

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 : Systèmes des Télécommunications**

**Par : BENMOSTEFA Othmane et BENAMAR Alae Adnane**

### **Sujet**

**Estimation d'un signal primaire dans un réseau 5G par un utilisateur  
secondaire à base d'un détecteur d'énergie**

Soutenu publiquement, le **05 / 11 / 2020**, devant le jury composé de :

M. IRID S.M.H	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. KAMECHE S	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ADARDOUR H.E	MAB	Univ. Chlef	Co- Directeur de mémoire
M. HADJILA M	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

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 : Systèmes des Télécommunications**

**Par : BENMOSTEFA Othmane et BENAMAR Alae Adnane**

### **Sujet**

**Estimation d'un signal primaire dans un réseau 5G par un utilisateur secondaire à base d'un détecteur d'énergie**

Soutenu publiquement, le **05 / 11 / 2020**, devant le jury composé de :

M. IRID S.M.H	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. KAMECHE S	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ADARDOUR H.E	MAB	Univ. Chlef	Co- Directeur de mémoire
M. HADJILA M	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À mes chers parents **Ahmed** et **Latifa** qui m'ont éclairé sur le chemin du succès et qui m'ont soutenu jusqu'à la fin de ce souvenir. Car si je le suis... c'est grâce à eux.*

*À ma seule soeur, **Chafia**, et à mon seul frère, **Brahim**, qui n'ont jamais cessé de m'apporter leur contribution morale.*

*À mes chers proches **Khalil** et **Bahia**.*

*À ma meilleure amie.*

*À toute ma famille.*

*À mon binôme **Alae** par sa présence et son soutien durant ce long travail.*

*À tous mes amis du groupe Amphi 1.*

*Et enfin à tous ceux que j'aime et dont j'ai manqué de mentionner leurs noms à ce travail qui vous est dédié.*

***Othmane***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À mes parents **Abderrahmane** et **Leila**. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*À mes frères **Mehdi**, **Nadir** et **Abdelalim** sans oublier ma **grand-mère**, mon **grand-père** que j'aime.*

*À mes chères **Otmane**, **Zohir** et **Mohammed**.*

*À toute ma famille, et tous mes amis.*

*À mon binôme **Othmane** et toute la famille **BENMOSTEFA**. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

***Alae Eddine***

# Remerciements

---

*Nous voudrions tout d'abord remercier DIEU le tout-puissant pour nous avoir donné la volonté et le pouvoir de développer ce modeste travail.*

*Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide, la gentillesse, la compréhension, le dévouement et le soutien permanent de certaines personnes, auxquelles nous tenons à témoigner notre gratitude et nos sincères remerciements.*

*Nous remercions sincèrement notre directeur de mémoire, Monsieur le Professeur KAMECHE Samir, pour ses efforts et ses précieux conseils pour nous guider et mener à bien la préparation de notre mémoire.*

*En même temps, nous souhaitons également remercier Monsieur ADARDOUR Haroun Errachid, le co-directeur de notre mémoire, qui nous a permis d'approfondir nos recherches qui ont été très généreuses en informations et conseils, dont le mérite va à lui.*

*Nos remerciements les plus respectueux vont à Monsieur IRID Sidi Mohamed Hadj, pour avoir accepté de présider le jury de ce Mémoire.*

*Nous exprimons également notre gratitude à Monsieur HADJILA Mourad, pour avoir accepté d'examiner et de porter un jugement sur les travaux de ce Mémoire.*

*Nos sincères remerciements s'adressent également à ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, dans la réalisation de cette étude.*

*Enfin, nos remerciements vont à tous nos professeurs de la Faculté de technologie, qui nous ont aidés tout au long de notre cycle universitaire.*

## **Résumé**

L'étude des ondes millimétriques (ou mmWave) est importante dans la communication 5G afin d'évaluer les nouvelles solutions technologiques dans des environnements réels. Il est donc essentiel de proposer et de développer de nouveaux modèles de canaux fiables qui prennent en compte les effets de l'absorption atmosphérique des ondes millimétriques et de la perte de couverture provoquée par la puissance du signal d'interférence dans les liaisons à ondes millimétriques plus encombrées. Dans ce projet, nous proposons un algorithme pour la détection du signal primaire transmis par une station de base 5G (ou SB5G) à une fréquence de 60 GHz dans un environnement fermé avec des obstacles fixes. De plus, l'algorithme proposé est basé sur la détection de l'énergie et l'estimation du signal primaire 5G en utilisant le filtre alpha-bêta (ou FAB). La performance de cet algorithme suggéré dans ce projet est évaluée à l'aide de simulations et de résultats.

**Mots clés :** mmWave, 5G, SB5G, Détecteur d'énergie, Filtre Alpha-Bêta.

# Table des matières

Remerciement.....	i
Résumé .....	ii
Table des matières .....	iii
Sigles et abréviations.....	vi
Liste des figures .....	x
Liste des tableaux .....	xii
Introduction générale .....	2

## Chapitre 1 : Évolution des systèmes de radio cellulaire

1.1. Introduction .....	5
1.2. Historique des réseaux mobiles.....	5
1.2.1. 1 <sup>er</sup> Réseau : réseau A.....	5
1.2.2. 2 <sup>ème</sup> Réseau : réseau B .....	5
1.2.3. 3 <sup>ème</sup> Réseau : réseau C .....	5
1.2.4. Réseau GSM (Global System Mobile) : réseau D.....	6
1.3. Réseaux mobiles.....	6
1.3.1. Classification des réseaux mobiles .....	6
1.3.2. Concept cellulaire .....	7
1.4. Évolution des réseaux mobiles .....	10
1.4.1. Première génération de téléphones mobiles (1G).....	10
1.4.2. Deuxième génération de téléphones mobiles (2G).....	10
1.4.2.1 Réseau GSM (2G).....	11
1.4.2.2 Réseau et architecture GPRS (2.5) .....	14

1.4.2.3 Réseau EDGE (2.75).....	15
1.4.3. Réseau UMTS (3G).....	15
1.4.3.1 Objectifs de réseau UMTS.....	15
1.4.3.2 Avantages de l'UMTS.....	16
1.4.3.3 Architecture du réseau UMTS .....	17
1.4.3.4 Entités du réseau UMTS .....	18
1.4.4. 4 <sup>ème</sup> génération.....	20
1.4.4.1 Définition de réseau 4G .....	20
1.4.4.2 Objectif de réseau 4G.....	20
1.4.4.3 Architecture de réseau 4G (LTE).....	20
1.4.4.4 Éléments de réseau 4G (LTE).....	21
1.5. Conclusion.....	22

## **Chapitre 2 : Technologies mobiles de cinquième génération (5G)**

2.1. Introduction .....	24
2.2. Passage aux ondes millimétriques cellulaires .....	24
2.3. Solutions d'ondes millimétriques pour les futurs réseaux 5G .....	26
2.4. Mesures cellulaires pour les ondes millimétriques : canal .....	29
2.5. Caractéristiques du canal mobile à ondes millimétriques .....	30
2.5.1. Perte en chemin .....	30
2.5.2. Étalement des retards.....	31
2.5.3. Évanouissements à petites échelles .....	32
2.5.4. Étalement angulaire .....	33
2.6. Modèles de déploiement de réseaux 5G.....	33
2.7. Aspects des réseaux hétérogènes.....	34

2.8. Mesures des canaux cellulaires à New York.....	36
2.9. Estimation du spectre mobile pour les IMT terrestres .....	38
2.10. Bandes de fréquences IMTs actuelles .....	39
2.11. Bandes de fréquences IMTs futures .....	41
2.11.1. Spectre en dessous de 6 GHz.....	42
2.11.2. Spectre au-dessus de 6 GHz .....	43
2.12. Conclusion.....	45

## **Chapitre 3 : Détection d'un signal primaire à 60 GHz dans un réseau 5G**

3.1. Introduction .....	47
3.2. Algorithme de détection d'un signal 5G proposé.....	47
3.3. Modèle de système .....	48
3.3.1. Filtre de suivi Alpha-Beta (ABF) .....	49
3.3.2. Modèle de propagation .....	50
3.3.3. Modèle de détection local du signal 5G .....	52
3.4. Étude de simulation et résultats.....	54
3.4.1. Simulation.....	54
3.4.2. Résultats.....	54
3.5. Conclusion.....	62
Conclusion générale .....	64
Références bibliographiques .....	66

## #

<b>1G</b>	<b>Première Génération</b>
<b>2G</b>	<b>Deuxième Génération</b>
<b>3G</b>	<b>Troisième Génération</b>
<b>4G</b>	<b>Quatrième Génération</b>
<b>5G</b>	<b>Cinquième Génération</b>

## A

<b>AMPS</b>	<b>Advanced Mobile Phone System.</b>
<b>AUC</b>	<b>Authentication Center</b>

## B

<b>BSC</b>	<b>Base Station Controller</b>
<b>BSS</b>	<b>Base Station Sub system</b>
<b>BTS</b>	<b>Base Transceiver Station</b>

## C

<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>CEPT</b>	<b>Conférence Européenne Des Postes Et Télécommunications</b>
<b>CN</b>	<b>Core Network</b>
<b>CS</b>	<b>Circuit Switched</b>

## D

<b>DCS</b>	<b>Digital Cellular System</b>
<b>DRF</b>	<b>Duplex à Répartition de Fréquence</b>
<b>DRT</b>	<b>Duplex à Répartition dans le Temps</b>

## E

<b>EDGE</b>	<b>Enhanced Data Rate For GSM Evolution</b>
<b>EIR</b>	<b>Equipment Identity Register</b>
<b>EIRP</b>	<b>Puissance Isotrope Rayonnée Effective</b>

<b>EPDG</b>	<b>E</b> volved <b>P</b> acket <b>D</b> ata <b>G</b> ateway
<b>ETACS</b>	<b>E</b> xtended <b>T</b> otal <b>A</b> ccess <b>C</b> ommunication <b>S</b> ystem
<b>EU</b>	<b>L</b> 'union <b>E</b> uropéenne
<b>E-UTRAN</b>	<b>E</b> volved <b>U</b> niversal <b>T</b> errestrial <b>R</b> adio <b>A</b> ccess <b>N</b> etwork

## **F**

<b>FDMA</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
-------------	--

## **G**

<b>GGSN</b>	<b>G</b> ateway <b>G</b> PRS <b>S</b> upport <b>N</b> ode
<b>GMSC</b>	<b>G</b> ateway <b>M</b> obile <b>S</b> witching <b>C</b> enter
<b>GPRS</b>	<b>G</b> eneral <b>P</b> acket <b>R</b> adio <b>S</b> ervice
<b>GSM</b>	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem <b>F</b> or <b>M</b> obile <b>C</b> ommunication
<b>GSN</b>	<b>G</b> PRS <b>S</b> upport <b>N</b> ode

## **H**

<b>HetNets</b>	<b>H</b> eterogeneous <b>n</b> etworks
<b>HLR</b>	<b>H</b> ome <b>L</b> ocation <b>R</b> egister
<b>HSDPA</b>	<b>H</b> igh <b>S</b> peed <b>D</b> ownlink <b>P</b> acket <b>A</b> ccess
<b>HSS</b>	<b>H</b> ome <b>S</b> ubscriber <b>S</b> erver

## **I**

<b>IMEI</b>	<b>I</b> nternational <b>M</b> obile <b>E</b> quipment <b>I</b> dentify
<b>IMSI</b>	<b>I</b> nternational <b>M</b> obile <b>S</b> ubscriber <b>I</b> dentify
<b>IMT</b>	<b>I</b> nternational <b>M</b> obile <b>T</b> elecommunications
<b>IoT</b>	<b>I</b> nternet of <b>T</b> hings
<b>IP</b>	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol

## **L**

<b>LAN</b>	<b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>LMDS</b>	<b>L</b> ocal <b>M</b> ultipoint <b>D</b> istribution <b>S</b> ervice
<b>LMDS</b>	<b>L</b> ocal <b>M</b> ultipoint <b>D</b> istribution <b>S</b> ystem
<b>LOS</b>	<b>L</b> ine <b>O</b> f <b>S</b> ight
<b>LTE</b>	<b>L</b> ong <b>T</b> erm <b>E</b> volution

## **M**

<b>M2M</b>	<b>M</b> achine to <b>M</b> achine
------------	------------------------------------

<b>MAC</b>	<b>Medium Access Control</b>
<b>ME</b>	<b>Mobile Equipment</b>
<b>MIMO</b>	<b>Multiple Input Multiple Output</b>
<b>MME</b>	<b>Mobility Management Entity</b>
<b>MMWAVE</b>	<b>Millimeter Wave</b>
<b>MS</b>	<b>Mobile Station</b>
<b>MSC</b>	<b>Mobile Switching Center</b>

## **N**

<b>NAS</b>	<b>Non Access Stratum</b>
<b>NLOS</b>	<b>Non Line Of Sight</b>
<b>NMT</b>	<b>Nordic Mobile Telephone</b>
<b>NSS</b>	<b>Network Sub- System</b>

## **O**

<b>OMC-G</b>	<b>Operations And Maintenance Center- GPRS</b>
<b>OSI</b>	<b>Open Systems Interconnection</b>

## **P**

<b>PAN</b>	<b>Personal Area Network</b>
<b>PCRF</b>	<b>Policy Charging Rules Function</b>
<b>PCS</b>	<b>Personal Communications Service</b>
<b>PCU</b>	<b>Packet Control Unit</b>
<b>PDCP</b>	<b>Packet Data Convergence Protocol</b>
<b>PDN</b>	<b>Packet Data Network</b>
<b>PDN-GW</b>	<b>Packet Data Network Gateway</b>
<b>PLMN</b>	<b>Public Land Mobile Network</b>
<b>PS</b>	<b>Packet Switched</b>
<b>PSTN</b>	<b>Public Switched Telephone Network</b>

## **R**

<b>RF-CMOS</b>	<b>Radio Frequency</b>
<b>RLC</b>	<b>Radio Link Controle</b>
<b>RMS</b>	<b>Root Mean Square</b>
<b>RNC</b>	<b>Radio Network Controller</b>
<b>RNIS</b>	<b>Réseau Numérique à Intégration De Service</b>
<b>RRC</b>	<b>Radio Resource Control</b>
<b>RTCP</b>	<b>Réseau Telephonique Commuté Public</b>

## **S**

**SGSN** Serving **G**PRS **S**upport **N**ode  
**SGW** Serving **G**ateway  
**SIM** Subscriber Identity **M**odule

## **T**

**TACS** Total Access Communication **S**ystem  
**TDMA** Time **D**ivision **M**ultiple Access

## **U**

**UE** **U**ser **E**quipment  
**UIT** **U**nion **I**nternational **T**elecommunications  
**UMTS** **U**niversal **M**obile **T**elecommunication **S**ystem  
**USIM** **U**niversal **S**ubscriber **I**ntity **M**odule  
**UTRAN** **U**niversal **T**errestrial **R**adio Access **N**etwork

## **V**

**V2V** **V**ehicle à **V**ehicle  
**VLR** **V**isitor **L**ocation **R**egister

## **W**

**WIFI** **W**ireless **F**idelity  
**WLAN** **W**ireless **L**ocal **A**rea **N**etwork  
**WMAN** **W**ireless **M**etropolitan **A**rea **N**etwork  
**WPAN** **W**ireless **P**ersonal **A**rea **N**etwork  
**WRCU** **W**orld **R**adio **C**ommunication **C**onference  
**WWAN** **W**ireless **W**ide **A**rea **N**etwork

## Chapitre1

<b>Figure 1.1.</b> Types de réseaux sans fil [4].....	7
<b>Figure 1.2.</b> Répartition du territoire en cellules [9].....	8
<b>Figure 1.3.</b> Exemple de motif de cellules [9]. ....	8
<b>Figure 1.4.</b> Structure hiérarchique des cellules [9].....	9
<b>Figure 1.5.</b> Architecture du réseau GSM [10].....	11
<b>Figure 1.6.</b> Architecture du GPRS [12].....	14
<b>Figure 1.7.</b> Architecture du réseau UMTS [5].....	17
<b>Figure 1.8.</b> Architecture du réseau LTE (4G) [15].....	21

## Chapitre2

<b>Figure 2.1.</b> Atténuation de la pluie en dB/km en fonction de la fréquence à différents taux de précipitation. L'atténuation de la pluie à 28 GHz a une atténuation de 7 dB/km pour une très forte pluie de 25 mm/heure (environ 1 pouce par heure). Si les zones de couverture cellulaire ont un rayon de 200 m, l'atténuation de la pluie sera réduite à 1,4 dB [18, 22].....	28
<b>Figure 2.2.</b> Absorption atmosphérique en fonction des fréquences des ondes millimétriques en dB/km. L'atténuation causée par l'absorption atmosphérique est de 0,012 dB sur 200 m à 28 GHz et de 0,016 dB sur 200 m à 38 GHz. Les fréquences de 70 à 100 GHz et de 125 à 160 GHz ont également une faible perte [18, 22]. ....	29
<b>Figure 2.3.</b> Cas d'utilisation des cellules à ondes millimétriques. (a) Couverture en extérieur dans un environnement de type campus. (b) Les micro-cellules ou pico-cellules urbaines telles qu'illustrées dans une figure détaillée à partir de la représentation des points d'accès mmWave (croix bleu et rose) placés sur chaque bloc d'une grille urbaine pour servir les mobiles (cercles verts) dans les rues [20, 26].....	34
<b>Figure 2.4.</b> En raison des limites de la propagation des ondes millimétriques, les systèmes cellulaires à ondes millimétriques devront coexister et se coordonner avec les cellules à micro-ondes conventionnelles. En outre, pour assurer une couverture intérieure et utiliser	

efficacement le spectre, le backhaul et le spectre peuvent être partagés entre les opérateurs et les tiers de manière beaucoup plus importante que dans les déploiements actuels [20]. ..... 35

**Figure 2.5.** Endroits de mesures typiques à New York pour les canaux de 28 GHz et 73 GHz [20]. ..... 37

**Figure 2.6.** Schéma fonctionnel de l'émetteur du sondeur à 28 GHz avec une puissance isotrope rayonnée effective de 54,5 dBm et une première bande passante RF de 800 MHz pour une haute résolution temporelle [20] ..... 37

**Figure 2.7.** Prévisions du trafic mobile vers 2020 par extrapolation selon le rapport ITU-R M.2290-0 [28]. ..... 38

**Figure 2.8.** Grille de spectre identifiée pour l'IMT [28]. ..... 40

**Figure 2.9.** Nouvelle gamme de fréquences possible pour les IMTs [28]. ..... 44

**Figure 2.10.** Configuration de base d'une liaison FSO ..... 33

**Figure 2.11.** Terminal de transmission optique en espace libre ..... 34

**Figure 2.12.** Topologies de réseau optique en espace libre ..... 34

**Figure 2.13.** Illustration des liaisons de raccordement sans fil «Backhaul »mobile ..... 36

## Chapitre3

---

**Figure 3.1.** Cycle de détection du signal 5G. .... 48

**Figure 3.2.** Réseau radio à mmWave. .... 49

**Figure 3.3.** Modèle de détection locale du signal 5G. .... 52

**Figure 3.4.** Positions semi-aléatoires réelles et estimées de l'U5G. .... 55

**Figure 3.5.** Erreur estimée de la position de l'U5G [m] vs. Temps [s]. .... 56

**Figure 3.6.** Vitesse estimée de déplacement de l'U5G [m/s] vs. Temps [s]. .... 56

**Figure 3.7.** Erreur estimée de la vitesse de l'U5G [m/s] vs. Temps [s]. .... 57

**Figure 3.8.** Puissance du signal reçu à l'U5G [dBm] vs. Temps [s]. .... 57

**Figure 3.9.** Erreur estimée de la puissance du signal reçu à l'U5G [dBm] vs. Temps [s]. .... 58

**Figure 3.10.** Rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G [dB] vs. Temps [s]. .... 59

**Figure 3.11.** Erreur estimée du rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G [dB] vs. Temps [s]. .... 59

**Figure 3.12.** Probabilité totale d'erreur de détection vs. Temps [s]. .... 60

**Figure 3.13.** Erreur estimée de la probabilité totale d'erreur de détection vs. Temps [s] . .... 61

## Chapitre 3

---

<b>Tableau 3.1.</b> Scénarios de détection locale du signal SB5G. ....	54
<b>Tableau 3.2.</b> Paramètres de simulation [38, 39, 40]. ....	54
<b>Tableau 3.3.</b> PTDE vs. $\text{SNR}_{(U5G,SB5G)}$ , à $t = 100$ s. ....	61

# Introduction générale

Le domaine des réseaux et des télécommunications mobiles connaît une mutation très rapide. Cette mutation s'accompagne toujours de nouvelles technologies et d'une plus grande complexité pour faire face à une forte augmentation des demandes des clients en termes de rapidité et de disponibilité des services offerts. Afin de faire face à cette forte demande des réseaux, les opérateurs télécoms cherchent des solutions pour augmenter la capacité de navigation sur Internet et la portée de couverture tout en maintenant la communication. De ce fait, une nouvelle technologie de génération est prévue, la "5G".

La 5G se présente comme la génération de rupture, celle qui ne se préoccupe plus uniquement du monde des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais qui offre de nouvelles perspectives et autorise la coexistence d'applications et d'utilisations extrêmement diverses, unifiée au sein d'une seule et même technologie. La 5G apparaît comme une nouvelle menace pour la numérisation de la société et de l'économie.

L'idée qui commence à être mise en place derrière la notion de 5G est qu'elle ne sera pas compatible à une simple augmentation de la vitesse, comme c'était le cas pour les générations précédentes.

Les communications mobiles destinées au grand public, le téléchargement de vidéos et l'utilisation d'applications mobiles constituent actuellement la plus grande partie de l'utilisation des ressources radio dans les réseaux 4G ; avec la 5G, l'objectif serait d'élargir considérablement le spectre des utilisations et la diversité des utilisateurs.

La 5G cible une grande variété de secteurs, qui n'ont pas nécessairement autre chose en commun que cette technologie, mais qui sont des éléments essentiels d'une société : énergie, santé, médias, industrie ou transports.

Les fréquences supérieures à 6 GHz n'ont tout simplement jamais été utilisées pour le déploiement de réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de la propagation. Pour répondre à l'augmentation continue des débits et des volumes de données échangées, elle peut offrir de telles réserves de spectre et leur utilisation exige le développement de toutes les technologies nécessaires, la communication par ondes millimétriques est destinée à être utilisée pour la couverture extérieure ; pour les réseaux denses tels que ceux d'une portée allant jusqu'à 200-300 mètres, chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en œuvre de techniques de formation de faisceau (MIMO) [1, 2, 3].

Dans ce travail de recherche, nous visons à étudier et à évaluer la performance de la détection du signal primaire d'une station de base 5G (SB5G) à une fréquence de 60 GHz dans un

environnement encombré par un utilisateur 5G (U5G) en utilisant un algorithme hybride basé sur l'estimateur de filtre Alpha-Beta et un détecteur d'énergie.

Cependant, pour atteindre les objectifs fixés, ce travail de recherche est organisé dans un document comprenant trois chapitres, en plus d'une introduction générale, d'une conclusion et perspective générale, et d'une bibliographie.

Dans le premier chapitre, les quatre générations de réseaux mobiles sont brièvement évoquées. Nous avons notamment mis l'accent sur les évolutions des systèmes de radio cellulaire.

Le deuxième chapitre vise à présenter les technologies mobiles de cinquième génération (5G). Nous nous concentrons en particulier sur la normalisation et le développement futur des systèmes cellulaires à ondes millimétriques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'algorithme proposé afin de nous permettre d'estimer le signal primaire transmis par une station de base 5G (SB5G) à une fréquence de 60 GHz dans un environnement encombré. En particulier, nous avons interprété les résultats de simulation obtenus.

À la fin, nous résumons le travail effectué avec une conclusion générale et nous suggérons ensuite quelques perspectives à étudier à l'avenir.

CHAPITRE 1

# Évolution des systèmes de radio cellulaire

## 1.1. Introduction

Le développement des réseaux mobiles n'a cessé de croître depuis plusieurs années, plusieurs générations ont en effet vues le jour, telles que : 1G, 2G, 3G et 4G, et ont connu un développement considérable en offrant un débit exceptionnel et en constante augmentation, et une bande passante de plus en plus large.

Le premier chapitre intitulé "Évolution des systèmes de radio cellulaire" est consacré à la description de l'évolution des générations de réseaux mobiles et de ses architectures.

