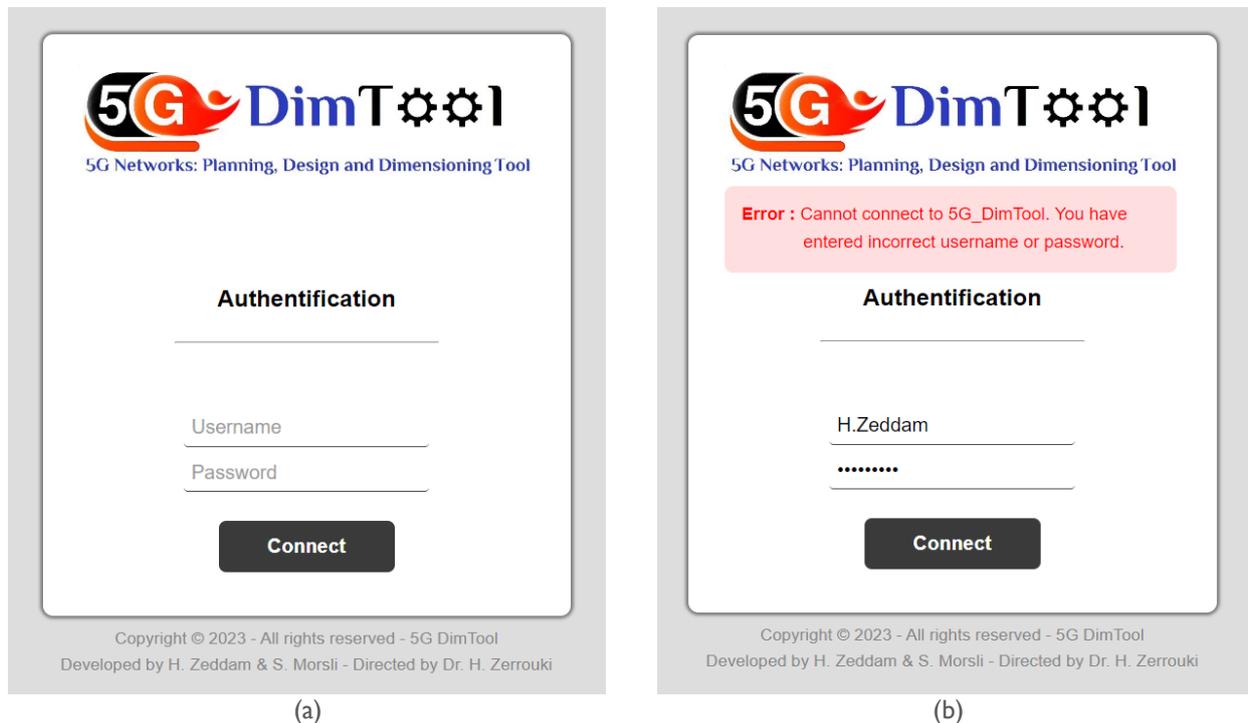


Figure IV.8 : (a) Interface d'authentification de l'outil "5G DimTool", (b) Message d'erreur.

#### IV.4.3 Interface principale

L'interface principale est constituée de 5 onglets (Figure IV.9), "Path Loss" pour le calcul de perte du chemin, "Link Budget" pour calculer les paramètres de bilan de liaison, "Relay Sation" pour le calcul de nombre des stations de relais à déployer pour chaque station de base 5G, "Dimensioning" pour la simulation de

dimensionnement d'une zone, le positionnement de station de base et des relais et la distribution des utilisateurs 5G. Enfin, l'anglet "About" qui donne un aperçu général sur notre outil.

Comme on peut le constater, les possibilités de simulations sont très nombreuses. On ne présentera par conséquent qu'un aperçu représentatif. Les paramètres utilisés dans le l'outil "5G DimTool" s'inspirent tous du standard de réseau 5G.



**Figure IV.9 :** Interface principale de l'outil 5G DimTool.

Notre outil fournit plusieurs sortes de résultats et même de tracer certaines courbes de simulation. Les paramètres imposés par le cahier des charges sont tous ajustables par l'utilisateur, et ce par l'intermédiaire des fenêtres de l'interface graphique de l'outil "5G DimTool". Celle-ci a pour vocation de rendre l'utilisation du programme simple et fonctionnelle. La saisie des paramètres se fait par l'intermédiaire des champs que l'utilisateur peut à souhait modifier ou ignorer. Des valeurs par défaut, réglages courants, sont disposées.

L'outil 5G DimTool contient un programme défensif, contre un mauvais choix des paramètres. Par exemple, si vous avez choisi, pour un modèle de propagation ABG, un environnement de terrain Line-of-Sight (LOS), le simulateur vous affiche une fenêtre "Error !" et vous indique une erreur.

La Figure IV.10 représente quelques fenêtres de dialogues d'erreurs.

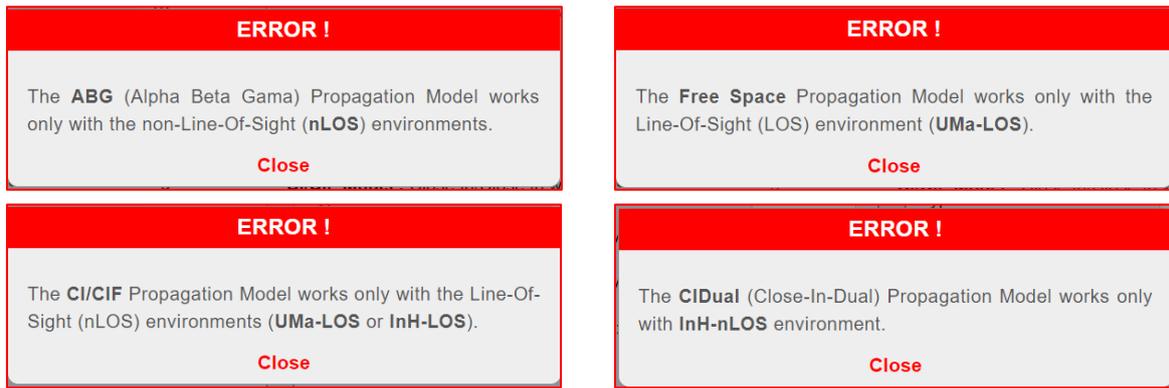
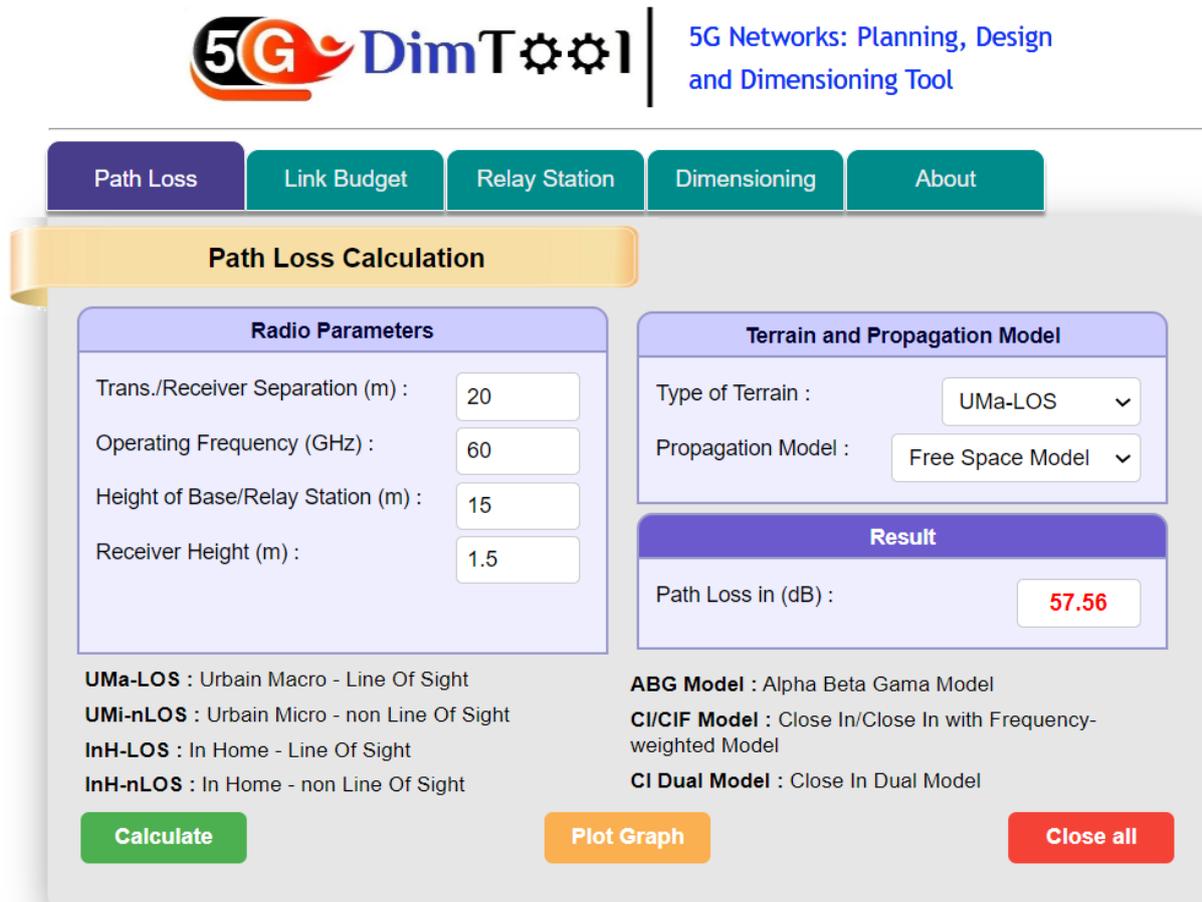


