

République de Côte d'Ivoire

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Institut National Polytechnique

Félix HOUPHOUËT-BOIGNY



UMRI 78

N° d'ordre : 101/2021

THESE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny

Mention : Télécommunications et Physiques Appliquées

Spécialité : Réseaux mobiles et propagation des ondes radio

Contrôle de puissance dans un canal de propagation radio mobile en environnements urbains extérieurs

THÈME :

Présentée et soutenue publiquement le 16/12/2021 par

AKOHOULE Alex Armand Josué

Devant le Jury Composé de :

| | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------|
| M.OUMTANAGA Souleymane | Professeur Titulaire Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (Yamoussoukro) | Président |
| M. KONATE Adama | Maître de Conférences Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (Yamoussoukro) | Directeur de thèse |
| Mme. AGUILERA GONZALEZ Adriana | Maître de Conférences Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées (France) | Rapporteur |
| M. AKA Boko | Professeur Titulaire Université Nangui Abrogoua (Abidjan) | Rapporteur |
| M. SORO Penétjiligué Adama | Maître de Conférences Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan) | Examineur |

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

UMRI ELECTRONIQUE ET ELECTRICITE APPLIQUEES

THÈSE

Mention : **Télécommunications et Physiques Appliquées**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY**

Présentée par :

AKOHOULE Alex Armand Josué

Thème :

**Contrôle de puissance dans un canal de propagation radio mobile
en environnements urbains extérieurs**

Devant le Jury Composé de:

| | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------|
| M.OUMTANAGA Souleymane | Professeur Titulaire Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (Yamoussoukro) | Président |
| M. KONATE Adama | Maître de Conférences Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (Yamoussoukro) | Directeur de thèse |
| Mme. AGUILERA GONZALEZ Adriana | Maître de Conférences Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées (France) | Rapporteur |
| M. AKA Boko | Professeur Titulaire Université Nangui Abrogoua (Abidjan) | Rapporteur |
| M.SORO Penétjiligué Adama | Maître de Conférences Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan) | Examineur |

DEDICACE

A Jésus-Christ et à toute la famille AKOHOULE

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le résultat d'une collaboration entre

- l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), et
- l'Ecole Supérieure Africaine des TIC (ESATIC)

Je souhaite remercier ici tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude.

Je commence principalement avec une mention spéciale à mon directeur de thèse, le professeur KONATE Adama Maître de conférences à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny et Directeur Général de l'Ecole Supérieure Africaine des Technologies de l'Information et de la Communication (ESATIC). Je suis infiniment reconnaissant au professeur ASSEU Kouamé Pascal Olivier, Professeur Titulaire à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny et Directeur de la Recherche et de l'Innovation Technologique de l'ESATIC. Chers maîtres, sans votre appui ce travail de thèse n'aurait certainement pas abouti. Merci pour vos conseils, votre disponibilité, votre soutien et votre confiance.

En effet, je ne saurais énumérer de façon exhaustive toutes attentions pour lesquelles je devrais vous remercier.

J'associe à ces remerciements particulièrement :

- Dr DIABY Moustapha, Maître de Conférences à l'ESATIC, pour ses conseils ;
- Dr BAMBBA Aliou, Maître-Assistant à l'ESATIC, membre de l'équipe de recherche Optique Non-linéaire et Télécommunication(ONET), pour sa contribution remarquable et la qualité de ses conseils ;
- Dr BROU Pacôme, Assistant à l'ESATIC, responsable de l'équipe de recherche Mathématique Algorithmique et Complexité(MAC) du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication(LASTIC), pour l'aide et la qualité du suivi qui m'ont permis d'acquérir des compétences scientifiques et intellectuelles pour mener ce travail de recherche ;
- Monsieur SILUE Dozohoua, enseignant et chef de service des ressources technologiques à l'ESATIC, pour sa disponibilité, ses encouragements réguliers et sa contribution pour l'avancement de ce travail de recherche ;
- Dr KAMAGATE Aladji, Maître de Conférences à l'ESATIC, responsable de l'équipe de recherche ONET, pour ses conseils ;

J'adresse mes remerciements aussi à tout le personnel de l'ESATIC qui a su m'accueillir dans son cercle professionnel durant ces années inoubliables.

En effet, travailler dans un tel environnement est un grand privilège, aussi bien au niveau relationnel que scientifique.

Je remercie sincèrement tous mes collègues du LASTIC de l'ESATIC

J'exprime particulièrement ma reconnaissance à :

- Monsieur et Madame Koukougnon, pour leurs conseils et encouragements dans les moments difficiles de ce travail de recherche. Leur soutien a su me donner la force de persévérer dans cette thèse.
- Monsieur et Madame Attin, pour leur assistance ;
- Tous mes collègues du LASTIC de l'ESATIC
- Dr GNAWA Jacques, enseignant chercheur à l'UNIVERSITE JEAN LOROUGNON GUEDE de Daloa.

Enfin, je dis un grand merci à toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la finalisation de ce travail de recherche.

RESUME

Connaitre le canal de propagation des ondes est très important tout au long de la durée de vie d'un système radio mobile. Pendant la phase de conception, l'interface radio est définie par les caractéristiques du canal de propagation ainsi que les modèles statistiques. En phase de déploiement, les modèles semi-déterministes prennent le relais pour l'optimisation des réseaux opérationnels. En effet les modèles de propagation sont utilisés pour évaluer la puissance du signal reçu et la qualité du canal de propagation. Ils dépendent des exposants de propagation qui sont les principaux paramètres pour caractériser l'environnement de propagation quelle que soit la variation du modèle. L'exposant de propagation a un fort impact sur la qualité des liaisons et dépend de la densité des obstacles dans l'environnement. Il doit donc être estimé avec précision pour une conception et un fonctionnement efficace du réseau mobile.

Le présent travail de thèse a porté sur le contrôle de puissance en boucle ouverte en liaison montante dans un canal de propagation radio mobile. Nous avons modélisé les pertes de propagation et avons évalué leur impact sur la puissance d'émission d'une station mobile en environnements urbains. L'optimisation de contrôle de puissance en boucle ouverte consiste à déterminer les valeurs optimales des paramètres P_0 et α qui optimisent la qualité de service. Trois modèles de propagation empiriques et semi-empiriques ont été sélectionnés et nous avons évalué l'impact des pertes de propagation sur les puissances d'émission. Nous avons proposé un modèle de propagation empirique dans lequel les pertes de propagation sont en relation linéaire avec la distance logarithmique. L'objectif du contrôle de puissance est de maintenir la puissance d'émission à sa valeur minimale tout en assurant une certaine qualité de service. Cet objectif est confronté à la problématique liée à la densité des obstacles dans le canal de propagation. Face à ce problème, nous avons étudié l'impact des exposants de propagation sur les performances du canal de propagation.

Mots clés : contrôle de puissance, canal de propagation, pertes de propagation, exposant de propagation, réseau mobile

ABSTRACT

Knowing the propagation channel is very important throughout the life of a mobile radio system. During the design stage, the radio interface is defined by the propagation channel characteristics as well as the statistical models. During the deployment phase, semi-deterministic models take over for the optimization of the operational networks. Indeed, propagation models are used to evaluate the received signal power and the quality of the propagation channel. They depend on pathloss exponents which are the main parameter to characterize the propagation environment whatever the variation of the model. The pathloss exponent has a strong impact on the link quality and depends on the density of obstacles in the environment. It must therefore be accurately estimated for efficient mobile network design and operation.

This thesis work focuses on open-loop uplink power control in a mobile radio propagation channel. We modelled pathloss and assessed their impact on transmit and receive power in a mobile radio channel in urban environments. Open-loop power control optimization consists in determining the optimal values of the parameters P_0 and α which optimize the quality of service. Three propagation models have been selected and we have calculated the transmit and receive powers from the losses caused by these different models. We proposed a single slope propagation model in which the pathlosses are linearly related to the logarithmic distance. The objective of power control is to maintain the transmitted power at its minimum value while ensuring a certain quality of service. This objective is confronted with the problem related to the density of obstacles in the propagation channel. Faced with this problem, we have studied the impact of propagation exponents on the performance of the propagation channel.

Keywords: power control, propagation channel, pathloss, pathloss exponent, mobile network

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|------------|
| DEDICACE..... | I |
| REMERCIEMENTS..... | II |
| RESUME..... | IV |
| ABSTRACT | V |
| TABLE DES MATIERES | VI |
| LISTE DES FIGURES..... | X |
| LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS | XII |
| SYMBOLES ET NOTATIONS MATHÉMATIQUES | XVI |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE..... | 2 |
| JUSTIFICATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE | 4 |
| OBJECTIFS DE LA THÈSE | 4 |
| MÉTHODE DE TRAVAIL | 5 |
| CONTRIBUTIONS..... | 5 |
| ORGANISATION DU MANUSCRIT..... | 7 |
| PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES | 9 |
| CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS..... | 10 |
| 1.1. INTRODUCTION | 11 |
| 1.2. GÉNÉRALITÉS ET ÉVOLUTIONS DES RÉSEAUX MOBILES | 11 |
| 1.2.1. Principe de fonctionnement d'un réseau mobile | 11 |
| 1.2.2. Standards des réseaux mobiles | 13 |

| | |
|---|-----------|
| 1.3. MÉTHODES D'ACCÈS MULTIPLES EN RADIO MOBILE | 32 |
| 1.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 1..... | 37 |
| CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART | 38 |
| 2.1. INTRODUCTION..... | 39 |
| 2.2. CONTRÔLE DE PUISSANCE DANS LES RÉSEAUX MOBILES | 39 |
| 2.2.1. Contrôle de puissance dans les réseaux mobiles de deuxième génération..... | 39 |
| 2.2.2. Contrôle de puissance dans les réseaux de troisième génération | 40 |
| 2.2.3. Contrôle de puissance dans le réseau de quatrième génération..... | 42 |
| 2.2.4. Contrôle de puissance dans le réseau mobile de cinquième génération..... | 46 |
| 2.3. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONTRÔLE DE PUISSANCE | 47 |
| 2.3.1 Allocation de puissance..... | 51 |
| 2.3.2 Algorithme de contrôle de puissance de transmission | 53 |
| 2.3.3. Algorithme de contrôle de puissance basé sur les pertes de propagation | 57 |
| 2.4. CANAL DE PROPAGATION RADIO MOBILE..... | 58 |
| 2.4.1. Propagation en espace libre..... | 58 |
| 2.4.2. Propagation par multiples trajets..... | 59 |
| 2.4.3. Mécanismes de propagation | 61 |
| 2.4.4. Variations du canal de propagation..... | 66 |
| 2.4.5. Paramètres de propagation dans un canal radio mobile | 68 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.6. Estimation d'un canal de propagation radio mobile..... | 69 |
| 2.5. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CANAL DE PROPAGATION | 75 |
| 2.6. ANALYSE DES TRAVAUX DE LA LITTÉRATURE | 76 |
| 2.7. PRÉSENTATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE..... | 77 |
| 2.8. CONCLUSION DU CHAPITRE 2..... | 78 |
| | |
| CHAPITRE 3 CONTRÔLE DE PUISSANCE BASÉ SUR | |
| L'ESTIMATION DES PERTES DE PROPAGATION DANS UN CANAL | |
| RADIO MOBILE | 79 |
| 3.1. INTRODUCTION..... | 80 |
| 3.2. DESCRIPTION DES MODÈLES DE PERTE PROPAGATION | 81 |
| 3.3. IMPACT DES PERTES DE PROPAGATION SUR LES PUISSANCES | |
| D'ÉMISSION..... | 85 |
| 3.3.1. Impact des pertes sur le contrôle de puissance en boucle ouverte | 85 |
| 3.3.2. Simulation des puissances pour chaque modèle | 86 |
| | |
| 3.4. MODÉLISATION ET PRÉDICTION DES PERTES DE | |
| PROPAGATION DANS UN CANAL RADIO MOBILE | 91 |
| 3.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 3..... | 94 |
| | |
| CHAPITRE 4 UNE APPROCHE EXPERIMENTALE POUR LA | |
| DETERMINATION DES PARAMETRES D'UN MODELE DE | |
| PROPAGATION DANS UN CANAL RADIO MOBILE EN | |
| ENVIRONNEMENTS URBAINS | 95 |
| 4.1. INTRODUCTION..... | 96 |

| | |
|---|-------------|
| 4.2. CAMPAGNES DE MESURE POUR LA DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE PROPAGATION | 97 |
| 4.2.1. Description de la zone de mesure et présentation des étapes expérimentales..... | 97 |
| 4.2.2. Campagnes de mesure | 98 |
| 4.2.3. Méthodologie de mesures..... | 100 |
| 4.3. SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS | 102 |
| 4.3.1. Résultats des simulations pour la fréquence de 800 MHz | 102 |
| 4.3.2. Résultats des simulations à la fréquence de 1800 MHz | 104 |
| 4.3.3. Résultats des simulations pour la fréquence de 2600 MHz | 106 |
| 4.4. VALIDATION DES RÉSULTATS..... | 109 |
| 4.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 4..... | 112 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... | 113 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 115 |
| ANNEXE A: PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES..... | I |
| ANNEXE B: DONNÉES RECUEILLIES LORS DES CAMPAGNES DE MESUREII | |
| ANNEXE C: EQUIPEMENTS ET SCÉNARIOS DE MESURES | VIII |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----|
| FIGURE 1. 1 : CONCEPT CELLULAIRE..... | 12 |
| FIGURE 1. 2 : STRUCTURE D'UNE TRAME EN LTE | 22 |
| FIGURE 1. 3 : FONCTIONNEMENT D'UNE TRAME LTE | 22 |
| FIGURE 1. 4 : TECHNIQUE DE MODULATION ADAPTATIVE | 23 |
| FIGURE 1. 5 : MODULATION QPSK, 16 QAM ET 64 QAM..... | 24 |
| FIGURE 1. 6 : SPECTRE DE FREQUENCES 5G [ANFR, 2019] | 29 |
| FIGURE 1. 7 : TECHNIQUE DE REPARTITION DES CANAUX EN FDMA | 32 |
| FIGURE 1. 8 : TECHNIQUE DE REPARTITION DES CANAUX EN TDMA | 33 |
| FIGURE 1. 9 : TECHNIQUE D'ACCES TDMA | 34 |
| FIGURE 1. 10 : PARTAGE DE LA BANDE DU SYSTEME ENTRE PLUSIEURS STATIONS MOBILES EN OFDMA..... | 34 |
| FIGURE 1. 11 : PARTAGE DE LA BANDE DU SYSTEME ENTRE PLUSIEURS STATIONS MOBILES EN SC-FDMA | 35 |
| FIGURE 1. 12 : DIFFERENCE ENTRE OFDMA ET SC-FDMA [RASMUS ET AL., 2012]..... | 36 |
| FIGURE 1. 13 : PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT DES ANTENNES MIMO..... | 36 |
| FIGURE 2. 1 : GENERATION DE LA COMMANDE TPC PAR LA STATION DE BASE..... | 54 |
| FIGURE 2. 2 : CANAL DE TRANSMISSION ET DE PROPAGATION | 58 |
| FIGURE 2. 3 : CANAL DE PROPAGATION MULTI-TRAJETS DANS UN ENVIRONNEMENT URBAIN..... | 60 |
| FIGURE 2. 4 : PROPAGATION MULTI-TRAJET SANS VISIBILITE DIRECTE | 60 |
| FIGURE 2. 5 : PROPAGATION MULTI-TRAJETS AVEC VISIBILITE DIRECTE | 61 |
| FIGURE 2. 6 : REFLEXION SPECULAIRE..... | 62 |
| FIGURE 2. 7 : REFLEXION SPECULAIRE SUR LE TOIT D'UN BATIMENT..... | 63 |
| FIGURE 2. 8 : REFLEXION DIFFUSE DES ONDES SUR UN TERRAIN RUGUEUX..... | 64 |
| FIGURE 2. 9 : REFLEXIONS SUR DES BATIMENTS | 65 |
| FIGURE 2. 10 : DIFFRACTION DES ONDES [CHRISTINE, 2005] | 66 |
| FIGURE 2. 11 : DIFFERENTS TYPES D'ATTENUATION DANS UN CANAL DE PROPAGATION [ROXANA, 2010]..... | 67 |
| FIGURE 2. 12 : CLASSES DES MODELES DE PROPAGATION ET LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES | 74 |
| FIGURE 3. 1 : PUISSANCE D'EMISSION EN FONCTION DES PERTES DE PROPAGATION DU MODELE 3GPP | 88 |
| FIGURE 3. 2 : PUISSANCE D'EMISSION EN FONCTION DES PERTES DE PROPAGATION DU MODELE WINNER II..... | 89 |
| FIGURE 3. 3 : PUISSANCE D'EMISSION EN FONCTION DES PERTES DE PROPAGATION DU MODELE WALFISCH-IKEGAMI | 89 |
| FIGURE 4. 1 : APERÇU DES ENVIRONNEMENTS DE MESURES..... | 98 |
| FIGURE 4. 2 : SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE CHAINE DE MESURE | 99 |
| FIGURE 4. 3 : PERTES DE PROPAGATION POUR L'ENVIRONNEMENT 1 | 102 |
| FIGURE 4. 4 : PERTES DE PROPAGATION POUR L'ENVIRONNEMENT 2 | 103 |
| FIGURE 4. 5 : PERTES DE PROPAGATION DANS L'ENVIRONNEMENT 1 | 104 |
| FIGURE 4. 6 : PERTES DE PROPAGATION POUR L'ENVIRONNEMENT 2 | 105 |
| FIGURE 4. 7 : PERTES DE PROPAGATION POUR L'ENVIRONNEMENT 1 | 106 |
| FIGURE 4. 8 : PERTES DE PROPAGATION POUR L'ENVIRONNEMENT 2..... | 107 |
| FIGURE 4. 9 : VARIATION DES EXPOSANTS DE PROPAGATION EN FONCTION DES FREQUENCES DANS DIFFERENTS ENVIRONNEMENTS..... | 109 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| TABLEAU 1. 1: COMPARAISON DES TECHNOLOGIES LTE ET LTE-ADVANCED..... | 26 |
| TABLEAU 1. 2 : TECHNOLOGIES DES RESEAUX MOBILES ET LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES | 31 |
| TABLEAU 3. 1: EXPRESSION DES MODELES DE PROPAGATION CHOISIS | 84 |
| TABLEAU 3. 2: PARAMETRES DE SIMULATION..... | 87 |
| TABLEAU 4. 1 : COORDONNEES GPS ET TAILLES DES DIFFERENTS EMETTEURS | 97 |
| TABLEAU 4. 2 : PARAMETRES DES EQUATIONS DU MODELE DE PROPAGATION DETERMINES DANS DEUX ENVIRONNEMENTS POUR TROIS FREQUENCES | 108 |
| TABLEAU 4. 3 : EXPOSANTS DE PROPAGATION EN FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT..... | 110 |

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

| | |
|---------|--|
| 1G | Réseaux mobiles de la première génération |
| 2G | Réseaux mobiles de la deuxième génération |
| 3G | Réseaux mobiles de la troisième génération |
| 3GPP | 3 rd Generation Partnership Project |
| 4G | Réseaux mobiles de la quatrième génération |
| 5G | Réseaux mobiles de la cinquième génération |
| AC | Admission Control (Contrôle d'admission) |
| ACI | Adjacent-Channel Interference |
| ACK | Acknowledgment |
| AMPS | Advanced Mobile Phone System |
| AUC | Authentication center |
| BCCH | Broadcast Control Channel |
| BCH | Broadcast Channel |
| BER | Bit Error Rate |
| BLER | Bloc Error Rate |
| BSC | Base Station Controller |
| BSS | Base Station Subsystem |
| BTS | Base Transceiver Station |
| CCCH | Common Control Channel |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CIR | Channel Impulsive Response |
| CLPC | Close Loop Power Control |
| CQI | Channel Quality Indicator |
| CSD | Circuit Switch Domain |
| DCCH | Dedicated Control Channel |
| DCI | Downlink Control Information |
| DCPA | Dynamic Channel and Power Allocation |
| DCS | Digital Communication System |
| DPCCH | Dedicated Physical Control Channel |
| DPDCH | Dedicated Physical Data Channel |
| DS-CDMA | Direct-Sequence Code Division Multiple Access |
| DTCH | Dedicated Traffic Channel |

| | |
|---------|--|
| EDGE | Enhanced Data rates for GSM Evolution |
| EDGE | Enhanced Data rates for GSM Evolution |
| EIR | Equipment Identification Register |
| eMMB | enhanced Mobile Broad Band |
| EPC | Evolved Packet Core |
| ETU | Extended Pedestrian Urban |
| E-UTRAN | Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network |
| EVA | Extended Vehicular A |
| FDD | Frequency Division Duplex |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| FPC | Fractional Power Control |
| GPRS | General Packet Radio Service |
| GSM | Global System for Mobile Communication |
| HARQ | Hybrid Automatic Repeat request |
| HLR | Home Location Register |
| HSDPA | High Speed Downlink Packet Access |
| HSPA | High Speed Packet Access |
| HSS | Home Subscriber Server |
| HSUPA | High Speed Uplink Packet Access |
| ICIC | Inter-Cell Interference Coordination |
| IMEI | International Mobile Equipment Identity |
| IMSI | International Mobile subscriber Identity |
| IMT | International Mobile Telecommunications |
| LOS | Line of Sight |
| LTE | Long Term Evolution |
| MAC | Medium Access Control |
| MCCH | Multicast Control Channel |
| MCS | Modulation Coding Scheme |
| ME | Mobile Equipment |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| MME | Mobility Management Entity |
| MMS | Multimedia Service |
| mMTC | massive Machine Type Communications |
| MSC | Mobile services Switching Center. |

| | |
|-----------|---|
| MT | Mobile Telephon |
| MTCH | Multicast Traffic Channel |
| MTSO | Mobile Telephon System Office |
| NG-RAN | Next Generation Radio Access Network |
| NLOS | Non-Line of Sight |
| NMT | Nordic Mobile Telephon |
| NSS | Network Switching Subsystem |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access |
| OLPC | Open Loop Power Control |
| OSS | Operating Subsystem |
| PAPR | Peak-to-Average Power Ratio |
| PBCH | Physical Broadcast Channel |
| PCCH | Paging Control Channel |
| PCFICH | Physical Control Format Indicator Channel |
| PCRF | Policy and Charging Rules Function |
| PDCCH | Physical Downlink Control Channel |
| PDN-GW | Packet Data Network Gateway |
| PDSCH | Physical Downlink Shared Channel |
| PHICH | Physical Hybrid ARQ Channel |
| PL | Path loss |
| PRACH | Physical Random-Access Channel |
| PRB | Physical Resource Block |
| PS | Packet Scheduling |
| PS Domain | Packet Switch Domain |
| PSD | Power Spectral Density |
| PSTN | Public Service Telephon Network |
| PUCCH | Physical Uplink Control Channel |
| PUSCH | Physical Uplink Shared Channel |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QoS | Quality of Service |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| RLC | Radio Link Control |
| RLT | Radio Link Timeout |
| RNC | Radio Network Controller |

| | |
|---------|---|
| RRC | Radio Resource Control |
| RRM | Radio Resource Management |
| RTC | Réseau Téléphonique Commuté. |
| SACCH | Slow Associated Control Channel |
| SC-FDMA | Single Carrier Frequency Division Multiple Access |
| SGSN | Serving GPRS Support Node |
| S-GW | Serving Gateway |
| SI | Subscriber Identity |
| SIM | Subscriber Identity Module |
| SIR | Signal to Interference Ratio |
| SINR | Signal Interference Noise Ratio. |
| SIR | Signal-to-Interference Ratio |
| SMS | Short Message Service |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| SRS | Sounding Reference Signal |
| TACS | Total Access Communications System |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| TPC | Transmit Power Control |
| UE | User Equipment |
| UIT | Union Internationale de Télécommunication |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| uRLLC | ultra-Reliable Low Latency Communications |
| USIM | Universal Subscriber Identity Module |
| UTRAN | Universal Terrestrial Radio Access Network |
| VLR | Visitor Location Register |
| VoIP | Voice over Internet Protocol |
| W-CDMA | Wideband Code Division Multiple Access |

SYMBOLES ET NOTATIONS MATHÉMATIQUES

| | |
|---------------|---|
| P_{DSP} | Densité spectrale de puissance |
| r_d | Parcours de l'onde directe |
| r_i | Parcours de l'onde indirecte |
| N_0 | Densité du bruit |
| U_i | Utilisateur quelconque i |
| τ | décalage temporel |
| γ | Exposant de propagation |
| N_{RB_i} | Nombre de ressource blocs alloué à un utilisateur U_i |
| PL_0 | Pertes de propagation à une distance de référence d_0 |
| ΔB | Largeur de bande |
| U_j | Nombre d'utilisateurs présents dans la cellule serveuse |
| M | Nombre total de blocs de ressource |
| P_i | Puissance d'émission d'un utilisateur i , |
| P^k | Puissance disponible dans la cellule serveuse, |
| X_σ | Variable aléatoire gaussienne |
| Δ_{TF} | Paramètre dépendant du type de modulation et de codage |
| Δ_j | Valeur de correction spécifique |
| P_0 | Puissance attribuée à un bloc de ressource |
| P_{max} | Puissance d'émission maximale |
| K_b | Constante de Boltzmann |
| \vec{E} | Vecteur champ électrique |
| \vec{H} | Vecteur champ magnétique |
| α | Facteur de compensation de perte de propagation. |
| Δd | Différence de marche |
| ρ | Coefficient de réflexion |
| Ψ | Déphasage induit à la réception de l'onde |
| C | Vitesse de l'onde électromagnétique dans le vide. |
| T | Période exprimée en seconde. |
| λ | Longueur d'onde. |

INTRODUCTION GENERALE

Contexte et problématique

L'évolution des réseaux de télécommunications a connu un essor phénoménal depuis les années 90. L'augmentation du nombre de services en plus de la voix tel que le multimédia (SMS, courriels, web, télévision, applications avec géolocalisation) a créé un engouement important pour ce moyen de communication [Loic, 2017]. L'émergence de nouveaux standards de télécommunication assurant un débit et une couverture plus importante est donc une étape clé pour l'amélioration de la qualité de service [Loic, 2017]. Face aux besoins toujours croissants en bande passante et à la demande du marché, des extensions de réseau sont nécessaires et de nouvelles technologies sont également déployées, principalement en zones urbaines où le trafic est très dense. Cependant, lors du déploiement, la partie la plus difficile est l'interface radio car elle n'est pas connue au préalable, et elle dépend des conditions environnementales. Le signal émis est déterminé à la réception en passant dans un canal de propagation qui dépend de nombreux paramètres tels que les obstacles le long de la liaison et les caractéristiques radio du canal.

La densité des obstacles en zones urbaines ne fait que s'accroître avec la construction des bâtiments, immeubles et maisons de haut standing. Ces habitations, construites avec des matériaux très sophistiqués constituent un problème majeur à la propagation des ondes dans un canal radio mobile. Elles dégradent la puissance de transmission qui est une ressource nécessaire au maintien de la qualité du signal. En effet, le niveau de puissance du signal reçu détermine la qualité du message à la destination. Il est alors important de contrôler la puissance d'émission dans le canal de propagation afin de garantir la qualité de service. Le mécanisme de contrôle de puissance fractionnaire est le plus souvent utilisé pour améliorer les performances du canal de propagation [Bilal et al., 2010] [Saad et al., 2016] [Amir et al., 2018]. Or, les utilisateurs mobiles à l'intérieur des bâtiments sont confrontés principalement à une mauvaise réception du signal du fait de la faible pénétration à travers les murs. L'atténuation récurrente du signal pourraient entraîner sa perte totale [Priti et al., 2017]. Les utilisateurs à l'extérieur des bâtiments quant à eux subissent des pertes dues aux effets de diffraction, de diffusion et de réflexion causés par les obstacles.

Ainsi l'augmentation des pertes pourrait engendrer une puissance d'émission inférieure à celle définie par le mécanisme de compensation des pertes de propagation totale. Cela risquerait de diminuer le nombre de blocs de ressources attribué par bande passante et par conséquent, réduire le débit surtout pour les stations mobiles en bordure de cellule [Huang, 2013].

Fort de ce fait, nous pouvons dire que la forte présence des obstacles dans le canal de propagation devient donc problématique pour la qualité de transmission. Pour remédier à ce problème, des modèles de propagation sont mis en place afin d'estimer et évaluer les pertes du signal dans les environnements de propagation [Artemenko et al., 2015]. Cependant, une des difficultés sous-jacentes à l'utilisation d'un modèle de prédiction de pertes de propagation est que les environnements n'ont pas tous les mêmes configurations. Il est donc difficile de formuler un modèle exact de pertes de propagation pour tous les types d'environnements. Afin de résoudre ces problèmes, les paramètres de certains modèles de propagation sont ajustés en se référant à l'environnement cible [Tonyé et al., 2015], [Premchandra et al., 2015].

Justification du travail de recherche

Vu la demande croissante concernant la connexion des terminaux mobiles à la station de base en environnements urbains, il est nécessaire d'effectuer des études relatives au canal de propagation. En effet, le canal de propagation est un élément primordial dans l'élaboration d'un système de communication réseau mobile car il détermine la qualité de liaison entre l'émetteur et le récepteur. La puissance d'émission est une ressource nécessaire au maintien de la qualité du canal lors de la communication. Cependant en environnements urbains, la puissance d'émission est soumise à des atténuations dues à la densité des obstacles et à la mobilité du terminal. La mobilité du terminal va entraîner la variation du canal de propagation ; on parle d'effet Doppler [Jean-François, 20042] et la densité des obstacles va occasionner l'augmentation des pertes de propagation. Des modèles de propagation sont mis en œuvre pour estimer et prédire les pertes de propagation dans les environnements de propagation radio mobile [Pagani, 2005], [Kaoutar, 2017]. Il existe trois types de modèle de propagation dans la littérature : Les modèles déterministes, les modèles empiriques et les modèles hybrides [Kaoutar, 2017].

Cependant, l'élaboration d'un modèle adapté à tous les environnements (rural, urbain, suburbain, etc...) et à toutes les technologies radio mobiles est très difficile. Cette difficulté vient du fait que les performances du canal de propagation sont fortement liées aux caractéristiques de l'environnement et aux fréquences d'émission [Pajusco, 2006]. Aussi les environnements n'ont pas tous la même configuration et la même densité d'obstacles. Face à ces difficultés, il est important de proposer des modèles de propagation adaptés aux environnements afin d'améliorer la qualité de la puissance d'émission dans le canal radio mobile.

Objectifs de la thèse

L'amélioration de la propagation des ondes dans un environnement complexe (dominé par de nombreux obstacles) est une question cruciale en réseau mobile à cause de la forte atténuation du signal dans ce genre d'environnement. Alors le développement de modèles adaptés à ce type d'environnement permettra d'améliorer la puissance d'émission afin de maintenir une bonne qualité du canal de propagation.

Cette thèse vise à évaluer l'impact de la densité des obstacles sur la qualité du canal de propagation radio mobile. Il s'agira dans un premier temps d'analyser l'effet des pertes de propagation sur la puissance d'émission d'une station mobile. Deuxièmement, un modèle de propagation pour les environnements urbains extérieurs sera proposé. En troisième lieu une évaluation de l'impact des exposants de propagation sur les performances d'un canal radio mobile sera effectuée.

Les résultats que nous obtiendrons lors de cette étude permettront d'améliorer la puissance d'émission et la qualité du canal de propagation radio mobile

Méthode de travail

La méthodologie de recherche employée afin d'atteindre les objectifs de la thèse est présentée dans cette section du manuscrit. Nous commencerons par présenter les différentes technologies de réseaux mobiles, les différents types de canaux de propagation et leurs caractéristiques respectives, ainsi que, les mécanismes de contrôle de puissance. Les principaux modèles de propagation adaptés aux environnements urbains extérieurs existants seront explorés et comparés. Ensuite, nous évaluerons l'impact des pertes de propagation sur la puissance d'émission d'un terminal mobile. Nous proposerons un modèle de propagation à la suite des campagnes de mesure de puissances du signal en fonction de la distance dans différents environnements urbains. Ces mesures seront effectuées à partir de trois fréquences d'émission : 800 MHz, 1800 MHz et 2600 Mhz avec différentes largeurs du canal. Puis, à partir de la méthode de régression linéaire, nous déterminerons les paramètres de l'équation du modèle de propagation défini. Enfin, l'impact des exposants de propagation sur les paramètres du contrôle de puissance sera analysé.