## 1.2. Historique des réseaux mobiles

Dans cette section, une présentation de l'histoire des réseaux mobiles à travers le monde sera faite. Nous verrons que le concept de téléphonie mobile existe depuis longtemps (1958). Nous allons donc énumérer la liste des différents réseaux qui ont existé jusqu'au réseau numérique : le réseau GSM.

### 1.2.1. 1<sup>er</sup> Réseau : réseau A

Le réseau A est apparu en 1958 et s'est achevé en 1977. Ce réseau était allemand, sa gestion était entièrement manuelle, effectuée par des opérateurs. Le réseau couvrait 80% du territoire allemand. Le problème était que la technologie des téléphones portables n'était pas développée, ainsi un téléphone fonctionnant sur le réseau A pesait 15 Kg et coûtait plus de 8000 DM.

### 1.2.2. 2<sup>ème</sup> Réseau : réseau B

Le réseau B est apparu en 1972 et s'est achevé en 1994. Ce réseau a été utilisé en Allemagne et dans certains pays voisins. Le réseau était divisé en cellules de 20 à 30 km. Mais ce réseau présentait un gros inconvénient : il fallait savoir où la personne se trouvait pour pouvoir la contacter !

### 1.2.3. 3<sup>ème</sup> Réseau : réseau C

Le réseau C est apparu en 1984 et a expiré en 2000. Ce réseau est le premier à exploiter les mêmes canaux de fréquence pour les cellules distantes. Mais il n'y avait pas de norme commune, chaque pays avait le sien : AMPS pour les Etats-Unis, TACS pour la Grande-Bretagne, NMT pour les pays nordiques... Le réseau C a permis d'élargir considérablement les connaissances sur le fonctionnement des réseaux cellulaires, comme le handover.

Ce réseau est appelé réseau de 1ère génération, il a également permis l'émergence de la carte SIM et pour la première fois, il y a eu une couverture à 100%.

#### **1.2.4. Réseau GSM (Global System Mobile) : réseau D**

Le réseau GSM (également appelé réseau D) est apparu en 1992 en Allemagne. C'est le premier système de radio-téléphonie entièrement numérique. Deux bandes GSM existent, à savoir : la bande GSM 900 (bande autour de 900 MHz) et la bande DCS 1800 (bande autour de 1800 MHz). Ces deux bandes sont complémentaires et un grand nombre de téléphones mobiles sont bi-bandes.

En Europe, 125 canaux sont attribués dans la bande 900 MHz, et 374 canaux dans la bande 1800 MHz. Chaque canal peut gérer 8 utilisateurs (8 tranches de temps utilisant le TDMA). Aux États-Unis, la fréquence GSM est de 1,9 GHz (PCS) [4].

### **1.3. Réseaux mobiles**

Les réseaux mobiles sont des réseaux sans fil dans lesquels au moins deux périphériques peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce à ce type de réseau, un utilisateur (abonné) a la capacité de se connecter au réseau tout en se déplaçant dans une zone géographique plus ou moins étendue, c'est pourquoi on parle de "mobilité" [5].

Ces réseaux sont fondés sur une liaison par onde radio et emploient l'interface radio comme support de transmission.

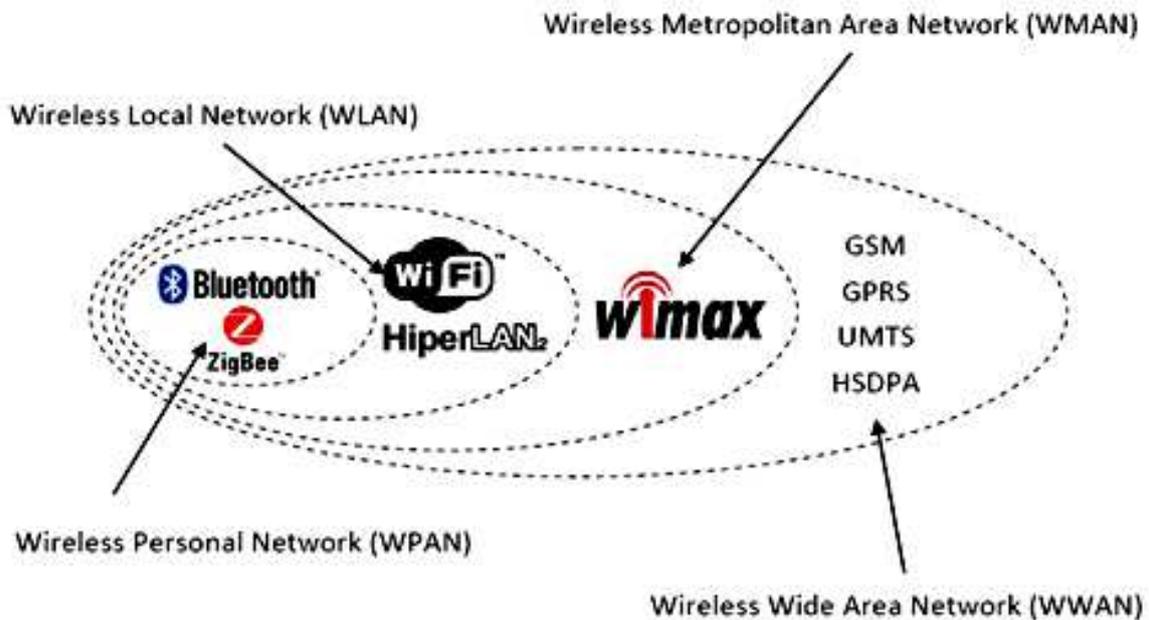
#### **1.3.1. Classification des réseaux mobiles**

Il est possible de classer les réseaux mobiles selon plusieurs critères. Par exemple, ils peuvent être classés en fonction de leurs modes de connexion ou de la portée géographique couverte par ces réseaux [6].

Il existe deux types de réseaux en fonction de leur topologie :

- L'architecture d'infrastructure : dans cette architecture, les stations de base assurent la gestion de toutes les communications mobiles. Ces différentes stations de base sont interconnectées les unes aux autres, formant ainsi le réseau et permettant la communication entre elles. Parmi ces réseaux, on peut citer le réseau GSM, l'UMTS... [7].
- L'architecture Ad-hoc est une architecture autonome créée par l'association temporaire des nœuds mobiles. Ceux-ci agissent à la fois comme client et comme routeur du réseau. Il n'y a pas de hiérarchie préalable, tous les nœuds mobiles sont considérés comme étant égaux [8].

Les réseaux mobiles se distinguent également par leur portée géographique. Parmi eux, il y a les réseaux WPAN, WLAN, WMAN, WWAN, comme le montre la figure 1.1.



**Figure 1.1.** Types de réseaux sans fil [4].

### 1.3.2. Concept cellulaire

Le principe du système cellulaire est de diviser le territoire en petites zones appelées cellules (voir la figure 1.2) et de partager les fréquences de radio entre elles. Chaque cellule est composée d'une station de base (connectée au réseau téléphonique commuté public, ou RTCP) à laquelle est associé un certain nombre de fréquences. Elle sert d'intermédiaire entre l'infrastructure du réseau fixe et les utilisateurs mobiles situés à l'intérieur de la cellule. Ainsi, une cellule peut être définie comme étant l'étendue géographique couverte par une station de base (ou, Base Transceiver Station (BTS)) [9].

L'utilisation du concept cellulaire a l'avantage de permettre la réutilisation des ressources radio (fréquences). Le principe de la réutilisation des fréquences consiste à attribuer la même bande de fréquences à des cellules suffisamment éloignées pour éviter les interférences. Ainsi, on définit des modèles appelés "clusters" constitués de plusieurs cellules dans lesquelles

chaque fréquence n'est utilisée qu'une seule fois. La figure 1.3 illustre un exemple d'un tel motif [9].

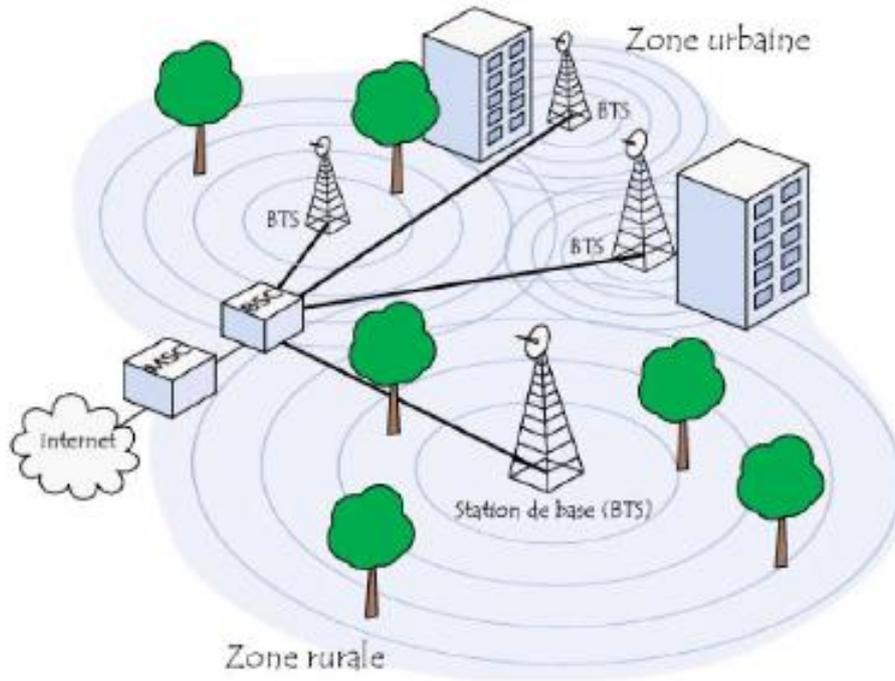


Figure 1.2. Répartition du territoire en cellules [9].

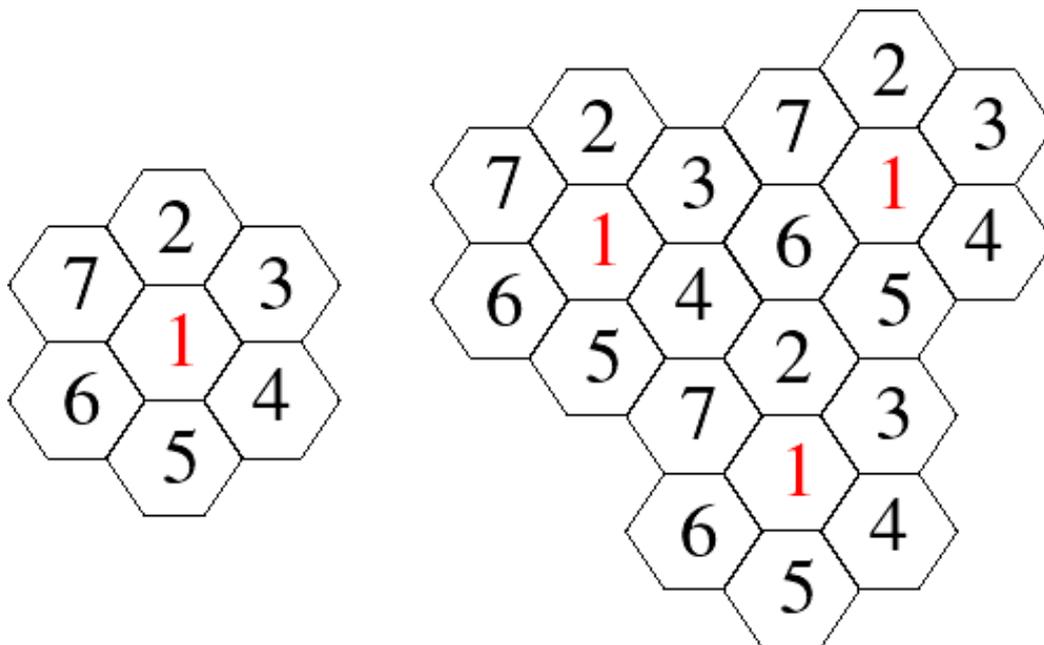
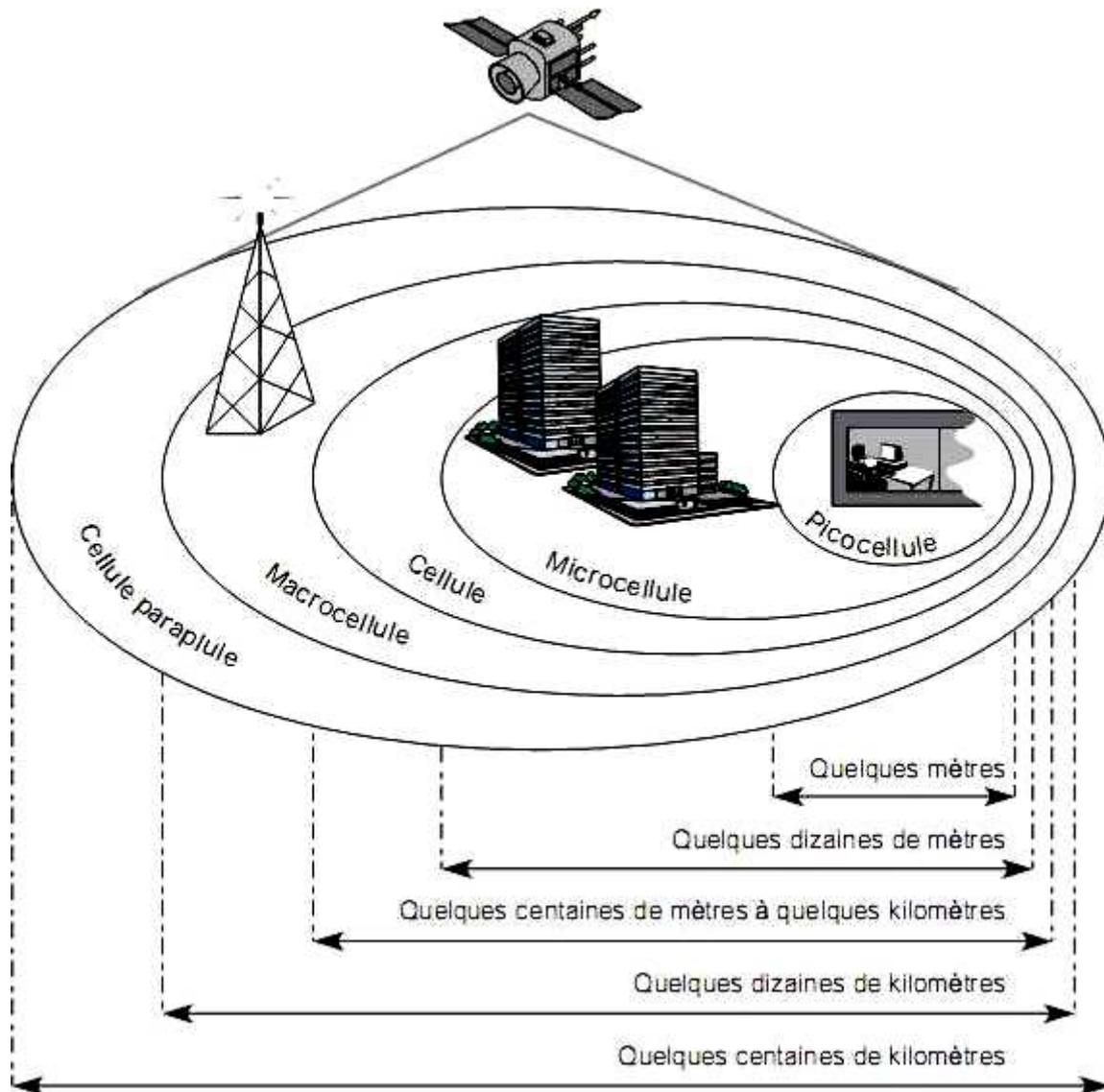


Figure 1.3. Exemple de motif de cellules [9].

Il existe quatre niveaux hiérarchiques de cellules, comme le présente la figure 1.4 :

- pico-cellule couvrant une petite surface comme l'intérieur d'un bureau ;
- micro-cellule couvrant la surface d'une petite cité ;
- macro-cellule qui peut avoir une couverture de plusieurs kilomètres ;
- cellule globale couvrant une région qui peut atteindre un tiers du globe grâce aux satellites.



**Figure 1.4.** Structure hiérarchique des cellules [9].

Une cellule se caractérise par :

- sa puissance de transmission : ce qui se traduit par une zone de couverture dans laquelle le niveau du champ électrique est supérieur à un seuil prédéterminé ;

- la fréquence porteuse utilisée pour la transmission radio ;
- le réseau auquel il est interconnecté.

## 1.4. Évolution des réseaux mobiles

### 1.4.1. Première génération de téléphones mobiles (1G)

La première génération de téléphonie mobile (notée 1G) est apparue dans les années 1980. Elle est basée sur la transmission analogique avec modulation de fréquence. Elle se compose d'appareils relativement grands, exploitant une faible largeur de bande. Cette norme ne permet que la transmission de la parole. La zone de couverture est divisée en cellules de différentes tailles. Il existe essentiellement les normes suivantes :

- **AMPS** (ou, Advanced Mobile Phone System) est apparu aux Etats-Unis, est le premier standard pour les réseaux 1G, il dispose de faibles mécanismes de sécurité permettant de pirater les lignes téléphoniques.
- **TACS** (Total Access Communication System) est la norme européenne du système AMPS utilisant la bande de fréquence de 900 MHz.
- **ETACS** (Extended Total Access Communication System) est une version améliorée de la norme TACS, elle a été développée au Royaume-Uni et autorise l'exploitation d'un plus grand nombre de canaux de communication [7].

Nous constatons que les réseaux cellulaires 1G ont été rendus obsolètes avec la naissance d'une deuxième génération (2G) complètement numérique, dans la prochaine sous-section, nous présenterons quelques détails sur la 2G.

### 1.4.2. Deuxième génération de téléphones mobiles (2G)

Le système cellulaire de deuxième génération (2G) basé sur la technologie numérique a été développé à la fin des années 1980. Ces systèmes cellulaires emploient la technologie numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal. Ce système offre une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à un coût moindre pour l'utilisateur. La technologie de la deuxième génération de systèmes cellulaires (2G) repose principalement sur les normes suivantes :

- GSM (ou, Global System for Mobiles (2G)) ;
- Le GPRS (ou, General Packet Radio Service (2,5G)) est un système mobile intermédiaire entre 2G et 3G (débits inférieurs à 100 kbit/s) ;
- EDGE (ou, Enhanced Data Rates for GSM Evolution (2.75G)).

### 1.4.2.1. Réseau GSM (2G)

GSM (ou, Global system for mobile communication), est un système de télécommunication cellulaire, numérique et radio-mobile. Son développement remonte aux années 80 mais son exploitation, qui a commencé en 1992 après une longue phase de normalisation, a été fait par le biais de la coopération internationale. Les premiers réseaux ont été ouverts en GSM-900 et deux ans plus tard, la norme GSM s'est étendue au DCS-1800 (système de communication numérique). La figure 1.5 décrit l'architecture du réseau GSM. Le rôle principal d'un réseau radiotéléphonique est de permettre les communications entre les abonnés mobiles et les abonnés du réseau téléphonique commuté public (ou, RTC). Il s'interface avec le réseau téléphonique commuté public (ou, RTC) et comporte des commutateurs. Il se caractérise par un accès très spécifique à la liaison radio. Enfin, comme tout réseau, il doit offrir à l'opérateur une facilité d'exploitation et de maintenance [10].

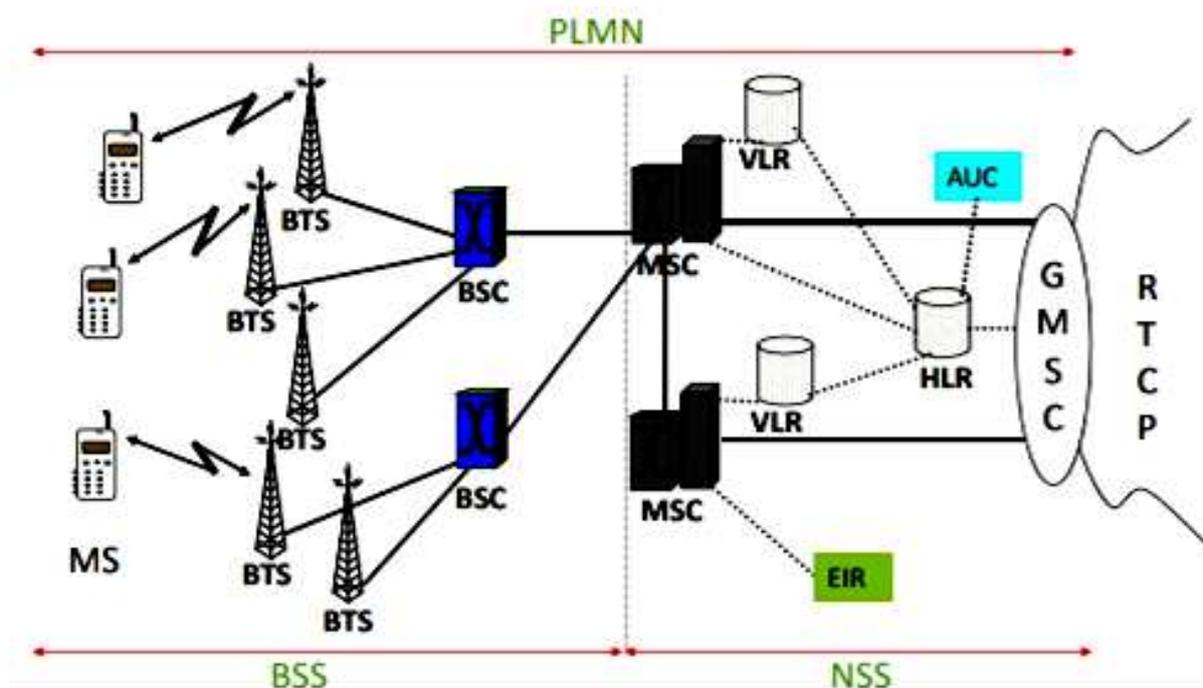


Figure 1.5. Architecture du réseau GSM [10].

#### a. Architecture du réseau GSM

Comme le montre la figure 1.5, le réseau GSM est composé essentiellement de deux sous-systèmes, à savoir : l'un pour le sous-système radio BSS (ou, Base station Sub-System) et l'autre pour le sous-système réseau NSS (ou, Network Sub-System).

**Sous system radio BSS** : Il relie un ensemble de mobiles dans une zone géographique limitée au réseau central, par l'intermédiaire de l'interface air et il est composé des éléments suivants : plusieurs MS (ou, Mobile Station), une ou plusieurs BTS (ou, Base Transceiver Station), une BSC (ou, Base Station Controller). La fonction de chacune des éléments du BSS est illustrée ci-dessous :

1. **station mobile (MS)** : La station mobile est constituée d'un terminal mobile (le téléphone) d'une part et du module d'identité de l'abonné (carte SIM) d'autre part. Chaque terminal mobile est identifié par un code IMEI (ou, International Mobile Equipment Identity) unique. Ce code est vérifié à chaque utilisation.
2. **station de base (BTS)** : La station de base est un élément clé qui contrôle une cellule. Elle peut être définie comme un émetteur-récepteur connecté à une antenne. Chaque cellule principale peut être divisée à l'aide d'antennes directionnelles. C'est la BTS qui sert de lien entre la station mobile et le BSS.
3. **Contrôleur des BTSs (BSS)** : Le contrôleur de la station de base pilote une ou plusieurs stations de base. Il est considéré comme un hub puisqu'il achemine les communications des différentes stations de base. Il commute les données en les dirigeants vers la bonne station de base. Il remplit à la fois le rôle de relais pour les différents signaux d'alarme destinés au centre d'exploitation et de maintenance. Il alimente également la base de données des stations de base.

**Sous-système réseau NSS**: Le sous-système réseau, appelé Network Switching Center (NSS), joue un rôle primordial dans un réseau mobile. Tandis que le sous-réseau radio (BSS) assure la gestion de l'accès radio, les éléments du NSS supportent toutes les fonctions de contrôle et d'analyse des informations contenues dans les bases de données nécessaires à l'établissement de connexions à l'aide d'une ou plusieurs des fonctions suivantes : cryptage, authentification ou itinérance. Le NSS est constitué de : MSC (Mobile Switching Center), HLR (Home Location Register)/ AuC (Authentication Center), VLR (Visitor Location Register), EIR (Equipment Identity Register).