Figure IV.10 : Quelques fenêtres "Error !" du programme défensif.

## IV.5 Simulation de dimensionnement

### IV.5.1 Calcul de pertes du chemin

La figure IV.11 montre l'interface de calcul des pertes de chemin pour les différents modèles de propagation ; Free Space, ABG, CI/CIF et CI Dual, à l'aide de leurs formules respectives. Après le choix de type de terrain et les différents paramètres radio, En cliquant sur le bouton "Calculer", le résultat de perte de trajet en dB s'affiche par une simple clique sur le bouton "Calculate".



Copyright © 2023 - All rights reserved - 5G DimTool  
 Developed by H. Zeddami & S. Morsli - Directed by Dr. H. Zerrouki

Figure IV.11 : Interface calculatrice des pertes du chemin.

Le tableau IV.1 résume les valeurs des pertes pour les types de terrain ; UMa, UMi et InH des deux environnements LOS et nLOS pour les fréquences de 60 GHz, en fonction des distances qui séparent l'émetteur au récepteur. Les valeurs utilisées pour les calculs sont les suivantes :

- Hauteur d'antenne d'émission : 20 m,
- Hauteur du récepteur : 1.5 m,
- Distance Emetteur/Récepteur : 10 m, 20 m, 30 m, 40 m et 50 m,

Distance Emetteur-Récepteur	UMa LOS	UMa LOS	UMa nLOS	UMi nLOS Place Ouverte	InH nLOS Indoor	InH LOS Centres Commerciaux	InH nLOS Centres Commerciaux Double pente
	Espace Libre	Modèle CI/CIF	Modèle ABG	Modèle ABG	Modèle CI Dual	Modèle CI/CIF	Modèle ABG
10 m	29.83	58.12	100.60	105.23	98.26	51.71	107.91
20 m	57.56	91.87	110.83	115.70	110.81	85.11	119.44
30 m	73.78	111.61	116.82	121.83	118.15	104.65	129.18
40 m	85.28	125.62	121.07	126.18	123.36	118.51	130.96
50 m	94.21	136.48	124.36	129.55	127.40	129.26	134.68

**Tableau IV.1** : Pertes en chemin pour différents environnements avec une fréquence de 60 GHz.

- Concernant le modèle Espace libre, les pertes du parcours sont minimales,
- Pour le modèle CI, les pertes du parcours restent faibles, indiquant une situation LOS (Line-Of-Sight). Toutefois, étant donné que les fréquences millimétriques subissent une forte atténuation, la puissance reçue diminue considérablement avec la distance. Par conséquent, la communication entre les stations de base et les relais est plus efficace s'ils sont en vue directe (LOS) et à une courte distance (pas plus de 500 m).
- Pour le modèle ABG à double pente, les pertes du chemin augmentent pour tous les types de terrains par rapport au modèle précédent, confirmant une situation de non-visibilité (NLOS : Non-Line-Of-Sight) due aux effets d'obstruction.

Après l'analyse des résultats, il est observé que pour un environnement en vue directe (LOS), les modèles de propagation adéquats sont ; l'Espace libre et le CI, tandis que pour un environnement hors de vue directe (NLOS), le modèle ABG est plus adapté pour prédire les pertes de signal lors de sa transmission vers le récepteur dans un réseau 5G.

La figure IV.12 et la Figure IV.13 illustrent la variation des pertes de chemin (*Path Loss*) en fonction de la portée, respectivement pour les 4 modèles de propagations et 5 types de terrain.

D'après les résultats en remarque que les allures des courbes sont croissantes. En effet, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, l'affaiblissement du parcours augmente pour les différents modèles de propagations et différents types de terrain. Ceci est dû aux différents phénomènes physiques radio, tels que le l'effet de masquage "Shodwing", la diffraction, la réflexion et l'absorption de rayonnement auxquels le signal est subit lors de sa propagation entre l'émetteur et le récepteur.

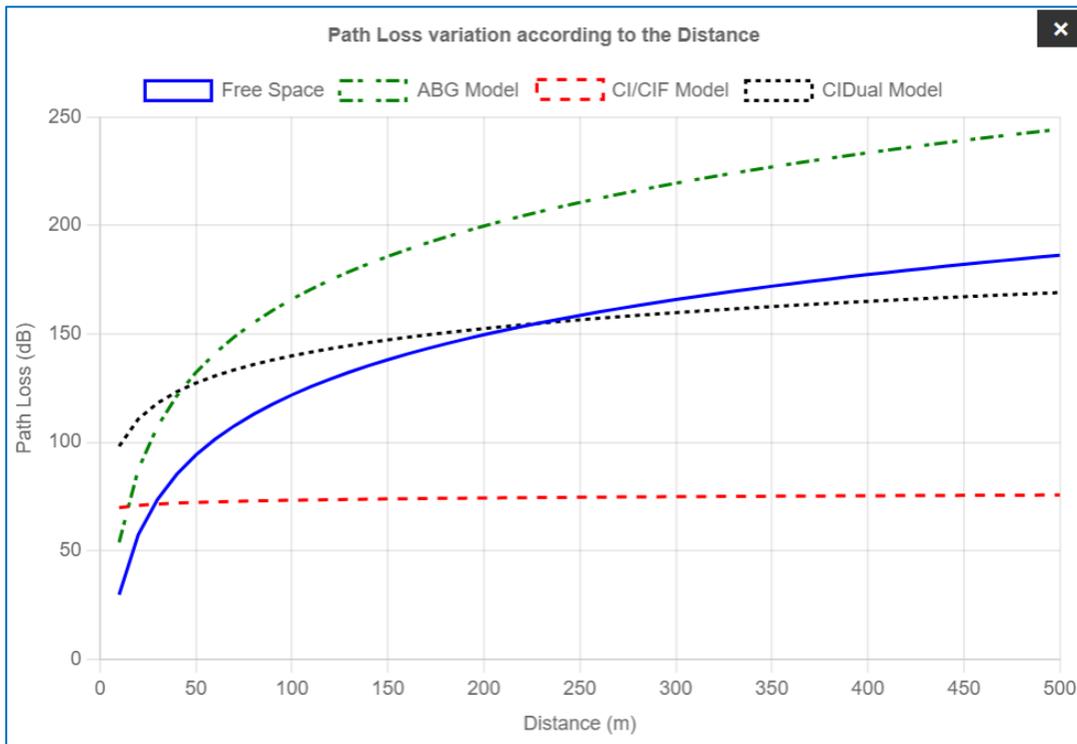


Figure IV.12 : Variation du Path Loss en fonction de la portée pour différents modèles.