Contributions

Les deux contributions de cette thèse sont à la fois liées à la proposition d'un modèle de propagation en environnements urbains extérieurs et à l'évaluation de l'influence des pertes de propagation sur le mécanisme de contrôle de la puissance du signal.

La première contribution résulte de l'analyse de l'impact des pertes de propagation sur la puissance d'émission en environnement urbain. Trois modèles de propagation ont été

sélectionnés et à partir de ces modèles nous avons calculé les puissances d'émission. Nous avons déterminé à partir des simulations la valeur de la compensation des pertes de propagation qui améliore la puissance d'émission.

La deuxième contribution consiste à déterminer de façon expérimentale des modèles de propagation dans des environnements réels. Ces modèles de propagation sont déterminés à la suite des mesures effectuées dans deux différents environnements urbains. Les mesures ont été effectuées à partir des fréquences de 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz. Ensuite, les différents paramètres du modèle dont le principal est l'exposant de propagation sont déterminés. Ces paramètres pour chaque environnement sont calculés à partir de la méthode de régression linéaire.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit de thèse comprend une introduction, une conclusion, trois annexes et quatre chapitres décrits brièvement comme suit :

Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS

Dans ce chapitre, nous présentons toutes les technologies des réseaux mobiles. Il se compose de deux parties. Nous partons de la première génération à l'actuelle cinquième génération en présentant leurs différents standards, les évolutions des réseaux mobiles et les normes radio associées.

Chapitre 2 : ÉTAT DE L'ART

Ce chapitre porte sur le contrôle de puissance dans les réseaux mobiles de la deuxième à la cinquième génération. Ensuite, nous présentons l'état de l'art relatif à la problématique liée au contrôle de puissance dans un canal radio mobile. Nous avons abordé le contrôle de puissance en liaison descendante et en liaison montante en mettant un accent particulier sur le contrôle de puissance en liaison montante avec une présentation des composantes de celui-ci à savoir : le contrôle de puissance en boucle fermée et le contrôle de puissance en boucle ouverte. Aussi, quelques algorithmes de contrôle de puissance sont présentés.

Nous avons également présenté le canal de propagation radio mobile ainsi que les travaux de littérature relatifs à sa modélisation. Une analyse des travaux de la littérature est effectuée afin de présenter la question de recherche.

Chapitre 3 : CONTRÔLE DE PUISSANCE BASÉ SUR L'ESTIMATION DES PERTES DE PROPAGATION

Dans ce chapitre, des modèles de propagation adaptés aux environnements urbains extérieurs sont déterminés. Trois modèles de propagation ont été sélectionnés à partir desquels nous avons évalué l'impact des pertes de propagation sur les puissances d'émission. A partir des simulations, les puissances d'émission ont été analysées avec différentes valeurs de compensation des pertes de propagation. Ensuite la valeur de compensation des pertes de propagation qui améliore la puissance d'émission a été déterminée. Nous avons enfin entamé la proposition d'un modèle de propagation adapté aux environnements urbains extérieurs.

Chapitre 4 : UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE POUR LA DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE PROPAGATION DANS UN CANAL RADIO MOBILE EN ENVIRONNEMENTS URBAINS

Ce chapitre décrit une étude expérimentale pour la détermination des paramètres des équations du modèle de propagation dans différents environnements urbains. À la suite de campagnes de mesure, des niveaux de puissances du signal reçus dans ces environnements en outdoor pour différentes fréquences d'émission, sont recueillies. A partir de la méthode de régression linéaire, les équations des modèles de propagation pour chaque environnement avec trois fréquences d'émission ont été proposées.

Publications scientifiques

Ce travail de thèse a fait l'objet de trois articles de revue publiés dont les références sont les suivantes :

1. Akohoule Alex, Bamba Aliou, Kamagate Aladji, Konate Adama, Oussama Tabbabi and Asseu Olivier; Measurements based evaluation of pathloss exponents in urban outdoor environments Int. J. of Adv. Res. 9 (Mar), 2021, 72-79 (ISSN 2320-5407). www.journalijar.com
<http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/12556>

Indexé CASSI:

https://cassi.cas.org/publication.jsp?P=eCQtRPJo9AQyz133K_1l3zLPXfer-WXfjt0X0_xdyEaV-bwOhGasxnN7lh7zdprwTQzTfQCxy7Cma7V7ovfBs8xi6dWo0k16Ms9d9yv5Zd85gYyul-WH3u5L9bts2nU3Ms9d9yv5Zd_Cij1mry-3z9NXpFCAWQFt

2. K. Adama, A. Alex, B. Pacôme, A. Olivier, Power Control Mechanism Based on The Estimation of Propagation Losses in LTE Technology, Far East Journal of Electronics and Communications, Volume 23, Number 1, 2020, 19-38.
<http://dx.doi.org/10.17654/EC023010019>

Indexé Zentralblatt MATH: <http://emis.mi.sanu.ac.rs/ZMATH/zmath/en/journals/search/>

3. Alex, A., Adama, K., Pacôme, B. & Olivier, A. Evaluation of the Impact of Obstacles on the Capacity of a LTE Network in Urban Area in the Uplink. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, 12(1), 20-29.
<https://doi.org/10.3844/ajeassp.2019.20.29>

Indexé SCOPUS:

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=American+Journal+of+Engineering+and+Applied+Sciences>

Les articles sont fournis à l'annexe A, du mémoire

CHAPITRE 1 GENERALITES

Sommaire

| | |
|--|----|
| 1.1. INTRODUCTION..... | 11 |
| 1.2. GÉNÉRALITÉS ET ÉVOLUTIONS DES RÉSEAUX MOBILES | 11 |
| 1.2.1. Principe de fonctionnement d'un réseau mobile | 11 |
| 1.2.2. Standards des réseaux mobiles | 13 |
| 1.3. MÉTHODES D'ACCÈS MULTIPLES EN RADIO MOBILE | 32 |
| 1.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 1 | 37 |

1.1. Introduction

Les réseaux mobiles sans fil ont révolutionné le monde de la téléphonie et à tendance aujourd'hui à remplacer l'utilisation excessive de câbles. Ils permettent aux utilisateurs de communiquer même lorsqu'ils sont en mouvement. La première génération (1G) des réseaux mobiles était purement analogique. Elle servait uniquement à passer des appels traditionnels, et offrait des services qu'un simple terminal mobile pouvait réaliser. A partir des années 2000, on remarque une grande évolution des systèmes cellulaires sans fil pour satisfaire les demandes des abonnés et offrir de nouveaux services tels que l'internet mobile. Cette évolution a favorisé l'apparition de nombreuses générations de réseaux mobiles (2G, 3G, 4G et la 5G). Ces générations de réseaux mobiles ont occasionné des révolutions remarquables, en apportant des débits exceptionnels qui ne cessent d'augmenter avec des bandes passantes de plus en plus larges. L'un des avantages de telles bandes passantes, est l'augmentation du nombre d'utilisateurs [Khan, 2009].

Le déploiement de ces systèmes de télécommunication réseau mobile en zone urbaine est confronté à des variations du canal de propagation du fait de la densité et la diversité des obstacles et la mobilité des terminaux [Pijcke, 2010]. Dans ce chapitre, nous présentons les généralités sur les standards des réseaux mobiles et leurs différentes évolutions.

1.2. Généralités et Evolutions des réseaux mobiles

1.2.1. Principe de fonctionnement d'un réseau mobile

Le principe du fonctionnement d'un réseau mobile est basé sur un système cellulaire à cause de la taille des territoires à couvrir. Des antenne-relais ou stations de base sont réparties sur le territoire selon un schéma. Ces antennes ont une portée limitée et ne peuvent couvrir que des zones restreintes. Une zone de couverture est appelée cellule d'où le nom de réseaux cellulaires. Alors un terminal mobile, pour communiquer, doit être à portée d'une station de base. Ainsi, pour permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder aux ressources radio, les opérateurs déploient plusieurs cellules pour couvrir le maximum de zones. Les cellules sont géométriquement considérées comme des hexagones et sont juxtaposées les unes aux autres afin de fournir une bonne couverture des zones considérées. Elles possèdent des tailles différentes allant des femto-cellules aux cellules parapluies [Pierre, 2003].

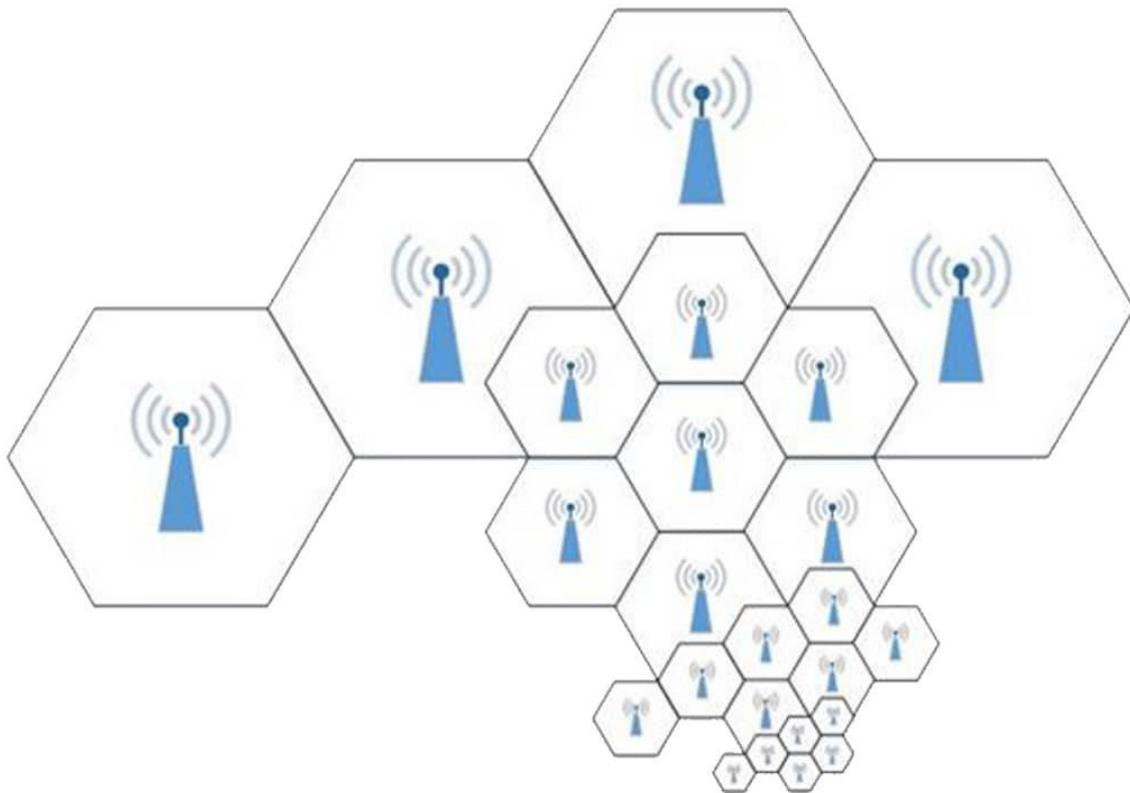


Figure 1. 1: Concept cellulaire

Les réseaux mobiles fonctionnent en mode infrastructure; c'est-à-dire que tous les échanges transitent par un point d'accès (station de base), desservant chacun, une cellule sur une couverture sans fil. La figure 1.1 illustre ce propos.

Les grandes cellules sont appelées macrocellules. Les macrocellules sont constituées de stations de base offrant un accès public et une large couverture, de l'ordre de quelques kilomètres. Elles émettent généralement des signaux jusqu'à 46 dBm pour fournir des services à des milliers de clients [Edenalisoa, 2017]. Les cellules moyennes représentent les microcellules et les picocellules. Les picocellules sont déployées de manière à couvrir une zone d'au moins 300 mètres avec une puissance d'émission allant de 23 dBm à 30 dBm. Elles peuvent être déployées au bord des macrocellules afin d'étendre la couverture ou le débit.

Les microcellules sont des zones desservies par des stations de base de faible puissance et dont la portée est d'environ un kilomètre. Une microcellule est généralement plus grande qu'une picocellule, bien que la distinction ne soit pas toujours claire.

Les plus petites cellules représentent les femto cellules. Les femto cellules sont déployées à l'intérieur des bâtiments afin d'augmenter le débit. Elles assurent généralement la couverture sur quelques mètres avec une puissance d'émission inférieure à 23 dBm [Edenalisoa, 2017].

1.2.2. Standards des réseaux mobiles

Les standards des réseaux mobiles ont connu des évolutions rapides et remarquables avec le développement des différentes technologies. Ces technologies radio mobiles ont apporté plusieurs avantages en termes de débit des bandes passantes plus larges permettant l'augmentation du nombre d'utilisateurs [Khan, 2009]. Nous présentons dans cette section les principaux standards des réseaux mobiles existants.

1.2.2.1. Réseaux mobiles de première génération

Les réseaux mobiles de première génération (1G) reposaient sur des communications mobiles analogiques. Cette génération a bénéficié de deux inventions technologiques majeures dans les années 1970 : les microprocesseurs et la transmission de données numériques entre les téléphones mobiles et les stations de base. Les appareils utilisés étaient particulièrement volumineux. Cette génération de réseaux mobiles a véritablement émergé au cours des années 1980. Elle est constituée d'un certain nombre de technologies introduites en parallèle à travers le monde, dont les principales sont :

- AMPS (Advanced Mobile Phone System) : Elle a été mise en place aux Etats-Unis. Il s'agit d'un réseau analogique reposant sur la technologie FDMA (Frequency Division Multiple Access);
- TACS (Total Access Communications System) : Elle reposait sur la technologie AMPS et a été fortement utilisée en Grande Bretagne. Cette technologie a aussi été utilisée en Asie avec la bande des 900MHz. La différence entre ces deux technologies se situe au niveau des bandes de fréquences et l'espacement des canaux. L'AMPS utilise la bande de fréquence de 800 MHz avec un espacement 30 KHz entre les canaux. Le TACS quant à elle utilise une la bande de fréquence de 900 MHz avec un espacement de 25 KHz entre les canaux [Mazda, 1993]
- NMT (Nordic Mobile Telephon) : Conçue essentiellement dans les pays nordiques tel que la Suède [Pierrick, 1995], elle est utilisée dans d'autres parties de la planète.

Toutes ces technologies dites de première génération étaient basées sur une modulation et un codage de type analogique. Elles utilisaient une méthode d'accès multiple (FDMA). En effet

la capacité de ces systèmes demeurait très limitée, de l'ordre de quelques appels simultanés par cellule. Cette contrainte de capacité, ainsi que les coûts élevés des terminaux et des tarifs de communication ont limité l'utilisation de cette génération de réseau mobile à un très faible nombre d'utilisateurs. Aussi, les grandes dimensions des terminaux limitaient significativement leur portabilité. L'architecture de base d'un mobile de première génération était essentiellement composée [Smith et al., 2002] :

- des Stations Fixes (Base Station/Cell Sites) : chargées du lien radio avec les équipements mobiles ;
- des stations mobiles (Mobile Station/ Unit Set) ;
- d'un centre de contrôle MTSO (Mobile Telephon System Office) représentant le réseau cœur. Il sert d'interface entre un site cellulaire et le réseau public fixe : Public Service Telephon Network (PSTN). Le MTSO assure l'acheminement des appels, l'enregistrement d'abonnés individuels et l'établissement de la politique de facturation des communications.

Les réseaux mobiles de première génération ne permettaient pas l'interopérabilité car chaque pays disposait de son propre réseau [Smith et al., 2002]. Dans le but de régler le problème d'incompatibilité et de saturation du réseau, les recherches ont abouti à la création de la deuxième génération (2G).

1.2.2.2. Réseaux mobiles de deuxième génération

Les réseaux mobiles de deuxième génération (2G) reposent sur des modulations numériques pour la liaison ainsi que pour le signal vocal. Ils ont été développés à la fin des années 1980 et ont pris de l'ampleur tout le long des années 1990.

Dans leurs versions initiales, les réseaux 2G ne fournissaient que des services voix et des messages textes courts (sms : Short Message Service). Cependant avec leurs améliorations elles permettaient de transférer des données mais à très faible débit.

Les réseaux mobiles de deuxième génération comportent trois normes : GSM, GPRS, EDGE.

- **Global System for Mobile Communication (GSM)**

Le GSM est un réseau commuté développé essentiellement pour une meilleure qualité de la voix. C'est un système cellulaire de transmission numérique et il favorise des communications entre abonnés mobiles et abonnés du réseau fixe RTC (Réseau Téléphonique Commuté). L'architecture du GSM comprend des commutateurs et il se distingue par un accès spécifique

traduisant la liaison radio et un débit inférieur à 10 Kb/s. Le GSM est composé de deux technologies qui sont :

- GSM 900 : système radio mobile à vocation urbaine et rurale et utilisant la fréquence des 900 MHz avec des sous bandes de largeur 25 MHz : (890-915) MHz et (935-960) MHz.
- Digital Communication System (DCS 1800) : exploite la fréquence 1800 MHz avec des sous bandes de largeurs 75 MHz destinées aux réseaux mobiles spécialement dans les zones urbaines.

Le réseau GSM se distingue par un mode d'accès spécifique qui est la liaison radio.

L'architecture de ce réseau est composée de trois grandes parties :

➤ **La station mobile (mobile station)**

La station mobile permet à l'abonné d'accéder aux services via le système cellulaire. Elle est composée d'un combiné téléphonique identifié par un numéro unique ; l'IMEI (International Mobile Equipment Identity), d'une carte SIM contenant le numéro d'identification de l'abonné IMSI (International Mobile subscriber Identity) et des algorithmes de chiffrement.

➤ **Le sous-système radio BSS (Base Station Subsystem)**

Il assure les transmissions radioélectriques et gère les ressources radio. Au sein de ce sous-système on distingue :

✓ **La station émettrice-réceptrice de base (Base Transceiver Station :BTS)**

La station émettrice-réceptrice de base est composée d'un ensemble d'émetteurs/récepteurs pilotant une ou plusieurs cellules.

Ce type d'équipement assure l'interface entre les mobiles et les structures fixes spécifiques au GSM.

✓ **Le contrôleur de la station de Base (Base Station Controller :BSC)**

Le contrôleur de la station de base administre un ensemble de station de base BTS et assure l'allocation de canaux, la gestion du saut de fréquence, le transfert intercellulaire des communications ainsi que la gestion de la signalisation sur voie radio.

✓ **Le sous-système d'acheminement NSS (Network Switching SubSystem).**

Il regroupe les équipements qui assurent des fonctions du niveau réseau (routage, interconnexion) :

✓ **L'enregistreur de localisation des visiteurs (Visitor Location Register : VLR)**

L'enregistreur de localisation des visiteurs est une base de données associée à un commutateur MSC qui enregistre temporairement les informations relatives aux terminaux présents et actifs (au moins en veille) dans son secteur de couverture. Les données

mémorisées par le VLR sont similaires aux données du Home Location Register (HLR) mais concernent les abonnés présents dans la zone concernée.

✓ **Home Location Register (HLR)**

Il constitue la base de données centrale contenant toutes les informations de localisation et de caractéristiques des abonnés, il mémorise pour chaque abonné le numéro du VLR où il est enregistré. Le réseau identifie le HLR associé à chaque abonné à travers son numéro d'appel ou de son identité IMSI.

✓ **Mobile services Switching Center (MSC)**

Le MSC est le centre de commutation généralement associé aux bases de données VLR. Il assure une interconnexion entre le réseau mobile et le réseau fixe public. Le MSC développe aussi la fonctionnalité du Gateway face aux autres composants du système et de la gestion des processus de handover, et il assure la commutation des appels en cours entre des BSC différents ou vers un autre MSC et la transmission des messages courts.

✓ **L'Authentication center (AUC)**

Le centre d'authentification a pour but de mémoriser pour chaque abonné une clé secrète utilisée pour authentifier les demandes de services et pour chiffrer les communications. Le mécanisme d'authentification vérifie la légitimité de la SIM sans transmettre sur le canal radio les informations personnelles de l'abonné.

✓ **Equipement Identification Register (EIR)**

Equipement Identification Register est une base de données contenant les identités des terminaux (IMEI). Il peut être consulté lors des demandes de services d'un abonné pour vérifier si un Equipement Mobile a ou non le droit d'accès au système.

✓ **Le sous-système d'exploitation et de maintenance OSS (Operating Subsystem)**

Il assure la gestion et la supervision du réseau. La mise en place d'un réseau GSM (en mode circuit) va permettre à un opérateur de proposer des services de type « Voix » à ses clients en donnant accès à la mobilité tout en conservant l'interface du réseau fixe RTC existant.

• **General Packet Radio Service (GPRS)**

Le General Packet Radio Service permet de proposer des services de types donnés pour la navigation sur internet. Il a introduit la transmission en mode paquet qui a fait augmenter un peu le débit. Cependant, il montre ses limites pour le téléchargement des fichiers dont la taille dépasse le mégaoctet.

- **Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)**

Enhanced Data rates for GSM Evolution permet d'atteindre des débits théoriques allant jusqu'à 384 kbit/s pour les stations fixes (piétons et véhicules lents) et 144 kbit/s pour les stations mobiles (véhicules rapides). Il a utilisé une modulation différente de celle utilisée par le GSM, ce qui implique une modification des stations de base et des terminaux mobiles. On le qualifie de 2.75G car il est considéré comme une transition vers les réseaux mobiles de troisième génération (3G).

Bien qu'ayant connu plusieurs évolutions, les réseaux mobiles de deuxième génération fournissaient des débits faibles pour les services des données Internet. Cette limitation a motivé la mise en place des technologies 3G.

1.2.2.3. Réseaux mobiles de troisième génération

La troisième génération (3G) des réseaux mobiles présente une évolution majeure par rapport à la deuxième génération. Elle a été adoptée en 1998 et déployée à partir des années 2003 ou 2004. La 3G fournit des débits allant de 2 Mbit/s en cas de mobilité faible et jusqu'à 144 Kbit/s pour une mobilité forte. La 3G est constituée principalement de deux normes : Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) et Code Division Multiple Access (CDMA-2000).

- **La norme UMTS**

Elle est développée par le consortium Third Generation Partnership Project (3GPP) et est une évolution de la technologie GPRS [3GPP, 2009]. La norme UMTS est la principale norme de la troisième génération et suit les spécifications de l'International Mobile Telecommunications 2000 (IMT 2000) de l'Union Internationale de télécommunication (UIT). Elle utilise la technologie d'accès radio Accès multiple à répartition de code à large bande ainsi que des bandes de fréquences différentes des réseaux précédents : 1885 MHz à 2025 MHz et 2110 MHz à 2200 MHz avec des débits variables pouvant aller de 384 Kbit/s en liaison montante à 2 Mbit/s en liaison descendante. Ces débits permettent aux utilisateurs de communiquer et de réaliser aisément des applications multimédias.

Ses services devaient concerner surtout les applications vidéo telles que la transmission de vidéo, la vidéo conférence, la vidéo à la demande et le MMS vidéo. Lesquels services exigent des débits un peu plus élevés. Ainsi dans le souci d'augmenter les débits, l'UMTS a été améliorée pour donner naissance aux technologies High Speed Downlink Packet Access

(HSDPA : 3,5 G) avec 14.4 Mbps en liaison descendante et le High Speed Uplink Packet Access (HSUPA: 3.75G) offrant un débit théorique maximum en liaison montante avec 5.76 Mbps [Isotalo et al., 2010].

L'UMTS est compatible avec tous les réseaux du monde du fait de la possibilité d'itinérance ou roaming au niveau mondial. Son architecture conserve une structure inhérente aux réseaux mobiles en présentant une nouvelle interface radio et la technique de multiplexage est différente de celle du GSM. Dans cette structure, les BSC sont remplacés par des Radio Network Controller (RNC) et les BTS par des nœuds B ou NodeB. Une des particularités des NodeB est qu'ils peuvent supporter plusieurs cellules radio par une seule entité physique.

Les terminaux sont désormais appelés User Equipment (UE) au lieu de Mobile Telephone (MT) et ils contiennent un module d'identification : Universal Subscriber Identity Module (USIM), évolution du Subscriber Identity (SI).

Trois parties composent le réseau UMTS :

- **Le réseau cœur ou core network** : Il est scindé en deux parties distinctes correspondant à un découpage entre les services à commutation de circuits pour la transmission de la téléphonie voix (Circuit Switch domain : CS Domain) et ceux à commutation de paquets (Packet Switch Domain : PS Domain) permet de gérer les services non-temps réels. Il s'agit principalement de la navigation sur internet, la gestion de jeux en réseaux et de l'accès/utilisation des courriels. La conséquence de cette séparation est une gestion séparée de l'établissement d'appel et de la mobilité de l'abonné, située dans des équipements réseaux différents (Le MSC et le SGSN).

- **Le réseau d'accès radio ou Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)**

Il comprend principalement deux entités : le NodeB et le RNC. Il réalise le transfert des Trafics de données et de signalisation entre la station mobile (UE) et le domaine du réseau cœur selon le trafic (voix et données) [Isotalo et al., 2010].

- **La station mobile** : Elle est composée du Mobile Equipment (ME) et de la carte Universal Subscriber Identity Module (USIM) qui est le modèle d'identité des services de l'abonné. La station mobile permet à l'abonné d'accéder à l'infrastructure UMTS et à ses services via l'interface Uu (UTRAN-UE). L'interface Uu est une interface logique qui permet de connecter la station mobile à la station de base à travers une liaison radio.

- **La norme CDMA-2000 (Code Division Multiple Access)**

Également connue sous le nom de IS-2000, c'est une amélioration de la norme IS-95 et n'est pas compatible avec le GSM. Elle est une technologie reconnue dans sa variante 1xEvolution-Data Optimized (1xEV-DO) comme de génération (3G) par l'Union Internationale des Télécommunication (UIT) en divisant le spectre en lignes multi porteuses (Mode TDD). Elle est adaptée aux pico et micro-cellules ainsi qu'aux trafics asymétriques. Le principal avantage du CDMA-2000 sur le WCDMA est le fait de sa compatibilité avec les réseaux mobiles 2G. C'est ce qui a largement favorisé la conversion des abonnés de la deuxième génération en utilisateurs de la troisième génération sur certains marchés notamment en Corée, au Japon et dans une moindre mesure aux États-Unis.

1.2.2.4. Réseaux mobiles de quatrième génération

La technologie de quatrième génération Long Term Evolution (LTE) est un réseau cellulaire destiné à la téléphonie mobile qui s'appuie sur un réseau de transport à commutation de paquet IP et n'a prévu de mode d'acheminement pour la voix que la Voix sur protocole Internet (VoIP), contrairement aux autres technologies qui transportent la voix en mode circuit. Les objectifs principaux ayant motivés l'introduction de la quatrième génération des réseaux mobiles sont : la réduction du coût de communication pour les usagers, la réduction du coût de déploiement pour les opérateurs et l'augmentation des débits afin de fournir une bonne qualité de service tout en réduisant la latence.

➤ Les caractéristiques du réseau LTE

La technologie Long Term Evolution ou évolution à long terme (LTE) a pour but de permettre le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un grand nombre d'appels par cellule et un temps de latence plus faible. En théorie, elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de 50 Mb/s en lien ascendant et de 100 Mb/s en lien descendant, partagé entre les utilisateurs mobiles à l'intérieur d'une même cellule. Pour les opérateurs, LTE implique de modifier le cœur du réseau et les émetteurs radio. Il faut également développer des terminaux mobiles adaptés. Aussi la norme LTE peut-elle prendre en charge plus de 200 terminaux actifs simultanément dans chaque cellule [Dat-Duong, 2014]. Cette technologie LTE utilise des fréquences d'émission de 1900 MHz et 2100 MHz dans certaines régions du monde. Dans d'autres régions cependant les plus usuelles des fréquences sont : 700 MHz,

1800 MHz et 2600 MHz. Elle offre la possibilité d'opérer avec une bande passante de taille différente pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, en liaison descendante et montante. L'intention est de permettre un déploiement flexible de la bande passante en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer. Le LTE utilise une efficacité spectrale (rapport entre le débit binaire et la bande passante) de 2,5 bit/s/Hz en liaison montante et 5 bit/s/Hz en liaison descendante. Le réseau LTE est composé essentiellement de deux parties : le réseau d'accès E-UTRAN et le réseau cœur Evolved Packet Core (EPC).

L'E-UTRAN désigne la partie radio du réseau LTE. Il est responsable de la connexion et des communications entre la station mobile et le réseau cœur. Il assure la connexion entre entités via des ondes radio. Il est constitué des stations de base Evolved NodeB (eNodeB) et des User Equipements (UE). Les eNodeB sont reliés entre eux par une interface X2, qui leur permet d'échanger des informations de signalisation et sont reliés au cœur du réseau à travers l'interface S1. Ils assurent l'échange radio avec l'E-UTRAN et les équipements usagers.

L'eNodeB assure une tâche importante dans l'architecture des réseaux LTE. C'est le gestionnaire des ressources radio (Radio Resource Management :RRM) et son objectif est d'accepter ou de rejeter les demandes de connexion au réseau, en assurant une distribution optimale des ressources radio entre les UE. Il est constitué principalement de deux éléments qui sont [Bendaoud et al., 2014] :

- **Le contrôle d'admission ou des entrées (AC : Admission Control).**

Il est responsable de l'acceptation et du rejet des nouvelles requêtes c'est-à-dire qu'il traite les nouvelles demandes de connexion au réseau. En effet, la décision d'accepter ou de rejeter une requête dépend de la capacité du réseau à offrir la qualité de service (QoS) exigée par cette requête tout en assurant la QoS des requêtes déjà admises dans le système.

- **La Planification ou ordonnancement des paquets (PS : Packet Scheduling).**

Il réalise une allocation efficace des ressources radio dans les sens montant et descendant. Il effectue le mapping UE-RB, c'est à dire qu'il sélectionne les équipements utilisateurs qui vont utiliser le canal en leur affectant les ressources radios qui leur permettent de maximiser les performances du système.

Le réseau cœur Evolved Packet Core : Il est composé des éléments suivants qui sont connectés via un réseau tout IP.

- Mobility Management Entity (MME) Il permet de localiser l'utilisateur, de connaître son état, de gérer les procédures authentification et la mobilité.

- Policy and Charging Rules Function (PCRF) : Il fournit au PGW les règles de taxation nécessaires pour différencier les flux de données et de les taxer d'une façon convenable.
- Home Subscriber Server (HSS): Il contient le profil de l'abonné pour les réseaux 2G, 3G, LTE.
- Serving Gateway(S-GW) : Il est responsable du transfert d'un relais à un autre. Il gère tout l'aspect handover et il effectue le transfert vers un réseau 2G ou 3G.
- Packet Data Network Gateway (PGW ou PDN-GW) est la passerelle vers les réseaux externes. Il gère le routage en affectant à la station mobile une adresse IP lors de sa connexion au réseau.

Le réseau cœur LTE utilise des technologies IP (Internet Protocol), c'est-à-dire que tous les services offerts par le noyau de réseau LTE sont basés sur le protocole internet à savoir : le transport de données, la voix (VOIP), la signalisation et tous les services de téléphonie. Il permet aussi l'interconnexion avec les stations de base via des routeurs. La réduction de la latence aussi bien pour l'accès internet que les appels vocaux est due à l'utilisation du protocole IP dans le réseau cœur.

➤ Structure d'une trame LTE

Les transmissions en LTE sont segmentées en trames et une trame dure 10 millisecondes (ms). Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. Chaque Sous trame est divisée en deux slots, un slot dure donc 0,5 ms et chaque slot se compose de sept symboles OFDM. La figure 1.2 présente la trame radio dans le réseau LTE [Dat-Duong, 2014].