1. **centre de commutation mobile (MSC)** : Le centre de commutation mobile est connecté au sous-système radio par le biais de l'interface A. Son rôle consiste principalement à assurer la commutation entre les abonnés du réseau mobile et ceux du réseau téléphonique commuté public (RTCP) ou de son équivalent numérique, le réseau RNIS (ISDN en anglais). Sur le plan fonctionnel, il est similaire à un commutateur de réseau RNIS, à l'exception de quelques modifications nécessaires pour un réseau mobile. En outre, il participe à la fourniture de divers services aux

abonnés tels que la téléphonie, les services complémentaires et les services de messagerie. Il permet également de mettre à jour les différentes bases de données (HLR et VLR) qui donnent toutes les informations concernant les abonnés et leur localisation dans le réseau. Les commutateurs MSC d'un opérateur sont liés entre eux pour la commutation d'informations internes. Les MSC servant de passerelle (Gateway Mobile Switching Center, GMSC) sont placés à la périphérie du réseau d'un opérateur afin d'assurer l'interopérabilité entre les réseaux des opérateurs.

2. **enregistreur de localisation nominale (HLR)** : Il existe au moins un enregistreur de localisation (HLR) par réseau (PLMN), il s'agit d'une base de données contenant des informations indispensables pour les services de téléphonie mobile et avec un accès rapide afin de garantir un temps de fonctionnement de la connexion le plus court possible. Le HLR comporte :

- toutes les informations concernant les abonnés : le type d'abonnement, la clé d'authentification  $K_i$  (cette clé est connue par un seul HLR et une seule carte SIM), les services souscrits, le numéro d'abonné (IMSI), etc.
- ainsi qu'un certain nombre de données dynamiques telles que la position de l'abonné dans le réseau (en fait, son VLR) et l'état de son terminal (allumé, éteint, en communication, libre,...).

Les données dynamiques sont mises à jour par le MSC. Cette base de données est généralement unique pour un réseau GSM et seulement quelques personnes y ont directement accès.

**Le centre d'authentification (AuC)** : Lorsqu'un abonné passe un appel, l'opérateur doit pouvoir garantir qu'il n'est pas un usurpateur. Le centre d'authentification remplit cette fonction de protection des communications. Il est donc possible de distinguer trois niveaux de protection :

- la carte SIM qui empêche un utilisateur non enregistré d'accéder au réseau.
- le chiffrement des communications destiné à empêcher qu'elles ne soient écoutées.
- Protection de l'identité de l'abonné.

3. **enregistreur de localisation des visiteurs (VLR)** : Cette base de données ne contient que des informations dynamiques et est associée à un MSC. Il y en a donc plusieurs dans un réseau GSM. Elle comporte des données dynamiques qui lui sont transmises par le HLR avec lequel elle communique lorsqu'un abonné rentre dans la zone de



En réutilisant l'infrastructure GSM, le coût de l'introduction du GPRS dans le réseau GSM est principalement lié à l'extension logicielle des entités GSM. Les principaux équipements ajoutés à l'architecture GSM existante sont l'intégration d'une carte PCU (Packet Control Unit) dans l'entité BSC, la fourniture de nouveaux terminaux GPRS aux utilisateurs, l'introduction de nœuds de commutation par paquets GPRS, à savoir SGSN (ou, Serving GPRS Support Node) et GGSN (Gateway GPRS Support Node), la mise en place d'une passerelle de facturation pour la facturation du GPRS et de l'OMC-G (Operations and Maintenance Center - GPRS) pour l'exploitation des équipements du réseau GPRS, comme le montre la figure 1.6. L'extension des logiciels peut se faire efficacement. Dans la plupart des solutions proposées par les fabricants, il est possible de télécharger de nouveaux logiciels GPRS dans le BTS et le BSC [12].

#### **1.4.2.3. Réseau EDGE (2.75)**

EDGE est une norme mobile de troisième génération. EDGE est une extension des normes de téléphonie mobile GPRS pour GSM qui permet d'accéder à Internet à partir d'un téléphone mobile ou d'un micro-ordinateur. La norme EDGE permet des transferts de données avec un débit maximal de 384 kbit/s [13].

#### **1.4.3. Réseau UMTS (3G)**

La technologie UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), également appelée plus généralement 3<sup>ème</sup> génération (3G), représente la mutation des systèmes de 2<sup>ème</sup> génération, permettant d'offrir aux utilisateurs une meilleure qualité de service, notamment en ce qui concerne les services offerts (débit maximal pour les données, vidéoconférence) et la vitesse de transfert. L'UMTS a été conçu pour assurer des vitesses : 144 kbps en milieu rural avec un déplacement de 500 km/h et 384 kbps en milieu urbain avec un déplacement de 120 km/h et 2 Mbps pour des distances plus proches de l'antenne.

##### **1.4.3.1. Objectifs de réseau UMTS**

Le réseau UMTS a de nombreux objectifs, sont les suivants :

- l'unification de tous les systèmes qui existent à travers le monde dans la définition d'une norme internationale ;
- compatibilité avec les systèmes de 2<sup>ème</sup> génération en ce qui concerne les services offerts à l'utilisateur (télé services et services additionnels), transparence du réseau pour l'utilisateur (l'utilisateur ne doit pas se rendre compte qu'il passe d'un système à un autre) ;

- prise en charge du multimédia : les terminaux ont la capacité d'accepter simultanément des services de différents types (voix, visiophonie, navigation sur le web, transfert de fichiers) ;
- Accroître les débits supportés par le réseau par rapport au réseau de 2<sup>ème</sup> génération ;
- Offrir quatre classes de services en tenant compte de 3 contraintes (le temps de transfert des informations, la variation du temps de transfert des informations et la tolérance aux erreurs de transmission) [4].

#### 1.4.3.2. Avantages de l'UMTS

##### a. Débit

L'UMTS permet le passage simultané de plus de données et offre un débit beaucoup plus élevé que le GSM et le GPRS. En théorie, il peut atteindre 2 Mbps depuis un lieu fixe et 384 kbps en mouvement. Bien que nous soyons encore loin de la promesse initiale, le maximum en Europe a été fixé à 384 kbps : soit 64 à 128 kbps en émission et 128 à 384 kbps en réception, même en mouvement (train, voiture...) [4].

##### b. Découpage en strates

La modélisation du réseau UMTS peut être effectuée par une division en strates. Cette division est conforme à celle du modèle OSI, permettant de séparer les niveaux de services indépendants [1].

##### c. Nombreux services innovants

Parmi les nombreux services fournis par l'UMTS, on peut citer:

1. **Vidéophone de poche** : Ce service est sans aucun doute l'un des plus performants des réseaux de troisième génération. Les terminaux mobiles seront équipés d'un mini écran de télévision permettant de voir l'interlocuteur avec lequel vous parlez. Dans le même esprit, des services de visioconférence seront proposés, c'est-à-dire la possibilité d'avoir des conversations avec plusieurs interlocuteurs en même temps et de les visualiser en même temps sur l'écran du téléphone.
2. **Messagerie et fax rapides** : Cette fonction existe déjà sur certains téléphones mobiles de deuxième génération, mais la vitesse d'envoi et de réception d'informations sera considérablement accrue pour les téléphones de troisième génération.
3. **Accès à Intranet** : Ce service offre la possibilité à un utilisateur, en tout point du globe, de rester en contact avec le réseau informatique de l'entreprise pour laquelle il travaille.

4. **Accès à Internet** : Ce service est celui qui sera le plus avancé dans les réseaux 3G. Son développement se fera à la fois pour le grand public et pour le monde professionnel, et pour les réseaux 3G eux-mêmes. Ce service n'est pas réellement un nouveau service sur le marché du téléphone étant donné que certains téléphones de deuxième génération offrent déjà ce service, mais la différence majeure se situera au niveau de la vitesse et du débit de transmission de données sensiblement accru (2 Mbps).
5. **Achats sur Internet** : La possibilité de faire des achats sur Internet à l'aide d'un téléphone portable peut ouvrir de nombreuses possibilités grâce à de nouveaux services.
6. **Télécharger des images** : La possibilité de télécharger des images sur Internet et de les visualiser sur l'écran du téléphone portable.
7. **Clips vidéo et musique mobile** : possibilité de voir différents types de médias par catégories et sous-catégories (ex : Jazz, Pop, classique), possibilité d'avoir d'autres détails sur les médias (ex : date des concerts, biographie de l'artiste...)...

#### 1.4.3.3. Architecture du réseau UMTS

L'architecture globale d'un réseau UMTS est formée de trois entités, comme le montre la figure 1.7 :

- UE (équipement de l'utilisateur).
- UTRAN (le réseau d'accès universel).
- CN (le réseau cœur).

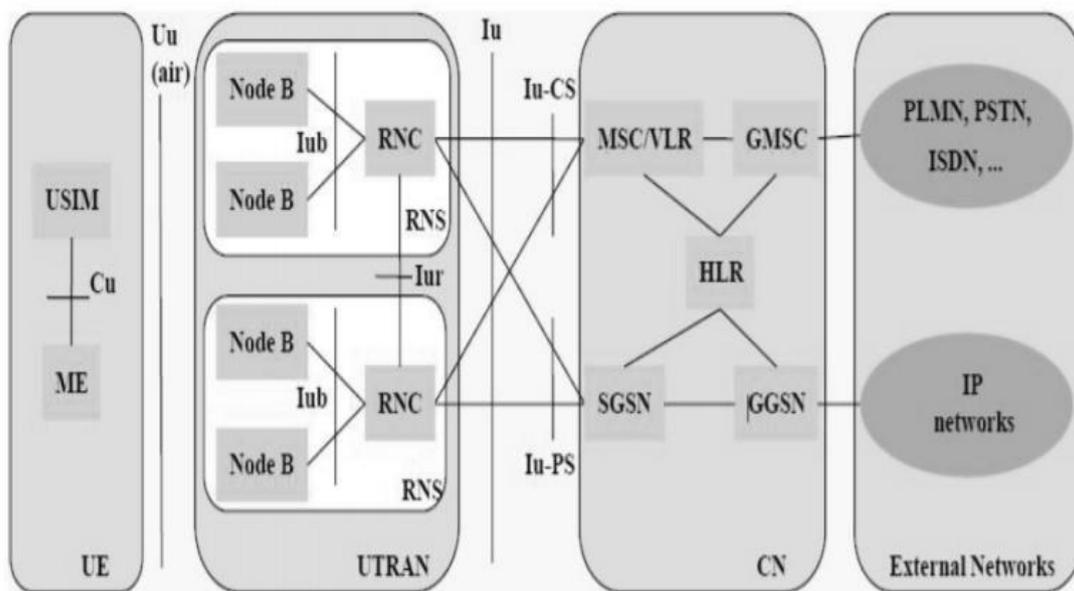


Figure 1.7. Architecture du réseau UMTS [5].

#### 1.4.3.4. Entités du réseau UMTS

##### a. Equipement de l'utilisateur (UE)

Le domaine des équipements usagés (UE) comprend tous les équipements terminaux :

- **équipement mobile (ou, Mobile Equipment (ME))** : Les mobiles UMTS ne seront plus de simples téléphones, mais des terminaux multimédia pouvant offrir simultanément et à tout moment des services de transmissions de données, d'audio et de vidéo.
- **module universel d'identité d'abonné (ou, Universal Subscriber Identity Module (USIM))** : Il s'agit d'une carte à puce, une version perfectionnée de la SIM (boîtier GSM), destinée à la troisième génération de téléphonie.

##### b. Réseau d'accès radio (UTRAN)

Le réseau d'accès radio (UTRAN) fournit les fonctions permettant d'acheminer les informations de l'utilisateur vers le réseau cœur [6]. Il s'agit d'une passerelle entre l'équipement de l'utilisateur et le réseau cœur via les interfaces Uu et Iu. En outre, L'UTRAN est constitué de plusieurs éléments : une ou plusieurs stations de base (appelées nœud B), des contrôleurs radio RNC (Radio Network Controller) et des interfaces de communication entre les différents éléments du réseau UMTS.

- **nœud B (ou, node B)** : Le nœud B est une antenne. Distribués géographiquement sur l'ensemble du territoire, les nœuds B sont au réseau UMTS ce que les BTS sont au réseau GSM [7]. Le rôle principal du nœud B est d'assurer les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules du réseau d'accès UMTS avec les équipements des utilisateurs [7].
- **RNC** : Le RNC est un contrôleur de nœud B. Le RNC est ici également l'équivalent du BCS dans le réseau GSM [7]. Le rôle principal du RNC est d'acheminer les communications entre le nœud B et le réseau cœur UMTS. Le RNC est le point d'accès à tous les services du réseau cœur. Plusieurs types d'interfaces de communication coexistent au sein du réseau UMTS :
  1. **Uu** : Interface entre l'équipement de l'utilisateur et le réseau d'accès UTRAN. Elle autorise la communication avec l'UTRAN par le biais de la technologie CDMA.
  2. **Iu** : Interface entre le réseau d'accès UTRAN et le réseau cœur UTRAN. Elle autorise le contrôleur radio RNC à communiquer avec le SGSN.
  3. **Iur** : Interface qui fait communiquer deux contrôleurs radio RNC.

4. **Iub** : Interface qui autorise les communications entre un nœud B et un contrôleur audio RNC.

### c. Réseau cœur (CN)

Le réseau cœur (CN) est la partie du système UMTS responsable de la gestion des services souscrits par l'abonné. Il permet la communication au sein d'un même réseau de téléphonie mobile et garantit l'interconnexion de ce dernier avec les réseaux externes, fixes ou mobiles, numériques ou analogiques. Le réseau cœur est constitué de trois parties :

- Le domaine CS (Circuit Switched) employé pour la téléphonie ;
- Le domaine PS (Packet Switched) qui autorise la commutation de paquets ;
- Les éléments communs aux domaines CS et PS : Il s'agit des éléments communs au domaine de la commutation par paquets et au domaine de la commutation par circuits, ces éléments sont :

1. **HLR (Home Location Register)** : Est une base de données qui contient toutes les informations concernant les abonnés : l'identité de l'équipement de l'utilisateur, le numéro d'appel de l'utilisateur, les informations concernant les possibilités d'abonnement souscrites par l'utilisateur.

2. **EIR (Equipment Identity Register)** : Il s'agit d'une base de données qui contient la liste des mobiles interdits, répertoriés par un numéro unique propre à chaque appareil utilisateur, le numéro IMEI (International Mobile station Equipment Identity).

3. **AuC (Authentication Center)** : Il est chargé de l'authentification des abonnés, ainsi que du cryptage des communications pour assurer la sécurité de l'accès au système. Le domaine à commutation de circuits (CS) sera utilisé pour gérer des services en temps réel dédiés aux conversations téléphoniques, , vidéo téléphone, jeux vidéo, streaming et applications multimédia. Ces applications nécessitent un temps de transfert rapide [8]. Le domaine CS est composé des éléments suivants :

- Le MSC (Mobile-services Switching Center) est un commutateur qui assure l'interface avec le réseau cœur pour un mobile ayant accès à des services commutés par circuits.
- Le GMSC (Gateway MSC) est une passerelle entre le réseau UMTS et le réseau téléphonique commuté PSTN (Public Switched Telephone Network).

- Le VLR (Visitor Location Register) est une base de données, assez semblable à celle du HLR, reliée à un ou plusieurs MSC. Le VLR conserve en mémoire des informations sur la position de l'abonné et ses déplacements dans la zone de localisation connectée à un ou plusieurs MSC.

#### **1.4.4. 4<sup>ème</sup> génération**

##### **1.4.4.1. Définition de réseau 4G**

La définition de la 4G a connu une nouvelle évolution sous la forme d'une nouvelle génération d'efforts de marketing de données mobiles qui fait évoluer le terme aux yeux du public pour différencier les marques. L'Union internationale des télécommunications (UIT), qui supervise le développement de la plupart des normes de données cellulaires, a récemment publié une déclaration soulignant que le terme 4G n'est pas défini. En réponse, les opérateurs de téléphonie mobile dotés d'architectures 3G avancées ont commencé à commercialiser des services "4G" [14].

##### **1.4.4.2. Objectif de réseau 4G**

La 4<sup>ème</sup> génération a pour but d'améliorer l'efficacité spectrale et d'augmenter la capacité de gérer le nombre de mobiles dans une seule cellule. Elle tente également d'offrir des débits élevés lors des déplacements et d'offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre les différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, afin d'éviter l'interruption des services lors du transfert, et de basculer l'utilisation vers le tout IP.

Les principaux objectifs ciblés par les réseaux de quatrième génération sont les suivants :

- Assurer la continuité de la session en cours;
- Réduire les délais de signalisation et le trafic;
- Fournir une meilleure qualité de service;
- Optimiser l'utilisation des ressources;
- Réduire le retard de l'interrogation, le retard de bout en bout, la gigue et la perte de paquets;
- Réduire au minimum le coût de la signalisation.

##### **1.4.4.3. Architecture de réseau 4G (LTE)**

L'architecture globale d'un réseau LTE (ou, Long Term Evolution) est illustrée dans la figure 1.8.

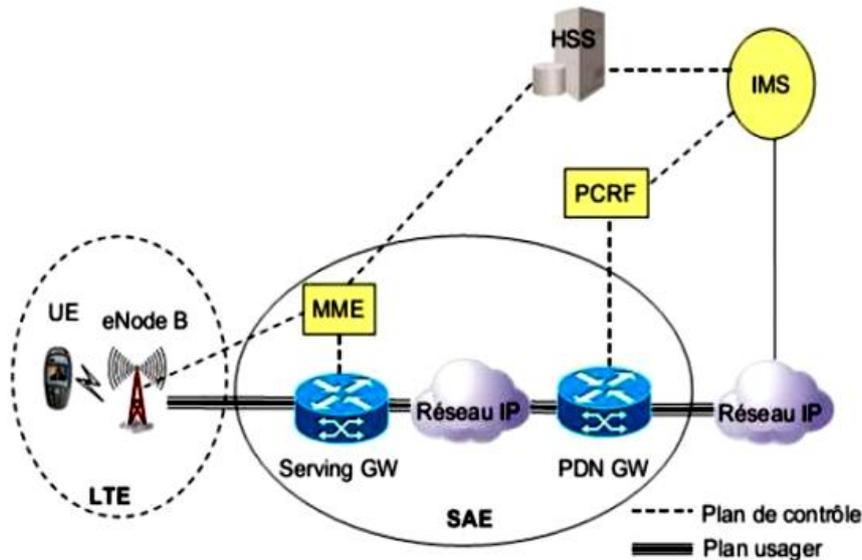


Figure 1.8. Architecture du réseau LTE (4G) [15].

#### 1.4.4.4. Éléments de réseau 4G (LTE)

##### a. Équipement de l'utilisateur (UE)

Il est présenté sur deux plans, à savoir :

- **le plan utilisateur** : il comporte les couches PHY (physique), MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control) et PDCP (Packet Data Convergence Protocol).
- **le plan de contrôle** : il comporte le NAS (Non Access Stratum) et le RRC (Radio Resource Control), avec le plan utilisateur.

##### b. eNode B

L'eNode B contrôle principalement la transmission et la réception radio avec l'UE. Contrairement à l'UTRAN 3G+ où les entités Node B et RNC sont présentes, l'architecture EUTRAN ne comporte que des eNodes B. Les fonctions prises en charge par le RNC ont été réparties entre le eNode B et les entités du réseau cœur MME/Serving GW (SGW). L'eNode B a une interface S1 avec le réseau cœur. L'interface S1 est (S1-Control) entre l'eNodeB et le MME, et S1-U est (S1-User) entre l'eNode B et le GW de service (SGW).

##### c. MME (Mobility Management Entity)

MME est chargée de la gestion de la mobilité et de l'authentification des utilisateurs. Elle choisit les composants dédiés aux types de communication des utilisateurs. Elle assure la gestion du handover inter-domaines et inter-réseaux. Et enfin, elle s'occupe de la signalisation.

**d. Serving GW (Serving Gateway)**

Serving GW assure le rôle de passerelle lors du handover inter-domaines et inter-réseaux, et est donc responsable de l'acheminement des paquets.

**e. PDN GW (Packet Data Network Gateway)**

PDN GW responsable de la mobilité entre les différents systèmes, il est composé de l'élément d'ancrage (anchor) 3GPP qui permet la mobilité entre les technologies LTE et 2G/3G, et de l'élément d'ancrage (anchor) SAE qui permet la mobilité entre le système 3GPP et les systèmes non 3GPP (WIFI, WIMAX, etc.). Il met uniquement en œuvre les décisions prises par l'UE. Il est responsable de l'attribution des adresses IP aux utilisateurs.

**f. HSS (Home Subscriber Server)**

HSS est une base de données avancée. Elle contient des informations sur les abonnements aux réseaux GSM, GPRS, 3G et LTE ...

**g. PCRF (Policy & Charging Rules Function)**

PCRF fournit les règles de taxation.

**h. ePDG (Evolved Packet Data Gateway)**

Il assure l'interopérabilité avec le réseau WLAN en fournissant des fonctions de routage de paquets, de tunneling, d'authentification, d'autorisation et d'encapsulation/décapsulation de paquets [16].

## 1.5. CONCLUSION

La mise en œuvre du service GPRS exige une évolution matérielle et logicielle en plus du réseau GSM déjà existant. L'évolution du GSM vers le GPRS ouvre la voie à l'introduction des réseaux UMTS de troisième génération. En ce qui concerne l'infrastructure, des modifications doivent être apportées pour l'intégration du GPRS ou de l'UMTS par l'ajout d'autres équipements et le chargement de logiciels.

Le réseau GPRS a finalement constitué une étape vers le réseau UMTS. Sur le plan technique, les architectures des trois réseaux GSM, GPRS et UMTS sont complémentaires et interconnectées afin d'optimiser la qualité du service fourni à un abonné.

Pour les réseaux 4G (LTE), nous avons présenté un aperçu des différentes caractéristiques et composantes de la technologie LTE (quatrième génération), puis les équipements utilisés dans cette technologie et les différentes interactions entre eux.

Le prochain chapitre sera consacré à la présentation d'un état de l'art sur la technologie mobile de 5<sup>ème</sup> génération (ou 5G), appelée mmWave (aussi, ondes millimétriques).

## CHAPITRE 2

# Technologies mobiles de cinquième génération (5G)

## 2.1. Introduction

La demande de données cellulaires a énormément évolué, avec des estimations modérées allant de 40 à 70 % d'augmentation du trafic d'une année sur l'autre. Cette croissance exceptionnelle signifie qu'au cours des prochaines décennies, les réseaux cellulaires pourront fournir jusqu'à 1 000 fois la capacité des niveaux actuels. En même temps, comme les avantages de la connectivité sans fil s'étendent au-delà des Smartphones et des tablettes, de nombreux nouveaux appareils nécessiteront un service sans fil. Selon une estimation, jusqu'à 50 milliards d'appareils seront connectés d'ici 2020. Pour répondre à ce défi, les systèmes cellulaires ont suscité un intérêt accru pour les bandes dites d'ondes millimétriques (mmWave), entre 30 et 300 GHz, où les largeurs de bande disponibles sont beaucoup plus larges que les réseaux cellulaires actuels.

Malgré cette évolution, l'intérêt pour les ondes millimétriques est encore très récent et l'utilisation de ces bandes reste une frontière encore largement inexplorée pour la communication cellulaire. Le présent chapitre va introduire un aperçu sur les technologies mobiles de 5<sup>ème</sup> génération.

## 2.2. Passage aux ondes millimétriques cellulaires

Les signaux mmWave se réfèrent à des longueurs d'onde de 1 à 10 mm, ce qui correspond à des fréquences situées entre 30 et 300 GHz environ. Les communications sans fil dans ces bandes de mmWave ne sont pas nouvelles. En effet, les communications millimétriques ont été démontrées pour la première fois par Bose, il y a plus de 100 ans [17].

Actuellement, les bandes mmWave sont couramment utilisées pour les communications par satellites et les liaisons cellulaires. Plus récemment, les transmissions mmWave ont été utilisées pour les réseaux locaux (LAN) et les réseaux personnels (PAN) sans fil à très haut débit, dans les bandes de 60 GHz nouvellement non autorisées. Bien que ces systèmes assurent des débits supérieurs à 1 Gbps, les liaisons sont souvent destinées à des réglages de LOS à courte portée ou point à point.

L'application des bandes mmWave pour des scénarios cellulaires NLOS à plus longue portée représente une nouvelle frontière, et la faisabilité de ces systèmes a fait l'objet de nombreux débats. Si le spectre mmWave présente des largeurs de bande beaucoup plus importantes que les attributions actuelles des cellules, on craint que la propagation des signaux mmWave soit beaucoup moins favorable. Comme nous le verrons plus tard, les signaux mmWave souffrent de fortes ombres, d'une connectivité irrégulière, et auront une plus grande propagation

Doppler. Compte tenu de ces limitations, un scepticisme considérable s'est fait jour quant à la viabilité des bandes mmWave pour les systèmes cellulaires qui nécessitent des communications fiables sur de longues distances et des trajets NLOS [18].