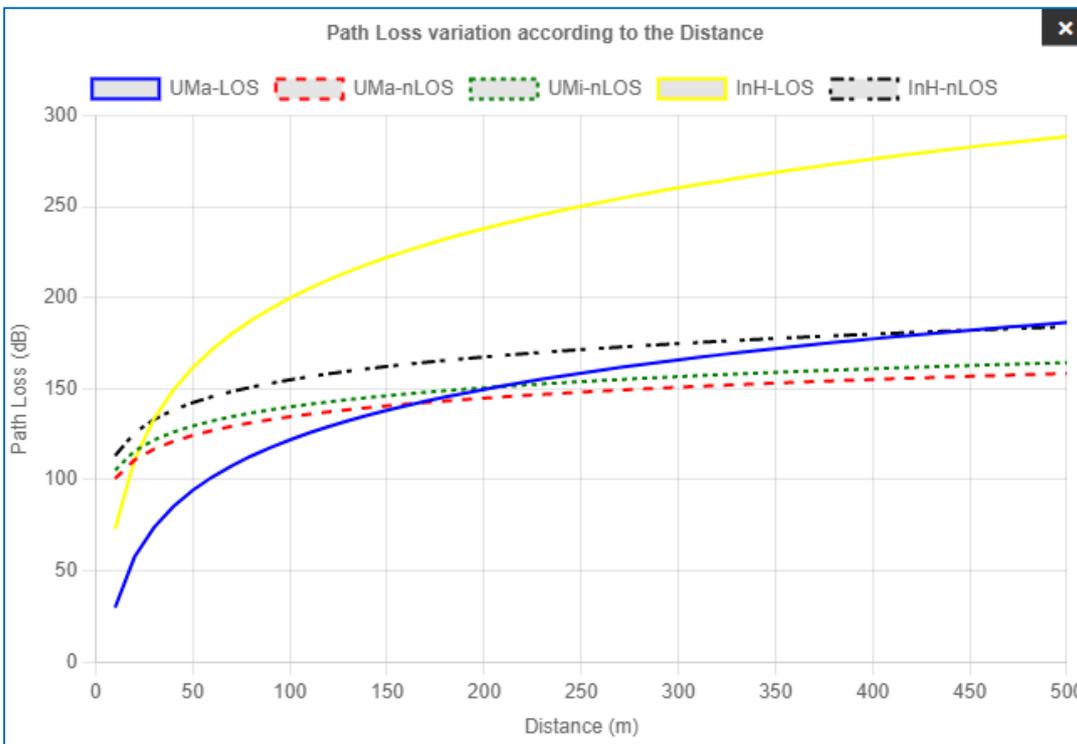


Figure IV.13 : Variation du Path Loss en fonction de la portée pour différents types de terrain.

### IV.5.2 Calcul de la portée de SB/SR (Bilan de liaison)

Si un utilisateur souhaite dimensionner la couverture radio d'une zone spécifique, il doit commencer par évaluer le bilan de liaison qui est une étape indispensable. Cela permet de calculer les affaiblissements maximaux tolérables entre la station de base et le récepteur pour un service donné, en fonction des caractéristiques des équipements envisagés et des marges d'affaiblissement estimées.

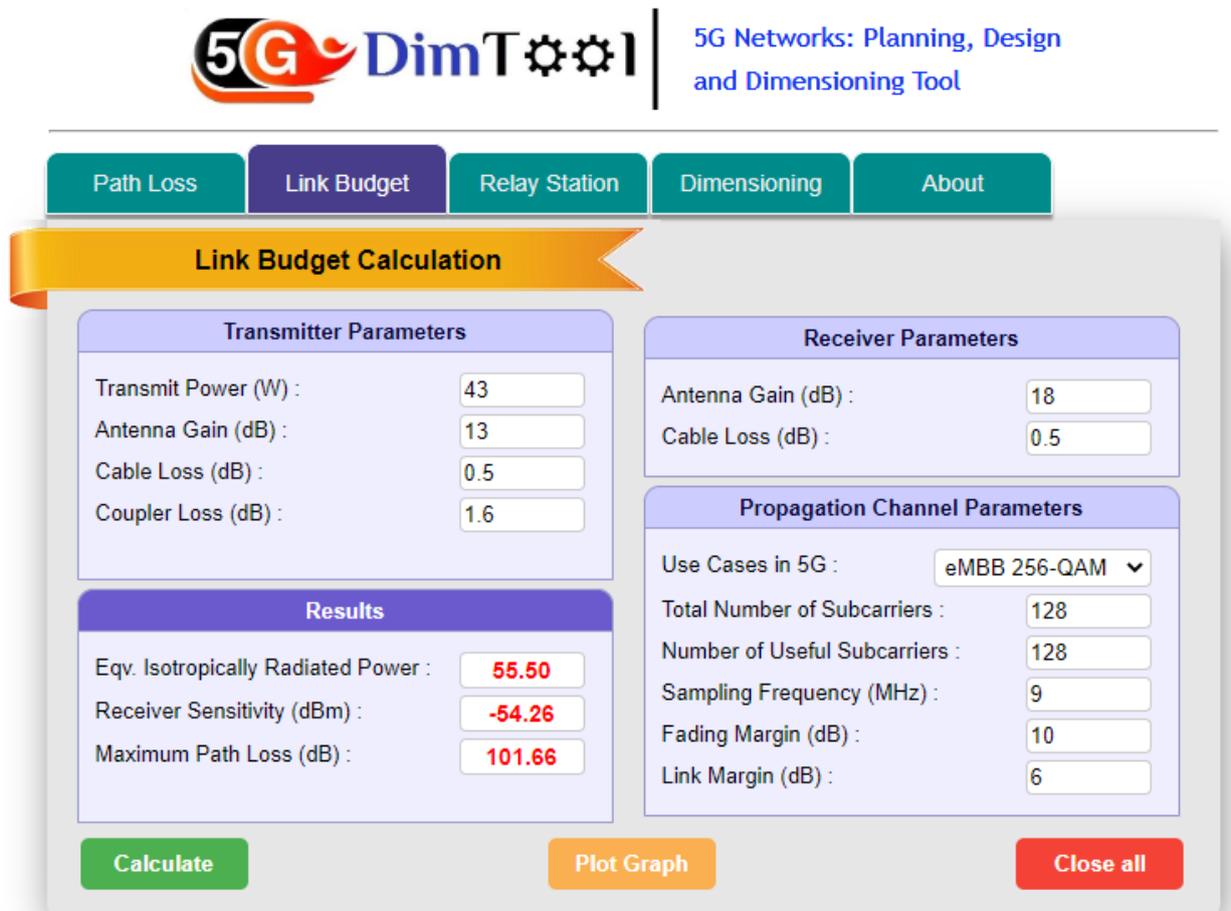
Il est nécessaire de saisir les paramètres du bilan de liaison pour évaluer les affaiblissements maximaux tolérés entre la station de base et le récepteur. Ces paramètres comprennent :

- Côté de l'émetteur : la puissance d'émission, le gain de l'antenne émettrice et les pertes liées aux câbles.
- Côté du récepteur : la sensibilité, le gain de l'antenne réceptrice, les pertes liées aux câbles et le facteur de bruit.
- Les marges : la marge d'interférence, la marge de Fading et les pertes dues aux pénétrations.

Dans notre simulation, on a utilisé les données suivantes afin de calculer le bilan de liaison :

- La puissance d'émission (puissance opérationnel) = 43 Watts
- Le gain de l'antenne réceptrice = 13 dB
- Les pertes dues aux câbles = 0.5 dB
- Le gain de l'antenne émettrice = 18 dB ainsi que les paramètres de la modulation GFDM.

L'interface de la Figure IV.14 permet de calculer le bilan de liaison "Link Budget" pour chaque modulation, l'affaiblissement maximal tolérable, la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) et la sensibilité en fonction du type de modulation, de codage et de l'environnement considéré.



Copyright © 2023 - All rights reserved - 5G DimTool  
 Developed by H. Zeddami & S. Morsli - Directed by Dr. H. Zerrouki

**Figure IV.14 :** Interface calculatrice de bilan de liaison.

Notons que l'affaiblissement maximum tolérable détermine la portée de chaque station de base ou station de relais, et donc conduit au calcul de la couverture et le nombre requis de station de base ou relais pour couvrir une zone donnée.