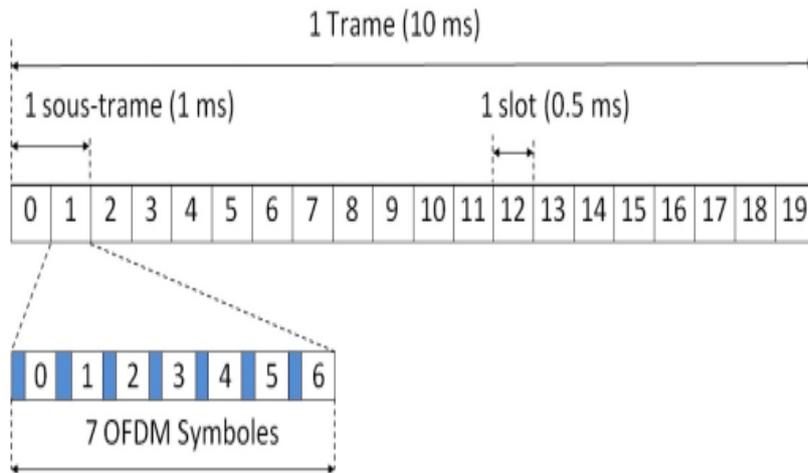


Figure 1. 2 : Structure d'une trame en LTE

Une trame radio LTE est composée de bloc de ressources physiques. Dans la norme LTE, la ressource élémentaire est le plus petit élément de l'allocation des ressources attribuées par l'ordonnanceur de la station de base. Un bloc de ressources physiques représente une ressource de 180 kHz dans le domaine fréquentiel et 0.5 ms (un slot) dans le domaine temporel. Étant donné que l'espace entre les sous-porteuses est de 15 kHz, chaque bloc de ressources physiques est composé de 12 sous-porteuses dans le domaine fréquentiel. La figure 1.3 illustre les ressources en LTE. Le bloc de ressources (RB) dans LTE se réfère à un intervalle de temps engendré par 12 sous-porteuses, où la largeur de bande de chaque sous-porteuse est de 15 KHz.

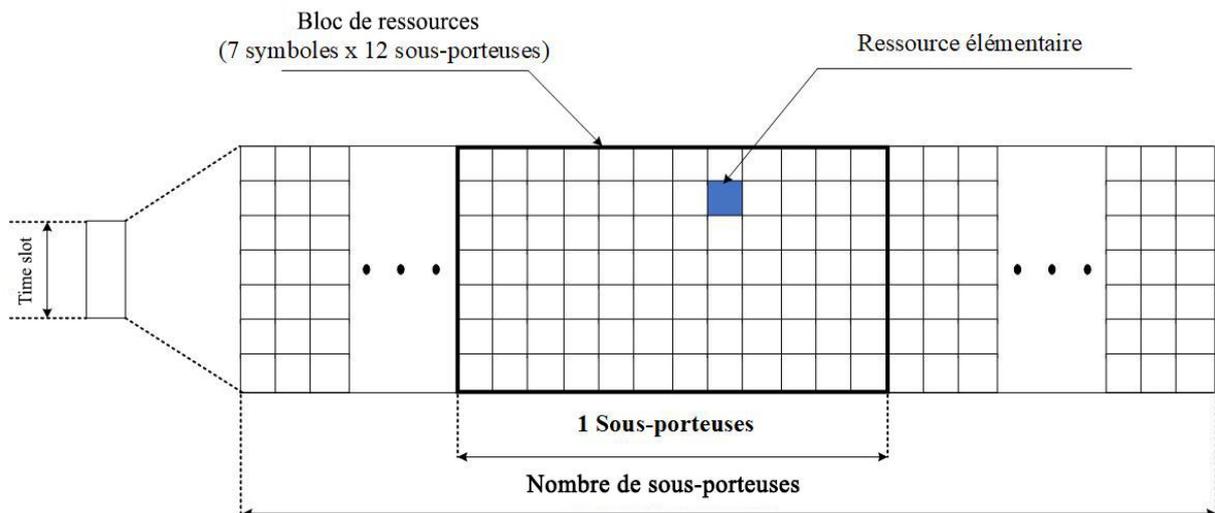


Figure 1. 3 : Fonctionnement d'une trame LTE

➤ Techniques de modulation en LTE

La modulation utilisée dans le LTE est une modulation adaptative qui varie en fonction de la distance qui sépare la station mobile de l'eNodeB. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation : Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) ou Quadrature Amplitude Modulation (4-QAM, 16-QAM et 64-QAM : modulation d'amplitude en quadrature). La figure 1.4 ci-dessous présente les différentes techniques de modulation utilisées par la norme LTE.

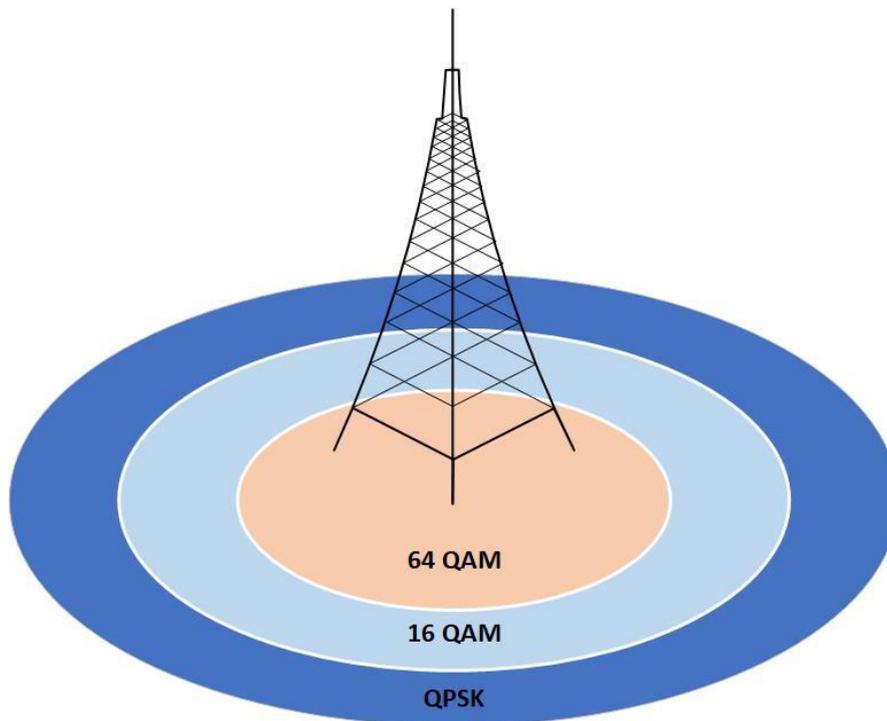


Figure 1. 4 : Technique de modulation adaptative

Cette norme utilise des techniques de modulation adaptative. Ces techniques permettent à la station de base de choisir le schéma de modulation spécifique en fonction des conditions du canal. Selon les conditions du canal, certaines stations mobiles peuvent recevoir une transmission plus robuste (QPSK), et d'autres des transmissions à débit de données plus élevé (64-QAM ou 16-QAM). De même, chaque station mobile peut utiliser un schéma de modulation différent dans la transmission en liaison montante. On parle de transmission en liaison montante lorsque la transmission se fait de la station mobile vers la station de base. Lorsque les conditions du canal sont bonnes, le schéma de modulation 16-QAM ou 64-QAM sera utilisé pour la transmission des données. Dans le cas contraire c'est le schéma de modulation QPSK qui sera utilisé. La technique de modulation QPSK est plus robuste mais moins efficace. La figure 1.5 ci-dessous présente les différents types de modulation.

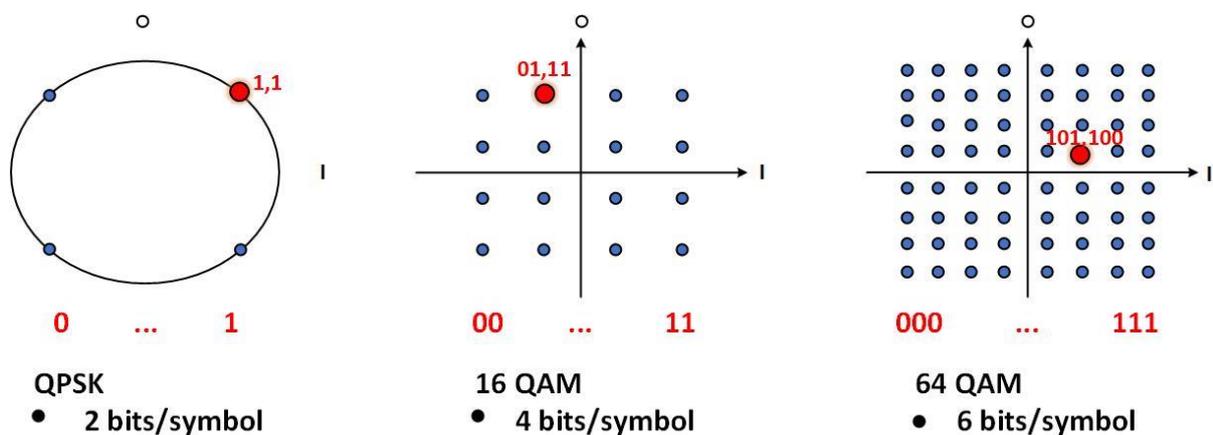


Figure 1.5 : Modulation QPSK, 16 QAM et 64 QAM

La modulation Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) est une modulation par déplacement de phase en quadrature. Ce type de modulation favorise une constellation de deux bits par symbole. La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature selon l'information transportée par deux signaux d'entrée. La constellation associée à la modulation QAM est de quatre bits par symboles pour le 16-QAM et six bits par symbole pour le 64-QAM.

➤ Evolution de la technologie LTE (LTE-Advanced ou 4G+)

L'introduction de la technologie LTE a commencé avec la Release 8 du 3GPP en 2004 [Holma, 2009]. Le réseau LTE a continué à évoluer et les améliorations apportées à partir de la Release 10 ont abouti au LTE-Advanced. Le LTE-Advanced (ou LTE avancé) est une évolution du LTE normalisée dans le cadre de la Release 10 du 3GPP. Une Release est une version d'évolution et la première version du LTE est la Release 8, dont les spécifications fonctionnelles ont été finalisées en décembre 2008. Le LTE, tout comme les autres systèmes normalisés par le 3GPP (GSM, UMTS, HSPA) a évolué au cours du temps en fonction des progrès techniques et des demandes du marché. Les spécifications fonctionnelles de la Release 10 ont été finalisées en 2011. Le nom LTE-Advanced provient du processus de réglementation appelé International Mobile Telecommunication-Advanced (IMT-Advanced) du secteur radiocommunication de l'Union Internationale de Télécommunication, dans lequel s'est inscrit son développement.

Il apporte des améliorations au LTE afin d'offrir une capacité de cellule supérieure et des débits utilisateurs élevés. La technologie LTE-Advanced permet d'atteindre le statut véritable

de la quatrième génération (4G), tout en gardant une compatibilité ascendante complète avec le LTE au niveau des terminaux. C'est-à-dire qu'une station mobile LTE-Advanced peut fonctionner dans un réseau LTE et vice versa. Au niveau du réseau, la compatibilité est possible grâce aux fréquences identiques et aux codages radio (OFDMA et SC-FDMA) utilisés dans les réseaux d'accès radio. Le LTE-Advanced est capable de fournir à l'utilisateur une connexion IP avec des débits pics descendants (téléchargement) supérieurs à 1 Gb/s à l'arrêt et à plus de 100 Mb/s pour un terminal en mouvement, grâce aux technologies réseaux intelligentes qui permettent de maintenir des débits plus élevés en tout point de la cellule radio. Certaines des technologies en LTE-Advanced comprennent:

- Un système à entrées et sorties multiples (MIMO) d'ordre supérieur ou égale à deux (jusqu'à 8x8 MIMO) avec la technique de formation de voie collaborative (beamforming). Les antennes multiples au niveau de la cellule macro peuvent transmettre le même signal avec pondération de façon appropriée pour chaque élément d'antenne de sorte que le faisceau transmis soit orienté dans la direction du récepteur afin d'améliorer le rapport signal-sur-bruit plus-interférence (SINR) reçu à la station mobile. La technique de beamforming fournit une amélioration de la couverture de la cellule macro, la capacité du réseau et réduit la consommation d'énergie au niveau de la station de base macro. La technologie MIMO permet d'améliorer la performance globale du système. Dans le mode de transmission en liaison descendante, des stations de base macros multiples transmettent à une station mobile. En liaison montante, le signal émis par la station mobile est reçu par une ou plusieurs stations de base macro. Aussi cette technologie permet aux stations de base macros qui coopèrent d'utiliser le spectre de façon efficace de sorte à minimiser les interférences des cellules adjacentes ;
- la mise en œuvre d'un réseau de différentes couches, c'est à dire, on trouve les stations de base macros superposées avec des petites cellules, afin d'améliorer la couverture du réseau et augmenter sa capacité ;
- des techniques de coordination d'interférences entre cellules (inter-cell interference coordination ICIC) et annulation d'interférences plus efficace. L'ICIC implique des technologies telles que le partage du spectre, le contrôle de puissance, etc. Quant aux techniques d'annulation d'interférences entre cellules, elles impliquent le décodage ou la démodulation de l'information désirée, qui sont encore utilisés avec les estimations de canal pour réduire ou éliminer l'interférence du signal reçu [Jeffrey, 2005].

- Amélioration de l'efficacité spectrale et le débit du réseau en utilisant le mécanisme d'agrégation des porteuses (Carrier Aggregation CA). La technique Carrier Aggregation consiste en l'agrégation des composantes de porteuses (Component Carriers : CCs) au niveau des stations de base macros pour permettre des taux plus élevés de données pour les stations mobiles. La norme LTE-Advanced actuelle permet d'agréger jusqu'à 5 composantes de porteuses allant de 20 Mhz à 100 MHz de bande passante. Le tableau 1.1 présente une comparaison entre les différentes technologies de quatrième génération

Tableau 1. 1: Comparaison des technologies LTE et LTE-Advanced

| Catégorie de terminaux | LTE (3GPP Release 8/9) | | | LTE Advanced (3GPP Release 10) | | |
|---|-------------------------|------|-----|--------------------------------|--------|--------------------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Débit liaison descendante (Mbit/s) | 100 | 150 | 300 | 300 | 300 | 1000-3000 |
| Débit liaison montante (Mbit/s) | 50 | 50 | 75 | 50 | 150 | 500-1500 |
| Lien MIMO | 2x2 | 2x2 | 4x4 | 2x2 | divers | ≤8x8(DL), ≤4x4(UL) |
| Bande passante (Mhz) | 1.4, 3, 5, 10, 15 et 20 | | | 20-100 | | |
| Efficacité spectrale | 16.3 bit/s/Hertz | | | 30 bit/s/Hertz | | |
| Agrégation de porteuse (CA) | Non | | | Oui | | |
| Technique de modulation pour la liaison descendante | QPSK, 16QAM et 64QAM | | | 64QAM | | |
| Technique de modulation pour la liaison montante | QPSK, 16 QAM | QPSK | | 16 QAM | 64QAM | 64QAM |

Les réseaux mobiles de quatrième génération reposent sur une combinaison de technologies sophistiquées à même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et faible latence) par rapport aux réseaux 3G existants. Cependant l'avènement des innovations telles que les villes intelligentes, les objets connectés et bien d'autres limitent les réseaux 4G du fait des exigences liées à la qualité de service. La réponse à ces exigences a motivé la naissance de la cinquième génération (5G).

1.2.2.5. Réseau mobile de cinquième génération

Définie par le 3GPP, la cinquième génération de standards de la téléphonie mobile succède à la quatrième génération et permet d'augmenter nettement le débit des données, une connectivité fiable ainsi qu'une faible latence pour les télécommunications mobiles. Le temps de latence est aussi réduit (moins d'une milliseconde) pour une meilleure réactivité. La

cinquième génération a le potentiel de transformer de nombreux aspects de notre vie quotidienne, que nous soyons à la maison, en déplacement ou au travail. Divers secteurs tels que les villes intelligentes, la santé, la finance, les voitures connectées sont susceptibles de tirer profit des applications de plus en plus sophistiquées en partageant des informations à partir de cette génération de réseau mobile. La cinquième génération constitue la première génération de téléphonie mobile à être conçue pour des cas d'usage autres que la voix et la donnée [ANFR, 2019]. Cette technologie offre un large éventail de services sans fils à l'utilisateur final à travers de multiples plateformes d'accès et via des réseaux à plusieurs couches. Les cas d'utilisation de la cinquième génération peuvent être classés en termes d'exigences en trois types de communication essentiels avec des objectifs très différents [Ericsson, 2017]:

- **L' enhanced Mobile Broad Band (eMBB)**

Il correspond aux applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide avec des capacités de débit plus importantes. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement de flux vidéo de qualité de plus en plus grande, des applications de réalité virtuelle.

- **Le massive Machine Type Communications (mMTC)**

Il est du domaine des utilisateurs nécessitant une couverture étendue, une consommation d'énergie et des débits relativement restreints. Nous pouvons citer comme exemple de service dans cette catégorie, l'internet des objets. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.

- **L' ultra Reliable low Latency Communications (uRLLC)**

Il correspond aux applications nécessitant une réactivité extrêmement importante avec une garantie très forte de transmission de message. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome. Aussi, les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit se faire le plus rapidement possible.

➤ **Fréquences utilisées par la cinquième génération**

Le choix d'une bande de fréquence représente toujours un compromis entre la couverture (définie par la taille de la zone où le service est accessible) et la capacité (caractérisée par exemple par le débit obtenu). Les basses fréquences sont privilégiées pour assurer une bonne couverture car elles permettent d'avoir de bonnes conditions de propagation. En revanche pour augmenter la capacité en termes de débit, les hautes fréquences sont préférables car les largeurs de bandes disponibles sont plus importantes ; ce qui permet d'écouler plus de trafic. Les réseaux de téléphonie mobile recherchent toujours un équilibre entre les bandes basses pour fournir une bonne couverture et les bandes hautes pour assurer un bon débit dans les zones de trafic denses. Dans ce contexte, la cinquième génération des réseaux mobiles disposera d'une gamme élargie de fréquences pour son déploiement. Elle pourra réutiliser le spectre déjà alloué pour la téléphonie mobile, notamment les basses fréquences pour assurer une bonne couverture, et se verra également attribuer de nouvelles fréquences (fréquences hautes) dans les bandes millimétriques, pour augmenter son débit. La figure 1.6 présente les fréquences de la 5G [ANFR, 2019]

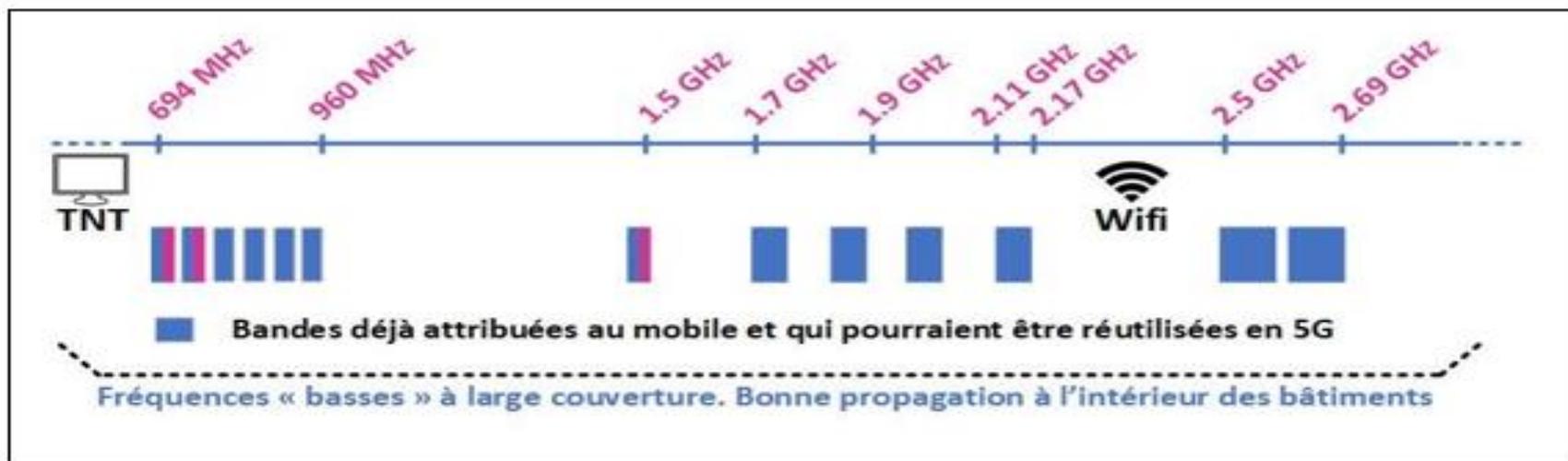


Figure 1.6 A : Fréquences basses

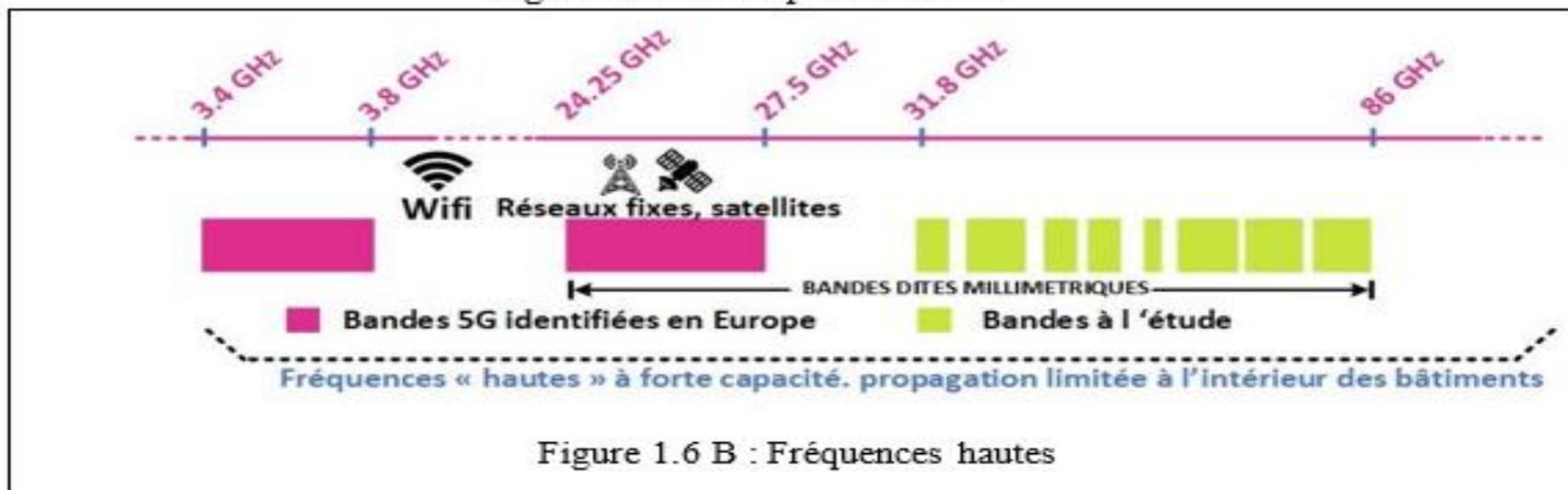


Figure 1.6 B : Fréquences hautes

Figure 1.6 : Spectre de fréquences 5G [ANFR,2019]

La cinquième génération va utiliser les fréquences déjà attribuées aux autres générations des réseaux mobiles. Il s'agit des fréquences basses, comme le montre la figure 1.6 A. Ces fréquences basses vont favoriser une large couverture. Mais de nouvelles fréquences seront également attribuées notamment dans des bandes de fréquences plus hautes, tel qu'indique la figure 1.6 B. Les fréquences hautes permettront d'obtenir de bonnes capacités du système. Le recours à des bandes de fréquence plus hautes permet de construire des antennes avec des composants élémentaires de plus petites tailles et donc en plus grands nombres [ANFR, 2019]. Ces antennes permettent de générer des faisceaux orientables qui permettent d'optimiser la ressource fréquentielle.

➤ **Architecture du réseau de cinquième génération**

La cinquième génération de réseau mobile constitue en réalité un cadre dynamique, cohérent et flexible pour de multiples technologies avancées prenant en charge une grande variété d'applications. Elle utilise une architecture plus intelligente, avec des réseaux d'accès sans fils qui ne sont plus soumis aux contraintes de proximité avec la station. Cette technologie de réseau mobile ouvre la voie vers un réseau d'accès sans fils désagrégé, flexible et virtuel avec de nouvelles interfaces créant des points d'accès aux données supplémentaires. Tout comme les générations précédentes, l'architecture du réseau de la cinquième génération est composée de deux grandes parties : un réseau d'accès Radio (Next Generation RAN : NG-RAN) et un réseau cœur (5G core).

La description des différents éléments qui constituent l'architecture du réseau 5G et leurs fonctionnements sont présentés dans [EFORT, 2018].

Nous terminons cette partie, concernant les différentes évolutions des réseaux mobiles, en présentant dans le tableau 1.2 les différentes technologies des réseaux mobiles et leurs principales caractéristiques.

Tableau 1. 2 : Technologies des réseaux mobiles et leurs principales caractéristiques

| Années | Génération | Sigles | Noms | Débits théoriques/ utiles | Fréquences | Services |
|--------|---------------------|--------------|---|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1981 | 1G | R 2000 | Radiocom 2000 | Analogique | | Appels voix uniquement |
| 1992 | 2G | GSM | Global System for Mobile | 9 kbps | 900 MHz et 1800 MHz | Appels vocaux |
| | 2.5G | GPRS | Global Packet Radio Service | 170 kbps | | SMS MMS |
| | 2.75G | EDGE | Enhanced Data Rate | 384 kbps/ 240 | 1900 MHz et 2100 MHz | Internet à faible débit |
| 2001 | 3G | UMTS | Universal mobile Telecommunication System | 384 kbps/ 300 | 1900 MHz et 2100 MHz | Internet haut débit |
| | 3G+ | HSPA | High Speed Packet Access | 14.4Mbps | | Téléchargement rapide |
| | 3G H+ | | High Speed Packet Access + | 21 Mbps | | Streaming |
| | 3G H+ DC | | Dual Cell HSPA | 42 Mbps | | |
| 2012 | 4G | LTE | Long Term Evolution | 80 Mbps | 800 MHz, | Internet très haut débit |
| | 4G+ | LTE-Advanced | Long Term Evolution Advanced | 400 Mbps | 1800 MHz et 2600 MHz | |
| 2020 | 5G(Basse fréquence) | | | 1 Gbps | 700 MHz, | Internet ultra haut débit |
| | 5G(Haute fréquence) | | | > 10 Gbps | 2100 MHz, 3500 MHz | |

1.3. Méthodes d'accès multiples en radio mobile

Les méthodes d'accès définissent les techniques à partir desquelles les utilisateurs mobiles accèdent aux ressources radios et communiquent avec le système. Chaque génération de réseau mobile utilise une méthode en fonction de ses attentes en termes de qualité de service. Les principales méthodes d'accès utilisées en réseaux mobiles sont les suivantes :

- **La technique d'accès multiple par répartition de fréquences (Frequency Division Multiple Acces : FDMA)**

Le principe de l'accès multiple par répartition de fréquences est une technique basée sur la division du canal en plusieurs sous canaux en affectant une fréquence à un utilisateur donné. Cette technique permet à différents utilisateurs d'accéder simultanément au système en utilisant différentes bandes de fréquences. Un canal de communication est représenté par une bande de fréquences et le nombre maximum d'utilisateurs que le système pourrait supporter est déterminé par le rapport entre la largeur de bande totale disponible et la largeur de bande d'un canal. La figure 1.7 illustre, pour sept utilisateurs (A, B, C, D, E, F, G) la répartition des canaux dans le spectre.

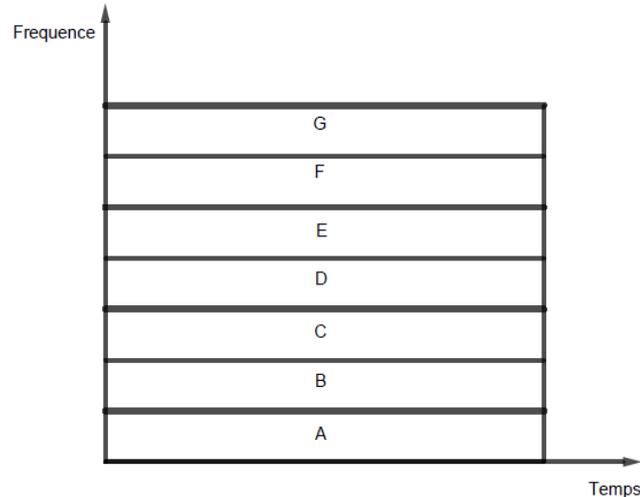


Figure 1.7 : Technique de répartition des canaux en FDMA

La méthode d'accès multiple par répartition en fréquence est la technique utilisée dans les réseaux mobiles de première génération. Si nous prenons comme exemple le réseau de première génération TACS : pour 10 MHz alloués, ce système ne peut supporter que 400 utilisateurs occupant chacun une bande de largeur 25 kHz.

- **La technique d'accès multiple par répartition dans le temps (Time Division Multiple Access : TDMA)**

Le TDMA est une technologie d'accès multiple par répartition dans le temps. Contrairement aux technologies FDMA et CDMA, la répartition des appels avec le TDMA se fait en fonction du temps. Les utilisateurs accèdent périodiquement à la bande qui leur est affectée pendant une durée limitée. Cette durée est nommée burst. La succession de bursts sur une période constitue une trame et chaque bande de fréquences comporte plusieurs canaux de communication. Le système numérise d'abord l'appel, puis combine les conversations en un flux numérique unifié sur un seul canal radio. Ensuite il divise chaque canal cellulaire en trois tranches de temps, ce qui signifie que trois appels sont passés sur une même fréquence, puis une tranche de temps est attribuée à chaque utilisateur pendant l'appel. Les utilisateurs transmettent les uns après les autres, chacun utilisant son propre créneau horaire. Cela permet à plusieurs stations de partager le même support de transmission tout en n'utilisant qu'une partie de leur capacité de canal. La figure 1.8 montre une stratégie d'accès multiple de type TDMA.

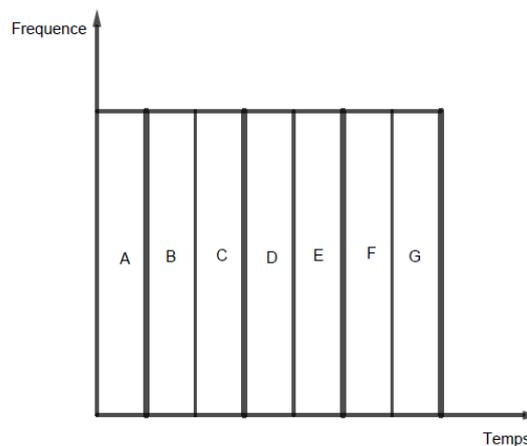


Figure 1. 8 : Technique de répartition des canaux en TDMA

Cette technologie d'accès radio est utilisée dans les réseaux mobiles de deuxième génération.

- **La technique d'accès multiple par répartition en code (Code division Multiple Access : CDMA)**

Le CDMA est une technologie d'accès multiple par répartition de code. Contrairement au FDMA, le CDMA identifie les données par code. Les données sont divisées en petites parties (bit de données) et marquées par un code spécifique et unique en fonction du service auquel elles appartiennent. Ces données sont envoyées via plusieurs fréquences discrètes en

petits blocs, qui peuvent être utilisés à tout moment dans une plage spécifiée. La figure 1.9 illustre cette technique d'accès multiples.

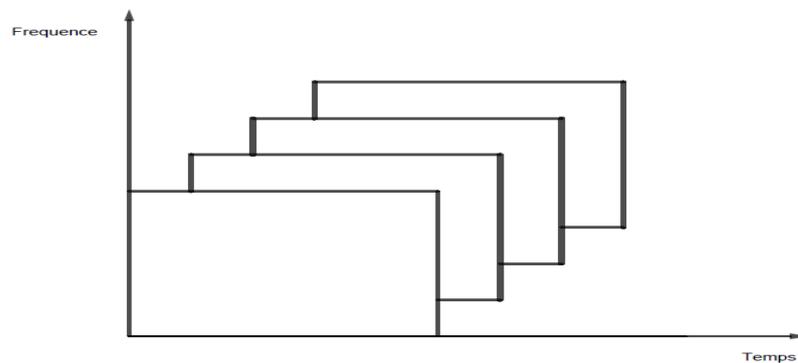


Figure 1. 9 : Technique d'accès TDMA

Cette méthode d'accès est une des techniques envisagées pour les systèmes radio mobiles de troisième génération

- La méthode OFDMA

En LTE la méthode d'accès en liaison descendante est basée sur la technique OFDMA. L'OFDMA est réalisé en modulant les informations sur une multitude de sous-porteuses orthogonales mutuelles à bande étroite, qui peuvent être partagées entre plusieurs utilisateurs. La principale motivation de l'adoption de l'OFDMA en LTE est l'obtention de bonnes performances dans les canaux sélectifs en fréquence, une faible complexité du récepteur en bande de base, une bonne efficacité spectrale, la gestion de plusieurs largeurs de bande, l'adaptation des liaisons, l'ordonnancement du domaine fréquentiel et la compatibilité avec les techniques MIMO avancées. De plus, le principe d'orthogonalité de l'OFDMA, associé à un espacement fixe de 15 kHz entre les sous-porteuses dans le domaine des fréquences, atténue considérablement les interférences des canaux adjacents (ACI). La figure suivante illustre le principe OFDMA.