Deux évolutions récentes ont encouragé une reconsidération de la rentabilité de la téléphonie cellulaire à ondes millimétriques.

Tout d'abord, les développements dans le domaine de la RF CMOS et du traitement numérique ont permis de mettre au point des puces à faible coût (mmWave) qui conviennent aux appareils mobiles commerciaux. Des progrès significatifs ont été réalisés, en particulier, dans la combinaison des amplificateurs de puissance et des réseaux adaptatifs en espace libre, et ces technologies devraient encore progresser avec la croissance des systèmes de réseaux LAN et PAN sans fil à 60 GHz. En outre, en raison des très petites longueurs d'onde, il est désormais possible de fabriquer de grands réseaux dans une petite zone de moins de 1 ou 2 cm<sup>2</sup>. Pour assurer la diversité des trajectoires en cas de blocage par des obstacles humains (comme une main tenant une partie de l'appareil ou le corps bloquant le trajet vers la cellule), plusieurs matrices peuvent être placées dans un appareil mobile.

Deuxièmement, les réseaux cellulaires ont évolué vers des rayons plus petits, en particulier avec le support des réseaux hétérogènes pico-cellulaires et femto-cellulaires dans les dernières normes cellulaires. Dans de nombreuses zones urbaines denses, la taille des cellules est maintenant souvent inférieure à 100-200 m de rayon, peut-être dans la gamme des signaux mmWave selon les mesures qui ont été effectuées. En raison de la pénurie de fréquences, l'augmentation de la capacité des réseaux actuels nécessitera une "densification" encore plus importante des cellules. Si une plus grande densification est susceptible de jouer un rôle central dans l'évolution des cellules, la construction de réseaux au-delà des densités actuelles ne peut pas être rentable dans de nombreux contextes en raison des dépenses dans l'acquisition de sites, le déploiement et la fourniture d'un backhaul de qualité. En effet, selon certaines estimations, le backhaul représente déjà 30 à 50 % des coûts d'exploitation et cette part ne fera que croître à mesure que le prix des autres parties de l'infrastructure du réseau diminuera. En revanche, dans les déploiements à très haute densité, les larges bandes passantes des signaux mmWave peuvent constituer une alternative au fractionnement des cellules en augmentant considérablement la capacité des petites cellules individuelles. Le backhaul peut également être fourni dans le spectre mmWave, ce qui permet de réduire encore les coûts [19, 20].

### 2.3. Solutions d'ondes millimétriques pour les futurs réseaux 5G

Malgré les efforts de la recherche industrielle pour déployer les technologies sans fil les plus efficaces possibles, le secteur des communications sans fil doit toujours faire face, en fin de compte, à des demandes de capacité énormes pour les technologies sans fil qu'il déploie actuellement, en raison des progrès et des découvertes constants dans le domaine de l'informatique et des communications, et de l'émergence de nouveaux téléphones portables et de nouveaux cas d'utilisation (comme la nécessité d'accéder à l'internet). Cette évolution se produira dans les années à venir pour la technologie de quatrième génération LTE, ce qui implique qu'à un moment donné, vers 2020, les réseaux sans fil seront congestionnés et qu'il sera nécessaire de mettre en œuvre de nouvelles technologies et architectures pour répondre correctement aux demandes continues des opérateurs et des clients. Le cycle de vie de chaque nouvelle génération de technologie cellulaire est généralement d'une décennie ou moins, en raison du développement naturel des technologies informatiques et de communication. Les travaux que mènent les chercheurs envisagent un avenir sans fil où les débits de données mobiles atteindront plusieurs gigabits par seconde, grâce à l'utilisation d'antennes orientables et d'un spectre d'ondes millimétriques qui pourraient simultanément prendre en charge les communications mobiles et les liaisons de backhaul, avec la convergence possible des services cellulaires et Wi-Fi.

Des recherches récentes suggèrent que les fréquences des ondes millimétriques pourraient être exploitées afin d'augmenter les bandes du spectre radioélectrique actuellement saturées de 700 MHz à 2,6 GHz pour les communications sans fil. L'association de la technologie CMOS, qui peut désormais fonctionner dans les bandes de fréquences des ondes millimétriques, et d'antennes orientables à gain élevé au sein des stations mobiles et de base, améliorent la fiabilité des communications sans fil en ondes millimétriques. En outre, les fréquences porteuses des ondes millimétriques autorisent des attributions de bande passante plus importantes, ce qui se traduit directement par des débits de transfert de données plus élevés. Le spectre des ondes millimétriques offrirait aux opérateurs de services la capacité de multiplier les largeurs de bande des canaux bien au-delà des 20 MHz que les clients de la 4G exploitent actuellement. En augmentant la largeur de bande du canal RF pour les canaux radios mobiles, la capacité de données est nettement accrue, tandis que la latence du trafic numérique est fortement réduite, ce qui améliore énormément l'accès à Internet et les applications qui exigent une latence minimale. Grâce à la très petite taille de la longueur d'onde millimétrique, les fréquences des ondes millimétriques peuvent exploiter la

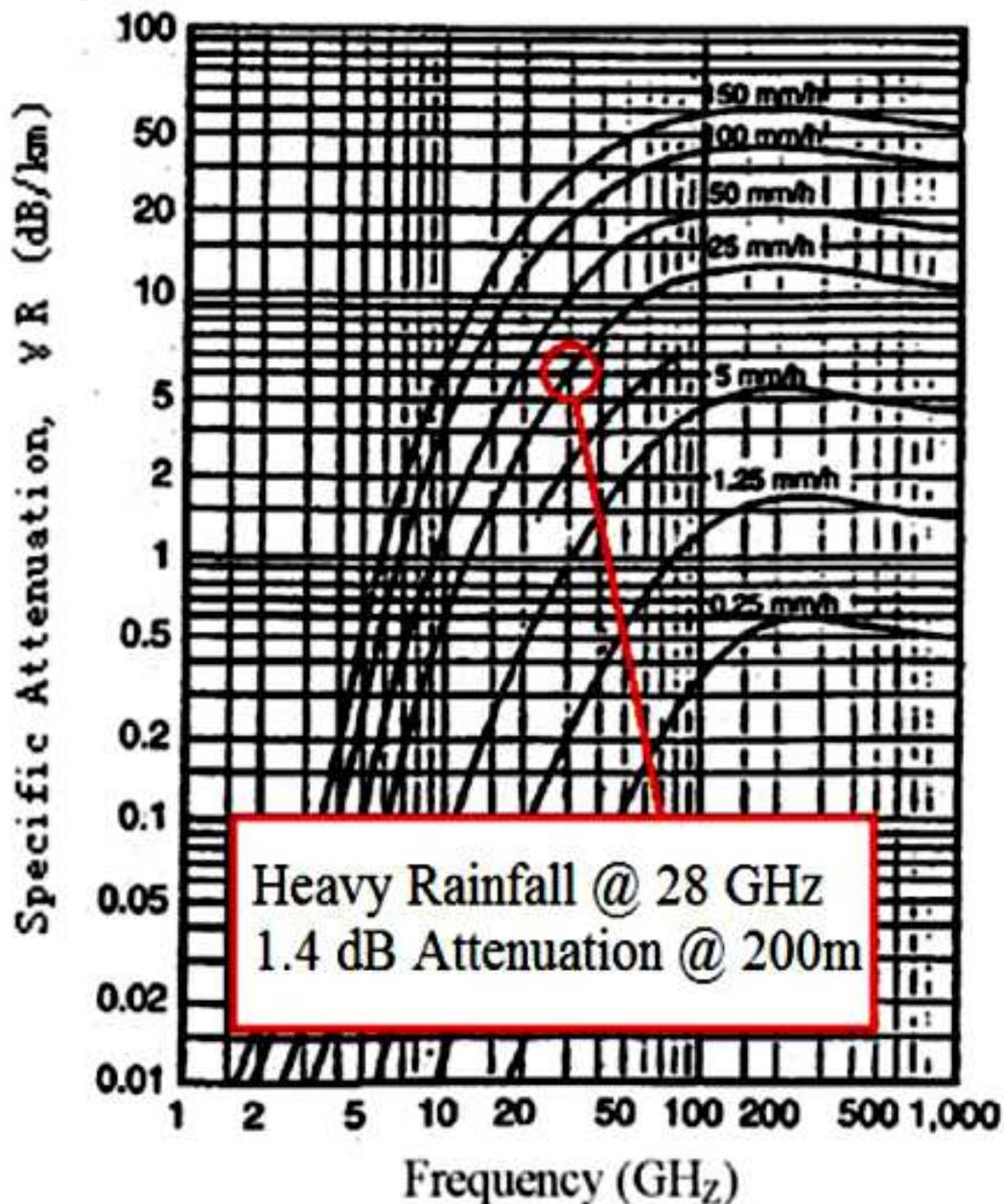
polarisation et les nouvelles techniques de traitement spatial telles que la méthode de MIMO massive et la technique du beamforming (filtrage spatiale) adaptative [18, 21].

Compte tenu de cette augmentation importante de la largeur de bande et des nouvelles capacités apportées par les ondes millimétriques, les liaisons entre les stations de base et les périphériques, ainsi que les liaisons de backhaul entre les stations de base, pourront traiter une capacité beaucoup plus importante que les réseaux 4G existants dans les zones très denses. En outre, les opérateurs poursuivent la réduction des zones de couverture cellulaire pour exploiter la réutilisation spatiale et mettent en œuvre de nouvelles architectures coopératives telles que les MIMO, les relais et l'atténuation des interférences entre les stations de base, le coût par station de base diminuera à mesure qu'elles deviendront plus nombreuses et plus densément distribuées dans les zones urbaines, ce qui rend le backhaul sans fil essentiel pour la flexibilité, le déploiement rapide et la réduction des coûts d'exploitation permanents.

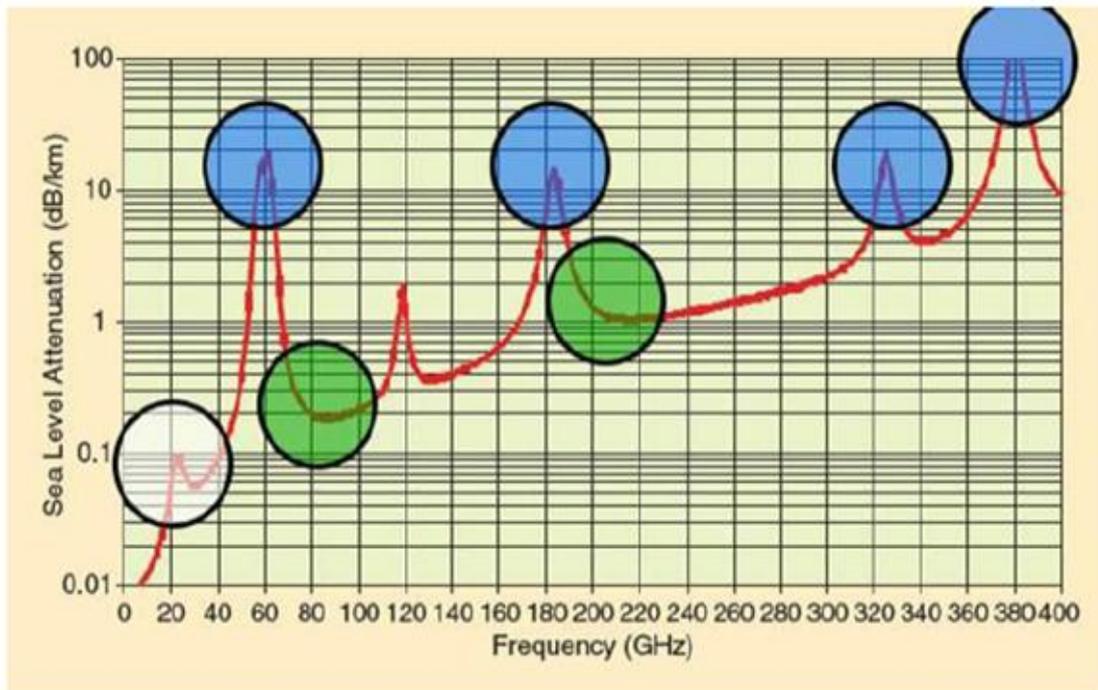
Enfin, par opposition au spectre disjoint employé par de nombreux opérateurs cellulaires aujourd'hui, où les distances de couverture des sites cellulaires varient considérablement sur trois octaves de fréquence entre 700 MHz et 2,6 GHz, le spectre des ondes millimétriques aura des attributions spectrales relativement plus proches, ce qui rendra les caractéristiques de propagation des différentes bandes d'ondes millimétriques beaucoup plus comparables et "homogènes". Les bandes 28 GHz et 38 GHz sont actuellement disponibles avec des allocations de fréquences de plus de 1 GHz en largeur de bande. Les bandes 28 GHz et 38 GHz sont actuellement disponibles avec des allocations de fréquences de plus de 1 GHz en largeur de bande. Elles étaient initialement destinées au service local de distribution multipoint (ou, Local Multipoint Distribution Service (LMDS)) à la fin des années 1990, et ces licences pouvaient être utilisées pour les services cellulaires mobiles et les liaisons sans fil backhaul.

En général, dans la communauté des ingénieurs sans fil, les chercheurs constatent que la pluie et l'atmosphère rendent le spectre des ondes millimétriques inexploitable pour les communications mobiles. Cependant, si l'on considère le fait que la taille des cellules en milieu urbain est aujourd'hui de l'ordre de 200 m, il devient évident que les cellules à ondes millimétriques peuvent résoudre ces problèmes. Les figures 2.1 et 2.2 montrent les caractéristiques d'atténuation de la pluie et d'absorption atmosphérique de la propagation des ondes électromagnétiques en millimètres. Il est possible de constater que pour des tailles de cellules de l'ordre de 200 m, l'absorption atmosphérique ne provoque pas une atténuation supplémentaire significative du trajet pour les ondes millimétriques, en particulier à 28 GHz et 38 GHz. Seulement 7 dB/km d'affaiblissement est prévu en raison des fortes précipitations

de 1 pouce/heure pour la propagation cellulaire à 28 GHz, ce qui se traduit par un affaiblissement de seulement 1,4 dB sur une distance de 200 m. Nombreux chercheurs ont affirmé que pour de petites distances (moins de 1 km), l'atténuation de la pluie présentera un effet négligeable sur la propagation des ondes millimétriques à 28 GHz et à 38 GHz pour les petites cellules [18, 22].



**Figure 2.1.** Atténuation de la pluie en dB/km en fonction de la fréquence à différents taux de précipitation. L'atténuation de la pluie à 28 GHz a une atténuation de 7 dB/km pour une très forte pluie de 25 mm/heure (environ 1 pouce par heure). Si les zones de couverture cellulaire ont un rayon de 200 m, l'atténuation de la pluie sera réduite à 1,4 dB [18, 22].



**Figure 2.2.** Absorption atmosphérique en fonction des fréquences des ondes millimétriques en dB/km. L'atténuation causée par l'absorption atmosphérique est de 0,012 dB sur 200 m à 28 GHz et de 0,016 dB sur 200 m à 38 GHz. Les fréquences de 70 à 100 GHz et de 125 à 160 GHz ont également une faible perte [18, 22].

## 2.4. Mesures cellulaires pour les ondes millimétriques : canal

Les futures technologies sans fil doivent être testées dans les environnements les plus urbains, tels que la ville de New York. Afin d'améliorer la capacité et la qualité du service, l'architecture du réseau cellulaire mmWave doit permettre une réutilisation spatiale plus importante. Les stations de base MIMO massives et les points d'accès aux petites cellules sont deux méthodes intéressantes pour les futurs cellulaires. En outre, les stations de base à MIMO massives attribuent des réseaux d'antennes aux macro-stations de base existantes, qui peuvent concentrer avec précision l'énergie transmise aux utilisateurs mobiles. Les petites cellules sont utilisées pour décharger le trafic des stations de base en superposant une couche de petits points d'accès aux cellules, ce qui réduit en fait la distance moyenne entre les émetteurs et les utilisateurs, et entraîne également des pertes de propagation plus importantes, augmente en outre les débits de transmission des données et améliore l'efficacité énergétique. Ces deux évolutions importantes sont facilement supportées et, en fait, améliorées par le passage au spectre des ondes millimétriques, puisque les petites longueurs d'onde autorisent la mise en place de dizaines, voire de centaines d'éléments d'antenne en réseau sur une plate-forme

physique relativement petite au niveau de la station de base, ou du point d'accès, et que l'évolution naturelle vers de petites cellules garantit que les fréquences des ondes millimétriques compenseront toute atténuation due à la pluie. La compréhension du canal radio est une exigence primordiale pour développer les futurs systèmes mobiles à ondes millimétriques ainsi que les techniques de liaisons de backhaul. Avec une bonne compréhension technique du canal, les chercheurs et les spécialistes de l'industrie peuvent alors explorer de nouvelles méthodes pour l'interface radio, l'accès multiple, les approches architecturales qui incluent la coopération et la réduction des interférences et d'autres techniques d'amélioration du signal. Pour élaborer un modèle statistique de canal spatial destiné aux canaux multi-trajets en ondes millimétriques, il faut effectuer des mesures approfondies dans des conditions et des environnements de fonctionnement typiques et dans le pire des cas. Dans le cadre de la compréhension du canal à ondes millimétriques, il a été effectué de nombreuses mesures de propagation en milieu urbain à New York et en zone suburbaine à Austin, au Texas [18].

## 2.5. Caractéristiques du canal mobile à ondes millimétriques

Plusieurs mesures des canaux mobiles mmWave ont été effectuées. Bien que les canaux à ondes millimétriques dépendent davantage des caractéristiques de l'environnement spécifique au terrain [22, 23], des statistiques importantes sur les canaux mobiles à ondes millimétriques, telles que, l'exposant de perte de trajet, la perte par pénétration, l'étalement angulaire et l'étalement du retard, peuvent être dérivées des mesures. Dans cette section, le présent paragraphe résume les résultats des mesures et met en évidence les observations que les chercheurs jugent importants pour le développement de modèles de signaux et d'interférences permettant de prédire les performances des systèmes cellulaires à ondes millimétriques.

### 2.5.1. Perte en chemin

En considérant une source ponctuelle et une antenne de réception isotrope, d'après l'équation de Friis en espace libre, un signal d'onde millimétrique à 30 GHz subit une atténuation de 20 dB de plus qu'un signal à 3 GHz [23, 24]. Cette perte de trajet de propagation est normalement compensée par des antennes directionnelles. Les signaux mmWave souffrent également d'une forte perte de pénétration à travers les matériaux solides, par exemple 175 dB de perte à travers un mur de béton de 10 cm d'épaisseur à 40 GHz [23, 24]. La conclusion est que la communication directe par LOS ne sera pas toujours possible en présence d'obstacles.

Heureusement, les résultats des mesures montrent aussi que les signaux mmWave se reflètent bien sur la surface des blocages, tels que le verre teinté et le béton. Par conséquent, même

sans trajet LOS, les trajets NLOS créés par les réflexions et la diffusion peuvent aider à couvrir les zones d'ombre derrière les blocages dans les réseaux cellulaires à ondes millimétriques.

Les trajectoires LOS et NLOS ont des caractéristiques de perte de trajectoire différentes. Les trajets LOS ont systématiquement une perte de puissance plus faible que les trajets NLOS [23, 25]. L'exposant de perte de trajet est également variable, par exemple environ 2 pour les trajets LOS, et environ 4 pour les trajets NLOS dans les mesures effectuées à 5 GHz, 28 GHz, 38 GHz et 60 GHz [23, 25]. Bien que l'exposant de perte de trajet LOS soit presque constant, dans les cas de NLOS, il dépend de la largeur du faisceau de l'antenne et de l'environnement de dispersion [23, 25].

La raison en est que la force des signaux réfléchis dépend de la quantité d'énergie qui tombe sur le diffuseur et du type de diffuseur. Par exemple, lorsque la largeur de faisceau de l'antenne varie de  $7,8^\circ$  à  $49,4^\circ$ , l'exposant diminue de 3,88 à 3,18 à 38 GHz, car une plus grande puissance de signal réfléchi devrait être reçue avec une antenne à largeur de faisceau plus large. En outre, les résultats des mesures montrent que l'exposant NLOS croît à mesure que la densité des diffusions dans l'environnement augmente. À titre d'exemple, l'exposant de perte de trajectoire NLOS dans le centre-ville de New York est de 5,76, alors qu'il diminue à 3,86 sur le campus de l'UT Austin, où il y a moins de bâtiments et où ils sont moins dispersés. Les études sur la perte de trajectoire concluent que différents modèles de perte de trajectoire devraient être appliqués aux trajectoires LOS et NLOS. En outre, les paramètres des modèles doivent être sélectionnés en fonction de l'environnement et des largeurs de faisceau d'antenne déployées dans le système. Ces modèles doivent être appliqués à la fois aux liaisons de signal et d'interférence [23, 25].

### 2.5.2. Étalement des retards

Les mesures dans la bande mmWave indiquent que le retard en mmWave est relativement faible par rapport aux systèmes à micro-ondes. Bien sûr, la période des symboles est beaucoup plus petite en raison de la plus grande largeur de bande, de sorte que le plus petit écart de délai provoque toujours des interférences entre les symboles et impose une égalisation au niveau du récepteur. Le comportement de LOS et NLOS est différent. Par exemple, la valeur quadratique moyenne (ou root mean square (RMS)) de l'étalement du retard s'est avérée négligeable pour les liaisons LOS, en revanche elle s'est avérée être d'environ 200 ns et 12,2 ns respectivement dans les mesures à 28 GHz et 38 GHz pour les liaisons NLOS (lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur est de l'ordre de 200 mètres) [23, 26]. Les mesures montrent également que la valeur RMS de l'étalement du retard

augmente et devient plus variable à mesure que les antennes de l'émetteur et du récepteur sont également plus espacées en liaisons LOS. En effet, lorsque les antennes de l'émetteur et du récepteur s'écartent, l'une de l'autre, un plus grand nombre de composantes réfléchies proviennent de nombreuses diffusions différentes, ce qui provoque une augmentation possible de la valeur RMS de l'étalement du retard [23, 26]. De plus, avec les résultats obtenus par les chercheurs, il est également possible de constater que l'étalement du retard est inversement proportionnel à la distance entre la station de base et l'utilisateur mobile. Cela s'explique par l'observation que moins de trajets dominants arrivent en raison de la perte de trajet élevée à mesure que la séparation émetteur-récepteur augmente. L'utilisation de la technique du beamforming (filtrage spatiale) directionnelle au niveau de l'émetteur et du récepteur réduit encore l'effet de l'étalement du retard en se concentrant sur un nombre moindre de trajets qui arrivent dans la largeur de faisceau étroit. Les études sur l'étalement des retards qu'ont été effectuées par les chercheurs nous permettent de conclure que l'étalement des retards est plus important sur des liaisons NLOS et dépend de la largeur du faisceau de l'antenne. Par conséquent, l'étalement du retard peut être plus élevé pour les liaisons interférentes, qui sont généralement hors de vue.

### 2.5.3. Évanouissements à petites échelles

Les mesures à 28 GHz montrent que les composantes à multi-trajets sont rares dans les canaux à ondes millimétriques. En ce qui concerne l'évanouissement à petite échelle, elle a un impact mineur sur les signaux d'ondes millimétriques. Les résultats indiquent également une forte corrélation spatiale dans le canal mmWave et peu de changement dans la puissance reçue en raison d'un évanouissement à petite échelle lorsque les antennes à haute directivité du récepteur et de l'émetteur sont pointées vers la direction de l'axe de visibilité directe. Les mesures à 5 GHz illustrent également la corrélation spatiale et fréquentielle élevée pour les canaux LOS. Bien qu'il y ait peu de mesures pour le cas NLOS, il semble que l'évanouissement du NLOS soit faible lorsque les antennes directionnelles sont correctement orientées pour capturer les rares multi-trajets réfléchis les plus forts.

Les études limitées sur les évanouissements à petite échelle permettent de conclure qu'il peut être utile de négliger les évanouissements à petite échelle dans le terme du signal désiré, lorsque les antennes directionnelles des stations de base (BS) et de la station mobile sont correctement orientées. Comme les signaux interférents n'ont pas forcément un pointage optimal, il est raisonnable de supposer une distribution générale des évanouissements à petite échelle de Nakagami pour le terme interférent, avec des paramètres déterminés à partir de l'environnement [23, 26].