Nous avons considéré 4 scénarios pour la simulation de réseau 5G, à savoir ; eMBB (*enhanced Mobile Broad Band*) avec la modulation 256-QAM, BLUF (*Basse Latence Ultra Fiable*), IoT (*Internet of Things*) et AIRE (*Accès à l'Internet pour les régions éloignées*) avec la modulation 16-QAM.

Le tableau IV.2 présente les résultats de simulation obtenus à partir de l'interface calculatrice de bilan de liaison pour tous les scénarios cités précédemment.

La portée d'une cellule diffère pour chaque modèle de propagation utilisé. Elle dépend fortement de l'environnement de transmission, par exemple pour un environnement rural, où il n'y a pas beaucoup d'obstacles entre la station de base (BS) et les stations relais (SR) ou l'équipement utilisateur (EU), le modèle de propagation se rapproche de la propagation en vue directe (LOS : *Line Of Sight*) où on n'a pas que la perte du chemin en espace libre.

	Modulation	Rapport Signal/Bruit (dB)	PIRE (dB)	Sensibilité (dBm)	Perte de chemin maximal (dB)
eMBB	256-QAM	17.26	55.5	-54.26	101.66
BLUF	16-QAM	1.36	55.5	-33.64	81.04
IOT	16-QAM	3.25	55.5	-36.74	84.14
AIRE	16-QAM	-1.89	55.5	-31.30	78.70

Tableau IV.2 : Valeurs de PIRE, la sensibilité et l'affaiblissement selon la zone.

Les courbes de la figure IV.15 exposent l'impact de la hauteur de station de base et/ou station de relais sur l'affaiblissement et la portée dans le modèle de propagation en espace libre, pour trois et cinq hauteurs de station de relais et de station de base respectivement (5 m, 10 m, 15 m et 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m).

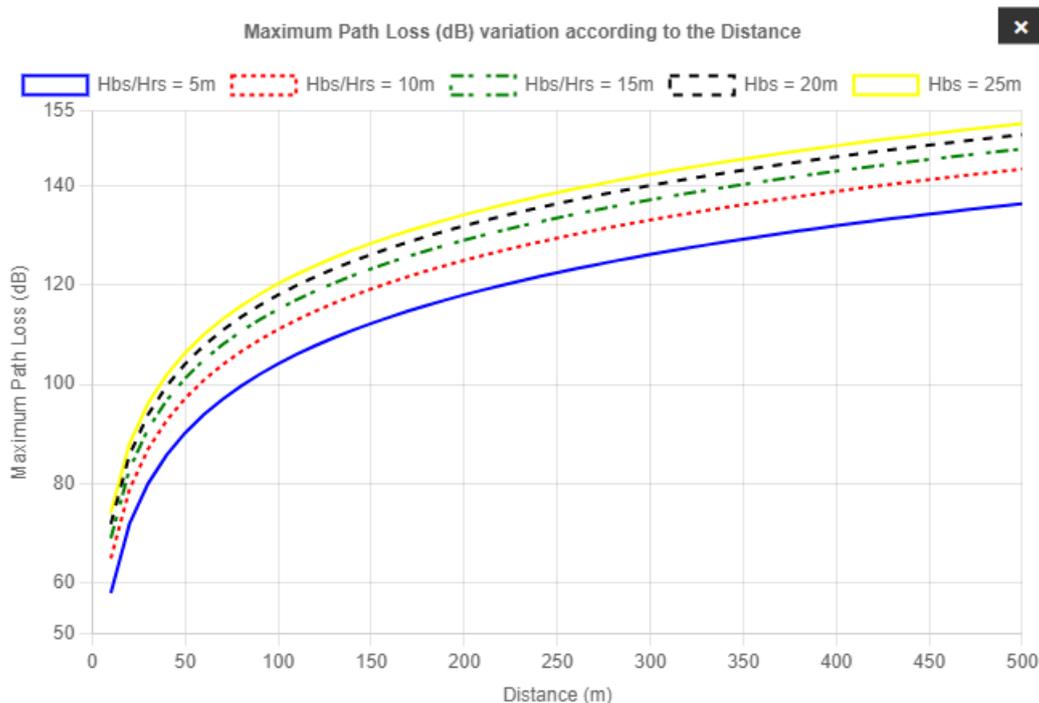


Figure IV.15 : Variation de maximum Path loss (dB) en fonction des portées.

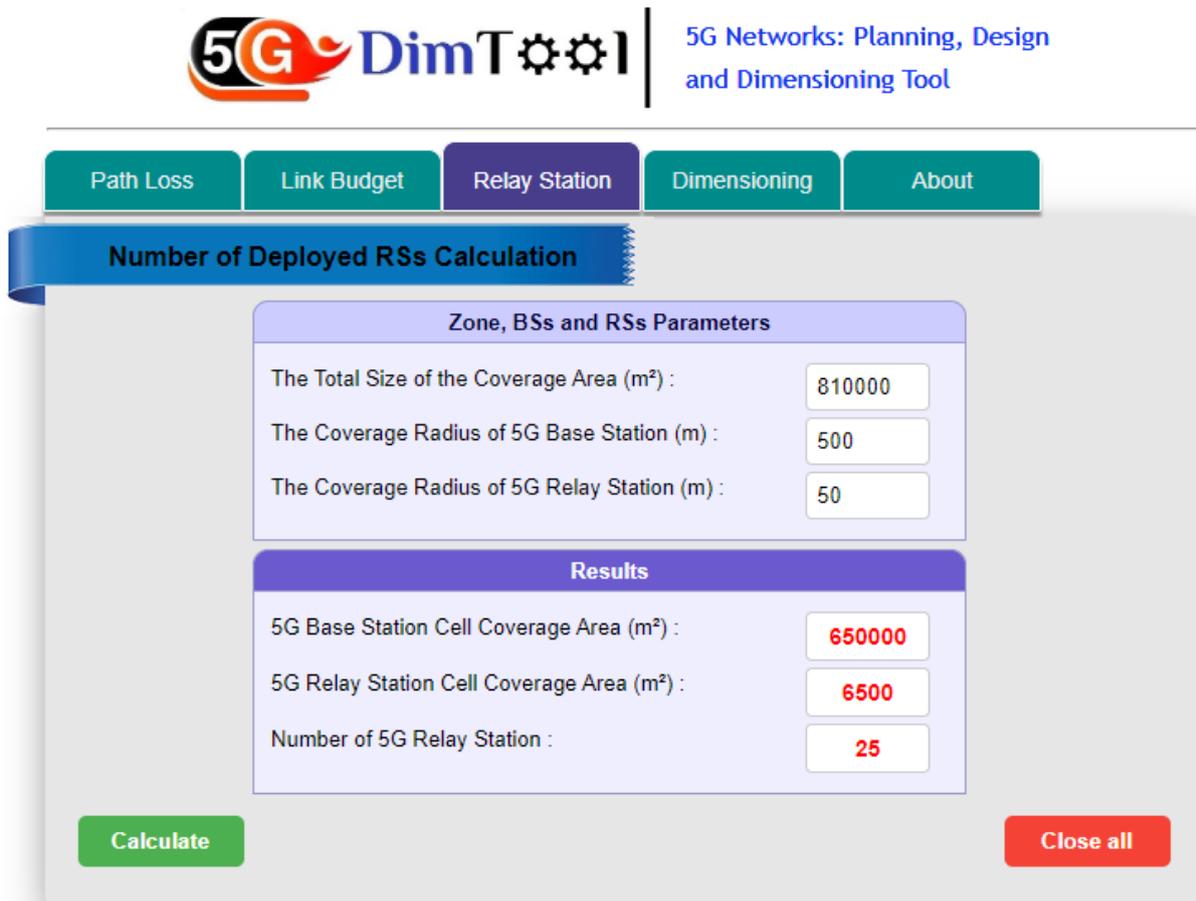
On constate une claire augmentation de l'affaiblissement en augmentant la portée, Aussi, on remarque cet affaiblissement augmente lorsqu'on augmente la hauteur de la station de base ou de la station de relais, ce qui montre l'effet de la situation de l'environnement (LOS ou nLOS) de la station de base ou de la station de relais sur l'affaiblissement subi par le signal.