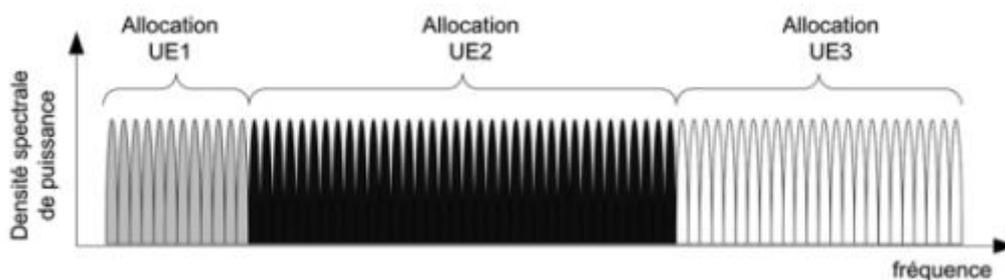


Figure 1. 10 : Partage de la bande du système entre plusieurs stations mobiles en OFDMA

La méthode d'accès OFDMA permet de déterminer le nombre de sous-porteuses allouées à la station mobile en fonction de ses besoins en débit. En effet, une station mobile effectuant un appel voix, qui ne nécessite qu'un faible débit se verra allouer un nombre de sous-porteuses bien inférieur à celle téléchargeant un fichier volumineux.

- **La technique Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)**

La Technique Single Carrier-Frequency Division Multiple Access est une technique d'accès multiple en voie montante. Elle offre des performances et une complexité globale similaire à l'OFDMA mais utilise une technique de multiplexage fréquentiel à une seule porteuse contrairement à OFDMA qui utilise un schéma de transmission à porteuses multiples.

Le SC-FDMA peut être considéré comme un OFDMA à étalement DFT (discrete Fourier transform : transformée de Fourier discrète) en utilisant les signaux de données du domaine temporel et en les transformant en domaine fréquentiel par une DFT avant de les analyser par la modulation OFDMA. Ces techniques Permettent de réduire la puissance de transmission instantanée, ce qui implique d'augmenter l'efficacité de l'amplificateur de puissance, la faible complexité et l'attribution flexible de la bande passante. La technique SC-FDMA permet l'utilisation d'un système de transmission à porteuse unique tel que le GSM et à accès multiple par répartition en code (CDMA) [Rasmus et al., 2012]. Ces types de systèmes ont un Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) faible. La figure 1.11 présente l'allocation des ressources radio avec la technique SC-FDMA.

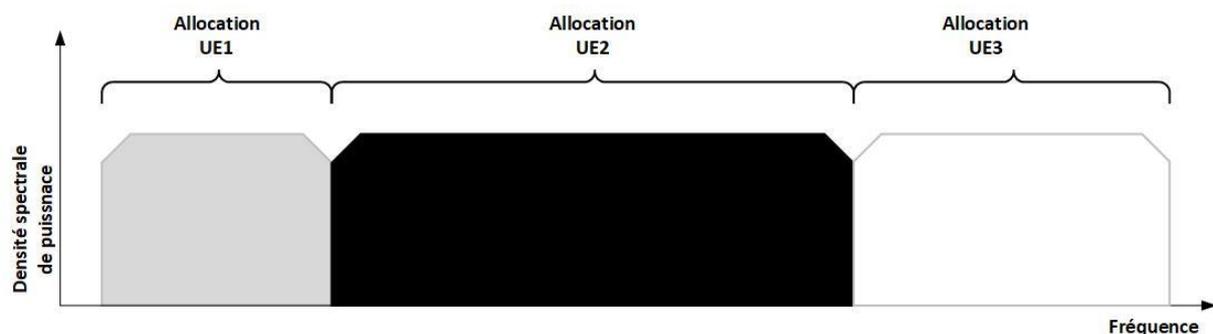


Figure 1. 11 : Partage de la bande du système entre plusieurs stations mobiles en SC-FDMA

Les réseaux mobiles de quatrième génération utilisent la technologie OFDMA en liaison descendante et la technologie SC-FDMA en liaison montante.

La figure 1.12 suivante montre la différence entre les méthodes d'accès OFDMA et SC-FDMA.

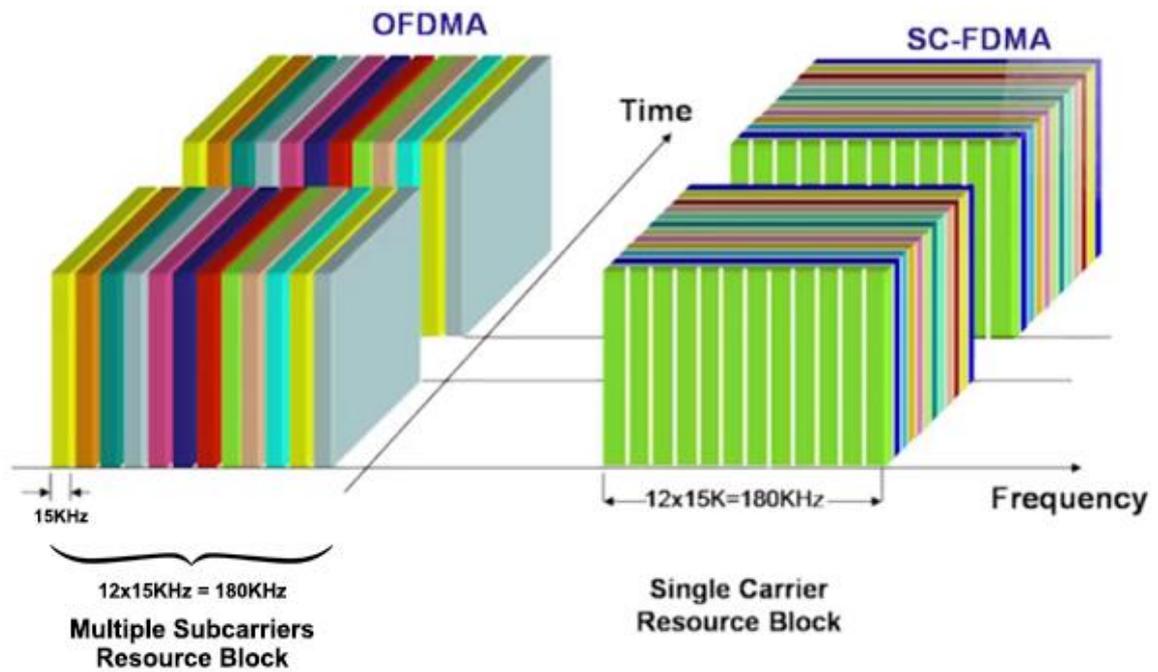


Figure 1. 12 : Différence entre OFDMA et SC-FDMA [Rasmus et al., 2012]

En plus de ces différentes méthodes d'accès multiples, nous pouvons citer la technique Multiple Input Multiple Output (MIMO). Le principe du fonctionnement d'un système MIMO est présenté par la figure 1.13.

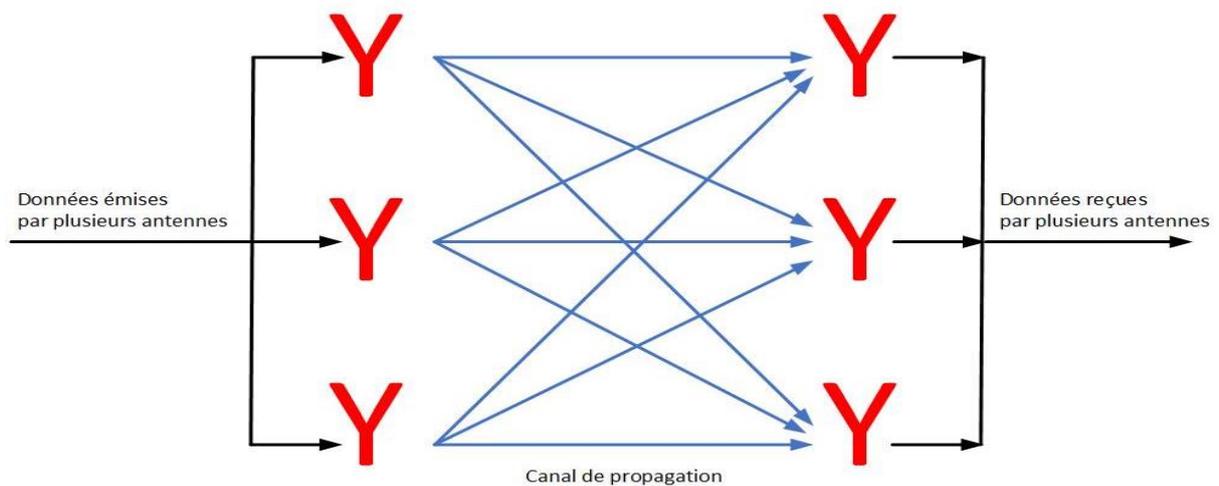


Figure 1. 13 : Principe du fonctionnement des antennes MIMO

La technique MIMO permet la transmission parallèle et simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur grâce à l'utilisation de plusieurs antennes d'émission et de réception. Elle est utilisée dans les réseaux de quatrième génération et nous pensons qu'elle sera davantage utilisée dans les réseaux de cinquième génération de réseau mobile. De nombreuses formes d'applications de MIMO

existent et peuvent être cataloguées comme multiplexage spatial, la diversité spatiale, la formation de faisceaux, ou une combinaison adéquate de ces dernières. En effet l'utilisation des antennes intelligentes permet d'augmenter l'efficacité spectrale. Ainsi un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et ; ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission.

1.4. Conclusion du chapitre 1

Les systèmes de communication des réseaux mobiles ont connu d'énormes progrès aussi bien sur le plan des infrastructures que celui des services offerts aux usagers.

Ils n'ont cessé d'évoluer depuis l'apparition de la première génération et nous sommes aujourd'hui à la cinquième génération qui fournit une qualité de service meilleure à celle des générations précédentes.

Ce chapitre a présenté en détail des connaissances nécessaires à la compréhension et au fonctionnement des réseaux mobiles. Nous avons débuté par les concepts de base et les terminologies associées aux réseaux mobiles existant ainsi que leurs différentes évolutions.

Nous sommes partis de la première à la cinquième génération et avons exposé sur leurs principales caractéristiques. Le chapitre suivant fera l'objet du contrôle de puissance dans un canal de propagation radio mobile.

CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART

Sommaire

| | |
|---|----|
| 2.1. INTRODUCTION | 39 |
| 2.2. CONTRÔLE DE PUISSANCE DANS LES RÉSEAUX MOBILES | 39 |
| 2.2.1. Contrôle de puissance dans les réseaux mobiles de deuxième génération..... | 39 |
| 2.2.2. Contrôle de puissance dans les réseaux de troisième génération | 40 |
| 2.2.3. Contrôle de puissance dans le réseau de quatrième génération..... | 42 |
| 2.2.4. Contrôle de puissance dans le réseau mobile de cinquième génération..... | 46 |
| 2.3. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CONTRÔLE DE PUISSANCE..... | 47 |
| 2.3.1 Allocation de puissance..... | 51 |
| 2.3.2 Algorithme de contrôle de puissance de transmission | 53 |
| 2.3.3. Algorithme de contrôle de puissance basé sur les pertes de propagation | 57 |
| 2.4. CANAL DE PROPAGATION RADIO MOBILE | 58 |
| 2.4.1. Propagation en espace libre..... | 58 |
| 2.4.2. Propagation par multiples trajets..... | 59 |
| 2.4.3. Mécanismes de propagation | 61 |
| 2.4.4. Variations du canal de propagation..... | 66 |
| 2.4.5. Paramètres de propagation dans un canal radio mobile | 68 |
| 2.4.6. Estimation d'un canal de propagation radio mobile..... | 69 |
| 2.5. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CANAL DE PROPAGATION | 75 |
| 2.6. ANALYSE DES TRAVAUX DE LA LITTÉRATURE..... | 76 |
| 2.7. PRÉSENTATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE | 77 |
| 2.8. CONCLUSION DU CHAPITRE 2 | 78 |

2.1. Introduction

Le contrôle de puissance correspond de manière générale au mécanisme de sélection et d'ajustement de la puissance d'émission dans un système de communication afin d'obtenir de bonnes performances. Il représente aujourd'hui un enjeu majeur dans les réseaux de communication sans fil, tant pour les problèmes de robustesse donc de qualité de service, que pour les contraintes environnementales. Ainsi, il constitue un domaine de recherche actif en réseau mobile. En effet, un contrôle de puissance rapide est primordial car sans ce mécanisme, un seul terminal mobile émettant une puissance trop élevée pourrait empêcher tous les autres terminaux mobiles de la cellule de communiquer, puisque différents utilisateurs émettent dans la même bande de fréquence. Chaque utilisateur pourrait alors devenir une source d'interférence pour les autres. Il est donc important de mettre en œuvre un mécanisme qui permet aux terminaux mobiles d'ajuster leur puissance d'émission tout en garantissant une bonne réception à la station de base. Le problème de contrôle de puissance se pose au niveau des puissances émises par les stations de base et les stations mobiles en vue de réduire les interférences inter et intra cellulaires, d'améliorer le débit, la couverture réseau et la capacité du système.

Le contrôle de puissance est soumis aux conditions du canal dans l'environnement de propagation. En effet les variations du canal due à la mobilité du récepteur et la forte présence des obstacles entre émetteurs et récepteurs deviennent problématique pour la qualité de réception du signal émis.

Ce chapitre, aborde la question du contrôle de puissance dans les réseaux mobiles en commençant par la deuxième génération ainsi que celle du canal de propagation radio. Il présente les travaux de la littérature relatifs au contrôle de puissance et la modélisation des canaux de propagation pour différents environnements. Une analyse des travaux de la littérature est effectuée et la question de recherche est présentée.

2.2. Contrôle de puissance dans les réseaux mobiles

2.2.1. Contrôle de puissance dans les réseaux mobiles de deuxième génération

Pour le réseau de deuxième génération, la station mobile peut adapter de façon automatique sa puissance d'émission aux conditions de réception en fonction de sa position par rapport à la

station de base et des obstacles dans le canal. Cela atténue les interférences et permet de maintenir l'autonomie des batteries en réduisant leur consommation d'énergie.

La station mobile émet d'abord à sa puissance maximale, puis progressivement la réduit sur instructions de la station de base. Les informations de correction de puissance arrivent à la station mobile par le canal SACCH (Slow Associated Control Channel) du groupe DCCH (Dedicated Control Channel). Etant un canal Duplex dédié, le SACCH a pour rôle de garantir une qualité de transmission acceptable.

Ainsi en liaison montante, il transmet :

- les valeurs de puissance émises en cours de la station mobile ;
- des mesures sur le canal utilisé et sur les stations de base voisines ;
- des informations sur la synchronisation de la transmission.

En liaison descendante, il contient :

- les valeurs de puissance demandée par la station de base au mobile ;
- les informations sur la cellule serveuse ;
- les fréquences à scanner des stations de base voisines ;
- plusieurs fonctionnalités effectuées dans la cellule serveuse telles que : le contrôle de puissance, la transmission discontinue et la valeur discontinue du Radio Link Timeout (RLT) en nombre de trames SACCH.

Le canal SACCH ne supporte que des faibles débits. Il est émis seulement une fois toutes les 13 trames, ou les 60 ms. Le terminal mobile qui reçoit une commande de modification de sa puissance, pourra l'actualiser uniquement toutes les 60 ms, soit 16,7 Hz.

Cependant, une station mobile GSM ne peut augmenter ou diminuer sa puissance transmise que par pas de 2 dB, dans la limite de la valeur minimum et maximum permise.

Pour la plupart des terminaux mobiles ayant une classe de puissance de 4, la réglementation définit une puissance maximum en GSM 900 de 33 dBm ou 2W avec un pas de ± 2 dBm. En GSM 1800, cette puissance peut descendre à 30 dBm ou 1W avec ± 2 dBm.

2.2.2. Contrôle de puissance dans les réseaux de troisième génération

Il existe deux types de contrôle de puissance dans les réseaux mobiles de troisième génération à savoir le contrôle de puissance en boucle fermée et le contrôle de puissance en boucle ouverte. Le contrôle de puissance en boucle ouverte consiste à déterminer le niveau de puissance du signal avec lequel la station mobile doit émettre à la station de base au début de

la communication. Ce niveau de puissance est déterminé en fonction des pertes de propagation mesurées en liaison descendante. Toutefois, cette boucle n'est pas efficace surtout que les canaux en liaison montante et descendante utilisent différentes bandes de fréquences (il s'agit du mode Frequency Division Duplex : FDD). Aussi l'évanouissement de Rayleigh dans les deux sens est-il indépendant [Holma, 2004], [Sanchez et al., 2007].

Le contrôle de puissance en boucle fermée est composé d'une boucle interne et une boucle externe. Au niveau du mécanisme de contrôle de puissance en boucle fermée, l'émetteur et le récepteur s'échangent des commandes de contrôle afin de régler réciproquement leur puissance.

La boucle interne du contrôle de puissance est effectuée entre la station de base et la station mobile à chaque time slot soit à la fréquence de 1500 Hz [3GPP, 2002]. Elle a pour but de lutter contre les variations rapides du canal de propagation et de maintenir le rapport signal-sur-interférence (SIR : Signal-to-Interference Ratio) à une valeur seuil. En liaison montante, elle sert à contrer l'effet 'proche-lointain', tandis qu'en liaison descendante elle permet de réduire les interférences intercellulaires. On parle de l'effet 'proche-lointain' ou 'Near-Far' lorsqu'un terminal mobile émet à une puissance trop élevée. Ce phénomène peut dégrader la qualité d'émission ou de réception des autres terminaux mobiles partageant la même cellule ou les terminaux en bordure des cellules voisines.

Par ailleurs, les commandes du contrôle de puissance sont transmises dans le champ TPC (Transmit power Control) du canal physique de contrôle (DPCCH :Dedicated Physical Control Channel). Celui-ci est transmis en multiplexage avec le canal DPDCH (Dedicated Physical Data Channel) qui est un canal réservé aux données. Sur la liaison montante et en absence de macro-diversité, si le SIR reçu à la station de base est inférieur (respectivement supérieur) à la valeur cible, la commande '1' (respectivement '0') est transmise à la station de base sur le lien montant pour qu'elle augmente sa puissance de transmission.

La boucle externe est plus lente que la boucle interne et bien que cela ne soit pas clairement mentionné dans les spécifications 3GPP, cette boucle est typiquement effectuée à une fréquence de 10 à 100 Hz [Hamouda, 2007]. Elle est par ailleurs assurée entre le RNC (Radio Network Controller) et la station de base, et vise à ajuster le SIR cible selon le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate) ou le taux d'erreurs par bloc (BLER : Bloc Error Rate) requis pour un service donné.

2.2.3. Contrôle de puissance dans le réseau de quatrième génération

Le mécanisme du contrôle de puissance dans les réseaux mobiles de quatrième génération est similaire à celui de la troisième génération. Il s'effectue dans les deux sens : en liaison descendante et en liaison montante.

2.2.3.1. Contrôle de puissance en liaison descendante

Dans le cas du contrôle de puissance en liaison descendante, toute la puissance est répartie uniformément sur toute la bande passante. Aussi, la même densité spectrale de puissance (PSD) est utilisée sur tous les canaux. Le contrôle de puissance en liaison descendante détermine l'énergie par élément de ressource. Le terme énergie par élément de ressource désigne l'énergie avant l'insertion du préfixe cyclique ainsi que l'énergie moyenne absorbée sur tous les points de constellation pour le schéma de modulation appliqué.

Le contrôle de puissance en liaison descendante a moins d'importance que le contrôle de puissance en liaison montante car la station de base émet à la même puissance dans toute la bande passante. Ainsi, afin de maximiser le débit, la station de base émet à puissance maximale en jouant sur l'adaptation de lien et la qualité du signal reçu. Cependant, afin de traiter des cas particuliers de transmission, la station de base a la possibilité d'ajuster individuellement la puissance allouée au PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) de chaque station mobile. Contrairement au contrôle de puissance en liaison montante, il n'existe pas de commandes Transmit Power Control provenant de la liaison descendante. La puissance allouée en liaison descendante à une station mobile est donc liée à la qualité du canal.

2.2.3.2. Contrôle de puissance en liaison montante

Le contrôle de puissance en liaison montante dans les réseaux de quatrième génération est un ensemble d'algorithmes et d'outils par lesquels la puissance de transmission pour différents canaux physiques et signaux de liaison montante est contrôlée au sein de la cellule. Ces algorithmes assurent une puissance suffisante à la station de base permettant la démodulation correcte des informations. Le contrôle de puissance en liaison montante est essentiel car il permet à la station de base de contrôler la puissance d'émission des stations mobiles. Il contrôle également les interférences avec les cellules voisines, afin d'améliorer le débit du système. En effet le contrôle de puissance en liaison montante pour les réseaux de quatrième génération s'effectue au niveau des canaux physiques et du signal de référence sonore (SRS : Sounding Reference Signal). En liaison montante, le contrôle de puissance permet de réduire les interférences entre les cellules voisines en contrôlant soigneusement la puissance

d'émission des stations mobiles et aide à augmenter le débit global dans le réseau. Le contrôle de puissance en liaison montante permet également d'assurer la qualité du taux d'erreur de bloc (BLER) et des applications de service. En outre, il contribue à réduire la consommation d'énergie de la station mobile, à améliorer la capacité du système et la couverture réseau. En plus, il permet de déterminer la puissance moyenne sur un symbole SC-FDMA dans lequel le canal physique est transmis. Le contrôle de puissance en liaison montante est alors une des plus importantes caractéristiques d'un réseau mobile de quatrième génération. Nous présentons le contrôle de puissance sur les deux principaux canaux physiques à savoir le canal physique de contrôle en liaison montante (PUCCH) et le canal physique partagé de liaison montante (PUSCH).

➤ Contrôle de puissance sur le canal physique de contrôle en liaison montante

Le canal physique de contrôle en liaison montante est utilisé pour supporter la transmission des messages d'acquittement (ACK), de l'ordonnancement, de l'indicateur de la qualité de canal (CQI) et du SRS (Sounding Reference Signal) qui est utilisé à la station de base pour l'estimation du canal. Sur la base de la différence entre le SINR (Signal Interference Noise Ratio) mesuré et le SINR seuil, la puissance d'émission du PUCCH est périodiquement ajustée en fonction du changement de l'environnement du canal. Si le SINR mesuré est supérieur au SINR seuil, la station mobile envoie une commande Transmission Power Control (TPC), ordonnant une diminution de la puissance d'émission. Sinon, elle envoie une commande TPC autorisant une augmentation de la puissance d'émission. La puissance d'émission de la station mobile pour les transmissions physiques du canal de contrôle en liaison montante est définie par :

$$P_{PUCCH} = \min \left\{ P_{\max}, 10 \log_{10}(M) + P_0 + PL + \Delta_{mcs} + g(\Delta_j) \right\} \quad (2.1)$$

Où M est le nombre de blocs de ressources attribués pour le PUCCH. Le paramètre P_0 représentant la puissance affectée à un bloc de ressource, est un paramètre spécifique à la cellule. Cette puissance est diffusée dans le cadre des informations sur le système cellulaire. P_{\max} représente la puissance d'émission maximale. Δ_{mcs} est un paramètre proportionnel à la méthode de codage et de modulation. Ce dernier détermine le niveau de protection apporté à l'information transmise. Plus la protection des bits transmis est élevée, moins la puissance est forte. Δ_j est une valeur de correction spécifique à la station mobile, également appelée

commande TPC. Elle est incluse dans une affectation de planification en liaison descendante ou est envoyée codée conjointement avec d'autres valeurs de correction spécifiques à l'équipement usager sur le canal physique de contrôle en liaison descendante (Physical Downlink Control Channel : PDCCH). La fonction g représente l'accumulation des valeurs de correction et PL détermine les pertes de propagation en liaison descendante.

$g(\Delta_j)$ est une fonction d'ajustement de la puissance de la sous-trame j .

➤ Contrôle de puissance sur le canal Physique partagé en liaison montante

Le canal physique partagé de liaison montante est le canal principal de la couche physique utilisé pour la transmission des données [Dat-Duong, 2014]. La puissance de transmission depuis une station mobile pour le canal PUSCH est définie par l'équation suivante [Mullner et al, 2009]:

$$P_{PUSCH} = \min \{ P_{\max}, 10 \log_{10}(M) + P_0 + \alpha PL + \Delta_{TF} + f(i) \} \quad (2.2)$$

P_{\max} : Puissance d'émission maximale autorisée à la station mobile. Les puissances de transmission autorisées à un terminal mobile LTE sont -40 dBm pour la puissance minimale et 23 dBm pour la puissance maximale.

M : Nombre de blocs de ressources physiques attribués à la station mobile.

P_0 : Paramètre spécifique à la cellule ou à la station mobile et mesuré en dBm / PRB. Il est utilisé pour contrôler SNR cible et est signalé par le contrôle des ressources radio. C'est la puissance par bloc de ressource physique.

α : Facteur de compensation de perte de chemin. C'est un paramètre spécifique à une cellule et ses valeurs sont dans l'intervalle [0 ; 1].

Il existe deux cas particuliers pour α [Müllner et al., 2009]. Lorsque $\alpha = 0$ il n'y a pas de compensation de perte de propagation, dans cette condition il n'y a pas de contrôle de puissance. Cela permet à toutes les stations mobiles d'émettre à leurs puissances maximales indépendamment des pertes de propagation. Lorsque $\alpha = 1$, Il s'agit d'une compensation totale de perte de propagation. On parle alors de contrôle de puissance conventionnel.

Dans le cas où $0 < \alpha < 1$, on a une compensation fractionnelle ou partielle des pertes de propagation, ce qui implique le contrôle de puissance fractionnel.

PL : Perte de propagation entre l'émetteur et le récepteur en liaison descendante calculée au niveau de la station mobile.

Δ_{TF} : Paramètre dépendant du type de modulation et de codage. Le type de modulation et de codage est spécifique à la cellule ou à la station mobile. Il est défini dans les spécifications 3GPP et dépend du format de transport.

$f(i)$ est une fonction de correction de puissance adaptative en boucle fermée. Elle définit le terme de correction spécifique close Loop power control (CLPC) avec augmentation ou diminution de puissance relative ou absolue en fonction de i .

i : représente le numéro de la sous-trame.

Le contrôle de puissance du PUSCH a deux composants, un composant en boucle ouverte et un composant en boucle fermée. Les deux composants fonctionnent consécutivement de manière asynchrone.

- **Contrôle de puissance en boucle fermée**

Le composant en boucle fermée permet d'améliorer les performances du système en compensant les variations rapides de canal [Tejaswi et al., 2013]. En boucle fermée, la station de base corrige la puissance émise par la station mobile, via des commandes TPC présentes dans chaque sous-trame. Cette régulation de puissance de boucle fermée vient en appoint au contrôle de puissance en boucle ouverte. Elle permet d'ajuster la puissance transmise plus finement afin de corriger des mesures erronées de pertes de propagation ou de prendre en compte la proximité d'une cellule adjacente. Pour un contrôle de puissance de PUSCH en boucle fermée, $f(i)$ est différente de 0 et est définie par l'équation suivante:

$$f(i) = f(i-1) + f(i-4) \quad (2.3)$$

$f(i)$ est une valeur corrective associée à la commande TPC envoyée par la voie descendante PDCCH (Physical Downlink Control Channel). Elle peut prendre typiquement une de ces quatre valeurs $\{-1, 0, 1, 3\}$. Ainsi, la station mobile effectue une correction de sa puissance à partir de la correction de la sous-trame précédente $f(i-1)$ et également d'une correction provenant de la station de base de quatre sous-frames précédents $f(i-4)$. Dans ces conditions, le mobile accumule donc des commandes d'augmentation et de diminution de puissance. Il continue d'accumuler des commandes, même lorsque le maximum ou le minimum de sa puissance d'émission est atteint. Ce phénomène n'affecte pas la puissance réelle transmise. En revanche, en l'absence de contre-mesures, cela entraînerait un certain temps de latence avant la diminution ou l'augmentation de la puissance émise. C'est pourquoi,

lorsque le mobile atteint sa puissance maximale ou minimale, l'accumulation des commandes positives ou négatives cessent. L'accumulation de commandes cesse également lorsque le mobile change de cellule.

- **Contrôle de puissance en boucle ouverte**

Dans le contrôle de puissance en boucle ouverte (OLPC), la puissance d'émission est définie au niveau de la station mobile à l'aide de paramètres et de mesures obtenues à partir de signaux envoyés par la station de base. Dans ce cas, aucun retour d'information n'est envoyé à la station mobile concernant la puissance à utiliser pour la transmission. La composante en boucle ouverte compense la perte de propagation et l'ombrage grâce à un contrôle de puissance fractionnaire permettant un compromis entre le débit au bord de la cellule et le débit moyen de la cellule [Tejaswi et al., 2013]. Le contrôle de puissance en boucle ouverte est souvent appelé contrôle de puissance fractionnaire (FPC) car elle permet à la station mobile de compenser partiellement la perte de propagation. Il est caractérisé par deux paramètres principaux [Marceau et al, 2011] : P_0 et α . En boucle ouverte, aucune correction adaptative n'est réalisée donc $f(i)=0$. La puissance transmise par le mobile est alors fonction des pertes de propagation estimées et des paramètres de la transmission.

2.2.4. Contrôle de puissance dans le réseau mobile de cinquième génération

Le mécanisme de contrôle de puissance dans la cinquième génération des réseaux mobiles en liaison montante est un ensemble d'algorithmes par lesquels la puissance d'émission pour différents canaux et signaux physiques est contrôlée afin de garantir un niveau de puissance approprié à la réception [Erik et al, 2018].

Ce mécanisme s'appuie sur le principe du contrôle de puissance existant dans le réseau mobile de quatrième génération, basé sur un mécanisme en boucle ouverte et en boucle fermée, en ajoutant quelques extensions supplémentaires au contrôle de puissance basée sur le faisceau [Erik et al, 2018].

Etant donné qu'en liaison montante les ressources sont limitées, la disponibilité de la puissance est signalée au réseau via le rapport sur la marge de puissance [Erik et al, 2018]. Il y'a deux raisons principales pour lesquelles la puissance doit être allouée le plus efficacement possible. Premièrement, la puissance d'émission par porteuse en liaison montante est limitée par la classe de puissance de la station mobile. Deuxièmement, il existe une puissance de

transmission totale maximale pour tous les opérateurs pour des raisons de réglementations [3GPP, 2018].

En plus, des commandes de contrôle de puissance fournies dans le cadre des attributions de programmation en liaisons descendante et montante, il existe la possibilité de transmettre une commande de contrôle de puissance en utilisant le format DCI 2-2 (Downlink Control Information). La principale motivation du format DCI 2-2 est la prise en charge du contrôle de puissance pour la planification semi-persistante. Dans ce cas, il n'y a pas d'attribution d'ordonnancement dynamique ou d'octroi d'ordonnancement qui peut inclure les informations de commande de puissance pour le PUCCH et le PUSCH, respectivement. Par conséquent, un autre mécanisme est nécessaire et le format DCI 2-2 répond à ce besoin [Erik et al, 2018].