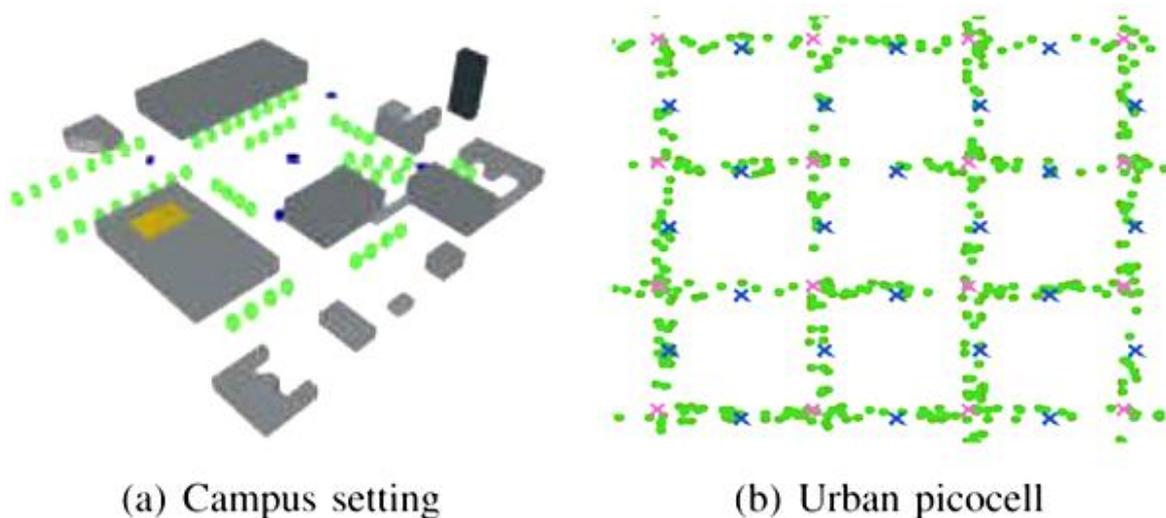
#### 2.5.4. Étalement angulaire

L'étalement angulaire croît et varie au fur et à mesure que la hauteur du récepteur décroît. Cela indique que les distributions de l'étalement angulaire sont généralement différentes dans les stations de base ou dans les stations mobiles, en raison des différentes hauteurs. À titre d'exemple, dans les mesures à 38 GHz, l'étalement angulaire est inférieur à  $30^\circ$  autour des directions de visibilité au niveau des sites de stations de base sur le toit des bâtiments, tandis que l'étalement angulaire au niveau des récepteurs de stations mobiles augmente considérablement à  $180^\circ$ . L'étalement angulaire le plus faible au niveau des stations de base indique que les futures stations de base mmWave pourraient bénéficier d'un réseau adaptatif composé d'un grand nombre d'antennes avec des largeurs de faisceau assez étroites. En raison de le plus grand étalement angulaire au niveau du récepteur, il est suggéré d'installer une antenne à faisceau relativement large au niveau de station mobile afin de capter plus de puissance.

Les mesures ne se caractérisent que par la relation entre la géométrie du réseau, la largeur du faisceau et l'étalement angulaire. Lorsque des caractérisations plus précises seront disponibles, elles devraient être incorporées dans un modèle de perte de trajectoire [23].

### 2.6. Modèles de déploiement de réseaux 5G

En raison de la portée limitée des signaux mmWave, la plupart des applications cellulaires pour les systèmes millimétriques se sont focalisées sur des déploiements extérieurs de petites cellules. À titre d'exemple, une étude de capacité effectuée par les chercheurs a porté sur des modèles de déploiement de réseaux 5G dans des environnements de type campus et stade où les utilisateurs pouvaient obtenir des connexions relativement libres aux cellules mmWave ; consulter la figure 2.3 (a). Le sujet principal de cette section sera sur les déploiements micro-cellulaires et pico-cellulaires urbains avec des rayons de cellules dans la gamme de 100-200 m, similaires aux tailles de cellules actuelles pour de tels déploiements. La propagation du signal NLOS sera beaucoup plus fréquente dans les environnements urbains que dans les campus ou les stades extérieurs, ce qui rend la couverture beaucoup plus complexe. Pour assurer une couverture dense dans de tels scénarios, les cellules mmWave pourraient être déployées, de manière pico-cellulaire au niveau du mobilier urbain tel que les lampadaires solaires ou les côtés des bâtiments afin de permettre une couverture directe sur les rues avec un ombrage minimal [20].

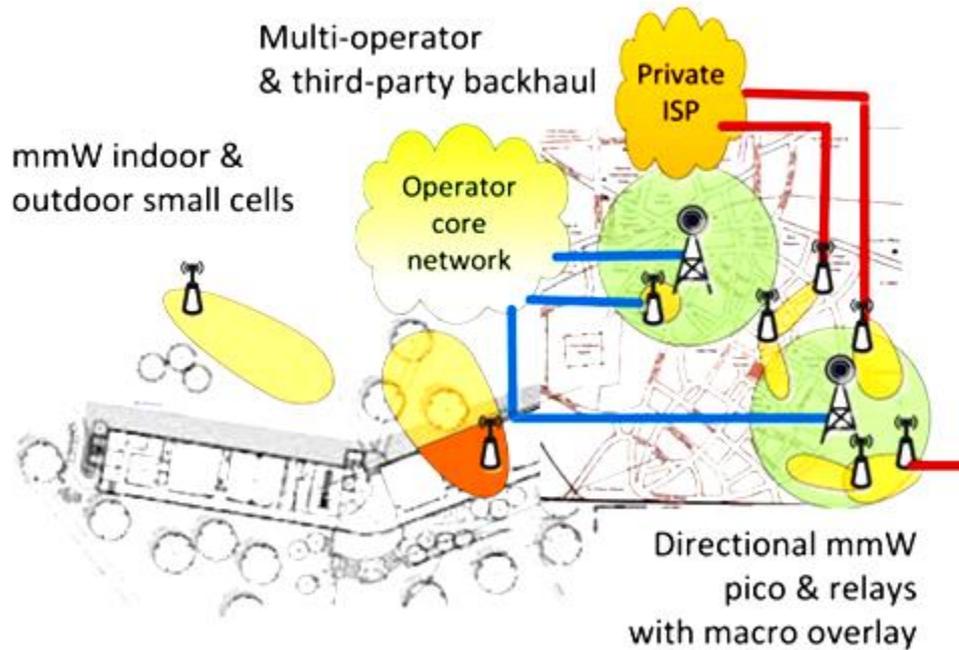


**Figure 2.3.** Cas d'utilisation des cellules à ondes millimétriques. (a) Couverture en extérieur dans un environnement de type campus. (b) Les micro-cellules ou pico-cellules urbaines telles qu'illustrées dans une figure détaillée à partir de la représentation des points d'accès mmWave (croix bleu et rose) placés sur chaque bloc d'une grille urbaine pour servir les mobiles (cercles verts) dans les rues [20, 26].

La figure 2.3 (b) montre une telle configuration pico-cellulaire pour un environnement urbain considéré, où un à trois points d'accès de mmWave ont été placés dans chaque bloc d'une grille de ville. D'autres déploiements sont également possibles. À titre d'exemple, des cellules pourraient être placées comme les micro-cellules urbaines actuelles sur le toit des bâtiments pour couvrir une plus grande région [20].

## 2.7. Aspects des réseaux hétérogènes

En raison des limites de propagation des ondes millimétriques, les systèmes cellulaires à ondes millimétriques ne peuvent pas assurer à eux seuls une capacité élevée, uniforme et robuste dans toute une série de déploiements. Les réseaux à ondes millimétriques seront par nature hétérogènes ; consulter la figure 2.4. En fait, il est fort probable que les réseaux cellulaires et locaux se dissiperont au fil du temps. Les réseaux hétérogènes (ou HetNets) ont été les uns des domaines de recherche les plus actifs dans les instituts de normalisation cellulaire au cours des cinq dernières années, l'accent étant mis sur la gestion des interférences intercellulaires et la répartition des charges. Cependant, l'introduction des cellules mmWave dans les réseaux cellulaires actuels entraînera une certaine hétérogénéité du réseau dans beaucoup plus d'aspects que la taille des cellules [20].



**Figure 2.4.** En raison des limites de la propagation des ondes millimétriques, les systèmes cellulaires à ondes millimétriques devront coexister et se coordonner avec les cellules à micro-ondes conventionnelles. En outre, pour assurer une couverture intérieure et utiliser efficacement le spectre, le backhaul et le spectre peuvent être partagés entre les opérateurs et les tiers de manière beaucoup plus importante que dans les déploiements actuels [20].

- **Ondes millimétriques et micro-ondes/UHF** : Le plus important, puisque les cellules mmWave auront une portée naturellement limitée en raison des limites physiques des structures d'antenne et du gain correspondant dans un appareil portable, ils devront coexister avec une superposition cellulaire conventionnelle UHF/micro-ondes pour une couverture universelle.
- **Relais contre points d'accès câblés** : Avec un grand nombre de petites cellules, il peut être peu pratique ou coûteux d'établir une connectivité par fibre optique avec chaque cellule. Les relais (ou, plus simplement, les répéteurs) constituent une alternative intéressante et rentable qui peut s'appuyer sur la technologie existante de backhaul via les ondes millimétriques et d'exploiter les degrés complets de liberté dans les bandes d'ondes millimétriques.
- **Pico-cellules à courte portée LOS contre micro-cellules à grande portée NLOS** : Comme décrit ci-dessus, il peut y avoir des différences significatives de couverture entre les microcellules et les picocellules. Les microcellules peuvent offrir une plus

grande portée, mais une couverture NLOS plus dense. En pratique, les deux types de cellules devront probablement coexister.

- **Propriétés** : L'un des principaux défis de mmWave est la pénétration à l'intérieur des bâtiments. Une couverture raisonnable exigera que les cellules mmWave soient placées à l'intérieur. Par analogie avec le concept de femto-cellule et les petites cellules de voisinage, des tiers peuvent être mieux à même de fournir ces cellules, créant ainsi un réseau avec plusieurs opérateurs et propriété de tiers.

Ces réseaux hétérogènes présentent plusieurs problèmes de conception, notamment en ce qui concerne la sélection des cellules et la mise en réseau [20].

## 2.8. Mesures des canaux cellulaires à New York

Afin de fournir une évaluation réaliste de la propagation des ondes millimétriques en milieu urbain, des mesures approfondies ont été effectuées par une équipe à New York sur des canaux de 28 et 73 GHz. Les bandes 28 et 73 GHz ont été choisies, car elles sont toutes deux considérées comme des fréquences initiales où les systèmes cellulaires à ondes millimétriques pourraient fonctionner [18, 20]. Les bandes de 28 GHz étaient auparavant ciblées pour les systèmes locaux de distribution multipoint (ou, local multipoint distribution systems (LMDSs)) et sont désormais intéressantes pour les premiers déploiements de cellules à ondes millimétriques, étant donné leur fréquence relativement faible dans la plage des ondes millimétriques. Cependant, à mesure que les systèmes à ondes millimétriques se déploieront, ces bandes de fréquences plus faibles seront probablement réduites, d'autant plus qu'elles doivent être en concurrence avec les systèmes de liaison cellulaire existants. Le passage aux bandes supérieures est donc inévitable. En revanche, les fréquences de la bande E [71-76 GHz et 81-86 GHz] [20, 27] ont un spectre suffisant et sont adaptables pour un déploiement dense, offrant une option majeure pour la transmission sans fil de classe transporteur à l'intérieur et à l'extérieur, si la fréquence inférieure devenait encombrée. Comme le montre la figure 2.2, l'absorption atmosphérique de la bande E n'est que légèrement inférieure (par exemple, 1 dB/km) à celle des bandes de fréquences inférieures (UHF/micro-ondes) qu'ont été largement exploitées aujourd'hui. Pour mesurer les caractéristiques des canaux dans ces fréquences, un déploiement de type micro-cellulaire a été émulé. Des émetteurs ont été placés sur des toits de deux à cinq étages et des mesures ont été ensuite effectuées à plusieurs endroits au niveau de la rue jusqu'à 500 m des émetteurs, consulter la figure 2.5. Pour caractériser à la fois la perte de trajectoire globale et la structure spatiale des canaux, les mesures ont été effectuées avec

des antennes à cornet rotatif, fortement directionnelles [30 dBm de sortie RF, 10 largeurs de faisceau et 24,5 dBi de gain à l'émetteur (TX) et au récepteur (RX)].

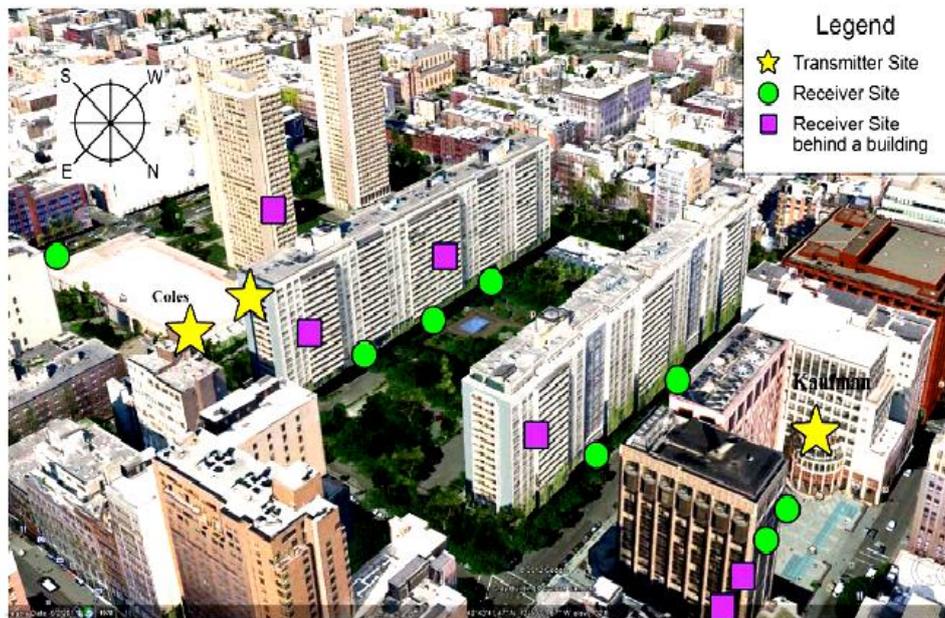


Figure 2.5. Endroits de mesures typiques à New York pour les canaux de 28 GHz et 73 GHz [20].

Afin d'obtenir une haute résolution temporelle, ils ont utilisé un sondeur de canal de 400 Mcps (mégachip par seconde) (voir la figure 2.6). Pour chaque paire d'emplacements TX-RX, les angles des antennes TX et RX ont été balayés sur une gamme de valeurs pour détecter des groupes de trajectoires discrets [18, 20].

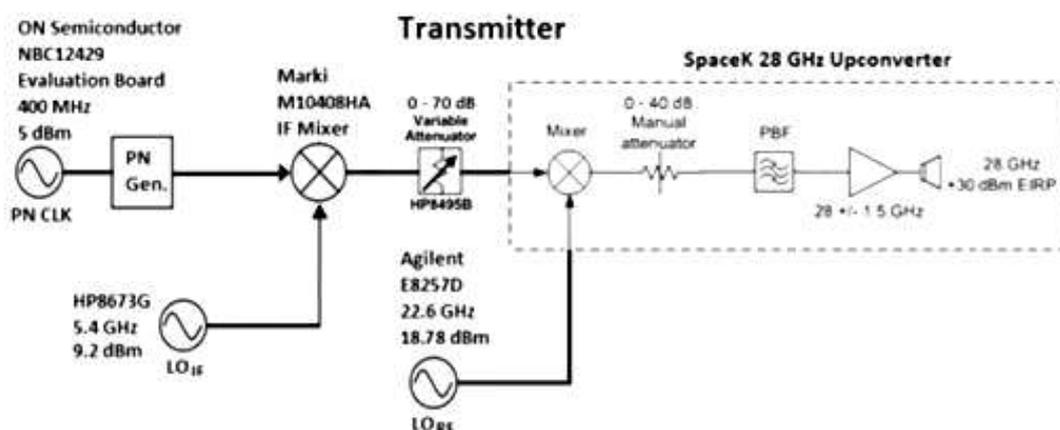
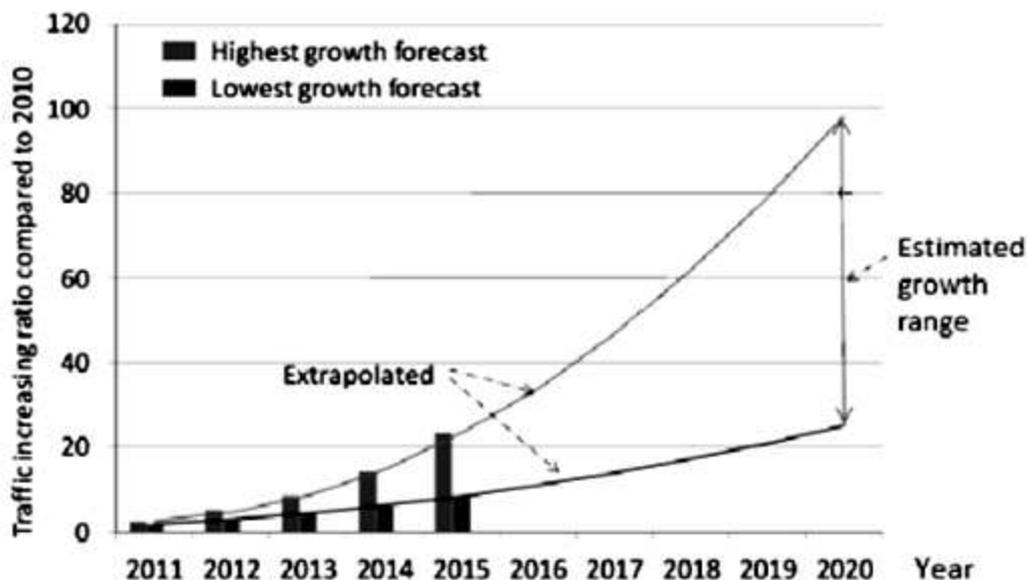


Figure 2.6. Schéma fonctionnel de l'émetteur du sondeur à 28 GHz avec une puissance isotrope rayonnée effective (EIRP en anglais (Effective Isotropic Radiated Power)) de 54,5 dBm et une première bande passante RF de 800 MHz pour une haute résolution temporelle [20].

## 2.9. Estimation du spectre mobile pour les IMT terrestres

Les termes de l'UIT (Union internationale des télécommunications, ou, en anglais : International Telecommunication Union ou ITU) pour 3G et 4G sont IMT-2000 et IMT-Advanced. En conséquence, le terme IMT-2020 est adopté pour la 5G. Collectivement, ils portent le nom d'IMT (ou International Mobile Telecommunications). Les capacités des systèmes IMTs sont constamment améliorées en fonction des besoins des utilisateurs et des progrès de la technologie. Les systèmes d'IMTs ont contribué au développement économique et social dans le monde. Avec l'augmentation du trafic de données mobiles, il faudra des ressources de spectre plus importantes pour les futurs systèmes de communication mobile à large bande. Le rapport ITU-R M.2290-0 offre une perspective mondiale sur l'estimation des besoins futurs en spectre pour les IMTs terrestres dans l'année 2020. Le besoin total en spectre prédit pour les scénarios de faible et de forte densité d'utilisateurs a été estimé à 1340 MHz et 1960 MHz (y compris le spectre déjà utilisé ou en cours d'utilisation) au moins pour l'année 2020. Dans certains pays, les besoins en spectre nationaux peuvent être inférieurs à l'estimation obtenue par des paramètres de densité d'utilisateurs plus faibles et dans certains autres pays, les besoins en spectre nationaux peuvent être supérieurs à l'estimation obtenue par des paramètres de densité d'utilisateurs plus élevés. Pour plus de détails, la figure 2.7 illustre les prévisions de trafic mobile jusqu'en 2020 [28].



**Figure 2.7.** Prévisions du trafic mobile vers 2020 par extrapolation selon le rapport ITU-R M.2290-0 [28].

Il est supposé que pour l'année 2020, la croissance médiane du trafic se situera entre les croissances les plus faibles et les plus élevées, en prévoyant un ratio de croissance du trafic au moins 25 fois en 2020 par rapport à 2010, consulter la figure 2.7. De plus, d'autres estimations anticipent que le trafic IMT mondial va augmenter de 10 à 100 fois dans les années 2020 à 2030 [28].

Le développement de petites cellules et la combinaison de la capacité de bandes sans licence (par exemple 2,4 GHz, 5 GHz) avec la capacité d'un bloc de fréquences sous licence constituent une solution pour augmenter les débits de données, déjà considérée pour les systèmes de communication mobile de quatrième génération (4G). Cela nécessitera un réseau intelligent pour le handover et la commutation entre diverses technologies et les bandes de fréquences dans des réseaux hétérogènes. Il existe une autre solution, à savoir l'agrégation de porteuses, qui permet d'augmenter les débits de données, mais sa complexité est exponentiel compte tenu du nombre de combinaisons possibles des bandes de fréquences exploitées ; le partage du spectre est également une solution envisageable.

Une autre solution consiste à développer et à introduire la prochaine génération de technologies de communication à large bande est la 5G, appelée également IMT-2020. L'un des principaux objectifs de la 5G est d'augmenter les débits de données actuels jusqu'à plusieurs gigabits par seconde (Gbit/s) avec même plus de 10 Gbit/s dans les environnements de hotspot. Une possibilité est de considérer l'utilisation de fréquences plus élevées afin d'augmenter la largeur de bande disponible (blocs de fréquences supérieurs à 500 MHz), qui sont nécessaires pour obtenir de tels débits de données. En outre, les chercheurs prévoient que les stations de base 5G seront, à l'avenir, connectées par des lignes optiques ou des liaisons de backhaul à micro-ondes comme solution alternative [28, 29, 30].

## **2.10. Bandes de fréquences IMTs actuelles**

L'IMT est destiné à fournir des services de télécommunication à grande échelle, quels que soient le lieu et le type de réseau ou de périphérique. L'identification des fréquences pour les IMTs offre un feu vert à l'industrie mobile dans le monde entier pour déployer en toute fiabilité les réseaux et services IMTs et fournit une base stable aux fabricants. La coordination des fréquences réduit les prix d'utilisation des systèmes mobiles et autorise l'itinérance internationale sur un grand nombre de bandes de fréquences. Par conséquent, les appareils mobiles à large bande qui exploitent les bandes IMTs coordonnées deviennent largement disponibles [28].

Depuis 1992, plusieurs bandes de fréquences ont été identifiées pour les IMTs dans les réglementations radios de l'UIT. Initialement, les premières bandes IMT ont été attribuées aux systèmes IMT-2000. La grille de la figure 2.8 récapitule les bandes de fréquences IMTs qui sont identifiées pour les systèmes IMTs dans les trois régions de l'UIT (globalement) ou seulement dans certaines d'entre elles, ou dans certains pays de ces régions. À titre de comparaison, la grille de la figure 2.8 contient une colonne indiquant les bandes de fréquences mobiles pour lesquelles les licences d'utilisation du spectre ont été attribuées aux opérateurs de téléphonie mobile dans les pays de la conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications (ou, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) [28].

IMT frequency bands identified for IMT systems in the ITU RR, MHz	World Radiocommunication Conference	Licensed mobile frequency bands in CEPT countries, MHz	Frequency arrangements defined by CEPT
450–470	WRC-07	450–457.5/460–467.5	FDD
470–608	WRC-15	—	—
614–698	WRC-15	—	—
694–960	WRC-2000, WRC-07, WRC-12	694–790	FDD, SDL
		790–862	FDD, TDD
		880–915/925–960	FDD
1427–1518	WRC-15	1452–1492	SDL
1710–2025	WARC-92, WRC-2000	1710–1785/1805–1880	FDD
		1900–1920	TDD
		1920–1980/2110–2170	FDD
		2010–2025	TDD
2110–2200	WARC-92	1920–1980/2110–2170	FDD
2300–2400	WRC-07	2300–2400	TDD
2500–2690	WRC-2000	2500–2690	FDD, TDD, SDL
3300–3400	WRC-15	—	—
3400–3600	WRC-07	3400–3600	FDD, TDD
3600–3700	WRC-15	3600–3800	TDD
4800–4990	WRC-15	—	—

Figure 2.8. Grille de spectre identifiée pour l'IMT [28].