En fait, la structure macro-cellules, généralement utilisée dans les zones rurales à faible densité d'abonnées, se base sur un nombre limité des stations de base qui sont hautes, le principal objectif étant d'assurer la plus grande couverture possible. Pour les zones urbaines denses, On utilise plus des stations de relais que les stations de bases, afin d'augmenter les débits et les supports sont généralement les plus courts afin de limiter l'effet d'interférence.

### IV.5.3 Calcul de nombre des stations de relais à déployer

La présente interface graphique schématisée par la figure IV.16 a pour objectif d'estimer le nombre de stations de relais requis pour assurer la couverture d'une zone donnée. Toutefois, il convient de noter que les calculs effectués dans cette simulation supposent que les cellules sont uniformes, alors que les cellules de Voronoi ne le sont pas, car elles sont générées de façon aléatoire. Cette hypothèse est toutefois nécessaire pour évaluer approximativement le nombre de relais nécessaire.

Après la simulation par notre outil, il est estimé que 25 stations de relais sont nécessaires pour supporter la station de base à couvrir la zone choisie et augmenter le débit fourni. Il est crucial de déterminer le nombre optimal de stations de relais pour optimiser le réseau et minimiser les coûts d'investissement.



Copyright © 2023 - All rights reserved - 5G DimTool  
 Developed by H. Zeddami & S. Morsli - Directed by Dr. H. Zerrouki  
**Figure IV.16 :** Calcul de nombre de stations de relais utilisées.

De plus, l'augmentation de la portée de la station de base est importante pour minimiser le nombre de cellules nécessaires pour couvrir la zone. Après ce calcul, la simulation de positionnement des stations de base et des stations de relais peut être effectuée.

#### IV.5.4 Simulation de dimensionnement d'une zone

Après avoir effectué toutes les études techniques dans les sections précédentes, nous pouvons maintenant passer à la simulation de dimensionnement de notre zone. La figure IV.17 montre l'interface de lancement de dimensionnement de réseau 5G.



**Figure IV.17 :** Interface de lancement de dimensionnement d'une zone.

Selon le calcul que nous venons de voir, notre zone a une surface de 810000m<sup>2</sup> (900m x 900m) que nous avons calculée précédemment, le nombre de stations de relais utiles pour une station de base est de 25, ainsi 500 utilisateurs actifs sont considérés dans cette zone à dimensionner.

Notre simulation consistera également à contrôler l'admission des utilisateurs et la puissance d'émission des stations. Pour commencer, nous validons le modèle de simulation et présentons les résultats de notre simulation ainsi que l'association d'utilisateurs à leurs stations, basée sur le diagramme de Voronoi pour une petite architecture de cellules hétérogènes.

La simulation est effectuée dans un scénario d'environnement urbain composé d'une seule station de base 5G (IBS 5G) supportée par 25 petites stations de relais (25 RS). Par un simple clic sur le bouton "Start Planning" il s'affichera l'interface de dimensionnement.

Les concepts suivants sont employés pour comparer et montrer l'exécution de notre arrangement proposé :

- Le critère d'association d'utilisateurs le plus couramment utilisé est la règle de la puissance du signal reçu en "downlink", où l'utilisateur  $j$  est associé à la station  $i$  ayant la puissance de signal la plus élevée.
- Avant de simuler l'association des utilisateurs, nous devons positionner les sites de notre système.

Nous utilisons notre outil "5G DimTool" pour placer la station de base et les 25 relais, en cliquant sur le bouton "Add BS/RS to the Map", tout en bas gauche de l'interface de dimensionnement. L'outil va placer la station de base en rouge et les relais en bleu, comme montre la Figure IV.18.

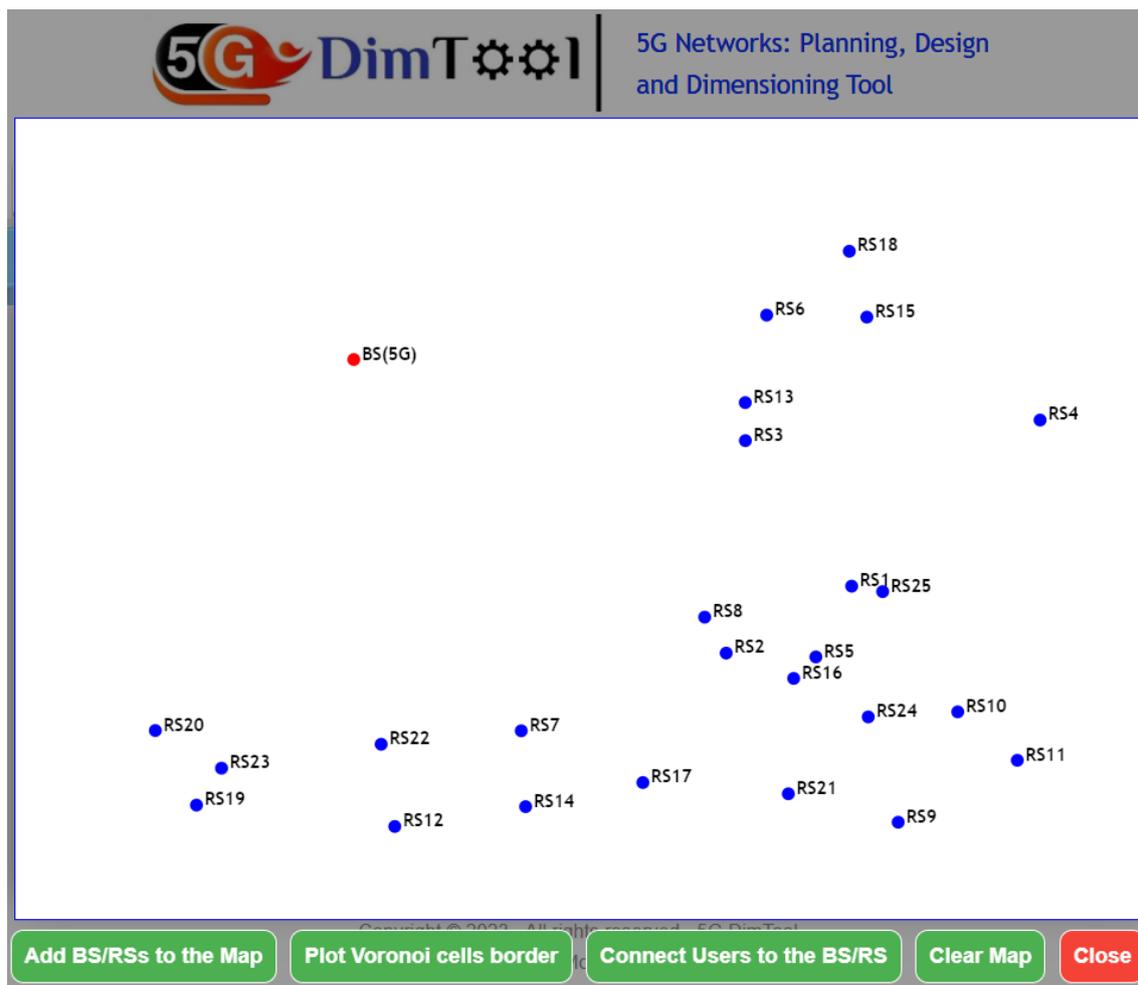


Figure IV.18 : Ajout des sites dans la zone de couverture.

Après l'ajout des sites, nous allons calculer de diagramme de Voronoi du réseau, qui détermine les zones de couverture de chaque site en cliquant sur le bouton "Plot Voronoi cells border", comme illustre la Figure IV.19.

Le diagramme de Voronoi sert à couper le plan en un certain nombre de polygones, un polygone par station, où n'importe quel point à l'intérieur de chaque polygone offre de plus grandes possibilités intéressantes à la station de ce polygone qu'à tout autre. La station de base 5G est distinguée aux stations relais par un arrière-plan de couleur orange claire.