2.3. Revue bibliographique sur le contrôle de puissance

Nous avons vu dans la section précédente que la puissance est une ressource très importante au maintien de la qualité de service dans un canal. Cependant cette ressource est très limitée et est soumise à des contraintes environnementales. Alors une bonne gestion de la puissance surtout dans les environnements urbains complexes est essentielle. Le contrôle de puissance est une fonctionnalité clé de la gestion des ressources radio dans les systèmes de communication radio mobile. Il est généralement utilisé pour fournir une puissance d'émission adéquate aux signaux désirés afin d'obtenir la qualité de service requise. Les travaux de recherche traitant la problématique du contrôle de puissance sont très variés et prolifiques. La plupart de ces travaux se sont intéressés aux problèmes liés à la capacité du réseau d'accès [Müllner et al., 2009] [Kemal, 2015], aux interférences [Kambiz et al., 2003] [Sami et al., 2009] [Chee et al., 2009] [Kemal, 2015] [Francisco et al., 2016], à l'optimisation de l'énergie [Chee et al., 2009] [Buenestado et al., 2017] et à l'amélioration de la couverture cellulaire [Fengming et al., 2013] [Kemal, 2015]. Les études concernant le contrôle de puissance dans les réseaux mobiles sont le plus souvent concentrées sur la liaison montante à cause de la durée de vie limitée des terminaux mobiles. Les travaux de [Chee et al., 2009] ont permis de minimiser la consommation d'énergie ainsi que certaines interférences dues aux signaux en liaison montante.

[Marceau et al., 2011] ont proposé une approche analytique pour l'étude du facteur de compensation du contrôle de puissance fractionnaire dans les réseaux LTE en environnements urbains. À partir de leur approche ils ont montré que le facteur de compensation (α) optimal dépend légèrement de la distance entre les stations de base, mais dépend fortement, du

coefficient des pertes de propagation. Leur approche ne prend pas en compte l'impact du bruit, de l'ombrage et d'autres paramètres du contrôle de puissance fractionnaire tels que la puissance d'émission ou de réception.

[Huang, 2013] a développé un algorithme de contrôle de puissance fractionnaire permettant d'atteindre un débit d'utilisateur élevé dans de grandes zones de la cellule.

La réutilisation des fréquences dans les réseaux mobiles engendre les problèmes d'interférences. Il existe deux types d'interférences : les interférences intracellulaires qui sont des interférences au sein d'une même cellule et les interférences intercellulaires qui sont les interférences provenant des cellules adjacentes. Le développement de la technologie d'accès Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) a permis de solutionner le problème lié aux interférences intracellulaires. Cependant, s'agissant des interférences intercellulaires des mécanismes de contrôle de puissance sont proposés pour y faire face. Des chercheurs tels que [Zhenwei et al., 2011], [Chen et al., 2015], [Sinan et al., 2016], [Tehseen et al., 2018] et [Amir et al., 2018] dans leurs travaux ont proposé des mécanismes de contrôle de puissance basés sur l'atténuation des interférences. [Francisco et al., 2016] ont utilisé la géométrie stochastique pour analyser un mécanisme de contrôle de puissance. Ils ont proposé une méthode qui maintient l'interférence générée par les stations mobiles à un seuil donné afin de réduire la consommation d'énergie moyenne et d'augmenter l'efficacité spectrale moyenne. Le mécanisme du contrôle de puissance en boucle ouverte est basé sur la détermination des valeurs optimales des paramètres P_0 et α en fonction des performances recherchées en termes de qualité de service. La détermination de ces paramètres consiste à trouver un compromis entre les stations mobiles en bordure et ceux au centre des cellules ainsi que le minimum entre la puissance d'émission maximale autorisée et la puissance d'émission de la station mobile.

Le principe du contrôle de puissance en boucle ouverte étant d'évaluer les pertes du canal afin de déterminer la puissance d'émission à laquelle le mobile doit émettre pour compenser les phénomènes d'évanouissement, la station de base va diffuser les paramètres P_0 et α . Ainsi à partir des valeurs de ces paramètres, et celles des pertes de propagation, le terminal mobile pourra déterminer son niveau de puissance d'émission. Les auteurs [Castellanos et al, 2008] et [Holma et al., 2009] ont montré que les valeurs de P_0 impactent toutes les stations mobiles de la cellule et à mesure que la valeur de α diminue, le débit des stations mobiles en bordure de cellule diminue alors que le débit moyen de la cellule augmente.

Chaque combinaison possible de P_0 et α définit un point de fonctionnement pour l'algorithme de contrôle de puissance fractionnaire ainsi qu'une certaine performance. Ce mécanisme est

basé sur le principe selon lequel le SINR cible est calculé en fonction des pertes de propagation.

[Fernández et al., 2016] ont développé une méthode d'approche d'auto-planification des paramètres du contrôle de puissance fractionnaire en évaluant la puissance nominale P_0 et la compensation de perte de propagation α .

[Yu et al., 2016] ont proposé un mécanisme de contrôle de puissance basé sur l'estimation des interférences en montrant qu'une valeur optimale de P_0 permet de fournir les meilleures performances en bordure des cellules. [Amir et al., 2016] ont évalué le contrôle de la puissance en boucle ouverte pour la liaison montante LTE d'un réseau de petites cellules. Ils ont adopté une approche analytique pour calculer la puissance d'émission à la station mobile, la puissance reçue par la station de base, les interférences dans le réseau et le rapport signal d'interférence plus bruit reçu. Ils ont montré que les valeurs de $\alpha = 1$ et $P_0 = -100$ dBm constituent le choix approprié pour obtenir les meilleures performances du réseau. Toutefois, si le réseau est limité par les interférences, l'opérateur peut choisir une valeur P_0 inférieure ou supérieure pour optimiser les performances du système. [Amir et al., 2018] poursuivent leurs études sur l'impact des paramètres du contrôle de puissance en boucle ouverte dans les microcellules homogènes et les environnements de réseaux hétérogènes composés de micro et macro-cellules. Ils ont prouvé que les valeurs de $\alpha = 1$ et $P_0 = -100$ dBm améliorent les performances du système pour les microcellules homogènes. Concernant les réseaux hétérogènes, les mêmes valeurs de $\alpha = 1$ et $P_0 = -100$ optimisent les performances des microcellules mais celles des macro-cellules sont améliorées par les valeurs de $\alpha = 0.8$ et $P_0 = -100$ dBm. Bien que les paramètres α et P_0 soient les principaux du contrôle de puissance en boucle ouverte, leurs valeurs peuvent cependant servir à améliorer les performances du contrôle de puissance en boucle fermée. C'est le cas de [Bilal et al., 2010] qui ont montré que les performances du contrôle de puissance en boucle fermée peuvent être améliorées avec la valeur de $\alpha = 0,8$. Selon eux, cette valeur permet de déclencher le rapport de marge de puissance à des intervalles périodiques et change les pertes de propagation de la station mobile. Dans le cas du contrôle de puissance en boucle fermée pour un réseau LTE, [Sonia et al., 2014] ont démontré que la valeur de $\alpha = 0.7$ minimise les interférences en liaison montante.

[Gururaj et al., 2012] ont développé un algorithme permettant d'atténuer les interférences en contrôlant les puissances des points d'accès dans un réseau de femto cellule. Pour se faire, Ils ont proposé à l'aide de techniques d'informatique souples deux méthodes pour régler la puissance de transmission des points d'accès : Le neuro-contrôleur et le contrôleur de logique

floue. Dans le but d'évaluer les performances globales d'un réseau multicellulaire, [Kaiming et al., 2014] ont proposé un algorithme sensible aux interférences à l'aide de la technique de la programmation de la somme des ratios. [Fengming et al., 2013] dans leurs travaux ont montré que le contrôle de puissance en liaison descendante peut équilibrer efficacement les performances, atténuer les interférences et optimiser la couverture cellulaire à partir d'une méthode d'auto-organisation au sein des femto cellules. De plus, [Buenestado et al., 2017] ont mis en place un algorithme d'auto-planification qui ajuste la puissance d'émission d'une station de base dans le système cellule par cellule. Cet algorithme permet d'améliorer l'efficacité spectrale globale du réseau en liaison descendante en réduisant la puissance d'émission des cellules spécifiques afin de diminuer les problèmes d'interférences.

Le mécanisme de contrôle de puissance développé par [Nie et al., 2007] est basé sur la théorie des jeux. Leur méthode est utile dans le cadre des réseaux cognitifs et contient une fonction d'utilité qui prend en compte les interférences provenant des nœuds utilisant le même canal radio. Ils ont montré que le contrôle de puissance utilisé conjointement avec une procédure optimisée de sélection de canal est la meilleure solution en termes de débit, de consommation d'énergie et d'équité entre utilisateurs. Le problème de contrôle de puissance en liaisons montantes dans un réseau DS-CDMA a été étudié par [Farhad et al., 2005]. Ils ont proposé que les utilisateurs du réseau soient autorisés à choisir leurs puissances d'émission afin de maximiser leurs fonctions d'utilité, qui permet de mesurer le nombre de bits transmis par unité d'énergie. [Asenov et al., 2013] ont utilisé une approche heuristique du contrôle de puissance pour améliorer les performances du réseau LTE en considérant les préférences des utilisateurs ayant des propriétés similaires dans une couverture cellulaire en liaison montante. [Jerzy, 2017] a dans ses travaux proposé un algorithme pour réduire la puissance d'émission dans les réseaux femto cellules LTE cognitif. Cet algorithme minimise la puissance d'émission dans chaque femto cellule, tout en satisfaisant un nombre maximum d'utilisateurs avec des exigences de qualité de service.

Outre les problèmes d'interférence, le contrôle de puissance permet d'améliorer la couverture cellulaire des réseaux mobiles. La couverture cellulaire peut être évaluée à partir des formules de pertes de propagation en visibilité non directe en considérant la distance entre l'émetteur et le récepteur et certains paramètres du réseau [Sivaraja et al., 2016]. Généralement, gérer le problème de couverture cellulaire consiste à optimiser les modèles de propagation qui constituent des outils essentiels à la planification radio dans les réseaux mobiles. Ils permettent d'évaluer la puissance du signal reçu par un terminal mobile ainsi que les rayons

de couvertures et d'en déduire le nombre de cellules nécessaires pour assurer la couverture d'une zone donnée [Deussom et al., 2015]. Ces modèles permettent de caractériser les atténuations subies par un signal entre l'émetteur et le récepteur. Ils sont fortement spécifiques à l'environnement (urbain, suburbain, rural) et peuvent varier considérablement en fonction du terrain, de la fréquence de fonctionnement, la vitesse du terminal mobile, et d'autres facteurs dynamiques [Yuvraj, 2012]. Les performances du contrôle de puissance en liaison montante dépendent également des pertes de propagation [Yu et al., 2016], de la fréquence de fonctionnement, du type de cellule et du rayon de la cellule. Alors en minimisant les pertes de propagation, une meilleure signalisation peut être fournie au récepteur et cela peut aider à estimer l'interférence entre les cellules [Priti et al., 2017].

[Jiayin et al., 2012] ont traité le problème de détermination d'une métrique de pertes de propagation de liaison montante appropriée pour les réseaux radio cellulaires hétérogènes avec un fonctionnement multipoint coordonné. Ils ont introduit le concept de pertes de propagation virtuelle lorsque le signal de liaison montante est reçu conjointement par plusieurs points séparés géographiquement. Ils ont développé une méthode pour calculer cette métrique au niveau de la station de base d'un système cellulaire LTE, permettant ainsi de corriger l'estimation erronée faite aux terminaux mobiles avec une simple méthode de rétroaction en boucle fermée.

Nous présentons dans les sous-sections suivantes quelques algorithmes de contrôle de puissance à savoir : l'allocation de puissance, le contrôle de puissance transmise et le contrôle de puissance basée sur les pertes de propagation.

2.3.1 Allocation de puissance

L'allocation de puissance au niveau des terminaux est un défi à relever lors de la conception des protocoles de communication. Elle est basée sur le développement d'algorithmes efficaces d'allocation de puissance adaptés au système et à la nature de l'environnement.

Les algorithmes d'allocation de puissance sont mis en œuvre par les stations de base et mobiles afin de déterminer la puissance de chaque sous-porteuse et d'améliorer les performances du système. Ces algorithmes doivent aussi prendre en compte les différents problèmes liés aux interférences. Un nombre important d'algorithmes d'allocation et de contrôle de puissance sont présents dans la littérature [Foschini et al., 1993], [Paulraj et al., 2003], [Andrea, 2005].

[EL Mahdi, 2014] dans ses travaux, propose un algorithme d'allocation de puissance aux différents usagers, basé sur une approche gloutonne pour améliorer le débit du système.

[Sami et al., 2009] présentent deux algorithmes d'allocation de puissance pour résoudre le problème d'interférences au sein des réseaux radio cognitifs basés sur la technologie OFDMA.

[Kambiz et al., 2003] ont développé un nouvel algorithme de contrôle de puissance prédictif en se fondant sur un schéma DCPA (Dynamic Channel and Power Allocation). Cet algorithme permet de gérer l'allocation des ressources de façon optimale dans des environnements non uniformes et stationnaires à cause des besoins de capacité toujours croissants dans les systèmes radio mobiles.

Dans la liaison montante 3GPP LTE-Advanced, les contraintes suivantes sur le sous-canal et l'allocation de puissance doivent être satisfaites [Xudong et al., 2013] :

- chaque sous-canal ne peut être alloué qu'à une seule station mobile dans chaque slot ;
- la puissance d'émission totale d'une station mobile sur tous les sous-canaux alloués ne doit pas dépasser le niveau de puissance maximum admissible par sous canal;
- la puissance d'émission d'une station mobile sur chaque sous-canal doit être inférieure à un certain niveau de puissance de crête [Ian et al., 2009] ;
- la puissance d'émission sur tous les sous-canaux alloués à un UE doit être constante.

Une allocation de puissance égale sur les sous-canaux similaire aux normes 3GPP LTE-Advanced permet de préserver un faible rapport entre la puissance de crête et la puissance moyenne [Ian et al., 2009], [Zhong et al., 2011]. Ainsi, l'allocation de puissance est répartie en fonction du nombre d'utilisateurs présents dans la cellule. Cela se traduit ainsi par l'équation 2.4 suivante :

$$P_i = \frac{P^k}{\sum_{j \in k} U_j} \tag{2.4}$$

Tel que $\sum P_i \leq P^k$

Avec :

P_i : Puissance d'émission d'un utilisateur i ,

j représente un utilisateur quelconque présent dans la cellule serveuse k .

P^k : Puissance disponible dans la cellule serveuse k ,

U_j : Nombre d'utilisateurs présents dans la cellule serveuse k

Si nous considérons :

N_{RB_i} : le nombre de ressources blocs allouées à un utilisateur U_i avec $1 \leq N_{RB_i}$

M : le nombre total de bloc de ressource bloc, $\sum N_{RB_i} = M$

ΔB : la largeur de bande. Pour les réseaux LTE $M = 5\Delta B$

L'objectif de l'allocation de puissance étant d'optimiser les ressources de canal, alors le problème d'allocation de puissance peut être formulé de la manière suivante :

$$\min \sum P_i$$

Tel que

$$\sum N_{RB_i} = M$$

Ainsi à partir des équations précédentes, nous proposons l'algorithme d'allocation de puissance suivante :

- 1 Initialiser N_{RB_i} à 1 pour tous les utilisateurs
- 2 Pour chaque utilisateur U_i , déterminer la puissance d'émission P_i lorsque N_{RB_i} est incrémenté par 1
- 3 Mettre à jour $N_{RB_i}^* \leftarrow N_{RB_{i+1}}$
- 4 Si $\sum N_{RB_i} \leq M$ alors retourner à l'étape 2

2.3.2 Algorithme de contrôle de puissance de transmission

L'algorithme de contrôle de puissance de transmission (TPC) permet à la station mobile d'ajuster avec précision sa puissance d'émission en liaison montante sur la base des valeurs de corrections transmises par la station de base. La commande TPC est calculée sur la base du rapport signal sur interférence et bruit en boucle fermée et du SINR reçu au niveau de la station mobile. Lorsque le SINR reçu par la station base est inférieur au SINR souhaité (ou cible), une commande TPC est transmise à la station mobile pour demander une augmentation de sa puissance. Sinon, une diminution de sa puissance lui est demandée [Weilian et al., 2017]. Dans les réseaux mobiles, l'indicateur de performance de base est le SINR, car il est un moyen de mesure de la qualité de transmission [Dat-Duong, 2014]. L'algorithme TPC est l'algorithme le plus utilisé en télécommunication radio mobile. [Dat-Duong, 2014] a fait une

étude détaillée de cet algorithme dans ses travaux. La figure 2.1 présente un mécanisme de génération de la commande TPC par la station de base [Sonia et al, 2014].

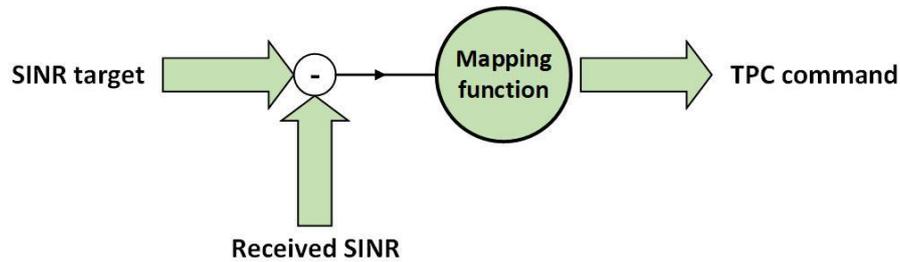


Figure 2. 1: Génération de la commande TPC par la station de base

La fonction de mappage calcule la différence entre le $SINR_{seuil}$ et le $SINR_{reçu}$. La station de base va comparer $SINR_{seuil}$ et le $SINR_{reçu}$ et va transmettre les valeurs de commande TPC vers la station mobile. Pour les réseaux mobiles de quatrième génération, les commandes TPC peuvent prendre les valeurs $\{-1, 0, 1, 3\}$ [Dat-Duong, 2014], [Sonia et al, 2014]. Considérons $F(n)$ la fonction de mappage et $\Delta(n)$ la valeur de commande TPC ou de correction de puissance.

$F(n) = SINR_{reçu} - SINR_{seuil}$. L'algorithme peut s'écrire :

```

si  $F(n) \geq 2$  alors
     $\Delta(n) = -1$  ;
sinon
    si  $1 \leq F(n) < 2$  alors
         $\Delta(n) = 0$  ;
    sinon
        si  $0 \leq F(n) < 1$  alors
             $\Delta(n) = 1$  ;
        sinon
            si  $F(n) < 0$  alors
                 $\Delta(n) = 3$  ;
            sinon
                fin
        fin
    fin
fin
  
```

Cet algorithme, développé par [Müllner et al., 2009] ne prend pas en compte le retard dû au temps de propagation des ondes radio ni au temps de calcul du processeur.

Cependant [Dat-Duong, 2014] a proposé un algorithme TPC qui résout le problème de retard dans la commande. Il considère le retard sur les incréments de puissance aux instants précédents en comparant dans un premier temps le $SINR_{seuil}$ et le $SINR_{reçu}$ afin de prédéterminer l'incrément de puissance $\Delta(n)$. Cette étape est la même que celle du premier algorithme. Ensuite, il compare la valeur de l'incrément prédéterminé avec la somme des incréments aux instants précédents $\sum_{i=1}^{K_{PUSCH}} \Delta(n-i)$ et décide de la valeur finale $\Delta(n)$ à envoyer à la station mobile.

Si $\Delta(n) > \sum_{i=1}^{K_{PUSCH}} \Delta(n-i)$ alors $\Delta(n) = \Delta(n)$, si $\Delta(n) = \sum_{i=1}^{K_{PUSCH}} \Delta(n-i)$ alors $\Delta(n) = 0$,

si $\Delta(n) < \sum_{i=1}^{K_{PUSCH}} \Delta(n-i)$ alors $\Delta(n) = -1$.

$K_{PUSCH} \in \{4, \dots, 7\}$ est le retard en liaison descendante, il correspond au temps de propagation et de calcul du processeur [Dat-Duong, 2014]. Cet algorithme se basant sur l'algorithme précédent peut être écrit de la manière suivante :

```
si F(n) ≥ 2 alors
|
|   Δ(n) = -1 ;
sinon
|
|   si 1 ≤ F(n) < 2 alors
|   |
|   |   Δ(n) = 0 ;
|   sinon
|   |
|   |   si 0 ≤ F(n) < 1 alors
|   |   |
|   |   |   Δ(n) = 1 ;
|   |   sinon
|   |   |
|   |   |   si F(n) < 0 alors
|   |   |   |
|   |   |   |   Δ(n) = 3 ;
|   |   |   sinon
|   |   |   fin
|   |   fin
|   fin
fin

fin

si Δ(n) > ∑i=1KPUSCH Δ(n - i) alors
|
|   Δ(n) = Δ(n) ;
Sinon
|
|   Si Δ(n) = ∑i=1KPUSCH Δ(n - i) alors
|   |
|   |   Δ(n) = 0 ;
|   Sinon
|   |
|   |   Si Δ(n) < ∑i=1KPUSCH Δ(n - i) alors
|   |   |
|   |   |   Δ(n) = -1 ;
|   |   Sinon
|   |   Fin
|   Fin
Fin

Fin
```

2.3.3. Algorithme de contrôle de puissance basé sur les pertes de propagation

Les algorithmes de contrôle de puissance basés sur les pertes de propagation prennent en compte les atténuations du canal de propagation. Ces atténuations ou pertes de propagation peuvent être calculées en décibels (dB) comme la différence entre la puissance de transmission (P_{TX}) et la puissance de réception (P_{RX})

$$PL = P_{TX} - P_{RX} \quad (2.5)$$

Ces algorithmes sont basés sur un schéma de contrôle de puissance fractionnaire qui compense partiellement les pertes de propagation. Chaque station mobile estime sa perte de propagation en fonction de la puissance du signal qu'elle reçoit de la station de base. Ce qui signifie qu'elles n'ont pas la même exigence en termes de SINR [Shan et al., 2010]. Il est donc important de fixer une valeur de $SINR_{cible}$ basée sur ces pertes de propagation afin d'évaluer la qualité du canal de propagation de chacune d'elles. Cela implique que la station mobile avec des pertes de propagation importantes aura un $SINR_{cible}$ faible et vice versa. Le $SINR_{cible}$ peut être exprimé en fonction de la perte de propagation par l'équation suivante :

$$SINR_{cible} = f(PL) \quad (2.6)$$

Le $SINR_{cible}$ est déterminé par la station de base à partir de la marge de puissance (P_m). La marge de puissance est un mécanisme par lequel le terminal mobile est configuré pour fournir régulièrement à la station de base, des rapports sur sa puissance. Elle est déterminée par la différence entre la puissance d'émission de la station mobile (P_{TX}) et sa puissance d'émission maximale (P_{max}) [Foschini and Zoran, 1993]:

$$P_m \text{ (dBm)} = P_{max} - P_{TX} \quad (2.7)$$

Ainsi connaissant les pertes de propagation et les pertes maximales (PL_{max}), le $SINR_{cible}$ est calculé à partir de l'équation suivante :

$$SINR_{cible} = \begin{cases} (\alpha - 1)(PL - PL_{max}) + SINR_{seuil} & \text{si } PL \leq PL_{max} \\ SINR_{seuil} & \text{si } PL > PL_{max} \end{cases} \quad (2.8)$$

PL_{max} constitue les pertes de propagation, à partir desquelles les utilisateurs commencent à utiliser la puissance maximale d'émission.

2.4. Canal de propagation radio mobile

Le canal de propagation radio mobile est l'espace dans lequel le signal émis se propage en subissant les lois des ondes électromagnétiques jusqu'à un récepteur. Une connaissance de la façon dont se propage le signal dans un canal hertzien est indispensable pour connaître les performances d'un tel système.

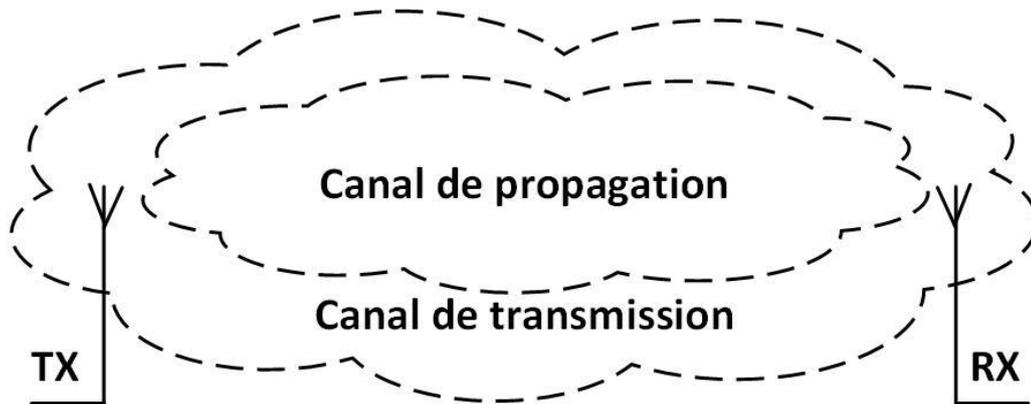


Figure 2. 2: Canal de transmission et de propagation

Il est important de différencier le canal de propagation du canal de transmission.

Le canal de transmission peut être considéré comme un quadripôle formé par les deux extrémités de la liaison radio [Pajusco et al., 2009]. Il inclue le diagramme de rayonnement et les différentes caractéristiques des antennes émettrices (TX) et réceptrices (RX) utilisées.

Le canal de propagation est un concept plus abstrait car ses caractéristiques ne peuvent pas être directement mesurées. Il peut être simplement défini comme l'environnement de propagation du signal et représente les différentes transformations subies par les ondes électromagnétiques dans leur processus de propagation. La figure 2.2 illustre graphiquement ces définitions.

2.4.1. Propagation en espace libre

Lors d'une communication radio mobile, le signal émis est transporté par une onde électromagnétique qui se propage dans l'air. En absence des obstacles, c'est-à-dire en espace libre, le signal ou l'onde va se propager entre l'émetteur et le récepteur en ligne directe. Ainsi, la puissance du signal reçue (P_r) sera fonction du gain de l'antenne émettrice G_e et réceptrice G_r , de la distance de séparation d et de la longueur d'onde λ [Jankiraman, 2004]. Selon l'équation de FRIIS, la puissance reçue en Watt s'écrit :

$$P_r = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.9)$$

2.4.2. Propagation par multiples trajets

Le cas idéal de la propagation des ondes est celui en espace libre. Cependant, en environnements urbains, l'onde émise dans le canal de propagation va emprunter plusieurs chemins à cause des obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Les divers obstacles dans le canal de propagation feront que l'onde émise va subir des phénomènes de diffraction, de réflexion et de diffusion. Ces phénomènes physiques favorisent la propagation multi-trajets qui est le résultat des répliques du signal qui arrivent au récepteur à des instants différents. Les ondes émises vont suivre plusieurs trajets et chaque trajet sera affecté d'une atténuation, d'un retard lié à la longueur du trajet et d'un déphasage différent. Le signal reçu sera alors composé d'une somme de plusieurs répliques.

Dans les réseaux de communications mobiles, la complexité de la simulation d'une liaison radio mobile provient du caractère multi trajets du canal de propagation. La figure 2.3 représente une illustration de différents chemins que peut emprunter un signal entre une station de base et l'équipement mobile. Les différents échos engendrent, au niveau du récepteur, des interférences constructives ou destructives qui peuvent conduire à une détérioration importante du signal reçu [Tesserault,2008].



Figure 2. 3: Canal de propagation multi-trajets dans un environnement urbain

Deux cas de figure sont distingués dans les propagations multi-trajets. Le premier est le cas où il n'y a pas de ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur (figure 2.4). Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude d'évanouissement du signal total reçue suit la loi de Rayleigh.

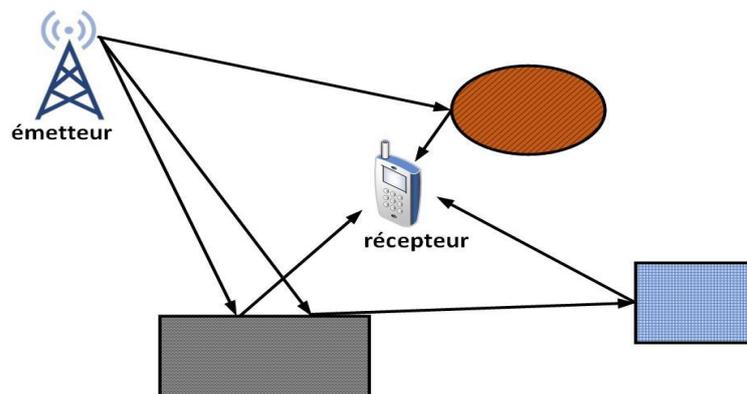


Figure 2. 4: Propagation multi-trajet sans visibilité directe

La distribution de Rayleigh correspond à un cas idéal dans lequel le signal complexe reçu est composé de trajets indirects (visibilité non directe NLOS : Non line of sight) ayant des amplitudes et phases aléatoires, indépendantes et uniformément distribuées. La loi de Rayleigh est définie par l'équation suivante [Alaa, 2011]:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.10)$$

r Représente le signal complexe reçu, $r = x + iy$ et σ est l'écart type de la partie réelle (x) ou la partie imaginaire (y) du signal complexe reçu.

Le second cas contient un trajet en ligne vue directe. L'amplitude d'évanouissement est alors caractérisée par la distribution de Rice.

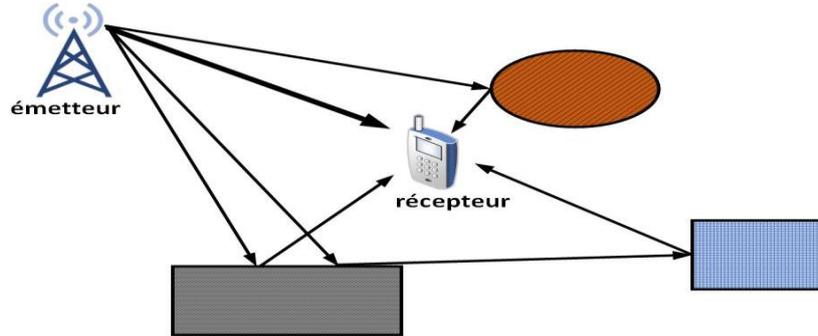


Figure 2. 5: Propagation multi-trajets avec visibilité directe

Comme le montre la figure 2.5 ci-dessus, la distribution de Rice intervient dans un canal de propagation caractérisé par plusieurs trajets indirects et un trajet direct (visibilité directe LOS :Line of sight). Dans ce cas, la densité de probabilité du signal complexe reçu obéit à la

distribution de Rice définie par :

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + r_d^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{r.r_d}{\sigma^2}\right) \quad r \text{ et } r_d \geq 0 \quad (2.11)$$

Avec r_d l'amplitude du trajet direct et I_0 représente la fonction de Bessel modifiée de première espèce et d'ordre zéro.

2.4.3. Mécanismes de propagation

Lorsque la station de base et le terminal mobile sont en ligne de vue non directe, le signal émis va subir des atténuations à cause des obstacles des phénomènes de réflexion, de diffraction, de diffusion avant son arrivée au récepteur.

2.4.3.1. La réflexion

Le phénomène de réflexion se produit lors de l'incidence de l'onde électromagnétique sur un matériau ou sur une surface de très grandes dimensions par rapport à sa longueur d'onde. Le

signal ne sera donc ni absorbé ni transmis, il subit alors une réflexion. A la rencontre de l'obstacle, l'onde émise est alors renvoyée dans la direction de la source. Lorsque l'onde directe et l'onde réfléchie sont en phase à la réception, la qualité de la réception du signal est bonne, cependant si les deux ondes sont en opposition de phase, le signal reçu est nul ce qui dégrade la qualité de la communication. Si le récepteur n'est pas en mouvement, la communication pourrait être interrompue. Le phénomène de réflexion peut être perçu sous deux aspects : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse.

- **La réflexion spéculaire**

La réflexion spéculaire se produit lorsque, pour des surfaces lisses ou presque lisses, l'angle d'incidence α est égal à l'angle de réflexion β .