La plupart de ces bandes de fréquences correspondent également aux bandes de fréquences coordonnées par la CEPT et l'EU (ou, European Union) [28].

L'identification à l'IMT n'exclut pas l'utilisation de ces bandes par toute application des services auxquels ils sont attribués ou identifiés et n'établissent pas de priorité dans la régulation radios. Différentes dispositions de régulation peuvent s'appliquer à chaque bande. Les déviations régionales pour chaque bande sont décrites dans les notes de bas de page de

l'ITU-RR qui s'appliquent à chaque bande. L'identification des bandes de fréquences attribuées au service mobile pour les IMTs peut apporter des modifications à la situation de partage concernant les applications des services auxquels la bande de fréquences est déjà attribuée et peut exiger des mesures de régulation supplémentaires [28].

Les interfaces radios d'IMTs comprennent deux modes de fonctionnement : le duplex à répartition en fréquence (DRF, ou, en anglais : Frequency Division Duplex ou FDD) et le duplex à répartition dans le temps (DRT, ou, en anglais : Time Division Duplex ou TDD). En outre, la liaison descendante supplémentaire permet de relier le spectre non apparié avec les bandes mobiles à large bande FDD afin d'améliorer considérablement la capacité des réseaux en liaison descendante [28, 31].

### 2.11. Bandes de fréquences IMTs futures

Afin de supporter une capacité de trafic de données accrue et de permettre les largeurs de bande de transmission nécessaires pour supporter des débits de données très élevés, la 5G va étendre la gamme de fréquences employées pour les communications mobiles. Cela implique de nouvelles fréquences en dessous de 6 GHz, ainsi que des fréquences plus élevées.

Pour les communications sans fil, les basses fréquences offrent une meilleure couverture. Actuellement, pratiquement tous les pays exploitent le spectre en dessous de 6 GHz pour les systèmes IMTs. Le spectre pertinent pour l'accès sans fil 5G va donc de moins de 1 GHz jusqu'à environ 100 GHz [28].

Le FDD a été le dispositif duplex prépondérant depuis le début de l'ère des communications mobiles. À l'ère des 5G, le FDD restera le principal système duplex pour les bandes de fréquences inférieures. Cependant, pour les bandes de fréquences plus élevées, en particulier au-dessus de 10 GHz, ciblant des déploiements très denses, le TDD jouera un rôle plus important. Selon les chercheurs, l'accès sans fil 5G peut être réalisé grâce à l'amélioration des systèmes d'évolution à long terme (LTE) pour le spectre existant, en combinaison avec de nouvelles technologies d'accès radio qui ciblent principalement le nouveau spectre, à titre d'exemple la technologie de radio cognitive [28].

Les hautes fréquences, en particulier celles supérieures à 10 GHz, ne peuvent servir qu'en complément aux bandes de fréquences plus basses, et offriront essentiellement une capacité de système supplémentaire et des largeurs de bande de transmission très élevées pour des débits de données extrêmes dans des déploiements denses. Les attributions de spectre dans les

bandes inférieures resteront le pivot des réseaux de communication mobile à l'ère de la 5G, en assurant une connectivité étendue ubiquitaire [28].

À mesure que la quantité de spectre exigée pour les services mobiles augmente, il devient de plus en plus préférable que le spectre existant et le spectre récemment attribué et identifié soient uniformisés. Les avantages de la normalisation du spectre sont notamment les suivants : faciliter les économies à grande échelle, permettre l'itinérance globale, réduire la complexité de la conception des équipements, préserver la durée de vie des piles, améliorer l'efficacité du spectre et réduire l'interférence frontalière. La normalisation du spectre pour les IMTs conduira à la mise en commun des équipements, ce qui est souhaitable pour réaliser des économies sur le plan de l'échelle et de la rentabilité des équipements [28, 30, 32].

### 2.11.1. Spectre en dessous de 6 GHz

Parallèlement à l'obtention de débits de données élevés, il est également nécessaire de garantir une large couverture géographique et une couverture de l'extérieur vers l'intérieur en 5G. Par conséquent, le spectre en dessous de 6 GHz constitue une partie très importante de la solution du spectre 5G. Jusqu'à présent, l'Europe a harmonisé plus de 1 200 MHz de spectre pour la large bande mobile dans la gamme de fréquences allant de 694 MHz à 3 800 MHz.

Afin d'assurer une couverture ubiquitaire dans les réseaux de prochaine génération (5G) ou pré-5G, les bandes LTE (4G) déjà harmonisées en dessous de 1 GHz, y compris en particulier la bande 700 MHz, et la bande 800 MHz, joueront un rôle important afin de permettre une couverture 5G nationale et intérieure. Selon les chercheurs, la bande de 450 MHz, qui a été harmonisée aux conditions d'utilisation de la LTE dans cette bande, est actuellement en cours de développement au sein de la CEPT, elle contribuera également de manière significative afin d'assurer une large couverture des services de réseaux mobiles de la prochaine génération en Europe. La normalisation des conditions d'utilisation de la bande 450 MHz en Europe a été lancée par l'office des communications électroniques de la République de Lettonie. La principale bande de fréquences adaptée à l'introduction de l'utilisation de la 5G en Europe avant même 2020 avec une large bande passante pourrait être la bande 3400-3800 MHz, sachant que cette bande est déjà normalisée pour les réseaux mobiles, et qu'elle offre jusqu'à 400 MHz de spectre continu permettant une large bande passante. Cette bande a la capacité de placer l'Europe à l'avant-garde du déploiement de la 5G ou de la pré-5G [28].

Selon les auteurs, les bandes de fréquences candidatent possibles pour la Région 1 de l'ITU pour une identification future à l'IMT pourraient être les bandes 470-694 MHz, 3300-3400

MHz et 4800-4990 MHz ou des parties de ces bandes si la compatibilité électromagnétique avec les services existants dans ces bandes et dans les bandes de fréquences adjacentes pouvait être assurée. La bande de fréquences 1427-1518 MHz pourrait également être exploitée pour les systèmes 5G [28, 33].

### 2.11.2. Spectre au dessus de 6 GHz

La 5G prévoit des débits de données très élevés, qui nécessiteront des largeurs de bande beaucoup plus importantes que jamais auparavant. Ces débits de données très élevés ne peuvent être trouvés que dans des bandes de fréquences plus élevées (au-dessus de 6 GHz). Pour offrir des débits de données plus élevés et une latence plus faible, il est prévu de déployer de nouvelles solutions sans fil à des fréquences plus élevées - à savoir les bandes d'ondes millimétriques (mmWave). Par conséquent, la mise en œuvre de bandes de fréquences même supérieures à 24 GHz reste indispensable pour garantir tous les objectifs de performance de la 5G, par exemple des débits de données de plusieurs gigabits par seconde. Les effets de la très faible latence conduisent aux déploiements en ondes millimétriques avec leurs antennes très directives et leurs petites tailles de cellules.

La plupart envisagent une solution de 5G où les réseaux cellulaires mobiles, Wi-Fi, machine-à-machine (ou, Machine-to-Machine (M2M)), et Internet des objets (ou, Internet of Things (IoT)) se consolident, et certains ajouteraient à cette liste celle des systèmes automobiles, tels que les systèmes de communication V2V (véhicule à véhicule, ou car-to-car), etc.

La WRC-15 (ou World Radiocommunication Conference-15) a décidé d'étudier la grille des bandes de fréquences présentées dans la figure 2.9 en vue d'une future identification à l'IMT (visant le 5G) lors de la WRC-19. Dans le cadre du point 1.13 de l'ordre du jour de la WRC-19, il est prévu d'identifier des bandes de fréquences pour le développement futur des IMTs, y compris les attributions supplémentaires possibles au service mobile à titre primaire, conformément à la résolution COM6/20 (WRC-15) [28].

Des études de compatibilité doivent être effectuées dans chaque bande de fréquences et chaque bande doit être en mesure de répondre aux besoins des autres services et attributions existants, consulter la figure 2.9. Toute identification de bandes de fréquences pour les IMT doit tenir compte de l'utilisation des bandes par d'autres services (afin de protéger les services existants) et de l'évolution des besoins de ces services. Le point 1.13 de l'ordre du jour de la WRC-19 indique qu'il faut mener et achever à temps pour la WRC-19, les études de partage et de compatibilité appropriées, en tenant compte de la protection des services auxquels la bande

est attribuée à titre primaire. En outre, les organisations de la CEPT et de l'ITU doivent s'efforcer de comprendre quelles bandes de fréquences pourraient être utilisées pour la 5G à l'avenir, et aussi lesquelles pourraient avoir le meilleur potentiel d'harmonisation internationale, ce qui reste essentiel pour le développement de la 5G afin de limiter la complexité des terminaux [28].

Frequency bands to be studied until WRC-19 for possible identification for IMT, GHz	Bandwidth, GHz	Primary allocations to radiocommunication services in Radio Regulations in ITU Regions (including WRC-15 results)	Comments
24.25–27.5	3.25	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (space-to Earth), FIXED, FIXED-SATELLITE (Earth-to-space), INTER-SATELLITE, MOBILE, RADIONAVIGATION, SPACE RESEARCH (space-to-Earth)	Frequencies have already allocation to the mobile service on a primary basis in ITU RR
37–40.5	3.5	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (Earth-to-space), FIXED, FIXED-SATELLITE (space-to-Earth), MOBILE, MOBILE except aeronautical mobile, MOBILE-SATELLITE (space-to-Earth), SPACE RESEARCH (Earth-to-space), SPACE RESEARCH (space-to-Earth)	
42.5–43.5	1	FIXED, FIXED-SATELLITE (Earth-to-space), MOBILE except aeronautical mobile, RADIO ASTRONOMY	
45.5–47	1.5	MOBILE, MOBILE-SATELLITE, RADIONAVIGATION, RADIONAVIGATION-SATELLITE	
47.2–50.2	3	FIXED, FIXED-SATELLITE (Earth-to-space), FIXED-SATELLITE (space-to-Earth), MOBILE	
50.4–52.6	2.2	FIXED, FIXED-SATELLITE (Earth-to-space), MOBILE	
66–76	10	BROADCASTING, BROADCASTING-SATELLITE, FIXED, FIXED-SATELLITE (space-to-Earth), INTER-SATELLITE, MOBILE, MOBILE-SATELLITE, MOBILE-SATELLITE (space-to-Earth), RADIONAVIGATION, RADIONAVIGATION-SATELLITE	
81–86	5	FIXED, FIXED-SATELLITE (Earth-to-space), MOBILE, MOBILE-SATELLITE (Earth-to-space), RADIO ASTRONOMY	
31.8–33.4	1.6	FIXED, INTER-SATELLITE, RADIONAVIGATION, SPACE RESEARCH (deep space) (space-to-Earth),	Frequencies may require additional allocation to the mobile service on a primary basis in ITU RR
40.5–42.5	2	BROADCASTING, BROADCASTING-SATELLITE, FIXED, FIXED-SATELLITE (space-to-Earth)	
47–47.2	0.2	AMATEUR, AMATEUR-SATELLITE	

**Figure 2.9.** Nouvelle gamme de fréquences possible pour les IMTs [28].

Selon la récente évaluation théorique de l'ITU, les simulations, les mesures, le développement technologique et le prototypage décrits dans le rapport ITU-R M.2376-0, l'utilisation des bandes entre 6 et 100 GHz est possible pour les scénarios de déploiement des IMTs étudiés, et pourrait être considérée pour le développement des IMTs pour 2020 et au-delà [28, 30, 34].

## 2.12. Conclusion

La normalisation et le développement futur des systèmes cellulaires à ondes millimétriques sont l'une des plus grandes avancées des deux dernières décennies dans le domaine des communications sans fil. Le passage aux ondes millimétriques impose toutefois de nouveaux défis de conception et de nouvelles problématiques de recherche. Dans ce chapitre, nous avons présenté et récapitulé toute une série d'enquêtes concernant la technologie 5G. Le prochain chapitre portera sur l'estimation des signaux à ondes millimétriques à l'aide d'un détecteur d'énergie.

## CHAPITRE 3

# Détection d'un signal primaire à 60 GHz dans un réseau 5G

### 3.1. Introduction

Les appareils mobiles sont devenus une partie essentielle de notre vie quotidienne et, à ce titre, l'infrastructure de réseau mobile qui les relie est devenue indispensable. Il est appelé à jouer un rôle encore plus important avec des systèmes mobiles de cinquième génération (5G) destinés à un large éventail de services et d'appareils. Dans ce chapitre, nous étudions et évaluons la performance de la détection du signal primaire d'une station de base 5G (SB5G) dans un environnement encombré en utilisant l'algorithme d'un détecteur d'énergie et un estimateur de filtre Alpha-Beta. La fréquence du signal primaire que nous souhaitons de le détecter est la suivante : 60 GHz. La performance de l'algorithme proposé dans ce chapitre est évaluée à l'aide de simulations et de résultats, et nous terminerons bien sûr par une conclusion.

### 3.2. Algorithme de détection d'un signal 5G proposé

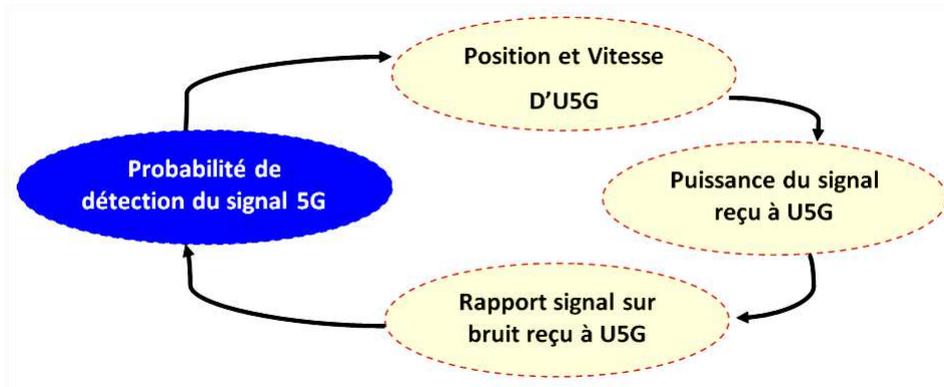
L'algorithme que nous étudions dans ce chapitre combine deux phases ; la première consiste à utiliser un estimateur appelé Filtre Alpha-Bêta (ou, Alpha-Beta Filter (ABF)), la deuxième consiste à employer un détecteur d'énergie.

Toutefois, la performance du filtre alpha-bêta (ABF), qui est utilisé dans le présent travail, est résumée ci-après. Il est important de rappeler que l'ABF est une forme simplifiée du filtre de Kalman (KF) qui peut facilement estimer et suivre la position d'un nœud mobile (ici, un utilisateur 5G) qui pourrait se trouver n'importe où, avec un minimum d'erreur. L'ABF a de nombreuses applications dans différents domaines, notamment les systèmes automatiques, le lissage des données, la théorie du contrôle, les systèmes de navigation, le traitement des signaux, les réseaux sans fil et bien d'autres encore. L'avantage essentiel de ce filtre est que le bruit de processus du système n'est pas considéré, ce qui n'est pas le cas pour le KF.

En outre, parmi les différentes techniques de détection du signal dans la littérature. Nous avons utilisé le détecteur d'énergie (radiomètre) [35, 36, 37], le détecteur d'énergie a été considéré comme un élément essentiel prometteur en raison de :

- facile à implémenter.
- ne nécessite aucune information préalable sur le signal détecté.
- faible coût de calcul.
- performant pour un SNR (rapport signal/bruit) élevé.

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, le but de ce projet est d'étudier et d'évaluer les performances de la détection en temps réel d'un signal primaire 5G avec l'impact de la mobilité d'un utilisateur 5G (U5G) (consulter la figure 3.1) ; notre contribution est basée sur les points suivants :



**Figure 3.1.** Cycle de détection du signal 5G.

La première phase (ABF) :

- La première étape commence par l'estimation de la position et de la vitesse de l'U5G.
- La deuxième étape s'est focalisée sur l'estimation de la puissance du signal reçu au niveau de l'U5G pour deux modèles de propagation (perte de trajectoire log-distance et perte de trajectoire log-normal shadowing).
- La dernière étape s'est consacrée à l'estimation du rapport signal sur bruit (ou, signal to noise ratio (SNR)) à chaque lien entre la SB5G et l'U5G.

La deuxième phase (détecteur d'énergie) :

- À partir de l'estimation du rapport signal/bruit, nous pouvons estimer la probabilité de détection (PD) afin d'envisager la présence ou l'absence du signal 5G d'une station de base à une fréquence bien déterminée ?

### 3.3. Modèle de système

Dans ce qui suit, nous présentons à la figure 3.2 notre modèle de réseau qui sera utilisé tout au long de ce projet ; ce modèle est modélisé par des équations mathématiques. Dans cette étude, nous considérons un réseau radio à mmWave hétérogène composé de :

- Station de base 5G (SB5G) fixée dans le réseau avec la coordonnée suivante :  $(0,0)$ .
- L'utilisateur 5G (U5G) est déployé aléatoirement dans le réseau avec la coordonnée suivante :  $(x(i), y(j))$ .

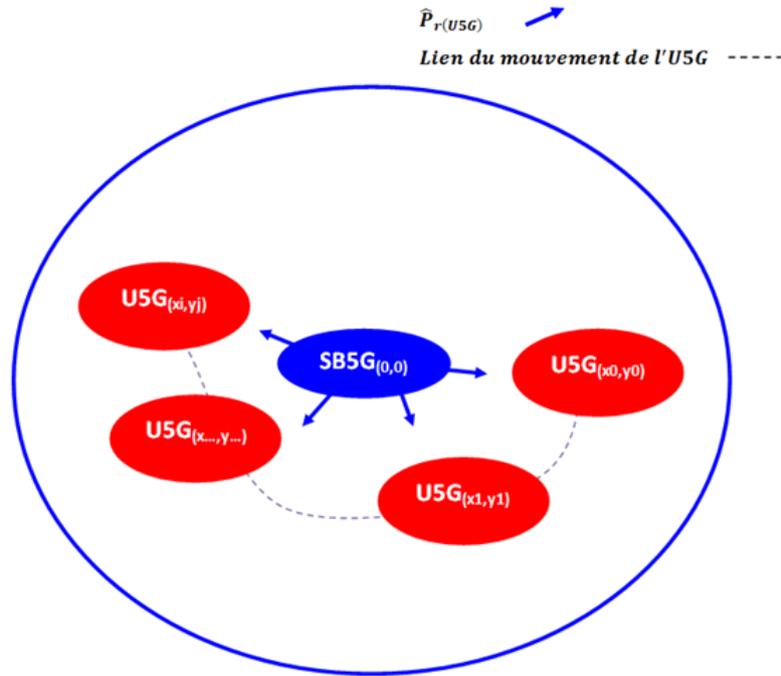


Figure 3.2. Réseau radio à mmWave.

### 3.3.1. Filtre de suivi Alpha-Beta (ABF)

Ici, l'ABF est employé pour estimer la position et la vitesse d'un nœud U5G sur la base d'un modèle d'accélération constante de la cible (ici, U5G), en utilisant les gains de deux filtres, à savoir le filtre alpha ( $\alpha$ ) et le filtre bêta ( $\beta$ ). L'ABF est un filtre en deux étapes ; les deux étapes sont le processus de prédiction et le processus de lissage (ou, smoothing) [35, 37] :

1. **Première étape** : Le processus de prédiction peut être exprimé comme suit [35, 37] :

$$\text{Axe } x \begin{cases} x_p(i) = x_s(i-1) + T * v_{xs}(i-1) + \left(\frac{T^2}{2}\right) * a_s(i-1) \\ v_{xp}(i) = v_{xs}(i-1) + T * a_s(i-1) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{Axe } y \begin{cases} y_p(j) = y_s(j-1) + T * v_{ys}(j-1) + \left(\frac{T^2}{2}\right) * a_s(j-1) \\ v_{yp}(j) = v_{ys}(j-1) + T * a_s(j-1) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où  $T$  représente l'intervalle d'échantillonnage ou le pas de temps,  $(x(i), y(j))$  la position,  $(v_x(i), v_y(j))$  la vitesse,  $(a(i), a(j))$  l'accélération ;  $p$  et  $s$  se réfèrent respectivement aux valeurs d'état prédites et lissées.

Les équations (3.1) et (3.2) peuvent être écrites autrement, comme suit [37] :

$$\begin{bmatrix} x_p(i) = x_s(i-1) + T * v_{xs}(i-1) + \left(\frac{T^2}{2}\right) * a_s(i-1) \\ y_p(j) = y_s(j-1) + T * v_{ys}(j-1) + \left(\frac{T^2}{2}\right) * a_s(j-1) \\ v_{xp}(i) = v_{xs}(i-1) + T * a_s(i-1) \\ v_{yp}(j) = v_{ys}(j-1) + T * a_s(j-1) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Selon l'équation (3.3), l'évolution du système peut s'écrire sous la forme d'une matrice comme suit [37] :

$$\begin{aligned} X_p(k) &= \begin{bmatrix} x_p(i) \\ y_p(j) \end{bmatrix} \\ X_p(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_s(i-1) \\ y_s(j-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{xs}(i-1) \\ v_{ys}(j-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ 0 & T^2/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_s(i-1) \\ a_s(j-1) \end{bmatrix} \\ X_p(k) &= \Phi * X_s(k-1) + H * V_s(k-1) + \Gamma * a_s(k-1) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Et

$$\begin{aligned} V_p(k) &= \begin{bmatrix} v_{xp}(i) \\ v_{yp}(j) \end{bmatrix} \\ V_p(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{xs}(i-1) \\ v_{ys}(j-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_s(i-1) \\ a_s(j-1) \end{bmatrix} \\ V_p(k) &= \Lambda * V_s(k-1) + \Psi * a_s(k-1) \end{aligned} \quad (3.5)$$

2. **Deuxième étape** : Selon les valeurs prédites précédemment, qui ont été établies lors de la première étape, le processus de lissage peut être décrit au moyen des équations suivantes [37] :

$$X_s(k) = X_p(k) + \alpha (X_0(k) - X_p(k)) \quad (3.6)$$

$$V_s(k) = V_p(k) + \left(\frac{\beta}{T}\right) (X_0(k) - X_p(k)) \quad (3.7)$$

Où  $X_0(k)$  est la position actuelle du nœud U5G.

Après avoir employé l'ABF pour l'estimation de la position et de la vitesse de l'U5G, la distance de liaison entre la SB5G et l'U5G peut être estimée, cette dernière sera intégrée dans le modèle de propagation utilisé, afin d'estimer la puissance du signal reçu au niveau de l'U5G et le rapport signal sur bruit (SNR) à chaque lien entre la SB5G et l'U5G.

### 3.3.2. Modèle de propagation

La puissance du signal reçu estimée en dB à partir du SB5G vers l'U5G est exprimée par :

$$\hat{P}_{r(U5G)} = P_{t(SB5G)} - \left( PL_0 + 10PLE_{(LOS/NLOS)} \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{(U5G,SB5G)}}{d_0} \right) \right) \quad (3.8)$$

À partir de l'équation (3.8), nous supposons que le modèle de perte de trajectoire log-distance est représenté sous la forme :

$$\left[ \frac{\hat{P}_{r(U5G)}(\hat{d}_{(U5G,SB5G)})}{P_{r(U5G)}(d_0)} \right]_{[dB]} = -10PLE_{(LOS/NLOS)} \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{(U5G,SB5G)}}{d_0} \right) \quad (3.9)$$

$$P_{r(U5G)}(d_0) = P_{t(SB5G)} - PL_0 \quad (3.10)$$

$$PL_0 = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.11)$$

De plus, pour obtenir le modèle des effets de shadowing log-normal, nous ajoutons un élément supplémentaire  $X_{\sigma(LOS/NLOS)}$  dans le modèle de perte de trajectoire log-distance, et ce modèle correspondant :

$$\left[ \frac{\hat{P}_{r(U5G)}(\hat{d}_{(U5G,SB5G)})}{P_{r(U5G)}(d_0)} \right]_{[dB]} = -10PLE_{(LOS/NLOS)} \log_{10} \left( \frac{\hat{d}_{(U5G,SB5G)}}{d_0} \right) + X_{\sigma(LOS/NLOS)} \quad (3.12)$$

Où,  $\hat{P}_{r(U5G)}$ ,  $P_{t(SB5G)}$ ,  $PL_0$ ,  $\hat{d}_{(U5G,SB5G)}$ ,  $\lambda$  et  $PLE_{(LOS/NLOS)}$ , sont respectivement, la puissance du signal reçu estimée à l'U5G en dB, la puissance de transmission par la SB5G en dB, la perte de trajectoire à une distance de référence  $d_0$  en dB, la distance de liaison estimée entre l'U5G et la SB5G en m, la longueur d'onde du signal 5G en mm et l'exposant de perte de trajectoire en ligne de visibilité (ou, line-of-sight (LOS)) ou hors de la ligne de visibilité (ou, non-line-of-sight (NLOS)), et  $X_{\sigma(LOS/NLOS)}$  est une variable aléatoire gaussienne distribuée à moyenne nulle avec un écart-type  $\sigma_{(LOS/NLOS)}$  en dB.