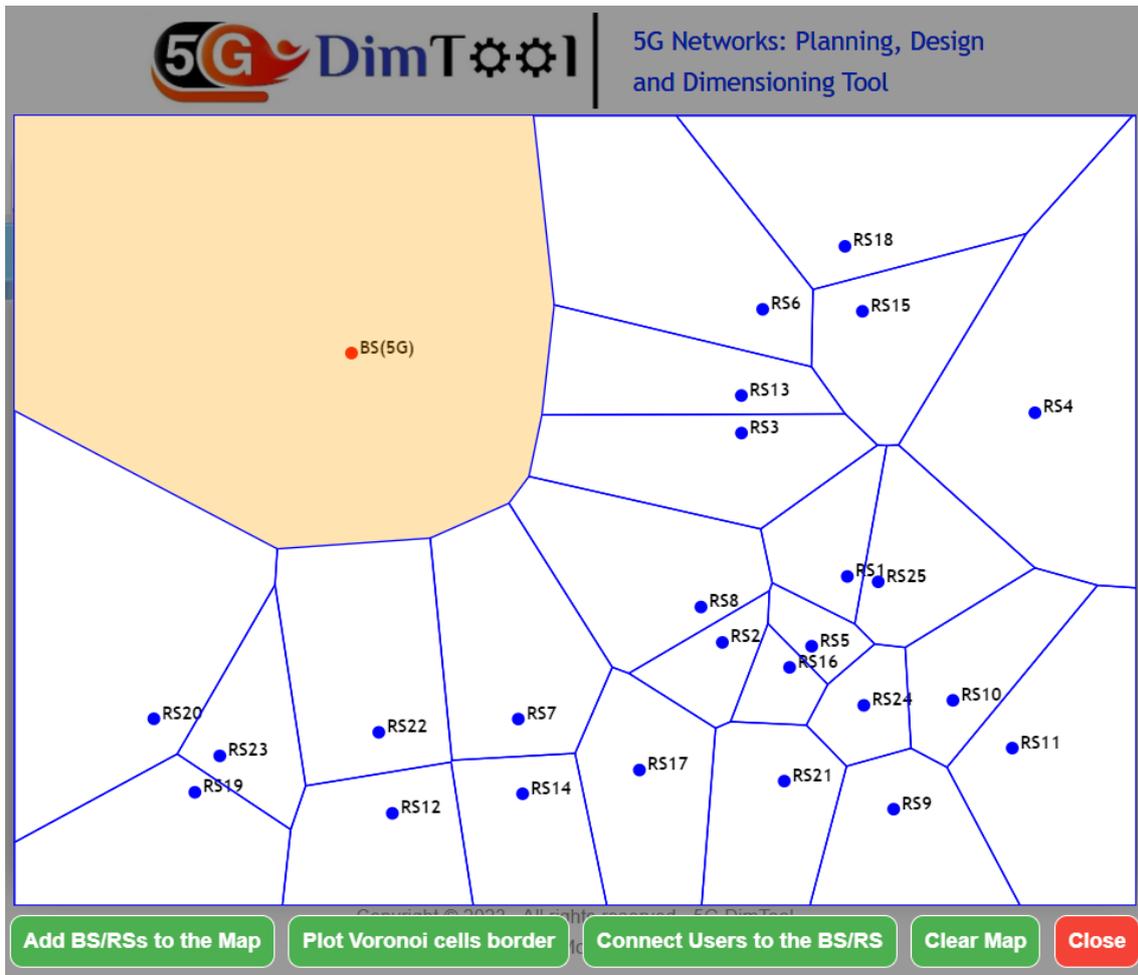


Figure IV.19 : Diagramme de Voronoi pour le réseau sans fil hétérogènes.

Après le calcul de diagramme de Voronoi, les répartitions et l'association des utilisateurs avec les sites les plus proches sont obtenues en cliquant sur le bouton "Connect Users to the BS/RS". Le résultat de cette opération est schématisé par la Figure IV.20.

Les Figures IV.19 et IV.20 montrent, respectivement, le diagramme de Voronoi et l'association d'utilisateur dans un réseau sans fil hétérogène. Dans un réseau cellulaire courant, les utilisateurs sont reliés à une station de base basée sur la force du signal reçue. Cependant, dans notre simulation, on emploie la technique de calcul de diagramme de Voronoi avec les métriques  $d_{ij}$ , c-à-d la distance en la station  $i$  et l'utilisateur  $j$  la plus faible, pour résoudre le problème d'association d'utilisateur quand un utilisateur a plusieurs stations à choisir.

Les résultats peuvent être vus dans les deux figures en appliquant la méthode de Voronoi ; la fonction trace les lignes bleues de sorte que pour n'importe quelle paire de stations voisines, une bordure de diagramme de Voronoi passe entre elles au moment où le potentiel égal.

Autrement dit, les points qui se trouvent sur les bordures du diagramme de Voronoi sont placés exactement au même potentiel de 2 stations voisines, et aux sommets du diagramme de Voronoi sont situés exactement au même potentiel de 3 stations voisines. La méthode de Voronoi alors calcule et relie chaque utilisateur dans un certain polygone de Voronoi à la station correspondant à ce polygone, comme illustré sur la Figure IV.20.

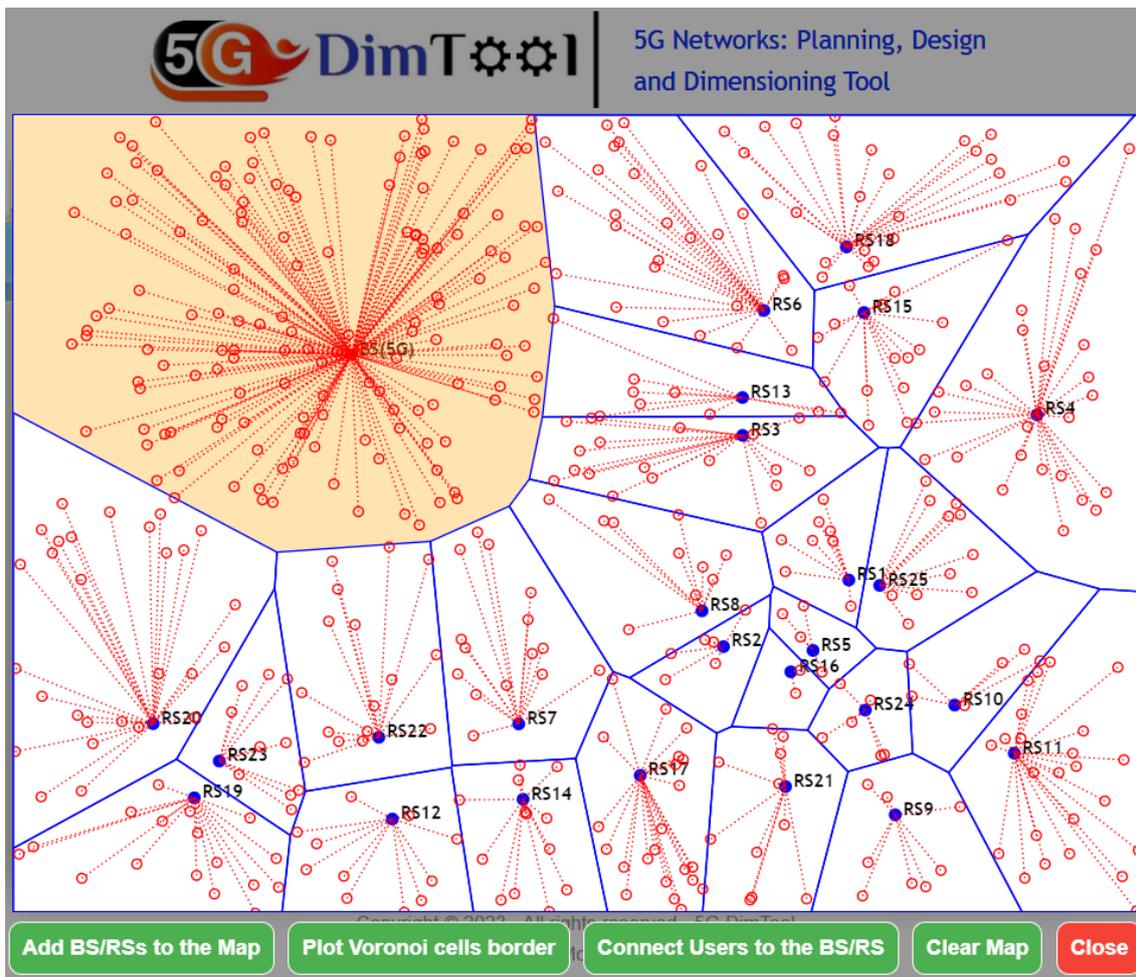


Figure IV.20 : Association des utilisateurs pour le réseau sans fil hétérogène.