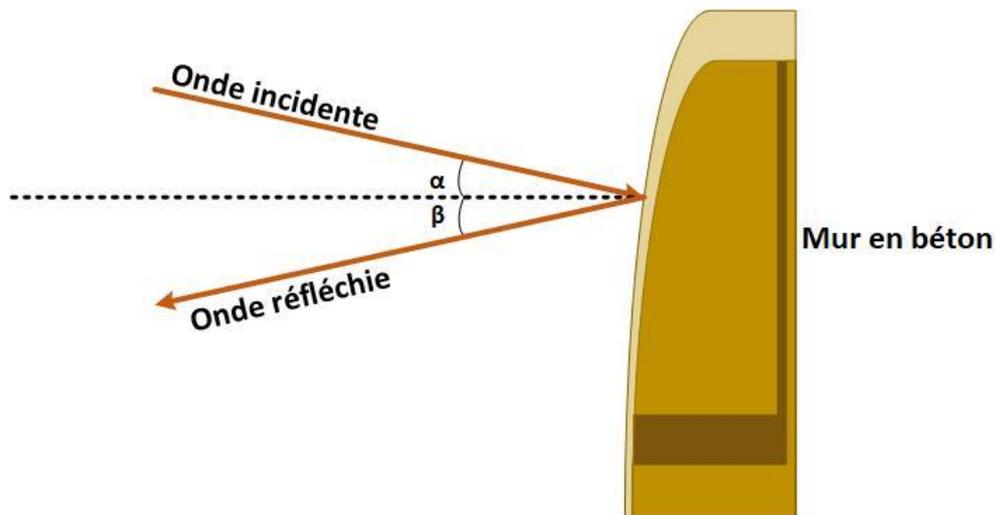


Figure 2. 6: Réflexion spéculaire

A cause de la différence de marche entre les ondes direct et réfléchi, un décalage temporel τ est observé entre les deux types de champ à leur réception en un même point. Ce décalage temporel n'est pas sans effet, puisqu'il occasionne un déphasage Ψ .

L'onde résultante des trajets direct et réfléchi dépend de la différence de marche, des caractéristiques de la surface réfléchissante et de l'angle d'incidence. Le degré de la réflexion peut être défini par un coefficient ρ de réflexion qui représente le rapport du module de l'onde réfléchie sur celui de l'onde directe.

Supposons le cas de la réflexion spéculaire sur le toit du bâtiment abritant les bureaux d'une université située entre des immeubles.

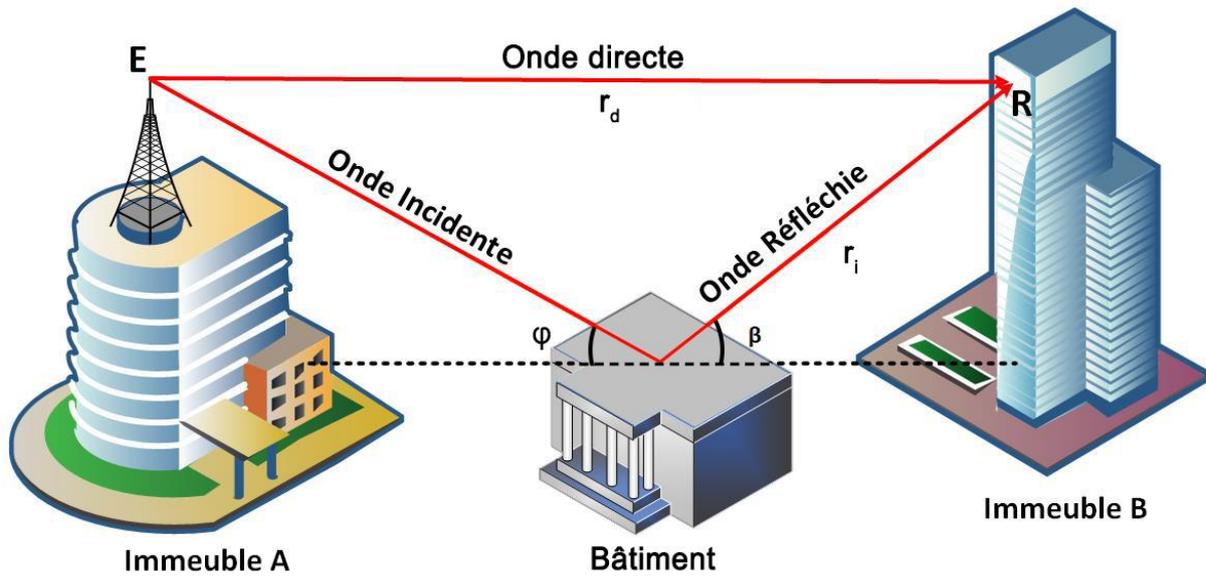


Figure 2. 7: Réflexion spéculaire sur le toit d'un bâtiment

Soit r_i le parcours de l'onde indirecte et r_d celui de l'onde directe on a :

- La différence de marche des deux chemins Δd est

$$\Delta d = r_i - r_d \quad (2.12)$$

- Le décalage temporel τ (s) correspondant est déterminé par :

$$\tau = \frac{\Delta d}{c} = \frac{r_i - r_d}{c} \quad (2.13)$$

- Le déphasage induit à la réception de l'onde est :

$$\Psi = \frac{2\pi\tau}{T} = \frac{2\pi}{T} * \frac{r_i - r_d}{c} = \frac{2\pi(r_i - r_d)}{\lambda} \quad (2.14)$$

Avec ;

T : la période exprimée en seconde (s).

c : la vitesse de l'onde électromagnétique dans le vide. Elle est égale à $3 \cdot 10^8$ m/s

λ : longueur d'onde exprimée en mètre (m)

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle, une partie de l'onde est réfléchie, une autre partie est transmise et une infime partie est absorbée. La proportion de chaque partie dépend de la nature de l'interface entre les deux milieux et de l'homogénéité du nouveau milieu.

Dans les supports de transmissions physiques (câble coaxial, paire torsadée), le coefficient de réflexion (ρ) est le rapport entre le niveau de tension du signal réfléchi sur celui du signal incident. Cependant, en espace libre, le coefficient de réflexion est un multiplicateur entre le

rapport des modules des champs réfléchis et incidents et celui de la longueur d'onde du rayon indirect et du rayon direct. Etant donné qu'une onde est constituée en tout point d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{H} alors le coefficient peut être calculé à partir de l'équation (2.15) suivante:

$$\rho = \frac{E_i}{E_d} * \frac{r_i}{r_d} \quad (2.15)$$

- **la réflexion diffuse**

Le phénomène de réflexion diffuse se produit lorsque l'onde incidente rencontre les obstacles dont les surfaces ne sont pas planes. Les surfaces de ces obstacles présentent des irrégularités de divers ordres dont les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde. Ce genre d'obstacles n'occasionne pas une simple réflexion mais un ensemble d'ondelettes diffusées dans diverses directions telle que le montre la figure 2.8 ci-dessous.

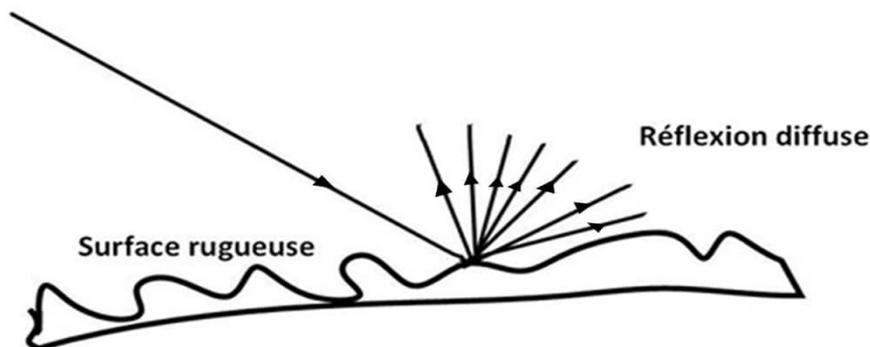


Figure 2. 8: Réflexion diffuse des ondes sur un terrain rugueux

Les réflexions entraînent des conséquences importantes dans les zones urbanisées. Elles peuvent favoriser l'augmentation ou la diminution du niveau du signal reçu. Les réflexions sur les bâtiments peuvent se faire sous tous les angles d'incidence. En règle générale, on n'obtient pas une bonne approximation si l'on considère que la surface est parfaitement réfléchissante. En effet, dans la construction des bâtiments, l'on utilise des matériaux qui sont mélangés ou placés très près les uns des autres (par exemple, béton armé), ou des matériaux creux (par exemple, des blocs de béton). Ainsi les surfaces des bâtiments peuvent être

suffisamment irrégulières pour réduire la réflexion spéculaire et diffuser les ondes. En général, on ne connaît pas dans le détail les propriétés des murs des bâtiments et l'on peut par conséquent utiliser des valeurs effectives, déterminées empiriquement. La figure 2.9 présente les réflexions sur les bâtiments.

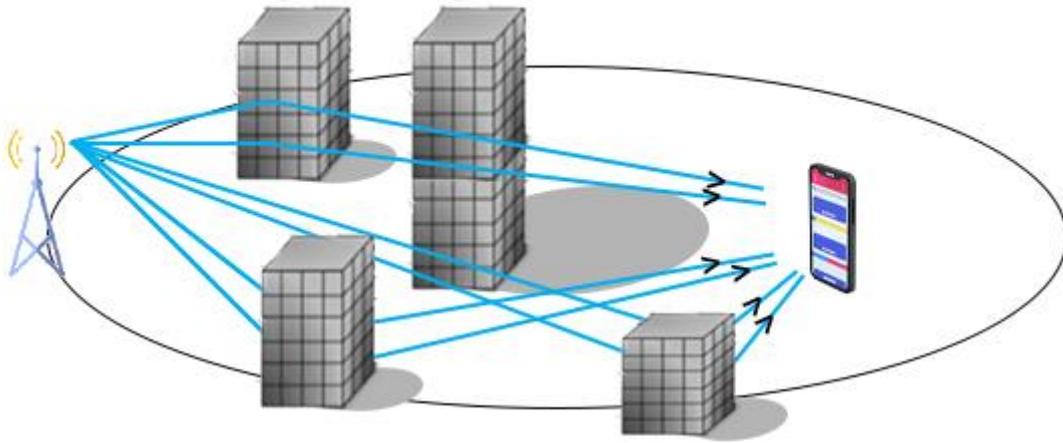


Figure 2. 9: Réflexions sur des bâtiments

2.4.3.2. Diffraction

Le phénomène de diffraction se produit lorsqu'une onde rencontre les arrêtes d'obstacles (toit, coin d'un bâtiment, gros arbre) de grandes dimensions ou des obstacles de petites dimensions par rapport à la longueur d'onde [Pagani,2005]. La rencontre de l'obstacle, entraîne une déviation du signal qui provoque l'éparpillement du rayonnement. Ce mécanisme se manifeste par la génération d'ondes secondaires derrière l'obstacle et doit nécessairement être pris en compte dans la prédiction. La diffraction permet aux ondes, quelles qu'elles soient, de se propager autour des obstacles et est le plus souvent, le mécanisme de propagation le plus important sur les trajets semés d'obstacles [UIT, 2002]. Ce phénomène est le principal acteur des pertes associées à la topographie du terrain. Au-delà de la visibilité directe et dans les conditions normales, il y a généralement prédominance des effets de diffraction chaque fois qu'on a affaire à des niveaux de signal élevés [ANFR, 2015]. Les phénomènes de diffraction sont présentés dans la figure 2.10.

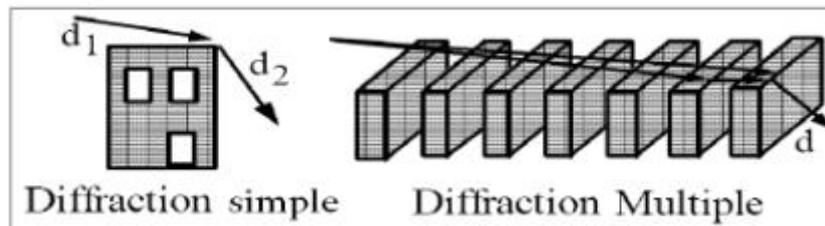


Figure 2. 10: Diffraction des ondes [Christine, 2005]

Sur la figure 2.10, d_1 représente l'onde émise, d_2 représente l'onde ayant subi une seule diffraction et d , l'onde ayant subi plusieurs diffractions.

Pour les réseaux mobiles, si la diffraction multiple peut permettre de couvrir une zone d'immeubles, elle dégrade souvent la qualité de la réception à cause des déphasages possibles.

2.4.3.3. Diffusion

Le mécanisme de diffusion se produit lorsque le signal émis rencontre un obstacle dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde. La longueur de l'onde dépend de la fréquence d'émission. Plus la fréquence d'émission est élevée, moins la longueur de l'onde sera grande. Lors de la diffusion, l'onde se trouve diffusée dans toutes les directions. C'est la réémission de l'énergie électromagnétique dans différentes directions à la suite de la rencontre d'une bordure.

2.4.4. Variations du canal de propagation

Dans un environnement urbain, les obstacles (bâtiments, immeubles, les véhicules et bien d'autres) de différentes formes géométriques et de diverses caractéristiques perturbent la propagation du signal dans le canal radio mobile. Ces perturbations créant des effets d'évanouissement (fading), d'ombrage (shadowing) et de pertes de propagation (pathloss) se traduisent par des fluctuations de la puissance du signal reçu en fonction de la distance.

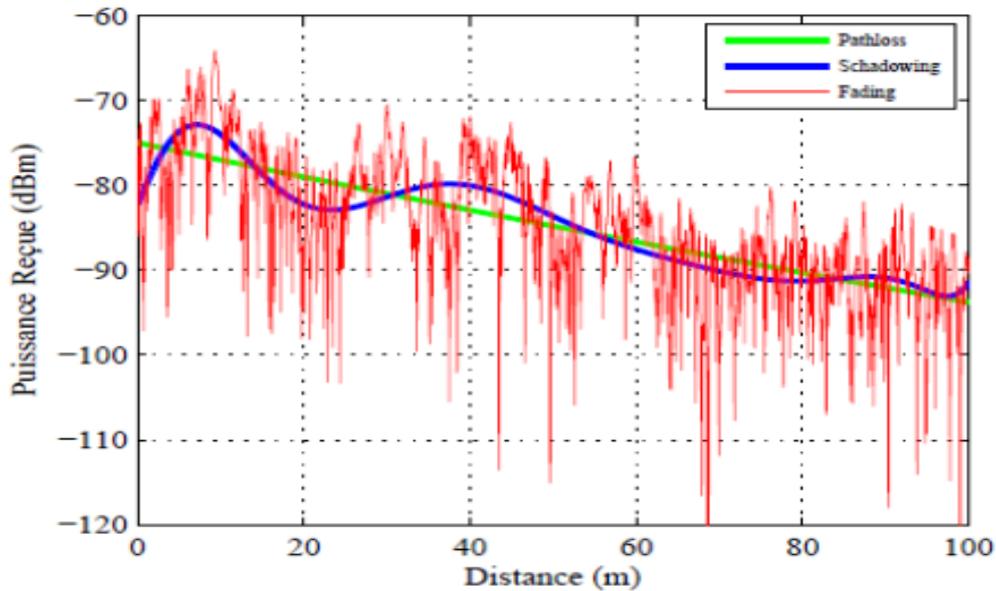


Figure 2. 11: Différents types d'atténuation dans un canal de propagation [Roxana, 2010]

✓ **Effet d'évanouissement du signal ou fading**

L'effet d'évanouissement ou fading est la rupture momentanée d'un signal par un obstacle. Ce phénomène auquel sont généralement soumis les communications mobiles, crée des variations rapides du signal dans le canal. Ces perturbations peuvent être causées par le trafic des véhicules, des piétons et la densité des arbres et bâtiments entre l'émetteur et le récepteur.

✓ **Effet de masque ou shadowing**

L'effet de masque est l'atténuation de puissance des ondes radio mobiles en fonction de la nature du matériau traversé. Cette atténuation est due à la présence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur.

✓ **La perte de propagation ou pathloss**

La perte de propagation est l'affaiblissement de la puissance ou la réduction de la densité de puissance d'une onde radio mobile lors de sa propagation. Elle est due non seulement à la dispersion de la puissance, mais également aux obstacles rencontrés. La perte de propagation représente le paramètre couramment utilisé pour caractériser le signal moyen local dans les canaux mobiles car il est un élément majeur dans l'analyse et la conception du bilan de liaison d'un système de télécommunication radio mobile.

2.4.5. Paramètres de propagation dans un canal radio mobile

2.4.5.1. Effet Doppler

L'effet Doppler est dû au déplacement du mobile dans le canal de propagation radio. Ce mouvement va introduire une variation de fréquence (longueur d'onde) dans le contenu spectral du signal reçu. Ce décalage de fréquence, dépend de la vitesse du mobile, de la longueur d'onde du signal et de l'angle d'incidence du trajet par rapport à la trajectoire de déplacement. L'effet Doppler est déterminé par l'équation 2.16 ci-dessous:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos(\varphi) \quad (2.16)$$

Avec v la vitesse de déplacement du récepteur mobile, λ est la longueur d'onde et φ est l'angle d'incidence par rapport à la trajectoire de déplacement.

2.4.5.2. Etalement de retard maximal

L'étalement des retards maximaux correspond à l'intervalle de temps écoulé, entre l'arrivée au récepteur du premier et du dernier trajet du signal, issus de la même impulsion à l'émission. Il est noté τ_{max} et est déterminé à partir de la fonction d'étalement des retards. Ainsi, l'étude du moment d'ordre deux de la variable aléatoire $\tau \in [0; \tau_{max}]$ déterminera la dispersion moyenne des retards, notée σ_τ . Dans le domaine fréquentiel, cette dispersion temporelle des retards se caractérise par une corrélation sur une bande de fréquence.

2.4.5.3. Bande de cohérence

La bande de cohérence est une mesure statistique qui quantifie la sélectivité en fréquence du canal. Elle permet de déterminer la bande à l'intérieur de laquelle le canal est considéré non sélectif en fréquence et laisse passer toutes les composantes spectrales avec approximativement le même gain et une phase linéaire. La mesure de la bande de cohérence B_c permet de quantifier le degré de corrélation entre deux fréquences distinctes. Ainsi, si l'écart fréquentiel entre deux signaux émis est supérieur à la bande de cohérence, alors les signaux reçus sont considérés comme décorrélés. L'expression de la bande de cohérence B_c est donnée par l'équation 2.17:

$$B_c = \frac{1}{\tau_m} \quad (2.17)$$

Avec τ_m qui représente l'étalement de la réponse impulsionnelle du canal.

2.4.5.4. Temps de cohérence

Le temps de cohérence représente une mesure de la vitesse à laquelle le canal fluctue. Il est possible, avec la connaissance de l'étalement Doppler maximal, d'approximer le temps de cohérence du canal.

$$T_C = \frac{1}{F_m} \quad (2.18)$$

F_m : Etalement Doppler maximal, il est considéré comme le taux d'évanouissement typique du canal.

T_C a été décrit comme étant le temps en dessous duquel la réponse du canal est essentiellement invariable.

2.4.6. Estimation d'un canal de propagation radio mobile.

La modélisation d'un canal radio permet de déterminer son comportement à partir du calcul et l'estimation de ses paramètres statistiques d'évanouissement. Ces paramètres sont dérivés de la conception et du modèle d'évaluation des performances du système de communication radio mobile. En effet un canal de propagation radio mobile peut être modélisé à partir des pertes de propagation du signal et est soit variant soit invariant. Les modèles de canaux sont classés en deux grandes catégories : les modèles déterministes ou analytiques développés à partir des mesures empiriques des signaux reçus et les modèles stochastiques qui traitent le canal comme un système variant et évolutif dans le temps. Un canal de propagation variant est représenté par un filtre linéaire ayant pour réponse impulsionnelle $h(\tau, t)$ [Hamid, 2005]. La réponse impulsionnelle du canal délivre des informations complexes et complètes relatives à l'impact du canal sur un signal radio, telles que l'amplitude et la phase du signal. C'est donc le paramètre idéal pour caractériser le canal. Dans le cas d'un canal invariant, la réponse impulsionnelle du canal ne dépend pas du temps t et est caractérisée par $h(\tau)$ [Van, 2005]. Si nous considérons des antennes isotropes, en supposant que le canal de propagation varie dans le temps et comporte un nombre fini de plusieurs trajets, la réponse impulsionnelle peut s'écrire de la manière suivante :

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L PL(t, \tau) \exp(j\psi_l(t, \tau)) \delta(t - \tau_l(t)) \quad (2.19)$$

Cette équation exprime le fait que chaque trajet de l'onde est affecté par un affaiblissement (PL), un retard temporel (τ_l) et un déphasage (ψ_l). Avec t le temps et δ la fonction de Dirac.

A partir de cette réponse impulsionnelle, il est possible de déduire le profil en puissance du canal permettant d'affecter la puissance qui correspond à chaque trajet.

2.4.6.1. Pertes de propagation dans un canal radio mobile

Le phénomène de propagation d'un signal dans un canal radio mobile se traduit par une variation de la puissance du signal reçu en fonction du temps, de la distance entre émetteur et récepteur. Le processus d'estimation d'un canal de propagation revient à déterminer avec précision la perte de propagation qui dépend des obstacles, de la nature de l'environnement et de la fréquence d'émission. De même la connaissance des pertes de propagation est indispensable pour configurer un réseau mobile, s'assurer de la couverture radio et estimer les interférences pouvant exister entre les émetteurs partageant les bandes de fréquences communes.

Cependant, il est difficile de déterminer précisément par calcul analytique les pertes de propagation. Des méthodes électromagnétiques numériques deviennent nécessaires lorsque l'environnement de propagation devient complexe (forte densité d'habitation, présence d'obstacle, milieu de propagation non homogène...). L'utilisation de méthodes précises suppose une très grande quantité de données et un temps de calcul considérable, les rendant parfois inadaptées au calcul des pertes de propagation dans un réseau cellulaire. Les pertes de propagation sont en grande partie liées à l'affaiblissement de parcours en terrain plat (au cas où l'émetteur et le récepteur sont en visibilité directe). Dans un réseau hertzien terrestre, la visibilité directe n'arrive que lorsque le mobile est proche de la station de base. La plupart du temps, la liaison entre les deux antennes se fait en visibilité non directe. Il devient nécessaire de prendre en compte les pertes liées aux obstacles qu'induisent des phénomènes de réflexion, de diffraction et de diffusion de l'onde incidente. Ces pertes dépendent aussi de la fréquence, de la taille, de la géométrie des obstacles et de la nature des matériaux (vitres, murs, bois etc...). L'environnement d'un réseau cellulaire (notamment les environnements urbains) comprend un grand nombre d'obstacles, avec plusieurs variétés, rendant difficile une modélisation fine de l'ensemble des sous canaux. Les pertes de propagation sont définies à partir des modèles de propagation.

2.4.6.2. Modèles de propagation

2.4.6.2.1. Domaine d'utilisation des modèles de propagation

L'utilisation d'un modèle doit se faire en tenant compte de son domaine d'utilisation qui dépend essentiellement des facteurs tels que [Christine, 2005] :

- **le type de système de télécommunication radio considéré**

Le système de télécommunication considéré permet de fixer un certain nombre de paramètres qui sont pris en compte dans le modèle à savoir: la fréquence, la dimension de la cellule (elle détermine la distance maximale d'utilisation), la taille et le type d'antenne etc...

- **l'environnement**

Le type du milieu géographique traversé le long de la liaison influe sur la propagation du signal de façon différente. Il faut donc utiliser des modèles capables de simuler chacun des cas suivants :

- **Outdoor to Outdoor (O2O)**

C'est le scénario dans lequel l'émetteur et le récepteur sont situés à l'extérieur des bâtiments. Les modèles pour l'extérieur avec des phénomènes très différents suivant le milieu de propagation (urbain, suburbain et rural...) nécessitent le développement des modèles pour chaque milieu. Nous nous focalisons dans notre étude sur ce cas de scénario.

- **Outdoor to Indoor (O2I)**

Il concerne les modèles de pénétration du signal pour l'utilisation des portables à l'intérieur des bâtiments à partir d'émetteurs situés à l'extérieur.

- **Indoor to Indoor (I2I)**

Ce scénario concerne les modèles de pénétration du signal pour la couverture intérieure à partir d'émetteurs ainsi que des mobiles situés à l'intérieur même des bâtiments. Nous pouvons dire que pour un même système de télécommunication radio mobile, il faut plusieurs types de modèles pour calculer les couvertures dans différents types d'environnement rencontrés (rural, urbain, suburbain, indoor, etc.) puisque les phénomènes de propagation à prendre en compte ne sont pas les mêmes selon le milieu géographique traversé.

2.4.6.2.2. Environnements terrestres et modèles de propagation radio mobile

- **Environnement rural macro-cellule**

Les environnements ruraux macro-cellule ont une taille supérieure à plusieurs dizaines de kilomètres. Les modèles macro cellulaires sont des modèles semi-empiriques généralement fondés sur l'analyse du profil vertical émetteur-récepteur et des obstacles qui s'y trouvent (colline, forêt, etc.). Ils se basent généralement sur des données géographiques de type maillé de sol et de sursol. Du fait de la pauvreté des informations géographiques fournies et de la simplicité des algorithmes de calcul, une mise au point par ajustement de variables est opérée à l'aide de mesures expérimentales. Deux types de modèles sont distingués : le modèle rural, moyennement urbanisé et le modèle montagneux.

Le modèle rural détermine les affaiblissements dus à la diffraction par les obstacles (sol et sursol) en considérant la coupe de terrain verticale entre l'émetteur et le récepteur pour déterminer les affaiblissements. Ils permettent d'estimer une couverture radioélectrique avec précision de l'ordre 6 à 7 dB d'écart-type sur la moyenne de l'erreur entre les valeurs mesurées et celles prédites. Les performances de ce modèle peuvent être améliorées en milieu urbain par l'utilisation de données géographiques plus précises. Elles se dégradent lorsque le vallonnement devient important, particulièrement en région montagneuse car les effets des trajets réfléchis deviennent prépondérants.

Le modèle montagneux prend en compte, outre le trajet direct, les trajets réfléchis sur le flanc des montagnes avoisinantes. L'identification des zones de réflexion rend les algorithmes de calcul de l'affaiblissement plus complexes et plus gourmands en temps de calcul.

- **Environnement urbain, semi-urbain**

Les environnements urbains et semi-urbain ont une taille de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres, en fonction de la densité d'habitation. Les pertes de propagation évoluent très rapidement en fonction de la distance, du fait de la présence d'un très grand nombre d'obstacles. Contrairement aux modèles statistiques macrocellules qui prédisent une couverture radio moyenne et pas très précise essentiellement en milieu ouvert, les modèles microcellules essaient de prédire une zone de couverture moins étendue mais plus précise. La modélisation micro cellulaire repose sur une dualité liée aux faibles distances considérées avec un calcul en ligne de vue directe et de vue non directe.

- **Environnement indoor (femto-cellule)**

Les femto cellules sont de petites cellules d'une dizaine de mètres de rayon principalement destinées à couvrir une habitation ou un étage de bureau. Elles sont associées à des puissances faibles de l'ordre de 20 dBm. Les femto cellules sont généralement déployées à l'intérieur des bâtiments où la propagation se fait par réflexion le long des couloirs (similaire à une propagation guidée), par diffraction sur les ouvertures des portes et par passage à travers les cloisons ou les dalles.

2.4.6.2.3. Différents types de modèles de propagation

Un modèle de propagation permet de déterminer les pertes de propagation dans un canal. Il dépend de la puissance émise, de la puissance reçue, de la fréquence d'émission, de la distance émetteur-récepteur, des hauteurs des antennes d'émission et de réception et des caractéristiques de l'environnement de propagation.

Le modèle de propagation est une procédure essentielle au début de déploiement du réseau car il permet de prédire des précisions sur la couverture. Il sert à estimer la portée d'un émetteur radio, à déterminer la qualité du signal reçu et à calculer le niveau d'interférence lorsque plusieurs émetteurs co-existent. Il permet aussi de déterminer et de configurer les équipements nécessaires pour assurer une couverture radio, une capacité et une qualité de service suffisante. Dans la plupart des cas, celui-ci est difficile à déterminer avec précision, en raison de la complexité des environnements de propagation terrestre et des phénomènes physiques. Les différents modèles de propagation sont les suivants :

- **Les modèles empiriques**

La mise en œuvre de ces modèles repose sur la collecte de données concernant des mesures et des formules mathématiques pour permettre de prédire l'impact ainsi que la valeur moyenne d'affaiblissement d'un émetteur sur une certaine zone de réception. Les modèles empiriques ont l'avantage d'être simple et de dépendre faiblement des caractéristiques d'un site. C'est pourquoi ils sont couramment employés dans les communications cellulaires pour une première estimation des pertes de propagation.

- **Les modèles déterministes ou physiques**

Les modèles déterministes donnent des résultats beaucoup plus précis mais requièrent une quantité importante d'informations sur la zone où ils vont être appliqués. De plus, ils

demandent beaucoup de temps de calcul et sont généralement réservés à des lieux particuliers où les autres modèles ne peuvent être utilisés. Ces modèles permettent de prédire la propagation des ondes radio et de calculer leurs trajets en tenant compte des phénomènes de réflexion et de diffraction.

- **Les modèles semi empiriques**

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

- **Les modèles stochastiques**

Les modèles stochastiques recouvrent les trois catégories des modèles décrites plus haut. On trouve des modèles stochastiques théoriques, empiriques et semi-empiriques. Un modèle est stochastique dès qu'une variable d'entrée ou de sortie est aléatoire. Les relations du modèle feront alors intervenir des variables déterministes ainsi que des statistiques provenant des variables aléatoires ou des paramètres permettant de préciser leurs lois de probabilité. Souvent ces paramètres sont déterminés à partir d'autres variables d'entrée.

La figure suivante donne une idée de la classification des modèles de propagation.

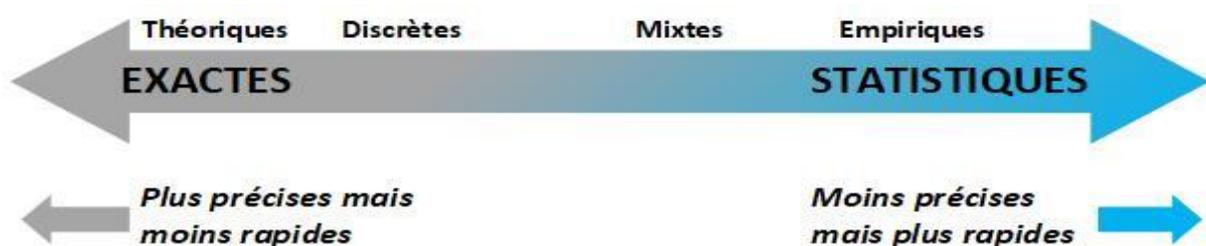


Figure 2. 12: Classes des modèles de propagation et leurs principales caractéristiques

Les modèles de propagation ont pour but de prédire au mieux les variations lentes du signal radio dues aux obstacles le long de la liaison entre l'émetteur et le récepteur. Alors le type de modèle choisi dépendra du niveau d'estimation souhaitée (estimation approximative ou

précise). Après l'estimation de prédiction, des mesures de champ doivent être réalisées de façon à valider le modèle. Cette étape nécessite généralement le réajustement des paramètres.

2.5. Revue bibliographique sur le canal de propagation

Dans la communication radio mobile, la modélisation du canal de propagation est l'un des plus importants domaines de recherche, parce que les performances de tout système pratique dépendent de ses caractéristiques [Jean-François, 2004] [Huang et al., 2019]. L'objectif principal de la modélisation du canal est de caractériser les composants multi-trajets dans divers environnements. En raison des mouvements des terminaux mobiles ou des changements dynamiques des environnements, les caractérisations du canal variant dans le temps rencontrent généralement de grands défis [Huang et al., 2019]. En effet de nombreux systèmes de communication fonctionnent dans des environnements dynamiques. Alors, la connaissance du canal de propagation est nécessaire pour la conception d'un réseau mobile car il constitue le pont entre le terminal mobile et les ressources radio. Plusieurs travaux de recherche sont entrepris pour proposer des modèles de canal de propagation en vue de garantir des meilleures performances du système de communication sans fil.

[Jean-François, 2004] a proposé une modélisation du canal de propagation dans le cadre d'une transmission MIMO dans différents environnements afin d'améliorer ses performances pour des applications dans le transport. Toujours dans le cadre d'améliorer les systèmes de communication MIMO, [Nuttapol, 2009] a consacré ses travaux à la caractérisation et à la modélisation du canal de transmission en tenant compte des composantes de polarisation des antennes à trois dimensions. Pour évaluer les performances de son modèle de canal, il a fait une étude comparative de la capacité de deux sortes de systèmes de communication sans fil multi-antennes à savoir : le système de communication multi-antennes à polarisation unique et les systèmes à polarisation multiple tels que les systèmes MIMO. En effet, les techniques MIMO reposent sur l'utilisation conjointe d'un réseau d'antennes à l'émission et à la réception. Elles favorisent l'amélioration des débits ou de la robustesse sans augmenter les bandes de fréquences allouées et les puissances d'émission.