Cependant, pour calculer le lien du  $\widehat{SNR}_{(U5G,SB5G)}$  de la distance estimée  $\hat{d}_{(U5G,SB5G)}$  entre l'U5G et la SB5G, nous nous appuyons sur l'équation suivante :

$$\widehat{SNR}_{(U5G,SB5G)} = \frac{\hat{P}_{r(U5G)}(\hat{d}_{(U5G,SB5G)})}{P_{Noise}} \quad (3.13)$$

$$\widehat{SNR}_{(U5G,SB5G)}[dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{\hat{P}_{r(U5G)}(\hat{d}_{(U5G,SB5G)})}{P_{Noise}} \right) \quad (3.14)$$

$$\widehat{SNR}_{(U5G,SB5G)}[dB] = \hat{P}_{r(U5G)}(\hat{d}_{(U5G,SB5G)}) [dB] - P_{Noise} [dB] \quad (3.15)$$

Où  $P_{Noise}$  représente la puissance du bruit de l'environnement du réseau radio à mmWave [35, 36, 37].

### 3.3.3. Modèle de détection local du signal 5G

Dans cette section, nous allons présenter le modèle de détection locale du signal 5G comme le montre la figure 3.3.

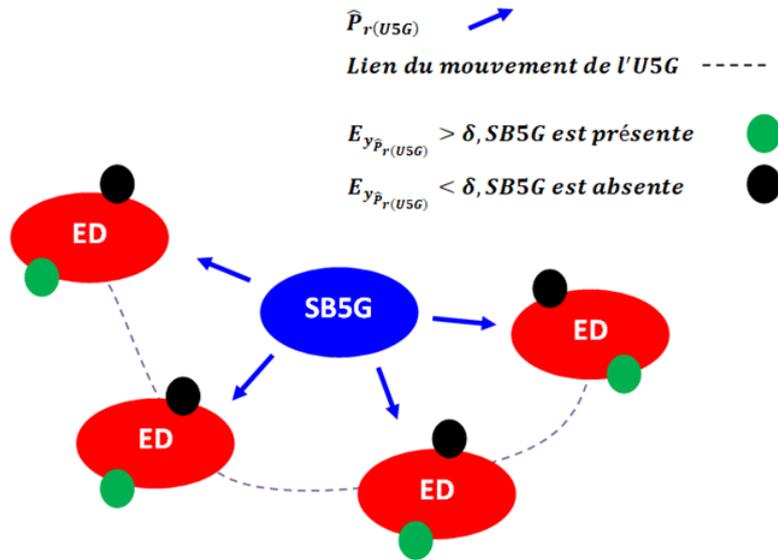


Figure 3.3. Modèle de détection locale du signal 5G.

Le processus de détection du spectre 5G ou de détection de la SB5G (signal 5G) est divisé en deux phases : la détection locale du spectre 5G et la détection coopérative du spectre 5G. Pour la détection locale du signal 5G, nous considérons que chaque U5G est muni d'un détecteur d'énergie pour détecter le signal 5G afin d'identifier si la SB5G est présente ou absente dans la zone d'intérêt (consulter la figure 3.2). Il peut être formulé comme suit :

- Lorsque la SB5G n'est pas présente, la puissance du signal reçu estimée vers l'U5G est exprimée par

$$y_{\hat{P}_r(U5G)}(t) = w(t) \rightarrow H_0 \tag{3.16}$$

- Lorsque la SB5G est présente, la puissance du signal reçu estimée vers l'U5G est exprimée par

$$y_{\hat{P}_r(U5G)}(t) = x_{P_t(SB5G)}(t) + w(t) \rightarrow H_1 \tag{3.17}$$

Où  $y_{\hat{P}_{r(U5G)}}(t)$  est la puissance du signal reçu estimée vers l'U5G,  $x_{P_{t(SB5G)}}(t)$  est le signal 5G de la SB5G et  $w(t)$  est le bruit blanc Gaussien additif (ou, Additive White Gaussian Noise (AWGN)). À partir de l'observation de  $y_{\hat{P}_{r(U5G)}}(t)$ , l'U5G doit prendre une décision entre  $H_0$  (SB5G est absente) et  $H_1$  (SB5G est présente).

En supposant que  $E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}}$  est l'énergie de  $y_{\hat{P}_{r(U5G)}}(t)$ , elle peut être exprimée par :

$$E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}} = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{n=1}^M \left| y_{\hat{P}_{r(U5G)}}_n \right|^2 \quad (3.18)$$

Où  $y_{\hat{P}_{r(U5G)}}_n$  désigne un échantillon obtenu par la puissance du signal reçu estimée au niveau de l'U5G et  $M = 2TW$  est le nombre total d'échantillons. Alors, la puissance du signal reçu estimée au niveau de l'U5G sera détectée dans une largeur de bande  $W$  pendant un temps d'observation  $T$ .

De plus, l'énergie de sortie  $E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}}$  d'un détecteur d'énergie est distribuée comme suivante :

$$E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}} = \begin{cases} E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}/H_0}} = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{n=1}^M |w_n|^2 \\ E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}/H_1}} = \left(\frac{1}{M}\right) \sum_{n=1}^M \left| x_{P_{t(SB5G)}}_n + w_n \right|^2 \end{cases} \quad (3.19)$$

Nous pouvons écrire l'équation (3.19) comme suit :

$$E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}} = \begin{cases} E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}/H_0}} = \chi_M^2 \\ E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}/H_1}} = \chi_M^2(2\gamma) \end{cases} \quad (3.20)$$

Où  $\gamma = \widehat{SNR}_{(U5G,SB5G)} [dB]$ ,  $\chi_M^2$  et  $\chi_M^2(2\gamma)$  désignent respectivement les distributions du Chi-carré central et non-central.  $M$  est le degré de liberté [3, 5, 33-36].

La performance de détection du signal 5G sous un canal AWGN est évaluée par deux paramètres : la détection de la probabilité (PD) et la probabilité de fausse alarme (PFA), qui sont représentées par [1, 33, 34] :

$$PD = Pr \left( E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}} > \delta | H_1 \right) = Q_M(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\delta}) \quad (3.21)$$

$$PFA = Pr \left( E_{y_{\hat{P}_{r(U5G)}}} > \delta | H_0 \right) = \frac{\Gamma(M, \frac{\delta}{2})}{\Gamma(M)} \quad (3.22)$$

Où  $\Gamma(\cdot)$  et  $\Gamma(\cdot, \cdot)$  sont des fonctions gamma complètes et incomplètes, respectivement [35, 36, 37].  $Q_M(\cdot, \cdot)$  est la fonction  $Q$  généralisée de Marcum et  $\delta$  est le seuil de décision [35, 36, 37].

### 3.4. Étude de simulation et résultats

#### 3.4.1. Simulation

Dans cette section, les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB 2017a. Ce qui nous intéresse dans ce travail, c'est l'anticipation de la détection d'un signal primaire en temps réel provenant par une station de base 5G (SB5G) avec impact de la mobilité d'un utilisateur 5G (U5G) en trois scénarios, comme indiqué dans le tableau 3.1. Les paramètres de notre simulation sont énumérés dans le tableau 3.2 [38, 39, 40].

	Modèle de propagation	Canal d'observation
Scénario (A)	Perte de trajectoire log-distance	AWGN
Scénario (B)	Perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{LOS}$ )	AWGN
Scénario (C)	Perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{NLOS}$ )	AWGN

**Tableau 3.1.** Scénarios de détection locale du signal SB5G.

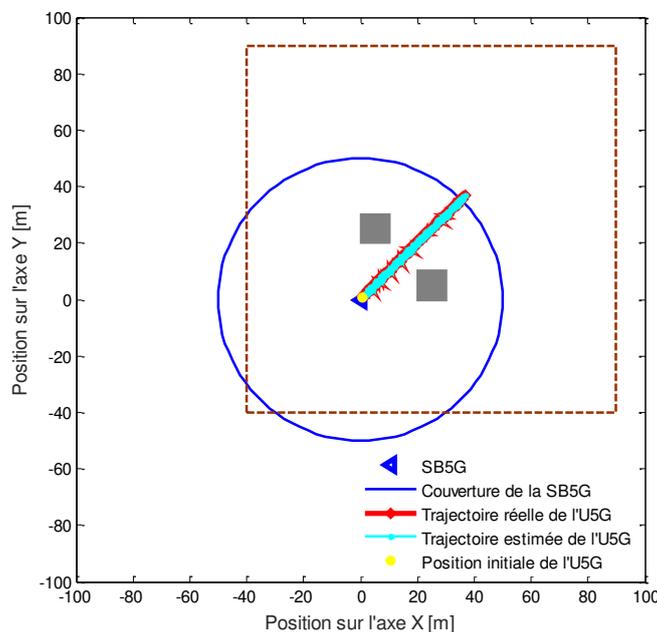
Paramètres	Valeurs
Couverture de la zone SB5G	50 x 50 [m <sup>2</sup> ]
Fréquence	60 [GHz]
Puissance de transmission de la SB5G	15 [dBm]
Puissance du bruit au niveau de l'U5G	-139 [dBm]
Exposant de perte de trajectoire	$n_{LOS} = 2.17$ et $n_{NLOS} = 3.01$
Distance de référence	1.0 [m]

**Tableau 3.2.** Paramètres de simulation [38, 39, 40].

#### 3.4.2. Résultats

Dans notre travail, la première phase de l'algorithme proposé a pour objectif d'estimer la puissance du signal reçu à l'U5G et le rapport signal/bruit entre la SB5G et l'U5G. Pour cela, nous devons d'abord estimer le trajet de déplacement (la position et la vitesse) de l'U5G par rapport à un repère qui sera la SB5G en utilisant le filtre Alpha-Beta.

Selon la figure 3.4, la SB5G a été installée dans un environnement fermé de  $130 \times 130 \text{ [m}^2\text{]}$ , comme le montre le contour marron, en outre les deux contours gris sont considérés comme des obstacles à l'U5G. Cependant, la figure 3.4 illustre la trajectoire réelle (en rouge) et estimée (en bleu ciel) du U5G dans un réseau 5G. Il est clair que l'U5G prend une trajectoire semi-aléatoire. Par conséquent, les résultats obtenus nous ont amenés à conclure que le filtre Alpha-Beta offrait de bonnes performances afin de pouvoir suivre la trajectoire réelle de l'U5G avec des erreurs d'estimation plus faibles pour chaque position de l'U5G (consulter la figure 3.5). À titre d'exemple, l'erreur moyenne d'estimation de la position de l'U5G est égale à  $1.1762 \times 10^{-04} \text{ m}$ .



**Figure 3.4.** Positions semi-aléatoires réelles et estimées de l'U5G.

La figure 3.6 donne les vitesses réelles et estimées pour le mouvement de l'U5G dans un réseau 5G. Selon les résultats obtenus dans la figure 3.6, nous avons observé que la vitesse estimée de l'U5G au moyen du filtre Alpha-Beta est proche du cas de la vitesse réelle et nous enregistrons néanmoins une très faible erreur d'estimation pour chaque vitesse de l'U5G à chaque instant (consulter la figure 3.7). À titre d'exemple, l'erreur moyenne d'estimation de la vitesse de l'U5G est égale à  $9.4092 \times 10^{-06} \text{ m/s}$ .

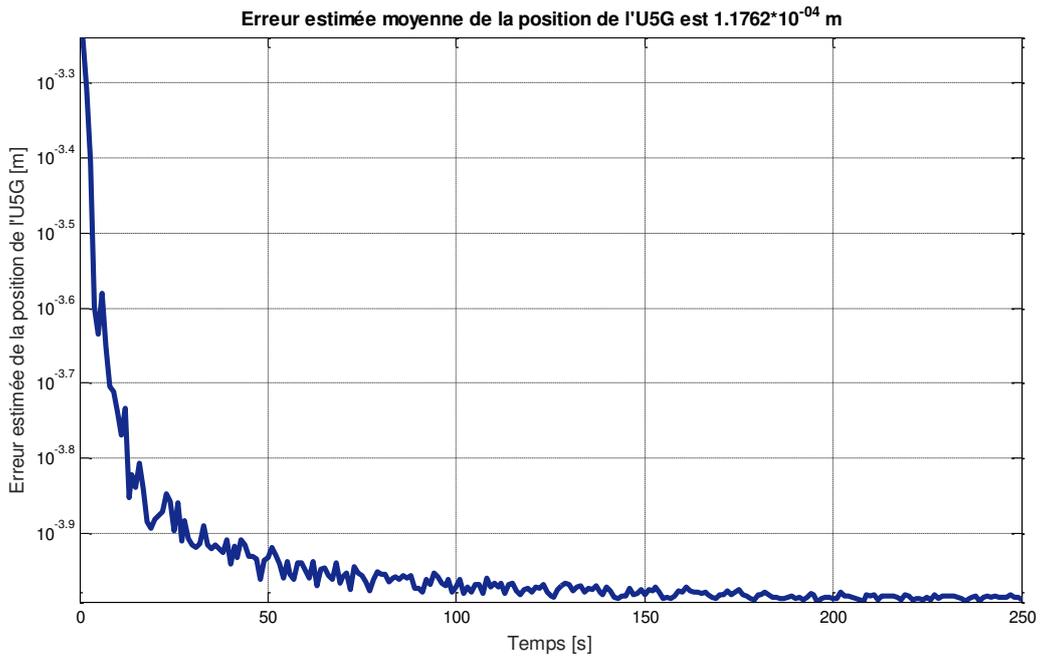


Figure 3.5. Erreur estimée de la position de l'U5G [m] vs. Temps [s].

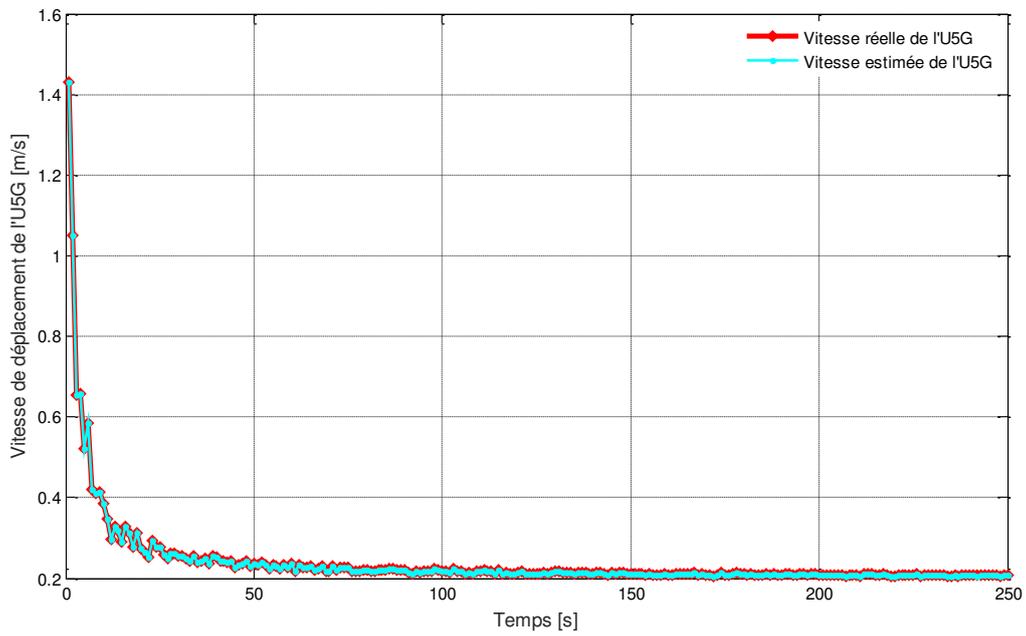


Figure 3.6. Vitesse estimée de déplacement de l'U5G [m/s] vs. Temps [s].

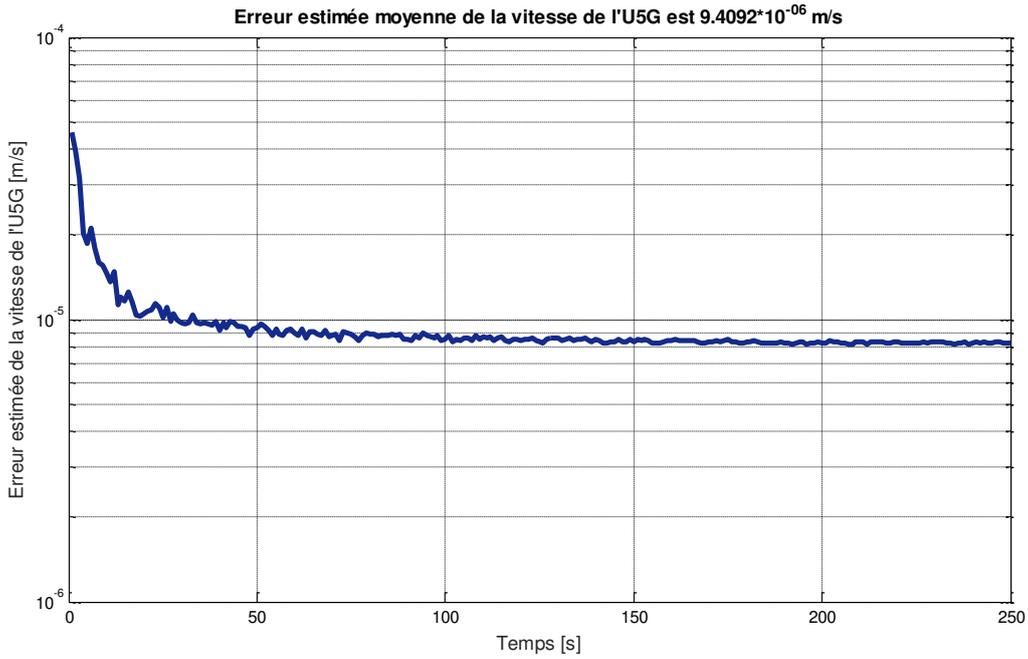


Figure 3.7. Erreur estimée de la vitesse de l'U5G [m/s] vs. Temps [s].

À partir des équations (3.8) à (3.12), nous pouvons évaluer la puissance réelle et estimée du signal reçu à l'U5G, comme le montre la figure 3.8. Plus l'U5G s'éloigne de la SB5G (consulter la figure 3.4), plus la puissance du signal reçu à l'U5G décroît et vice versa (consulter la figure 3.8).

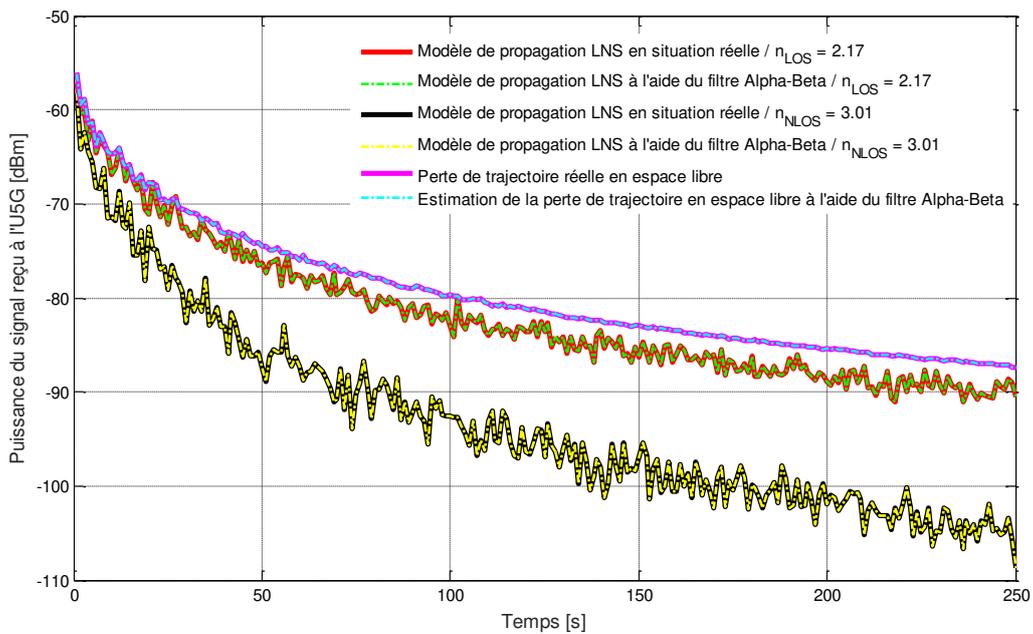
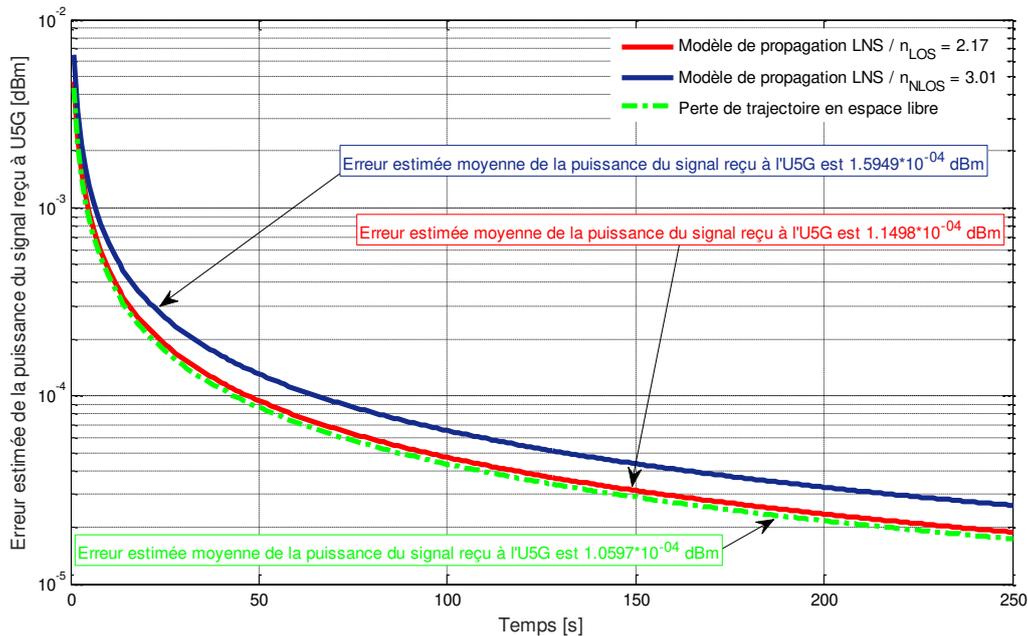


Figure 3.8. Puissance du signal reçu à l'U5G [dBm] vs. Temps [s].

En outre, la figure 3.8 illustre les variations possibles de la puissance du signal reçu pour chaque position de l'U5G, en trois modèles de propagation, sont les suivants : perte de trajectoire log-distance, perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{LOS}$ ), et perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{NLOS}$ ). Comme résultats, nous avons clairement vu que le modèle de propagation perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{NLOS}$ ) peut influencer sur la puissance réelle et estimée du signal reçu à l'U5G (en noir et jaune, respectivement). En conclusion, la phase d'estimation de la puissance du signal reçu à l'U5G en utilisant le filtre Alpha-Beta, nous a permis d'identifier le signal primaire provenant de la SB5G avec une certaine précision, grâce à la similarité entre les résultats réels et estimés. A titre d'exemple, l'erreur estimée moyenne de la puissance du signal reçu à l'U5G sous un modèle de propagation perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{NLOS}$ ) est de  $1.5949 \times 10^{-04}$  dBm (consulter la figure 3.9) et si nous comparons l'erreur estimée de la puissance du signal reçu à l'U5G pour les trois scénarios proposés, nous constatons que l'erreur estimée dans le cadre d'un modèle de propagation perte de trajectoire log-normal shadowing ( $n_{NLOS}$ ) est la plus importante par rapport aux deux autres modèles de propagation (voir la figure 3.9).