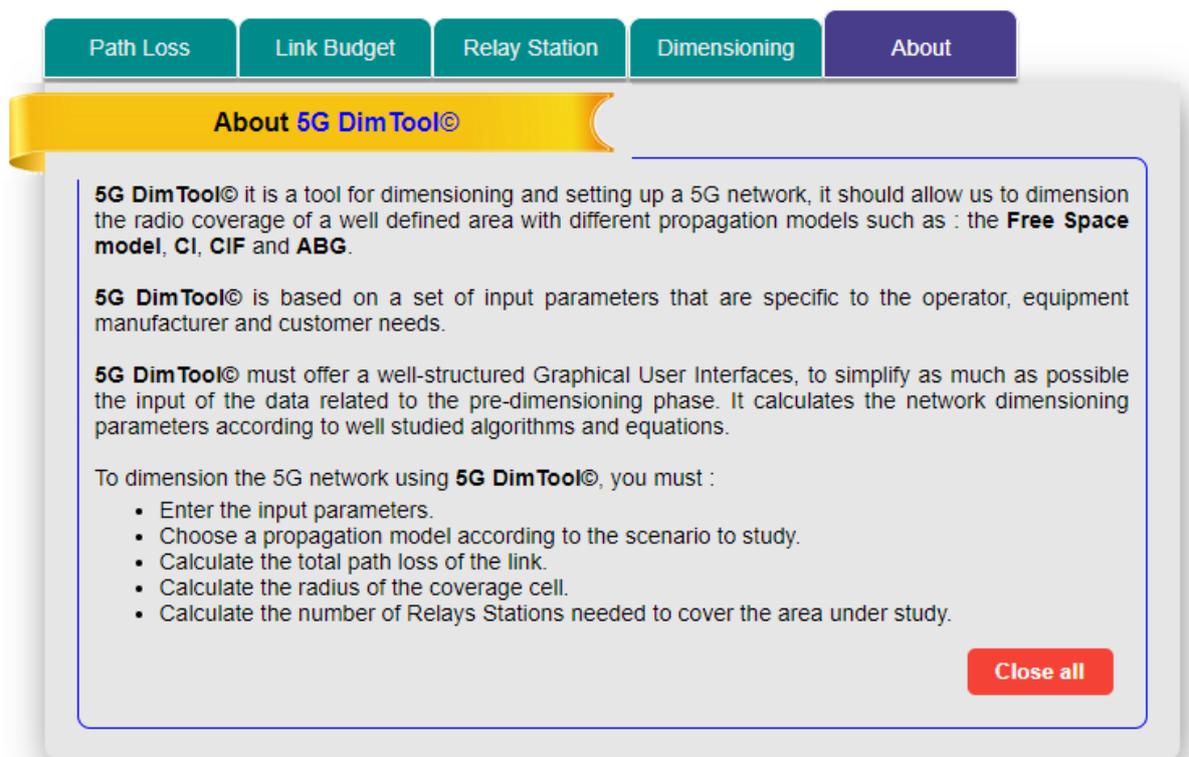
#### IV.5.5 Interface "About"

Cet onglet à propos de notre outil de dimensionnement "5G DimTool" (Figure IV.21), il permet d'informer l'utilisateur notre outil et donner un aperçu général sur son mode d'utilisation.

5G DimTool© est un outil de dimensionnement et de mise en place d'un réseau 5G. Elle offre des interfaces graphiques bien structurés, pour simplifier le maximum possible la saisie des données relatives à la phase de pré-dimensionnement.

Le calcul de dimensionnement du réseau suivant des algorithmes et des équations établis par des chercheurs de domaine. L'utilisateur ne doit que :

- Saisir les paramètres d'entrée,
- Choisir un modèle de propagation selon le scénario à étudier,
- Calculer la perte de trajet totale (*Path Loss*) de liaison,
- Calculer le rayon de la cellule de couverture,
- Calculer le nombre de relais nécessaire pour la couverture de la zone à étudier,
- Enfin, Simuler le dimensionnement et la planification de la zone à couvrir.



Copyright © 2023 - All rights reserved - 5G DimTool  
Developed by H. Zeddami & S. Morsli - Directed by Dr. H. Zerrouki

Figure IV.21 : Interface "About" de l'outil 5G DimTool.

## IV.6 Conclusion

Le dimensionnement des réseaux 5G, qui sont des réseaux hétérogènes, est une tâche complexe qui nécessite d'identifier ses étapes, estimer le temps nécessaire à chacune, planifier leur exécution et une stratégie de mise en œuvre.

Dans notre simulation, nous avons accompli le dimensionnement d'une zone en prenant en compte le contrôle d'admission des utilisateurs et le contrôle de la puissance de transmission dans un réseau 5G hétérogène. Nous avons également proposé d'utiliser le diagramme de Voronoi pour positionner les stations avec leurs identifiants dans la zone et représenter les bordures de chaque site, enfin associer les utilisateurs aux stations, afin de maximiser le nombre d'utilisateurs admis dans le système, tout en respectant les exigences de qualité de service et les contraintes de capacité. En particulier, cette méthode permet de minimiser la puissance de transmission nécessaire et d'assigner de manière optimale la puissance à chaque station de sorte qu'une puissance de transmission minimale soit utilisée.

## Conclusion générale

Le dimensionnement d'un réseau sans fil est crucial pour minimiser les coûts de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau, tout en prenant en compte la couverture radio, la taille des cellules et la topologie du réseau, sous réserve des contraintes de la qualité de service (QoS).

L'objectif de ce projet de fin d'études est d'optimiser la couverture du réseau d'accès 5G grâce au développement d'un outil simplifiant les calculs complexes nécessaires au dimensionnement de la couverture. Ces calculs comprennent notamment le calcul du bilan de liaison, permettant de déterminer le nombre minimal de stations de relais requises pour supporter la station de base, dans l'objectif de couvrir une zone déterminée avec l'amélioration de ses performances, en utilisant les formules spécifiques à chaque modèle de propagation selon le type du terrain de la zone de couverture.

Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé en plusieurs étapes essentielles. Tout d'abord, nous avons examiné les différents types de réseaux mobiles existants, leur évolution dans le temps, de la première génération à la cinquième en cours de déploiement et jusqu'à la sixième génération de future assez proche.

Après la mise en point sur l'essentiel à savoir sur les réseaux mobiles 1G, 2G, 3G, 4G, 5G et 6G, nous avons détaillé avec une étude technique approfondie, les technologies du réseau 5G, ses objectifs, ses caractéristiques, son architecture et ses spécifications techniques.

Ensuite, nous avons expliqué le processus de dimensionnement et énuméré les différentes règles caractéristiques des modèles de propagation nécessaires pour le dimensionnement orienté couverture d'un réseau 5G.

Une étude conceptuelle de l'outil de dimensionnement, spécifiant les besoins fonctionnels et non fonctionnels, ainsi les langages de programmation et l'environnement utilisés, nous a permis de simplifier la mise en œuvre de notre outil.

En conclusion, nous considérons avoir atteint les divers objectifs préalablement fixés, mais comme toute tâche humaine, ce mémoire peut être amélioré en ajoutant la planification orientée capacité. De plus, les études sur la communication inter-objets ou la communication *device-to-device* (D2D) ne sont pas suffisamment approfondies dans notre travail.