[Mohamed, 2010] a étudié le canal de propagation radiofréquence pour les systèmes embarqués sans fil automobiles. Il a développé des outils afin d'améliorer les protocoles de communication et pallier les évanouissements des signaux dans le canal de transmission.

[Kaoutar, 2014] a travaillé sur la modélisation du canal de propagation dans les milieux industriels. Il a estimé que le canal de propagation dans de tels environnements présente un comportement différent de celui des modèles classiques des environnements indoor. Comme

solution, il a proposé un modèle hybride de canal basé à la fois sur une méthode de tracé de rayons 3D et sur le modèle Wireless World Initiative New Radio (WINNER II).

Des modèles de canal de transmission ont été développés dans les systèmes de l'aviation civile. C'est le cas de [Alexandre, 2016] qui a proposé des modèles qui combinent calculs électromagnétiques et aspects spécifiques aviation civile.

[Xiongwen et al., 2014] ont évalué les différences entre les modèles et les paramètres des canaux pour les fréquences de 2 GHz et 5 GHz ainsi que les corrélations de ces paramètres avec une bande passante de 100 MHz lorsque les mesures étaient effectuées sur les mêmes itinéraires pour les microcellules urbaines. Ils sont arrivés à la conclusion selon laquelle ces fréquences peuvent avoir des comportements de propagation différents provoquant des paramètres de canal indépendants. Cependant, il a été constaté que leurs largeurs de bande de cohérence étaient fortement corrélées.

2.6. Analyse des travaux de la littérature

Comme nous l'avons vu tout au cours de cette revue bibliographique, il existe au sein de la littérature, plusieurs approches et différents mécanismes du contrôle de puissance dans un canal de propagation. Le mécanisme du contrôle de puissance en boucle ouverte en liaison montante, conçu pour compenser les pertes de propagation dans le canal, consiste à trouver les valeurs des paramètres P_0 et α qui optimisent les performances du système. La partie la plus difficile lors du déploiement des systèmes radio mobiles est l'interface radio car elle n'est pas connue à l'avance et elle est soumise aux conditions environnementales. Le signal émis va subir au cours de sa propagation des atténuations à cause de la présence des obstacles dans le canal. L'optimisation du contrôle de puissance dans un canal est basée sur la maîtrise des pertes de propagation dans l'environnement. Les pertes dans le canal sont principalement estimées à partir des modèles de propagation. Ainsi plusieurs modèles ont été développés et mis à la disposition des opérateurs de réseaux mobiles pour les aider dans le déploiement de leurs systèmes. Cependant ces modèles ne sont pas très souvent adaptés à tous les environnements parce que les environnements n'ont pas exactement tous les mêmes configurations. Aussi, dans le cas de la densification des réseaux, à cause de la visibilité directe et de la faible hauteur des antennes, le canal de propagation des petites cellules est différent de celui des macro-cellules et les modèles stochastiques du canal existants ne sont plus adaptés [Maviel, 2013].

Les modèles tels que le modèle de Walfish-Bertoni, le modèle Cost231 Walfish-Ikegami et bien d'autres développés pour des grandes villes présentent malheureusement certaines limites [Lai et al., 2013], [Bhuvaneshwari et al., 2016], en fonction de leurs fréquences d'utilisation, de la distance entre émetteur et récepteur et de bien d'autres paramètres et nécessitent d'être calibrés pour leur adaptation dans un autre environnement.

En raison du manque de modèles de propagation très satisfaisants, l'estimation de la couverture et des interférences dans les milieux micro cellulaires est une tâche particulièrement difficile.

2.7. Présentation de la question de recherche

Basé sur les performances du canal de propagation, le contrôle de puissance dans des environnements urbains exige l'étude des phénomènes de propagation des ondes afin de pouvoir prédire la qualité des liaisons radio. En environnements urbains, la propagation dépend fortement de la densité des bâtiments, des immeubles et divers autres obstacles. Les ondes sont affectées par les caractéristiques des environnements dans lesquels elles se propagent. Ces phénomènes vont par exemple affaiblir la puissance des ondes émises et limiter ainsi la portée de la transmission. Alors, face à ces défis environnementaux nous nous sommes posé la question suivante : **Comment optimiser l'impact des pertes de propagation sur la puissance d'émission dans un canal de propagation radio mobile en environnements urbains ?**

Deux principales méthodes existent pour estimer les pertes de propagation dans un canal radio mobile : la mesure et la modélisation. Les campagnes de mesures sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre. Ainsi, des modèles de propagation sont développés pour offrir une alternative à faible coût. Dans nos travaux, il est question d'étudier l'impact de la densité des obstacles dans un environnement urbain sur la puissance d'émission et de réception dans le but d'évaluer leurs influences sur les performances du système. En effet la maîtrise de la propagation des ondes électromagnétiques, en zone urbaine, est aujourd'hui très incomplète à cause de la croissance permanente de la densité des obstacles et la mobilité du terminal. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons à cette problématique.

2.8. Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre a fait l'objet d'un exposé sur le contrôle de puissance dans les réseaux mobiles et sur les canaux de propagation radio. Nous avons abordé des travaux de la littérature relatifs à la problématique liée au contrôle de puissance dans les systèmes radio-mobiles. Quelques algorithmes de contrôle de puissance ont été présentés. Il s'agit de l'algorithme d'allocation de puissance, l'algorithme Transmit Power Control et l'algorithme de contrôle de puissance basé sur une estimation des pertes de propagation. Les pertes de propagation dans un environnement donné permettent d'estimer les canaux de propagation. Nous avons vu que la modélisation des canaux de propagation est très importante pour le déploiement des réseaux mobiles surtout dans les environnements dominés par une forte densité d'obstacles. Les environnements de propagation diffèrent les uns des autres parce qu'ils n'ont pas tous les mêmes configurations. Il n'existe malheureusement pas de modèle adapté à tout type d'environnement ce qui rend difficile et coûteux le déploiement du réseau car chaque environnement nécessite soit un nouveau modèle soit une calibration de modèles existants. Aussi, une revue bibliographique a été effectuée sur la modélisation des canaux de propagation dans divers environnements pour divers services de communication sans fil. Une analyse des travaux de la littérature a été menée et la présentation de la question de recherche termine ce chapitre. Le chapitre suivant fera l'objet de l'évaluation des pertes de propagation sur le mécanisme du contrôle de puissance en boucle ouverte dans un canal de propagation.

CHAPITRE 3 CONTROLE DE PUISSANCE BASE SUR L'ESTIMATION DES PERTES DE PROPAGATION DANS UN CANAL RADIO MOBILE

Sommaire

| | |
|--|----|
| 3.1. Introduction | 80 |
| 3.2. Description des modèles de perte propagation | 81 |
| 3.3. Impact des pertes de propagation sur les puissances d'émission..... | 85 |
| 3.3.1. Impact des pertes sur le contrôle de puissance en boucle ouverte | 85 |
| 3.3.2. Simulation des puissances pour chaque modèle | 86 |
| 3.4. Modélisation et prédiction des pertes de propagation dans un canal radio mobile..... | 91 |
| 3.5. Conclusion du chapitre 3..... | 94 |

3.1. Introduction

Le déploiement des réseaux mobiles en zones urbaines est une problématique pour les opérateurs de téléphonies à cause des défis environnementaux. En effet ces environnements, caractérisés par une forte densité d'habitations construites avec des matériaux très sophistiqués, constituent des obstacles à la propagation des ondes. Ces obstacles sont la cause de la dégradation de la puissance du signal émis qui est une ressource nécessaire au maintien de la qualité du signal. Ainsi, un terminal mobile à l'intérieur des bâtiments souffre principalement d'une mauvaise réception du signal en raison de la faible pénétration du signal à travers les murs. Aussi l'atténuation de la puissance d'émission peut entraîner une perte totale du signal. En revanche, la station mobile à l'extérieur des bâtiments est soumise à l'atténuation due aux phénomènes physiques de diffraction, de réfraction et de réflexion causés principalement par les bâtiments et immeubles.

Le niveau de puissance du signal reçu détermine la qualité du message à la destination. Alors, en cas de perte élevée de propagation, la puissance émise est considérablement réduite et peut devenir inférieure à celle définie par le mécanisme de compensation de perte de propagation totale. Cela peut entraîner un nombre moins important de blocs de ressources attribués par la bande passante de transmission adaptative et, par conséquent un débit plus faible pour les utilisateurs en bordure de la cellule.

Ce chapitre s'intéresse principalement à la problématique de l'impact des pertes de propagation sur la qualité de la puissance d'émission du signal dans un canal radio mobile en environnement urbain.

3.2. Description des modèles de perte propagation

Nous décrivons trois principaux modèles de propagation adaptés aux environnements urbains. Ces modèles de propagation sont des modèles empirique et semi-empiriques, et permettent de caractériser les atténuations subies par un signal entre un émetteur et un récepteur dans un environnement en présence d'obstacles. En effet l'atténuation des signaux à différentes fréquences dépend de l'environnement et est prédite par des modèles de propagation qui donnent des résultats différents dans des environnements différents [Zachaeus et al., 2016]. Les modèles de propagation choisis dans cette étude sont des modèles adaptés aux environnements extérieurs et fonctionnant sur plusieurs fréquences d'émission. Ces modèles de propagation sont utilisés pour les systèmes de communication sans fil pour les scénarios en visibilité directe non directe. Ce sont des modèles de propagation reconnus par des organismes de télécommunication tels que l'UIT, le 3GPP.

- **Le modèle 3GPP**

Le modèle 3GPP prévoit les pertes de propagation dans la bande de 2 GHz [Masoud et al., 2013]. Il est dédié aux liens de relais pour les scénarios à visibilité non directe. Les pertes de propagation proposées par le modèle 3GPP peuvent être déterminées à partir de l'équation suivante [Anirudh et al, 2017]:

$$PL_{3GPP} = 125.2 + 36.3 \log_{10}(d) \quad (3.1)$$

Avec d étant la distance entre les stations de base en Km

- **Le modèle Wireless World Initiative New Radio (WINNER II)**

Les modèles WINNER II sont développés à partir des mesures effectuées dans WINNER et des résultats obtenus dans la littérature scientifique [Masoud et al., 2013]. Basés sur une approche géométrique stochastique, ces modèles peuvent être appliqués à tout système sans fil fonctionnant dans une plage de fréquences de 2 à 6 GHz avec une bande passante RF (Radio Frequency) allant jusqu'à 100 MHz [Pekka et al., 2008]. Les modèles de canaux WINNER II peuvent être utilisés pour évaluer les performances des systèmes sans fil au niveau des liaisons des systèmes et pour comparer différents algorithmes. Les modèles WINNER II supportent quinze scénarios dans lesquels les émetteurs ont une vitesse nulle et les récepteurs peuvent avoir une vitesse qui varie selon le scénario entre 0 et 350 km/h. Ces modèles peuvent être utilisés dans une microcellule urbaine en intérieurs ou extérieurs. La hauteur des émetteurs est de 10 mètres et celle des récepteurs 1.5 mètres. En raison de la précision avec

laquelle les modèles WINNER II permettent de prédire les statistiques des pertes de propagation à grande échelle, ils ont été largement appliqués à la conception actuelle des modèles de canaux 3G et 4G [George et al., 2013]. Cependant, ces modèles ne disposent pas de la résolution temporelle (manque de bande passante suffisante) pour modéliser ou simuler les futures liaisons sans fil à plusieurs Gigabits par seconde avec une latence ultra faible.

Les modèles WINNER II peuvent être utilisés aussi bien en visibilité directe (Line of sight : LOS) qu'en visibilité non directe (non Line of sight : NLOS) à partir des formules suivantes [Pekka et al., 2008]:

- Pour la visibilité directe caractérisée par l'absence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur, on a l'équation suivante :

$$PL_{LOS} = 46.4 + 20 \log(d) + 20 \log(f/5) \quad (3.2)$$

- Pour la visibilité non directe caractérisée par la présence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur, on a l'équation suivante :

$$PL_{WINNERII} = 46.4 + 30 \log_{10}(d) + 23 \log_{10}(f) + X \quad (3.3)$$

Où :

- d [m] est la distance émetteur-récepteur ($30 \text{ m} < d < 1.5 \text{ km}$)
- f [GHz] est la fréquence d'utilisation ($2 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$).
- X représente les atténuations diverses dues aux obstacles dans un scénario NLOS

- **Le modèle Cost 231 Walfisch-Ikegami (Cost 231-WI)**

Le modèle Cost 231 Walfisch-Ikegami un modèle semi-déterministe basé sur le modèle de Walfisch Bertoni et le modèle Ikegami. Il fait la distinction entre la propagation en visibilité directe (Line of sight : LoS) et la propagation en visibilité non directe (non Line of sight : NLoS). Il inclut quelques corrections empiriques pour être adapté aux caractéristiques des grandes villes. Ce modèle est développé par le comité de recherche européen, et est capable de refléter les différentes caractéristiques urbaines, il est donc plus adapté à l'environnement urbain et peut être utilisé pour des fréquences supérieures à 2000 MHz [Noman et al., 2011].

Ce modèle est comparé aux résultats d'essais sur le terrain menés dans de nombreuses villes européennes et donne de bons résultats dans la zone, avec des hauteurs assez uniformes situées sur une grille de rues régulière, mais il donne de mauvais résultats dans la zone où la distribution des bâtiments est complexe et irrégulière. Le modèle COST231-WI contient trois éléments : les pertes d'espace libre (PL_0), les pertes dues aux diffractions de toit (PL_{rts}) et les pertes dues aux écrans multiples (PL_{msd}). Ces trois paramètres sont regroupés dans l'équation 3.4 suivante :

$$PL_{WI} = \begin{cases} PL_0 + PL_{msd} + PL_{rts} & \text{si } PL_{msd} + PL_{rts} > 0 \\ PL_0 & \text{si } PL_{msd} + PL_{rts} \leq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Ce modèle se concentre davantage sur les effets de diffraction sur les toits et les rues mais il néglige les pertes dues aux réflexions multiples sur les bâtiments [Bhuvaneshwari, 2016].

Le tableau suivant récapitule les modèles considérés et leurs différentes propriétés.

Tableau 3. 1: Expression des modèles de propagation choisis

| Modèles de propagation | Equations | Propriétés |
|---------------------------|--|--|
| 3GPP | $PL_{3GPP} = 125.2 + 36.3 \log(d)$ | f=2GHz |
| WINNER II | $PL_{winnerII} = 30 \log(d) + 46.4 + 23 \log(f) + X$ | 30 m < d < 1.5 km 2 GHz < f < 6 GHz. |
| Cost 231 Walfisch-Ikegami | $PL_{WI} = \begin{cases} PL_0 + PL_{msd} + PL_{rts} & \text{si } PL_{msd} + PL_{rts} > 0 \\ PL_0 & \text{si } PL_{msd} + PL_{rts} \leq 0 \end{cases}$ $PL_0 = 20 \log(d) + 32.45 + 20 \log(f)$ $PL_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log(d) + K_f \log(f) - 9 \log(b)$ $PL_{rts} = -16.9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori}$ | <p>800 MHz < f < 2 GHz</p> <p>0.02 Km < d < 5 Km</p> <p>4 m < h_{BS} < 50 m</p> <p>1 m < h_{MS} < 3 m</p> <p>d: distance émetteur-récepteur h_{BS} : hauteur de la station de base h_{MS} : hauteur de la station mobile</p> |

3.3. Impact des pertes de propagation sur les puissances d'émission

Lorsqu'une station mobile accède aux ressources radio du réseau, elle fournit une puissance nécessaire au maintien de la connexion. Cette puissance émise est perturbée par la présence des obstacles entre la station de base et celle-ci. Ces obstacles dégradent alors la qualité du signal dans le canal de propagation. Il faut donc contrôler la puissance d'émission afin de maintenir la qualité du signal à la réception car la puissance d'émission influence la qualité du canal de propagation.

Dans la section précédente, nous avons présenté trois principaux modèles de propagation adaptés aux environnements urbains extérieurs. Nous cherchons à présent à évaluer l'impact des pertes de propagation estimées à partir de ces différents modèles sur les puissances d'émission d'une station mobile dans le mécanisme du contrôle de puissance en boucle ouverte.

3.3.1. Impact des pertes sur le contrôle de puissance en boucle ouverte

Le contrôle de puissance est un mécanisme important pour évaluer et améliorer le canal de propagation. Il est basé sur le réglage de la puissance d'émission du mobile et de la station de base en vue de réduire les interférences, augmenter la durée de vie des batteries des mobiles et améliorer la capacité du système. La puissance d'émission autorisée à une station mobile est donnée par l'équation 3.5 suivante en dBm [Müllner et al., 2009] :

$$P = 10\log_{10}(M) + P_0 + \alpha PL + \Delta_{TF} + f(i) \quad (3.5)$$

Cette équation provient de l'équation 2.2 et les paramètres de cette équation ont été largement expliqués dans le chapitre 2 du manuscrit.

Dans le mécanisme du contrôle de puissance, la station de base diffuse les paramètres α et P_0 . Ainsi, à partir des valeurs de α , P_0 et de celles des pertes de propagation, le terminal mobile peut déterminer son niveau de puissance d'émission (P_{TX}). Ce mécanisme est dénommé contrôle de puissance d'émission en boucle ouverte dont la formule est déterminée à partir de l'équation 3.5 en éliminant les paramètres Δ_{TF} et $f(i)$.

$$P_{TX} = 10\log_{10}(M) + P_0 + \alpha PL \quad (3.6)$$

Si nous estimons qu'un seul bloc de ressource ($M=1$) est allouée à la station mobile, alors la puissance d'émission en dBm sera :

$$P_{TX} = P_0 + \alpha PL \quad (3.7)$$

Lorsque la station mobile émet à la puissance P_{TX} , la puissance P_{RX} reçue au niveau de la station de base en dBm est déterminée par la formule suivante :

$$P_{RX} = P_{TX} + PL = P_0 + (\alpha - 1)PL \quad (3.8)$$

Les puissances d'émission (P_{tx}) et de réception (P_{rx}) exprimées en milliwatt (mW) sont données par les équations 3.9 et 3.10 ci-dessous :

$$P_{tx} = p_0 p l^\alpha \quad (3.9)$$

Et

$$P_{rx} = p_0 p l^{\alpha-1} \quad (3.10)$$

Le principe du contrôle de puissance en boucle ouverte consiste à évaluer les pertes du canal afin de déterminer la puissance d'émission à laquelle le mobile doit émettre pour compenser les phénomènes d'évanouissement.

L'optimisation du contrôle de puissance en boucle ouverte se base sur la détermination des valeurs optimales des paramètres P_0 et α en fonction des objectifs des performances recherchées en termes de qualité de service. La détermination de ces paramètres consiste à trouver un compromis entre les stations mobiles en bordure et ceux au centre de la cellule ainsi que le minimum entre la puissance d'émission maximale autorisée (23 dBm) [Müllner et al., 2009] et la puissance d'émission de la station mobile.

3.3.2. Simulation des puissances pour chaque modèle

Nous comparons les résultats des puissances d'émission calculées à partir des trois modèles de propagation. Nous faisons varier les valeurs de α et nous fixons la valeur de P_0 . Les paramètres de simulation sont regroupés dans le tableau 3.2.

Tableau 3. 2: Paramètres de simulation

| Paramètres | Valeurs |
|---|---|
| Distance maximale entre émetteur et récepteur d(m) | d=500 m |
| Facteur de compensation de pertes de propagation α | $\alpha = 0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1$ |
| Puissance nominale contenue dans un bloc de ressource Po(dBm) | Po= -60 (dBm) |
| Modèles de propagation | PL _{WI} , PL _{winnerII} et PL _{3GPP} |

Pour nos simulations nous avons utilisé un ordinateur portable de marque Dell Inc., équipé d'un processeur Intel(R) core (TM) i5-2520M CPU @ 2,50GHz(4CPUs), une RAM de 8Gb et un système d'exploitation Windows10 Professionnel 64bits (10.0, build 19043). Nous faisons nos simulations avec le logiciel MATLAB R2020a.

3.3.2.1. Puissances d'émission

Nous représentons dans cette partie les puissances d'émission des trois modèles de propagation, en fonction des pertes de propagation pour cinq valeurs du paramètre de compensation de pertes de propagation α . Sur les différentes figures ci-après, les courbes en vert représentent les puissances d'émission pour la valeur de $\alpha = 1$, les courbes en jaune sont celles des puissances d'émission pour $\alpha= 0.8$. Les courbes en bleu, noir et rouge représentent respectivement les puissances d'émission pour les valeurs de $\alpha=0.6$, $\alpha=0.4$ et $\alpha=0.2$. Nous recherchons les valeurs de compensation des pertes de propagation α qui optimisent la puissance d'émission d'un terminal mobile émettant à partir de ces trois modèles de propagation.

- Le modèle 3GPP

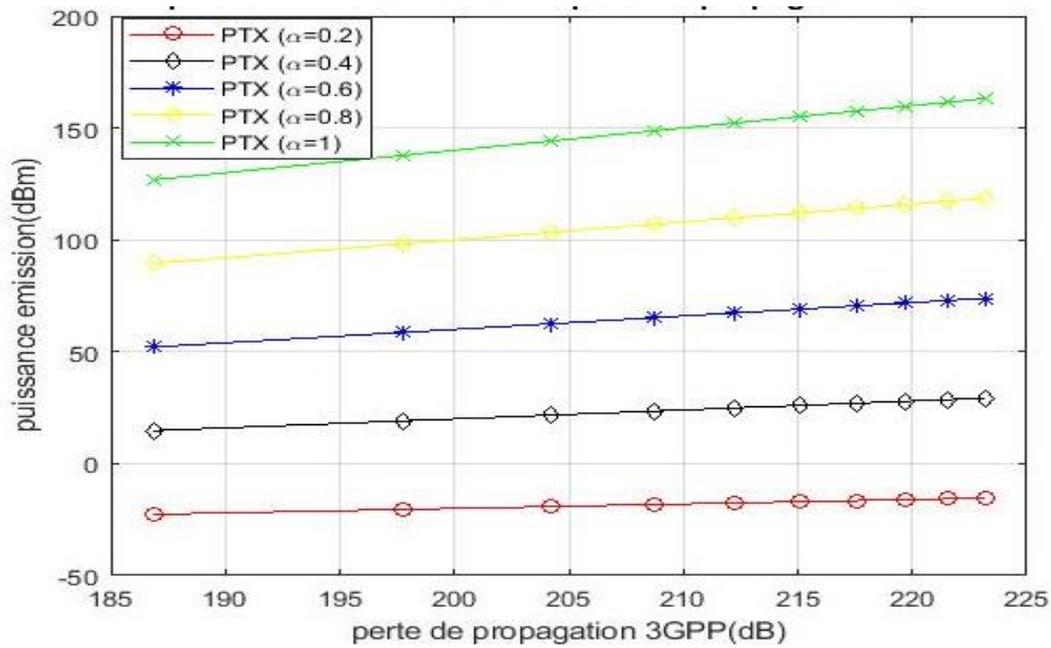


Figure 3. 1 : Puissance d'émission en fonction des pertes de propagation du modèle 3GPP

La figure 3.1 présente les puissances d'émission d'un mobile à partir du modèle de propagation 3GPP avec différentes valeurs de α . Nous remarquons que la puissance d'émission évolue en fonction des valeurs de α . La puissance est supérieure à -40 dBm pour α égale à 0.2 et inférieure à 20 dBm pour α égale à 0.4. Mais au fur et à mesure que les pertes augmentent, la puissance d'émission est supérieure à 20 dBm. Pour les autres valeurs de α , les puissances d'émission sont largement supérieures à 50 dBm.

- **Le modèle Wireless World Initiative New Radio (WINNER II)**

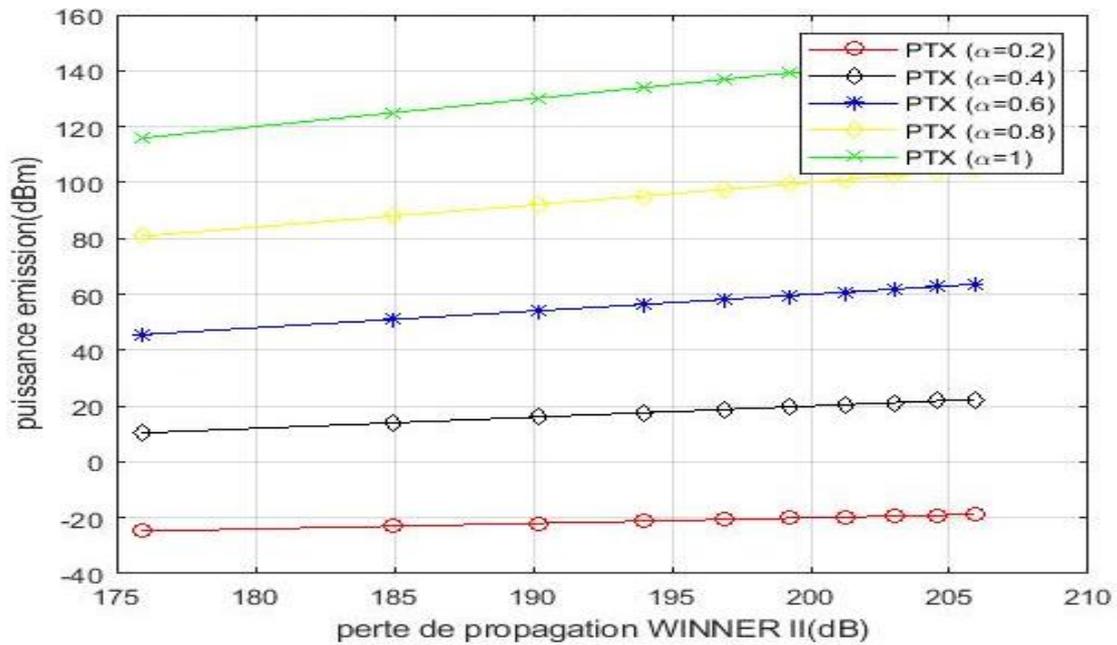


Figure 3. 2: Puissance d'émission en fonction des pertes de propagation du modèle WINNER II

La figure 3.2 exprime la variation des puissances d'émission avec différentes valeurs de α en fonction du modèle WINNER II. Avec ce modèle, la puissance d'émission est autour de -20 dBm pour la valeur de α égale à 0.2 et 20 dBm pour α égale à 0.4. Les autres valeurs du paramètre α donnent des valeurs des puissances d'émission supérieures à 40 dBm.

- **Le Modèle Cost231 Walfish-Ikegami**

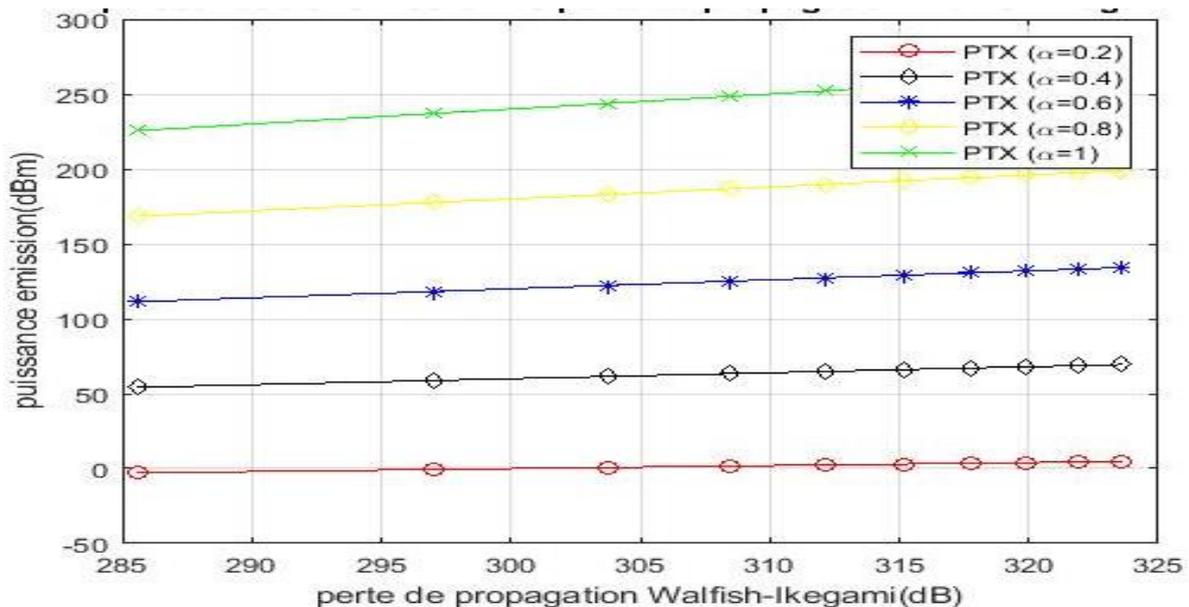


Figure 3. 3: Puissance d'émission en fonction des pertes de propagation du modèle Walfish-Ikegami

La figure 3.3 représente la variation de la puissance d'émission par rapport aux valeurs de α en fonction du modèle Cost 231 Walfisch-Ikegami. Nous remarquons que pour la valeur de α égale à 0.2, la puissance d'émission est autour de 0 dBm. Les autres valeurs de α donnent des puissance d'émission supérieures à 50 dBm.

Nous avons évalué avec différentes valeurs de α les puissances d'émission d'un mobile pour trois modèles de propagation. Nous comparons les puissances d'émission déterminées à partir de ces modèles de propagation avec les puissances d'émission seuilles autorisées à une station mobile LTE. La puissance d'émission minimale est -40 dBm et la puissance d'émission maximale est 23 dBm [3GPP, 2010] [Góra et al., 2010]. Les résultats montrent que pour tous les modèles de propagation, la valeur de $\alpha = 0.2$ autorise une bonne puissance d'émission. Avec les modèles 3GPP et WINNER II, la valeur de $\alpha = 0.4$ donne de bons résultats jusqu'à une certaine valeur des pertes de propagation. Ensuite la puissance d'émission dépasse la limite maximale lorsque les pertes de propagation augmentent. Pour les autres valeurs de α , les puissances d'émission sont largement supérieures à la puissance maximale d'émission autorisée. Nous remarquons qu'avec ces trois modèles déterminés, plus la valeur de α est grande, plus la puissance d'émission est élevée. Cela signifie que plus des pertes de propagation augmentent dans le canal, plus la puissance émise par le terminal mobile est élevée. Une augmentation de la puissance d'émission peut être source d'interférence pour les autres terminaux mobiles, et réduire le niveau de vie de la batterie du terminal mobile.

Ainsi nous pouvons dire que le modèle de propagation qui optimise la puissance d'émission dans un canal radio modèle est celui qui fournit moins de pertes de propagation. Cependant si les pertes de propagation sont élevées, il est préférable de choisir la plus petite valeur α pour l'optimisation de la puissance d'émission.

3.4. Modélisation et prédiction des pertes de propagation dans un canal radio mobile

Les modèles de propagation radio mobile décrivent le comportement du signal lors de sa propagation entre l'émetteur et le récepteur. Ils permettent de déterminer les affaiblissements ou pertes de propagation dans un canal radio mobile. Ces pertes dépendent de l'environnement de propagation, de la fréquence de fonctionnement et de la distance entre l'émetteur et le récepteur [Noman et al., 2011]. Elles sont déterminées à partir de la formule de la densité de puissance en considérant la propagation en espace libre, c'est-à-dire le cas idéal où il n'y a pas d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur.

Dans ce cas de figure, la densité de puissance S (W/m²) du signal émis à une distance d peut être déterminée par [Zaher, 2018] :

$$S = \frac{G_E \cdot P_{TX}}{4\pi d^2} \quad (3.11)$$

Où G_E représente le gain de l'antenne d'émission et P_{TX} la puissance du signal émis.

La densité de puissance S peut être liée à la puissance du signal reçu P_{RX} au niveau d'une antenne réceptrice ayant pour gain G_R par l'expression suivante :

$$P_{RX} = S \cdot A_R = \frac{G_E \cdot P_{TX}}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2 \cdot G_R}{4\pi} \quad (3.12)$$

$A_R = \frac{\lambda^2 \cdot G_R}{4\pi}$, représente l'aire effective de l'antenne de réception et λ la longueur d'onde d'émission.