**Figure 3.9.** Erreur estimée de la puissance du signal reçu à l'U5G [dBm] vs. Temps [s].

Le troisième scénario (consulter le tableau 3.1) est le plus réaliste dans un réseau 5G, donc l'étude de l'algorithme que nous avons proposé consiste à estimer le niveau de détection du signal primaire provenant de la SB5G à 60 GHz sous un canal AWGN. Pour ce faire, nous

nous basons sur l'estimation du rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G, comme le montre la figure 3.10. Les équations qui nous aident à évaluer le rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G, pour chaque position de l'U5G, sont les suivantes: (3.13), (3.14) et (3.15).

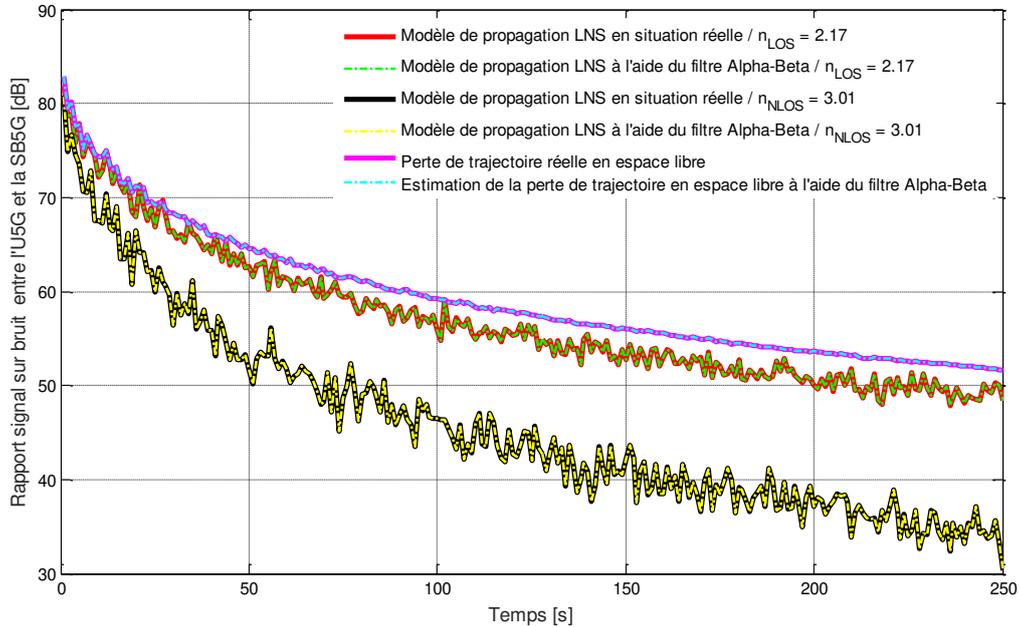


Figure 3.10. Rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G [dB] vs. Temps [s].

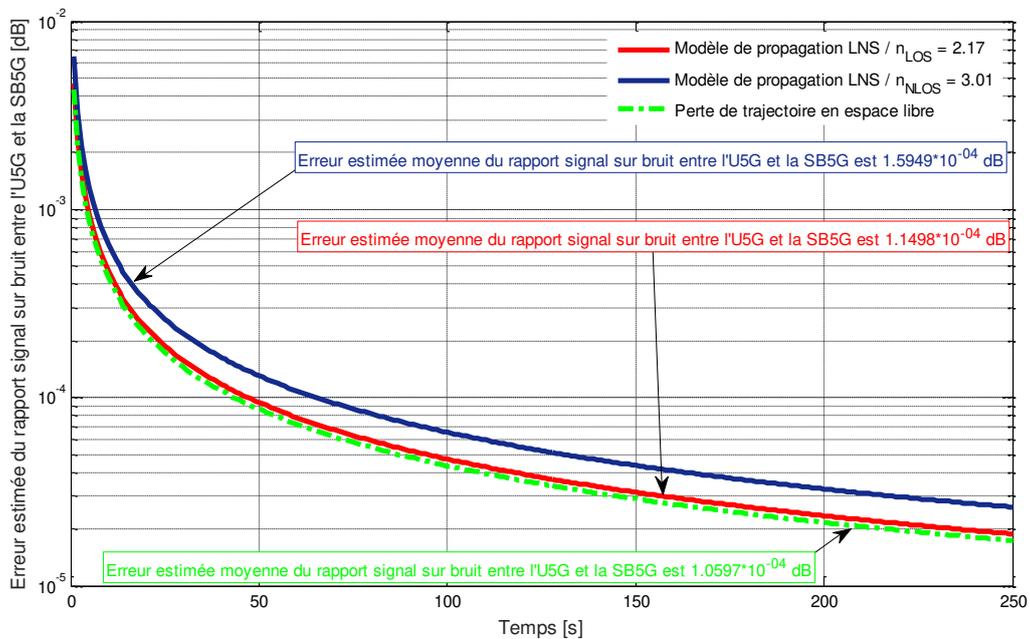
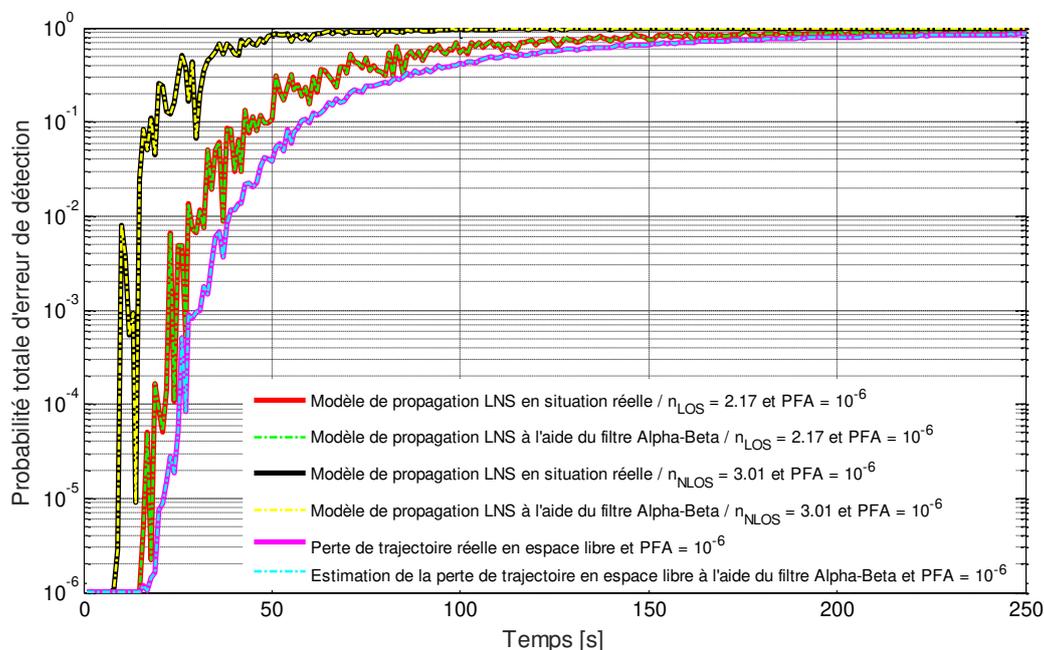


Figure 3.11. Erreur estimée du rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G [dB] vs. Temps [s].

Comme prévu, plus la puissance du signal reçu à l'U5G est affaiblie (consulter la figure 3.8), plus le rapport signal sur bruit entre l'U5G et le SB5G est également affaibli (consulter la figure 3.10), et vice versa.

Concernant les résultats obtenus de l'erreur estimée du rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G (consulter la figure 3.11), ces derniers prennent le même rythme de résultats obtenus que l'erreur estimée de la puissance du signal reçu à l'U5G (consulter la figure 3.9), car la puissance du bruit au niveau de l'U5G a été considérée comme une constante dans ce travail (voir tableau 3.2) et par conséquent, le rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G sera directement corrélé à la variation de la puissance du signal reçu à l'U5G (consulter les équations (3.13), (3.14) et (3.15)).

La deuxième phase de l'algorithme proposé a précisément pour objectif d'estimer la probabilité totale d'erreur de détection d'un signal primaire à 60 GHz provenant de la SB5G. Dans la figure 3.12, nous montrons la probabilité totale d'erreur de détection en fonction du temps pour chaque position de l'U5G en trois scénarios comme indiqué dans le tableau 3.1. Pour les résultats qui ont été obtenus, nous avons fixé la PFA à  $10^{-06}$ .



**Figure 3.12.** Probabilité totale d'erreur de détection vs. Temps [s].

Nous enregistrons que les résultats obtenus précédemment dans la première phase (l'estimation de la position et de la vitesse de l'U5G, l'estimation de la puissance du signal reçu à l'U5G et l'estimation du rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G) ont une nette influence sur la détection du signal primaire à 60 GHz de la SB5G. À titre d'exemple, le tableau 3.3 résume certains résultats comparatifs entre le rapport signal sur bruit entre l'U5G et la SB5G, et la probabilité totale d'erreur de détection (PTED) d'un signal primaire à 60 GHz provenant de la SB5G. Cependant, le PTDE est déterminé par l'équation suivante (3.23) :

$$PTED = 1 - PD + PFA \tag{3.23}$$

À t = 100 s	$SNR_{(U5G,SB5G)}$	$\widehat{SNR}_{(U5G,SB5G)}$	PTDE	$\widehat{PTDE}$
Scenarios (A)	59.2869 dB	59.2868 dB	$10^{-0.3764}$	$10^{-0.3763}$
Scenarios (B)	56.0584 dB	56.0583 dB	$10^{-0.263932}$	$10^{-0.263929}$
Scenarios (C)	46.4833 dB	46.4832 dB	$10^{-0.0118260}$	$10^{-0.0118258}$

Tableau 3.3. PTDE vs.  $SNR_{(U5G,SB5G)}$ , à t = 100 s.

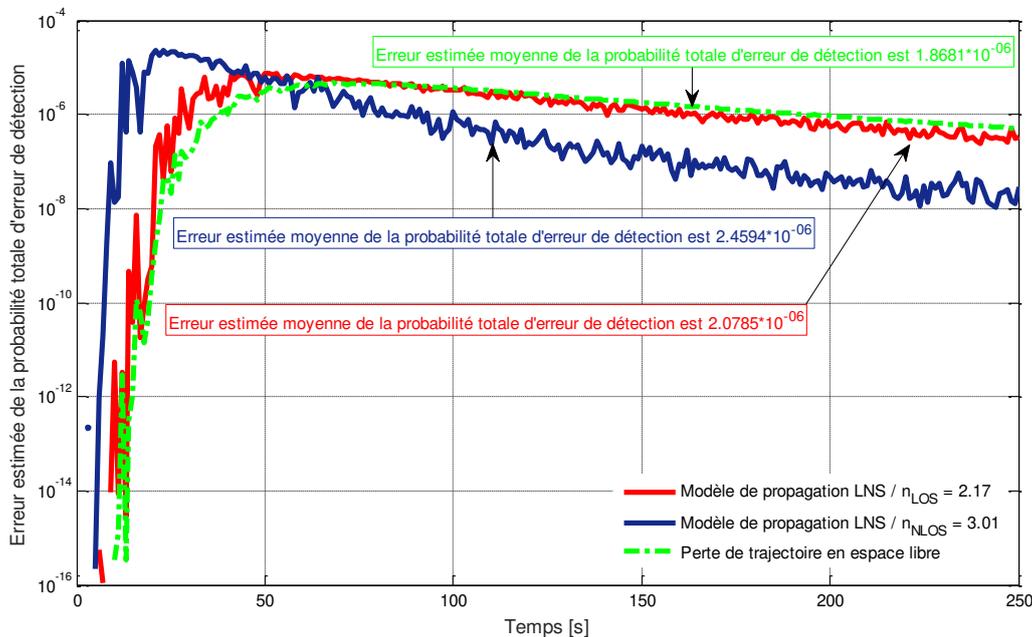


Figure 3.13. Erreur estimée de la probabilité totale d'erreur de détection vs. Temps [s].

En effet, dans le tableau 3.3, nous avons observé qu'il y a une très faible erreur dans l'estimation de la probabilité totale d'erreur de détection entre le cas réel et le cas estimé et

même les résultats obtenus dans la figure 3.13 ont également prouvé que l'erreur estimée de la probabilité totale d'erreur de détection d'un signal primaire à 60 GHz provenant de la SB5G est très faible. A titre d'exemple, les erreurs estimées moyennes de la probabilité totale d'erreur de détection sont les suivantes :  $1.8681 * 10^{-06}$  (scenario (A)),  $2.0785 * 10^{-06}$  (scenario (B)) et  $2.4594 * 10^{-06}$  (scenario (C)).

### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude et une évaluation des performances d'un système de détection d'un signal primaire à 60 GHz provenant de la SB5G en temps réel dans un réseau 5G. Nous avons constaté que la mobilité de l'U5G a un effet défavorable sur les performances de détection dans un réseau 5G, ce qui permet de vérifier cette influence est: le comportement de la probabilité totale d'erreur de détection en fonction de la distance de liaison entre l'U5G et la SB5G. Cependant, l'algorithme que nous avons proposé utilise un estimateur qui fournit d'excellents résultats avec un minimum d'erreur, il s'agit du filtre Alpha-Beta.

# Conclusion générale

La normalisation et le développement récents des systèmes cellulaires à ondes millimétriques constituent l'un des plus grands progrès réalisés dans le domaine des communications sans fil au cours des dernières décennies. Cependant, le passage aux ondes millimétriques pose de nouveaux défis de conception et de nouvelles problématiques de recherche [41]. Ce projet vise néanmoins à étudier et à évaluer les performances de l'algorithme proposé afin d'estimer le signal primaire SB5G à une fréquence de 60 GHz sous un canal AWGN dans des environnements encombrés, en utilisant le logiciel MATLAB 2017a.

Les simulations de ce projet nous ont permis d'obtenir les résultats suivants :

Nous avons observé que la mobilité de l'U5G a un effet défavorable sur les performances de détection dans un réseau 5G et ceci pour les trois scénarios proposés, le plus réaliste est le scénario (c), les performances qui vérifient cette influence sont les suivantes : la probabilité totale d'erreur de détection, la puissance du signal reçu à l'utilisateur 5G (U5G) et le rapport du signal reçu sur bruit entre l'U5G et le SB5G.

De plus, l'algorithme que nous avons proposé emploie un estimateur qui fournit d'excellents résultats avec un minimum d'erreur, c'est le filtre Alpha-Beta et un détecteur d'énergie qui fonctionne avec de bonnes performances lorsque les valeurs du rapport signal reçu sur bruit entre l'U5G et le SB5G sont très significatives.

Comme travail futur, un autre axe de recherche est possible à intégrer dans l'algorithme proposé dans ce projet, est la technique MIMO massive en utilisant d'autres fréquences.

# Références Bibliographiques

## Références Bibliographiques

- [1] D. Kaci Anis, et G. Nouredine, “ Conception et développement d’un outil de Dimensionnement de réseau Packet Core Virtualisé dédié pour la 4G et 5G,” Mémoire de fin d’études de master académique, Université de Tizi-Ouzou, 2016.
- [2] H. Khaled, et A. Anes, “ Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations,” Mémoire de fin d’études de master académique, Université de Guelma, 2019.
- [3] Rapport, “ Les enjeux de la 5G,” Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, mars 2017.  
[https://archives.arcep.fr/uploads/tx\\_gspublication/rapport-enjeux-5G\\_mars2017.pdf](https://archives.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-enjeux-5G_mars2017.pdf)
- [4] <http://david.andry.perso.infonie.fr/UMTS3.htm>
- [5] Samuel Pierre et Max Maurice, “ Introduction aux Réseaux Mobiles,” Geninov Inc, 2008.
- [6] K. Al Agha, G.Pujolle, “ Réseaux de Mobile & Réseau Sans Fil,” EYROLLES 2001.
- [7] Fabrice Lemainque, “ Tous sur les Réseaux Sans Fil,” DUNOD 2005.
- [8] V. Kumar, F. Carrez, J. Riganati, “ Technologies Clés pour les Réseaux Ad-hoc,” Revue des télécommunications d’ALCATEL, pp. 207–209, 2001.
- [9] Lee (W.C.Y), Mc Graw-Hill, “ Mobile cellular Telecommunication System,” 2<sup>ème</sup> édition, 1995.
- [10] MEGNAFI Hicham (ESSAT Tlemcen), “ Réseaux Mobiles et Réseaux Sans Fil,” 2017.
- [11] C. Demoulin, M.Van Droogenbroeck, “ Principe de base du fonctionnement du réseau GSM,” revue de l’AIM, pp.3-18, N04, 2004.
- [12] Alan Kavanagh, John Beckmeyer, “GPRS Networks,” Osborne Publishing, Septembre 2002.
- [13] <http://www.marche-public.fr/Terminologie/Entrees/EDGE-Enhanced-Data-Rates-GSM-Evolution.htm>
- [14] George Lawton, “4G: Engineering versus Marketing,” <http://ComputingNow.computer.org>, MARCH 2011.
- [15] Pierre Beaufils et al., “Réseaux 4G technologies et services,” Hermes science, novembre 2008.
- [16] J. Wiqard and T. Kolding, “On the User Performance of LTE-A UE Power Savings Schemes with Discontinuous Reception in LTE-A,” Proc. IEEE International Conference on Communications Workshops, 2009.
- [17] J. Bose, “Collected Physical Papers,” New York, NY, USA: Longmans, Greenand Co., 1927.

- [18] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, “Millimeterwave mobile communications for 5G cellular: It will work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [19] T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, “State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 8, pp. 1390–1436, Aug. 2011.
- [20] S. Rangan, T. S. Rappaport and E. Erkip, “Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366–385, March 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2299397.
- [21] F. Rusek, D. Persson, B. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, “Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 4060, Jan. 2013.
- [22] Q. Zhao and J. Li, “Rain attenuation in millimeter wave ranges,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas, Propag. EM Theory*, Oct. 2006, pp. 14.
- [23] T. Bai, V. Desai and R. W. Heath, “Millimeter wave cellular channel models for system evaluation,” 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, 2014, pp. 178–182, doi: 10.1109/ICCNC.2014.6785327.
- [24] Z. Pi and F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, Jun. 2011.
- [25] T. Rappaport et al., “38 GHz and 60 GHz angle-dependent propagation for cellular and peer-to-peer wireless communications,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, Jun. 2012, pp. 4568–4573.
- [26] T. S. Rappaport, F. Gutierrez, E. Ben-Dor, J. N. Murdock, Y. Qiao and J. I. Tamir, “Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications,” in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1850–1859, April 2013, doi: 10.1109/TAP.2012.2235056.
- [27] J. A. Wells, “Faster than fiber: The future of multi-Gb/s wireless,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 10, no. 3, pp. 104–112, May 2009.
- [28] Ancans Guntis, Bobrovs Vjaceslavs, Ancans Arnis, Kalibatiene Diana, “Spectrum considerations for 5G mobile communication systems,” *Procedia Comput Sci* 2017, 104, pp. 509–16.

- [29] Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT. Report ITU-R M.2290-0; 2014. p. 10–14.
- [30] IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU-RM.2083-0; 2015.
- [31] ECO Report 03. The licensing of ‘Mobile Bands’ in CEPT; 2016. Available: <http://efis.dk/views2/report03.jsp>.
- [32] 5G Radio Access. Ericsson White paper; 2016. Available: <https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-5g.pdf>.
- [33] New work item for developing harmonised technical conditions for MFCN in the 450 MHz band. Electronic Communications Office of Latvia; 2015. Available: [http://cept.org/Documents/ecc/23512/ecc-15-018\\_new-work-item-for-developing-harmonised-technicalconditions-for-mfcn-in-the-450-mhz-band](http://cept.org/Documents/ecc/23512/ecc-15-018_new-work-item-for-developing-harmonised-technicalconditions-for-mfcn-in-the-450-mhz-band).
- [34] Resolution COM6/20 (WRC-15). Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond. Provisional Final Acts World Radiocommunication Conference (WRC-15). International Telecommunications Union (ITU). Geneva; 2015. p. 424-426.
- [35] H.E. Adardour, & S. Kameche, “Predicting the primary signal sensing for cognitive radio users using an alpha-beta filter,” In IEEE proceeding of the 5th international conference on electrical engineering: Boumerdes, Algeria, 2017. <https://doi.org/10.1109/icee-b.2017.8191969>
- [36] H.E. Adardour, M. Meliani, & M.H. Hachemi, “Estimation of the spectrum sensing for the cognitive radios: Test analysing using Kalman filter,” *Wireless Personal Communications*, 84(2), pp.1535–1549, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2701-y>.
- [37] H.E. Adardour, & S. Kameche, “Enhancing the Performance of Spectrum Mobility in Cognitive Radio Local Area Networks Using KF-ABF-SRE Estimators,” *Wireless Personal Communications*, 104, 2018, pp.1321–1341. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-6085-7>
- [38] S. Sun et al., “Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless

- Communications,” in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2543139.
- [39] K. Joongheon, L. Jae-Jin, & L. Woojoo, “Strategic Control of 60 GHz Millimeter-Wave High-Speed Wireless Links for Distributed Virtual Reality Platforms,” in Hindawi, Mobile Information Systems, Volume 2017, Article ID 5040347, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/5040347>
- [40] Z. Zhang, & H. Yu, “Beam interference suppression in multi-cell millimeter wave communications,” in Digital Communications and Networks, vol. 5, no. 3, 2019, pp. 196-202, .<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2018.01.003>.
- [41] J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta and R. W. Heath, “Modeling and Analyzing Millimeter Wave Cellular Systems,” in IEEE Transactions on Communications, vol. 65, no. 1, pp. 403-430, Jan. 2017, doi: 10.1109/TCOMM.2016.2618794.

## Résumé

L'étude des ondes millimétriques (ou mmWave) est importante dans la communication 5G afin d'évaluer les nouvelles solutions technologiques dans des environnements réels. Il est donc essentiel de proposer et de développer de nouveaux modèles de canaux fiables qui prennent en compte les effets de l'absorption atmosphérique des ondes millimétriques et de la perte de couverture provoquée par la puissance du signal d'interférence dans les liaisons à ondes millimétriques plus encombrées. Dans ce projet, nous proposons un algorithme pour la détection du signal primaire transmis par une station de base 5G (ou SB5G) à une fréquence de 60 GHz dans un environnement fermé avec des obstacles fixes. De plus, l'algorithme proposé est basé sur la détection de l'énergie et l'estimation du signal primaire 5G en utilisant le filtre alpha-bêta (ou FAB). La performance de cet algorithme suggéré dans ce projet est évaluée à l'aide de simulations et de résultats.

**Mots clés :** mmWave, 5G, SB5G, Détecteur d'énergie, Filtre Alpha-Bêta.

## Abstract

The study of millimetric waves (or mmWave) is important in 5G communication in order to evaluate new technological solutions in real environments. It is therefore essential to propose and develop new reliable channel models that take into account the effects of atmospheric millimeter wave absorption and coverage loss caused by interference signal power in more congested millimeter wave links. In this project, we propose an algorithm for detecting the transmitted primary signal by a 5G base station at a frequency of 60 GHz in a closed environment with fixed obstacles. In addition, the suggested algorithm is based on energy detection and estimation of the 5G primary signal using the Alpha-Beta filter (or ABF). The performance of the algorithm proposed in this project is evaluated using simulations and results.

**Keywords:** mmWave, 5G, SB5G, Energy Detection, Alpha-Beta Filter.

## الملخص

تعتبر دراسة الموجات المليمترية (أو مم موجة) مهمة في اتصالات 5G من أجل تقييم الحلول التكنولوجية الجديدة في بيئات حقيقية. لذلك من الضروري اقتراح وتطوير نماذج قنوات جديدة موثوقة تأخذ في الاعتبار تأثيرات امتصاص الموجات المليمترية في الغلاف الجوي وفقدان التغطية الناجم عن قدرة إشارة التداخل في وصلات الموجات المليمترية الأكثر ازدحاماً. في هذا المشروع، نقتراح خوارزمية لاكتشاف الإشارة الأولية المرسله بواسطة محطة قاعدة 5G بتردد 60 جيجا هرتز في بيئة مغلقة مع عوائق ثابتة. بالإضافة إلى ذلك، تعتمد الخوارزمية المقترحة على اكتشاف الطاقة وتقدير إشارة 5G الأولية باستخدام مرشح ألفا-بيتا. يتم تقييم أداء الخوارزمية المقترحة في هذا المشروع باستخدام المحاكاة والنتائج.

**الكلمات الرئيسية:** مم موجة، 5G، محطة قاعدة 5G، كشف الطاقة، مرشح ألفا-بيتا.