## Références bibliographiques

- [1]. Guy Pujolle, "Les réseaux : Annexe N18. Les réseaux de mobiles 2G et 3G", Edition Eyrolles, Released July 2011. ISBN : 9782212128789.
- [2]. « Chapitre 1 : l'évolution des réseaux mobiles », document-569882437, publié le 14 Avril 2021. consulté le 2 février 2023, <https://www.scribd.com/document/569882437/Chapitre-1>
- [3]. C. Demoulin, M. Van Droogenbroeck. "Principes de base du fonctionnement du réseau GSM", Revue de l'AIM, Institut Montefiore - Université de Liège – Belgium, pages 3–18, N04, 2004.
- [4]. Pierre Brisson, Peter Kropf, "Global System for Mobile Communication (GSM)", Support de cours, Université de Montréal, 2014.
- [5]. HASNAOUI Omar El-hak, "Etude et simulation d'un réseau cellulaire UMTS", Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Djillali Liabes-Sidi Bel Abbès, 2006.
- [6]. Khaldoun Al Agha, Guy Pujolle, Guillaume Vivier, " Réseaux de mobiles et réseaux sans fil", Edition Eyrolles, 2001. ISBN : 9782212110180.
- [7]. Orange Developer, " EDGE : description technique", Documentation technique Orange Developer, <https://developer.orange.com/od-uploads/EDGE-Description-technique.pdf>
- [8]. Jean Cellmer, " Réseaux cellulaires - Système UMTS", Techniques d'ingénieur, Article Réf : TE7368 v1, 10 mai 2002.
- [9]. Lescuyer (P.), "UMTS : Les origines, l'architecture, la norme." Edition Dunod, Paris - 241 p., 2001.
- [10]. Holma Harri, Toskala Antti, "HSDPA/HSUPA for UMTS High Speed Radio Access for Mobile Communications", Edition Wiley, April 2006. ISBN: 978-0-470-01884-2.
- [11]. Nouradine Saïd Ali, "Etude de Transmission pour les réseaux LTE/4G (Mobilis)", Mémoire de Master en Électronique, Spécialité : Réseaux et Télécommunication, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2016.
- [12]. Hamza YAHIAOUI, Redouane LOUNNAS, "Étude des Performances des Réseaux 4G LTE", Mémoire de Master en Génie Électrique, Spécialité : Télécommunications et Réseaux, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [13]. Dehemchi Marwa, Bouhafer Asma «Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G», Mémoire de Master en Télécommunications Spécialité : Réseaux et Télécommunications, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [14]. Ando R., "6G : guide complet sur la sixième génération de réseau sans fil", Mis à jour : 22 Septembre 2021, consulté le 21 février 2023. <https://www.objetconnecte.com/6g-guide-complet/>.
- [15]. [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html), Updated : March 9, 2020, Consulté le 05 avril 2023.
- [16]. A. Ghosh, R Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced : next generation wireless broadband technology," IEEE Wireless Communications, vol.17, n°3, p : 10,22, June 2010.
- [17]. Abdullah Al Mamun, Sultan Anwar, Hassan Ali, "4G and 5G Mobile Communication Networks : Features Analysis, Comparison and Proposed Architecture", Dept. of Computer Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, KSA, June 2016.

- [18]. Dehemchi Marwa, Bouhafer Asma, "Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G", Mémoire de Master en Télécommunications Spécialité : Réseaux et Télécommunications, Faculté des sciences et de la Technologie, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [19]. Gerhard Fettweis, Marco Krondorf, and Steffen Bittner, "GFDM-generalized frequency division multiplexing," 2009.
- [20]. Nicola Michailow, Ivan Gaspar, Stefan Krone, Michael Lentmaier, and Gerhard Fettweis, "Generalized frequency division multiplexing : Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems.", p : 171–175, 2012.
- [21]. Trilochan Patra, Swarup Kumar Mitra, "Resource optimization of MIMO using neural network for 5G communication",- Alexandria Engineering Journal, Volume 61, Issue 12, 2022.
- [22]. Thakur.Neena, Thakur. Ranjana. "Performance Evaluation Of Ber For AWGN, AWGN multipath and RAYLEIGH Fading Channels". Department Of Electronics and Communication Engineering, s.e.c.g., Mohali, Punjab, India. 2014.
- [23]. Sadou, B., Alqudami, D. A., & Zaaimia, M. Z. E. "Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G de nouvelle génération", Doctoral dissertation, Université de Jijel, 2020.
- [24]. Jean-Yves Chouinard. "Théorie et pratique des codes correcteurs", Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Canada, 2013.
- [25]. Jean-Guillaume Dumas, Jean-Louis Roch, Eric Tannier, Sébastien Varrette, "Théorie Des Codes : compression, cryptage, correction", Edition Dunod, page2 71-273, Paris2007.
- [26]. Abderrahmane, Ben Mimoune, & Michel, Kadoch. "Mobility Management for novel LTE-A Relay System", 2013.
- [27]. 3GPP "Technical Specification Group Radio Access Network ; Mobile Relay for Evolved Universal Terrestrial Radio Access", 2012.
- [28]. Sui, Vihriala, J., Papadogiannis, A., Sternad, M., Wei, Yang, & Svensson, T. "Moving cells : a promising solution to boost performance for vehicular users". Communications Magazine, IEEE, 2013.
- [29]. Ravaliminoarimalalason Toky Basilide, "QoS et ingénierie des réseaux cellulaires", Cours 5ème année, Dép. TCO. E.S.P.A, A.U. : 2015-2016.
- [30]. Nicola Michailow, Ivan Gaspar, Stefan Krone, Michael Lentmaier, and Gerhard Fettweis, "Generalized frequency division multiplexing : Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems.", p : 171–175, 2012.
- [31]. A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications : The vision of the METIS project", IEEE communications Magazine, vol.52, n°.5, p : 26–35, 2014.
- [32]. RAJAONARISON Roméo, "La technique MIMO : Multiple-Input Multiple-Output", Cours 4ème année, Dép. TCO. E.S.P.A, A.U. : 2014-2016.
- [33]. M. S. Ali, "On the Evolution of Coordinated Multi-Point (CoMP) Transmission in LTEAdvanced", International Journal of Future Generation Communication and Networking, vol.7, n° 4, p : 91-102, Apr 2014.
- [34]. W. Ryanand S. Lin, "Channel Codes : Classical and Modern". Cambridge University Press, 2009.
- [35]. S. ChoiandK. G. Shin, "A class of adaptive hybrid ARQ schemes for wireless links", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.50, n° 3, p : 777–790, May 2001.
- [36]. N. Michailow, M. Matthe, I. Gaspar, A. Caldevilla, L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks", IEEE Transactions on Communications, vol.62, n°.9, p : 3045–3061, Sept 2014.

- [37]. N. Michailow and G. Fettweis, "Low peak to average power ratio for next generation cellular systems with generalized frequency division multiplexing", in Proc. of IEEE Int. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS), p : 651-655, Nov.2013.
- [38]. G. Wunder, P. Jung, M. Kasparick, T. Wild, F. Schaich, Y. Chen, S. tenBrink, I. Gaspar, N. Michailow, A. Festag, L. L. Mendes, N. Cassiau, D. Ktenas, M. Dryjanski, S. Pietrzyk, B. Eged, P. Vago, and F. Wiedmann, "5G NOW : non orthogonal, asynchronous waveforms for 71 future mobile applications", IEEE Communications Magazine, vol.52, n° 2, p : 97-105, 2014.
- [39]. S. Choi and K. G. Shin, "A class of adaptive hybrid ARQ schemes for wireless links," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.50, n° 3, p : 777-790, May 2001.
- [40]. Teyeb, Oumer, Van Phan, Vinh, Raaf, Bernhard, & Redana, Simone, "Dynamic Relaying in 3GPP LTE-Advanced Networks.", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009
- [41]. D. Bojic, E. Sasaki, N. Cvijetic, T. Wang, J. Kuno, J. Lessmann, "Advanced Wireless and Optical Technologies for Small-Cell Mobile Backhaul with Dynamic Software-Defined Management", IEEE Communications Magazine, vol.51, n° 9, p: 86-93, Sept. 2013.
- [42]. Vyalyi, Mikhail Nikolaevich, Gordeyev, EN, & Tarasov, Sergei Pavlovich, "The stability of the Voronoi diagram", Computational mathematics and mathematical physics, p: 405-414, 1996.
- [43]. Stéphane Genoud " Cours 6 : Introduction au langage JavaScript (1ère partie) ", UFR "IM2AG", Manuel Atencia Arcas, UGA, Dernière modification le 19/10/2022.
- [44]. *HTML, CSS, and JavaScript: Your Guide to Learning Fundamental Front End Languages*, <https://techbootcamps.utexas.edu/blog/html-css-javascript/>, Consulté le 12 Mai 2023.
- [45]. <https://www.journaldunet.fr/Web-tech/dictionnaire-du-Webmastering/1203587-jquery-definition/#:~:text=Qu'est%20le%20framework,faciliter%20l'%C3%A9criture%20de%20>, Consulté le 12 Mai 2023.