Si nous considérons que les antennes d'émission et de réception sont isotropes, c'est-à-dire $G_E = G_R = 1$, alors de l'équation (3.12) on tire le rapport entre la puissance d'émission et la puissance de réception selon la formule ci-après :

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (3.13)$$

L'atténuation moyenne du signal reçu représente la perte de propagation [Zaher, 2018], l'expression en décibel (dB) est donnée par :

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{TX}}{P_{RX}} \right) \quad (3.14)$$

En remplaçant l'expression de $\frac{P_{TX}}{P_{RX}}$ dans l'équation (3.14), on obtient :

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3.15)$$

Cette équation représente les pertes de propagation en visibilité directe ou en espace libre. Cependant la présence des obstacles entre l'émetteur et le récepteur fait qu'en réalité, l'atténuation de la puissance en fonction de la distance qui les sépare est différente de celle déterminée en visibilité directe.

- **Choix du modèle de propagation**

Un modèle de propagation est un modèle mathématique qui permet de simuler le canal de propagation. Ce modèle mathématique est ensuite implémenté dans un algorithme, puis dans un programme informatique. Il permet d'estimer le niveau moyen de la puissance du signal radio reçu à n'importe quelle position à partir d'un certain nombre de paramètres (caractéristiques techniques, type d'environnement géographique traversé le long de la liaison...). Il modélise donc les variations dues aux obstacles rencontrés par les ondes le long du canal radio mobile auxquelles il faudra rajouter ensuite un algorithme pour tenir compte des variations rapides [Christine, 2006].

Notre modèle choisi est un modèle empirique car il est basé sur les mesures faites dans des environnements réels. Les modèles empiriques sont plus simples et moins spécifiques au site et fournissent une modélisation de premier ordre pour un large éventail d'emplacements. C'est la raison pour laquelle ces modèles sont couramment utilisés pour une première estimation des pertes de propagation. Pour notre étude, nous avons choisi ce type de modèle car il fait partie des modèles à pente unique ou one slope model. Il est un type de modèle généralement utilisé en environnements urbains extérieurs dans le cas où l'on ne maîtrise pas exactement les caractéristiques des obstacles dans l'environnement de propagation [Janaswamy, 2003]. C'est un modèle générique adapté à tout type d'environnements, il est peu précis car il ne considère pas principalement la structure des obstacles dans l'environnement d'étude. Notre objectif pour le choix de ce type est qu'il permet de déterminer l'exposant de propagation dont les valeurs nous permettent de caractériser l'environnement de propagation et d'estimer les pertes de propagation.

Ce modèle est déterminé par l'expression suivante:

$$PL(dB) = PL_0 + 10\gamma \log_{10}(d) + X_\sigma \quad (3.16)$$

Où γ est l'exposant de propagation, représentant la pente de l'équation qui est sous forme d'une droite affine. X_σ est une variable aléatoire gaussienne représentant les effets de masque et d'évanouissement et permet de prendre en compte les variations des pertes dues aux mouvements des obstacles dans le canal de propagation [Bouzigues, 2014]. Cette variable suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type σ dont la valeur varie généralement entre 3 et 13 [Dat-Duong, 2014]. Elle donne une indication sur la variation moyenne de la puissance reçue. PL_0 est un affaiblissement constant du trajet à une distance de référence (d_0), $d_0=1\text{m}$ en général [Zaher, 2018].

Des mesures expérimentales sont alors nécessaires pour déterminer les paramètres de ce modèle à savoir : γ , PL_0 et X_σ . L'exposant de propagation est le principal paramètre pour caractériser l'environnement de propagation quelle que soit la variation du modèle. En effet, dans le canal sans fil, ce paramètre a un fort impact sur la qualité des liaisons, et doit donc être estimé avec précision pour une conception et un fonctionnement efficace du réseau sans fil [Pratibha et al., 2014]. Ce paramètre est généralement extrait par régression linéaire à partir de mesures sur terrain. Cette étape largement abordée dans le prochain chapitre.

3.5. Conclusion du chapitre 3

Nous avons évalué dans ce chapitre l'impact des pertes de propagation sur les puissance d'émission d'une station mobile. Nous avons fait une étude analytique au cours de laquelle trois modèles de propagation adaptés aux environnements urbains ont été sélectionnés. Il s'agit des modèles de propagation Cost 231 Walfish-Ikegami, le modèle WINNER II, le modèle 3GPP. Ensuite, les performances du canal à partir de ces trois modèles ont été estimées en termes de puissance d'émission. Nous avons constaté dans cette étude que les valeurs de compensations des pertes de propagation α influencent les puissances d'émission. C'est-à-dire que plus α est grand, plus les puissances d'émission sont élevées. Les valeurs des puissances d'émission déterminées à partir de ces trois modèles de propagation ont été comparées aux valeurs seuilles des puissances d'émission (puissance minimale :-40 dBm, puissance maximale : 23 dBm) autorisée à un terminal mobile pour la technologie LTE. Nous remarquons que la valeur de $\alpha=0.2$ favorise une puissance d'émission acceptable pour tous les trois modèles de propagation. Nous avons choisi un type de modèle de propagation adapté aux environnements urbains extérieurs. Dans le chapitre suivant nous allons déterminer les différents paramètres de l'équation du modèle de propagation proposé dans la dernière partie de ce chapitre à partir des données de mesures réelles dans différents environnements urbains et évaluer leur impact sur les performances du canal de propagation.

CHAPITRE 4 UNE APPROCHE EXPERIMENTALE POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES D'UN MODELE DE PROPAGATION DANS UN CANAL RADIO MOBILE EN ENVIRONNEMENTS URBAINS

Sommaire

| | |
|---|-----|
| 4.1. INTRODUCTION | 96 |
| 4.2. CAMPAGNES DE MESURE POUR LA DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE PROPAGATION | 97 |
| 4.2.1. Description de la zone de mesure et présentation des étapes expérimentales..... | 97 |
| 4.2.2. Campagnes de mesure | 98 |
| 4.2.3. Méthodologie de mesures..... | 100 |
| 4.3. SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS | 102 |
| 4.3.1. Résultats des simulations pour la fréquence de 800 MHz | 102 |
| 4.3.2. Résultats des simulations à la fréquence de 1800 MHz | 104 |
| 4.3.3. Résultats des simulations pour la fréquence de 2600 MHz | 106 |
| 4.4. VALIDATION DES RÉSULTATS..... | 109 |
| 4.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 4 | 112 |

4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons évalué l'impact des pertes de propagation sur les puissances d'émission et de réception dans un canal radio mobile. En effet dans les canaux de propagation radio mobiles, les modèles de propagation sont utilisés pour évaluer la puissance du signal reçu et la qualité du canal de propagation. Ces modèles dépendent de certains paramètres dont le principal est l'exposant de propagation. L'exposant de propagation permet de caractériser l'environnement de propagation quelle que soit la variation du modèle. Il exerce une forte influence sur la qualité des liaisons dans un canal de propagation, qui a un caractère aléatoire dû à la mobilité du récepteur. La mesure de l'exposant de propagation peut être imprécise et incertaine lorsque les ondes directes du signal radio sont faibles tandis que les ondes réfléchies et diffractées sont fortes [Chuan et al., 2013]. Ce paramètre est généralement extrait par régression linéaire à partir de mesures sur terrain, et doit donc être estimé avec précision pour une conception et un fonctionnement efficace du réseau.

Dans ce chapitre, nous déterminons par régression linéaire à partir des mesures effectuées dans deux différents environnements extérieurs, les paramètres de l'équation de notre modèle de propagation. L'objectif est de caractériser les environnements de propagation, de déterminer un modèle de propagation et d'évaluer l'impact des exposants de propagation sur les performances d'un canal radio mobile.

4.2. Campagnes de mesure pour la détermination des paramètres du modèle de propagation

Dans les réseaux sans fil, les modèles de propagation sont utilisés pour évaluer la puissance du signal reçu et estimer le canal de propagation. Certains de ces modèles dépendent de l'exposant de propagation qui est l'un des principaux paramètres pour caractériser l'environnement de propagation. L'exposant de propagation influence fortement la qualité des liaisons entre émetteurs et récepteurs dans un canal radio mobile.

Des campagnes de mesures ont été réalisées afin de déterminer les paramètres du type de modèle de propagation choisi. Cette section décrit la méthodologie adoptée pour la campagne de mesure et la détermination de ces paramètres.

4.2.1. Description de la zone de mesure et présentation des étapes expérimentales

Des données de mesures effectuées dans la ville de Fez au Maroc ont été mises à notre disposition. Le test expérimental a été réalisé pour deux différents environnements nommés environnement 1 et environnement 2. Pour chaque environnement, les mesures ont été effectuées à partir de trois différentes fréquences d'émission à savoir : 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz, sur un rayon de couverture d'environ un kilomètre (1 Km). Ces environnements sont caractérisés par une forte présence des obstacles dont les principaux sont des bâtiments et immeubles. Les distances entre bâtiments et immeubles qui varient entre quinze (15) et trente mètres (30m), les hauteurs moyennes des obstacles qui peuvent atteindre quarante mètres (40 m) et la largeur des rues qui va jusqu'à trente mètres. La figure 4.1 donne un aperçu de la densité des obstacles dans ces différents environnements. Le tableau 4.1 décrit les positions géographiques et les tailles des différents émetteurs.

Tableau 4. 1 : Coordonnées GPS et tailles des différents émetteurs

| Emetteurs | Latitudes | Longitudes | Hauteur Emetteur(m) |
|------------|-----------|------------|---------------------|
| Emetteur 1 | 34,0397 | -5,0314 | 26 |
| Emetteur 2 | 34,013 | -5,03674 | 21 |

Emetteur 1 et émetteur 2 désignent les différents émetteurs placés dans les environnements 1 et 2 respectivement.



Figure 4.1 A : Environnement 1



Figure 4.1 B : Environnement 2

Figure 4. 1 : Aperçu des environnements de mesures

4.2.2. Campagnes de mesure

- **Equipements de mesures**

La perte de propagation est l'atténuation de la puissance du signal lorsqu'il se propage entre l'émetteur et le récepteur. Divers paramètres tels que la hauteur de l'antenne, la distance entre les deux stations, les obstacles tels que les bâtiments, sont la principale cause de cette réduction.

Pour assurer l'obtention d'un bon modèle qui reflète la réalité des prédictions avec le maximum de fidélité, une chaîne de mesures analogiques est utilisée pour la collecte des données obtenues lors des campagnes de mesures. Un logiciel de géo localisation a été utilisé pour permettre le traçage du parcours et analyser les puissances des mesures acquises.

La chaîne de transmission est composée d'un générateur analogique de signaux, d'un amplificateur et d'une antenne omnidirectionnelle. Le générateur est de type Agilent N9310A, avec une puissance maximale de 13 dBm et une plage de fréquences allant de 0.9 – 3 GHz.

L'amplificateur est de type Amplifier Research 25S1G4A et possède une puissance maximale de 45 dBm, avec pour plage de fréquences de 0.8 - 4.2 GHz.

Le mât télescopique permet de fixer l'antenne d'émission afin de la placer à une hauteur désirée.

La chaîne de réception est composée d'un récepteur multi-bande, un GPS, des antennes magnétiques pour la fixation sur le toit d'un véhicule. Le récepteur, de type coyote dual modular receiver, édité par bvsystem. Il est capable de supporter plusieurs bandes en changeant les modules adéquats, il possède une plage de sensibilité -118 dBm/-30 dBm à +/- 1 dB, une réjection canal adjacent supérieure à 45 dB. Le GPS est un récepteur modulaire composé de 12-canaux avec antenne active. Les gains et pertes des câbles des antennes magnétiques sont compensés par les modules de réception. La figure 4.2 décrit de façon simplifiée le schéma synoptique de la chaîne de mesure.

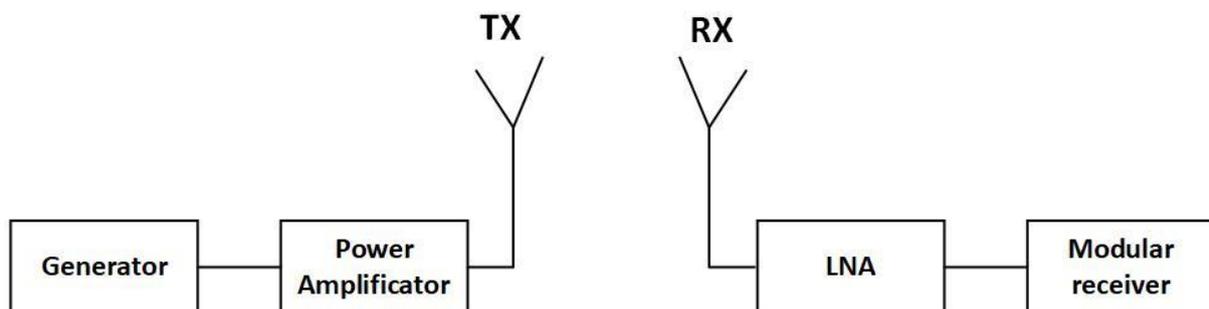


Figure 4. 2 : Schéma simplifié d'une chaîne de mesure

À l'aide des données GPS et de la localisation des émetteur, il est possible de calculer les distances radiales depuis la station de base en tout point de l'itinéraire.

Les images détaillées des équipements de mesure utilisés sont présentées dans les annexes de ce manuscrit.

Le générateur produit des signaux radio à onde continue à l'amplitude et à la fréquence définies et réglables. L'amplificateur de puissance va ajouter de la puissance au signal radio générer sans toutefois le modifier. L'antenne émettrice (TX) va rayonner le signal produit par le générateur dans l'environnement et l'antenne réceptrice (RX) va recevoir les ondes émises par l'émetteur.

L'amplificateur faible bruit (LNA) va amplifier le signal reçu afin de le maintenir à un niveau suffisant au-dessus du bruit de fond pour qu'il puisse être utilisé pour un traitement supplémentaire.

4.2.3. Méthodologie de mesures

Pour assurer l'obtention d'un bon modèle qui reflète la réalité des prédictions avec le maximum de fidélité, une chaîne de mesures analogiques est utilisée pour la collecte des données lors des campagnes de mesures. Les mesures sont effectuées en utilisant des signaux analogiques de type Continuous Waves (CW) avec des fréquences d'échantillonnage permettant de respecter le critère de Lee pour éliminer les problèmes liés au Fast Fading. Le nombre d'échantillons est paramétrable au niveau du récepteur et est au moins de 256 échantillons par seconde pour toutes les bandes. Pour chaque fréquence utilisée le nombre d'échantillons, le moyennage et la fréquence exacte de réception ont été fixés. Les antennes de réception utilisées sont des antennes magnétiques pour la fixation sur le toit d'un véhicule, ainsi qu'un logiciel de géo localisation pour permettre le traçage du parcours et analyser les puissances des mesures acquises.

- **Préparation des parcours**

Une fois la zone de mesures choisie, il faut définir les itinéraires des mesures. Ces itinéraires sont définis de telle façon qu'ils donnent assez de mesures pour la plupart des clusters.

Pendant les campagnes de mesure, la durée minimale des drives test pour chaque zone était de trois heures et le rayon des drives test était d'au plus un kilomètre (1 km).

- **Processus de mesures**

La puissance du signal a été mesurée en environnements extérieurs dans la gamme de fréquences de 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz.

Le but de cette campagne de mesures étant d'obtenir des valeurs assez régulières, les mesures ont débuté lorsque les conditions suivantes ont été respectées :

- Rester dans la même classe de sursol dans la mesure du possible
- Eviter de revenir plusieurs fois sur le même trajet
- Conduire à vitesse réduite (max 50 km/h)
- S'arrêter dès que le champ s'affaiblit (< -115 dBm)

4.2.3.1. Acquisition des données

Nous parlons dans cette section de la méthodologie d'acquisition des données lors des campagnes de mesure. La chaîne de réception utilisée pour la collecte des données est composée d'une antenne de réception omnidirectionnelle, d'un GPS, d'un récepteur de type coyote modular-receiver, d'un ordinateur portable core I5 et d'un véhicule pour assurer la mobilité. L'antenne de réception et le GPS étaient posés sur le véhicule et le récepteur coyote modular-receiver était placé à l'intérieur du véhicule. Le véhicule a été conduit dans la zone de couverture de l'émetteur en enregistrant les puissances du signal reçu et les données GPS (latitudes et longitudes) des émetteurs et récepteurs ont été enregistrées de façon simultanée à chaque instant de mesure. Les informations de l'émetteur telles que la fréquence d'émission, la puissance transmise et les hauteurs d'antenne sont obtenues. À partir des données GPS et de la localisation des émetteurs, il est possible de calculer les distances radiales en tout point de l'itinéraire depuis l'émetteur. Les mesures ont été effectuées dans deux différents environnements, à partir de trois fréquences d'émission. Ces environnements sont nommés: environnement 1, environnement 2. Les données recueillies au cours des campagnes de mesure sont présentées en annexe de ce manuscrit.

4.2.3.2. Traitement des données recueillies

Dans les canaux de propagation radio mobile, la puissance du signal reçu varie en fonction du temps, de l'espace et de la fréquence. Pour quantifier les impacts des évanouissements des canaux sur les performances du système, il faut d'abord quantifier la distribution de la puissance du signal reçu. Ainsi lors des campagnes de mesures, les puissances au niveau du récepteur mobile ont été recueillies et ces données ont permis de déterminer les pertes de propagation pour les différents environnements. La détermination de ces paramètres a permis d'élaborer les équations du modèle pour chaque environnement à différentes fréquences. Les pertes de propagation sont calculées à partir de l'équation suivante :

$$PL = PIRE - P_{RX} \quad (4.1)$$

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (dBm)

$$PIRE = P_e + G_e \quad (4.2)$$

P_e : Puissance d'émission

G_e : Gain de l'antenne d'émission

P_{RX} : Puissance reçue mesurée (dBm)

4.3. Simulations et interprétations des résultats

Dans cette partie, nous avons créé des codes Matlab pour implémenter différentes pertes de propagation dans deux environnements à différentes fréquences, afin d'observer leurs variations. Nous avons également déterminé les différents paramètres du modèle de propagation choisi. Les figures ci-dessous illustrent les résultats de simulations des différentes mesures effectuées dans ces environnements pour les fréquences de 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz respectivement.

4.3.1. Résultats des simulations pour la fréquence de 800 MHz

Les résultats pour la fréquence de 800 MHz sont obtenus pour une largeur de bande de 196 MHz.

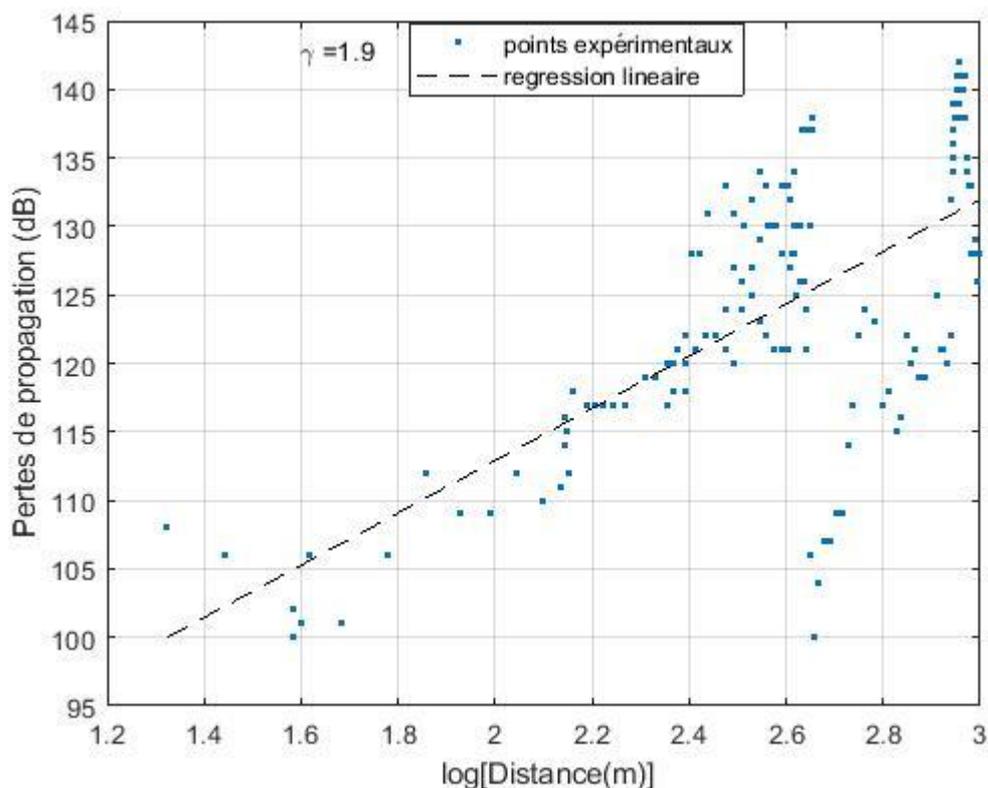


Figure 4. 3 : Pertes de propagation pour l'environnement 1

Les valeurs des puissances à la réception pour l'environnement 1 ont été obtenues pour 145 points de mesures.

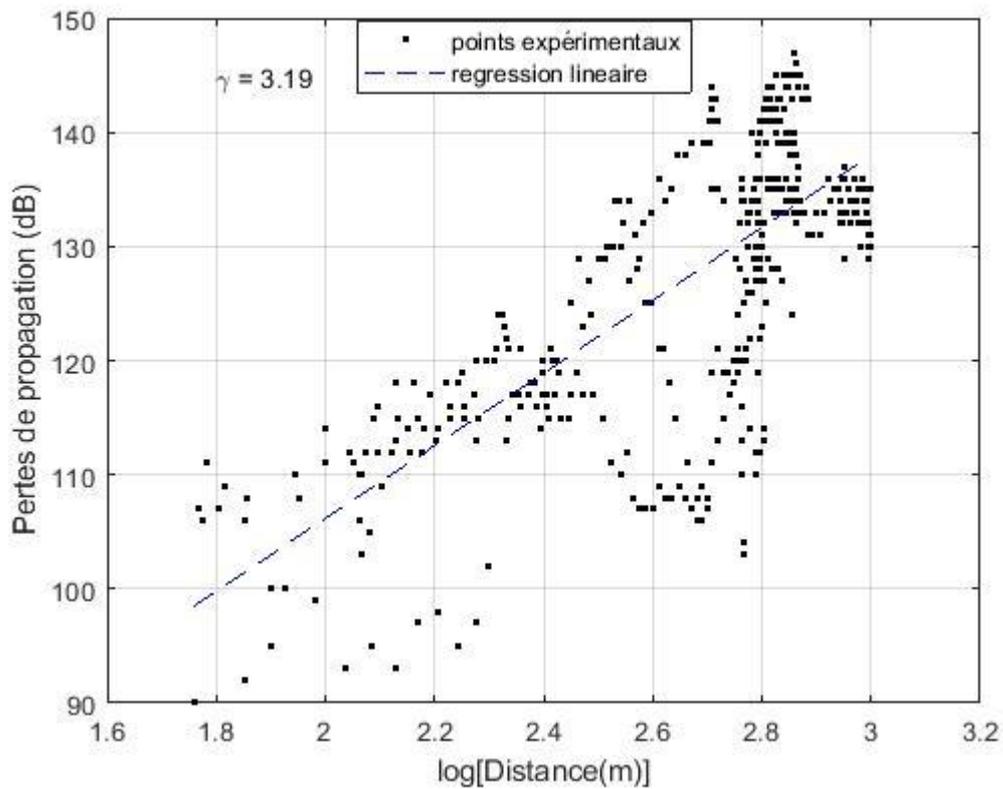


Figure 4. 4 : Pertes de propagation pour l'environnement 2

Les pertes de propagation dans l'environnement 2 sont estimées avec 407 points de mesure. Les valeurs des exposants de propagation pour la fréquence de 800 MHz sont de 1.9 pour l'environnement 1 et 3.19 pour l'environnement 2.

4.3.2. Résultats des simulations à la fréquence de 1800 MHz

Les mesures ont été effectuées sur une largeur de bande de 280 MHz pour la fréquence d'émission 1800 MHz.

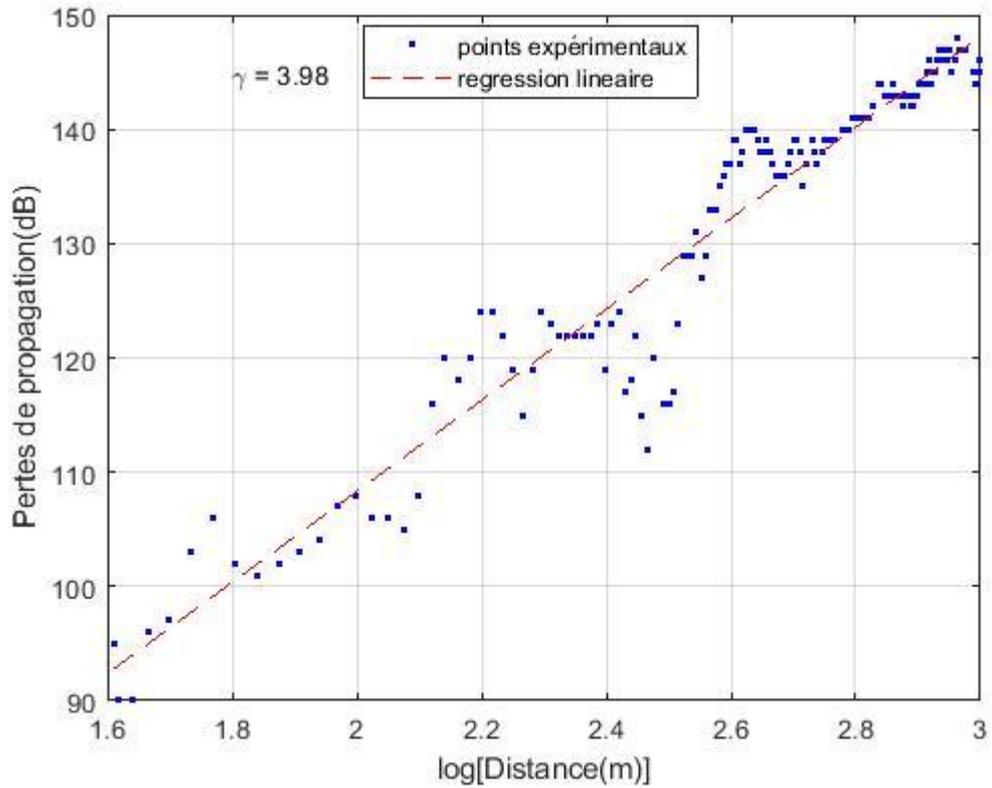


Figure 4. 5 : Pertes de propagation dans l'environnement 1

Le nombre de points de mesure pour l'environnement 1 est 156.

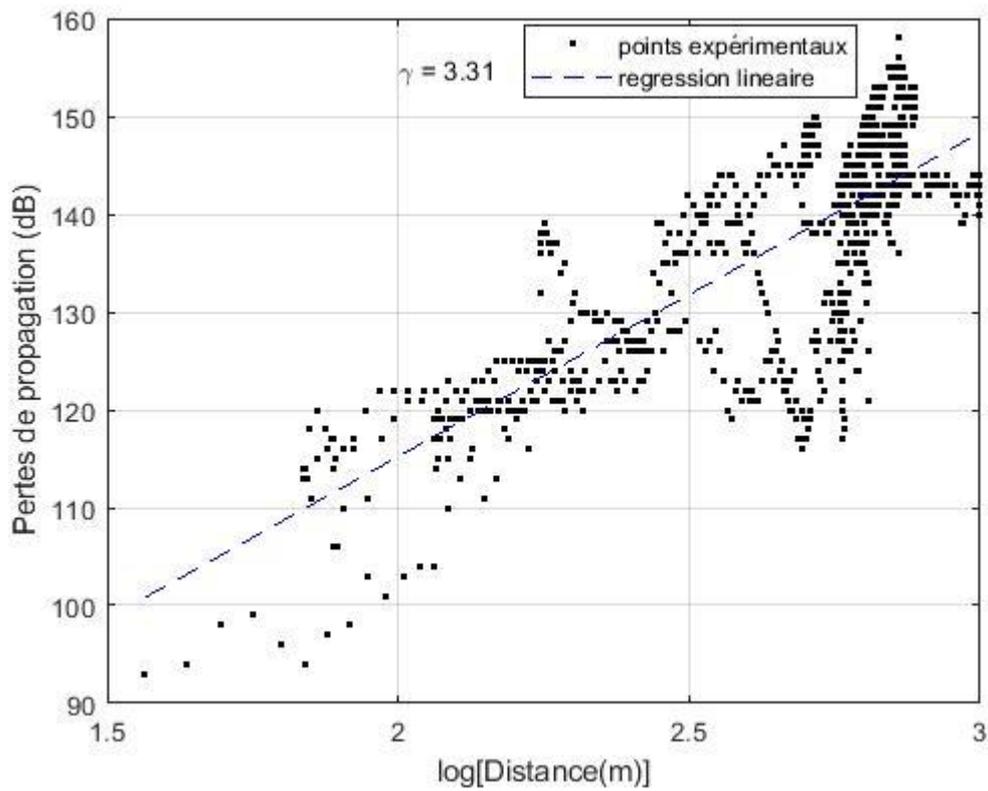


Figure 4. 6 : Pertes de propagation pour l'environnement 2

Dans l'environnement 2, les mesures des puissances à la réception ont été déterminées en 810 différents points.

Les valeurs des exposants de propagation obtenues pour la fréquence de 1800 MHz sont de 3.98 et 2.86 pour les environnements 1 et 2 respectivement.

4.3.3. Résultats des simulations pour la fréquence de 2600 MHz

Pour cette fréquence de 2600 MHz, une largeur bande de 80 MHz a été utilisée et les figures ci-dessous présentent les résultats pour les deux environnements.

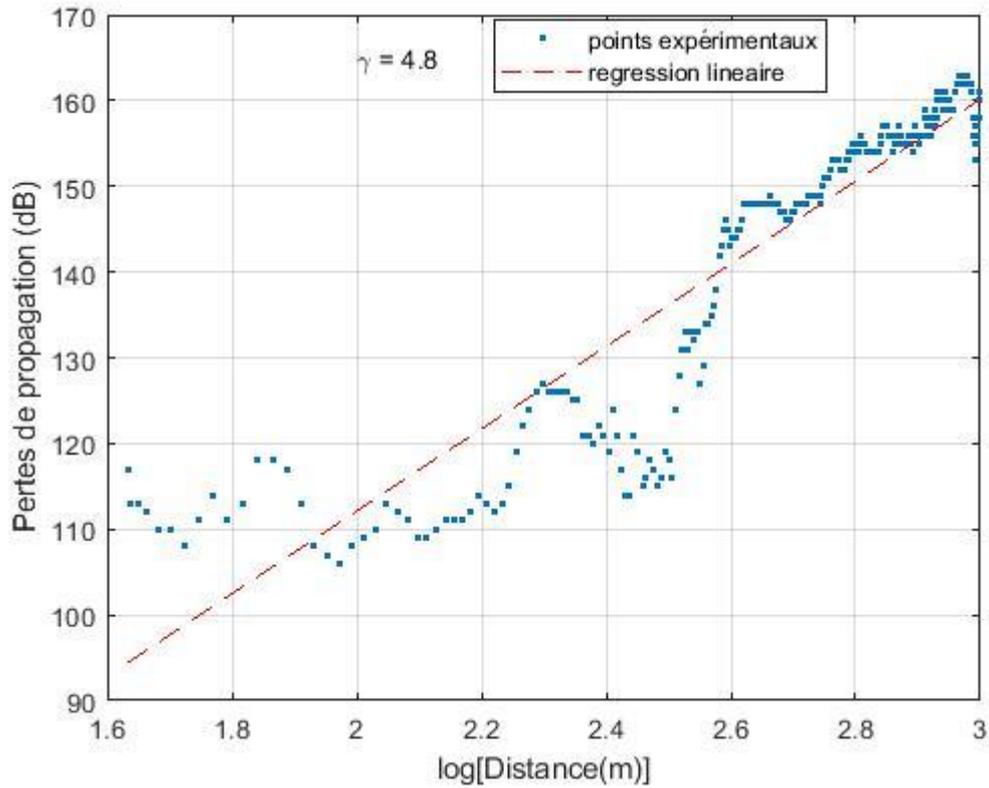


Figure 4. 7 : Pertes de propagation pour l'environnement 1

Pour cet environnement, 256 points de mesure ont permis de déterminer les paramètres de propagation.

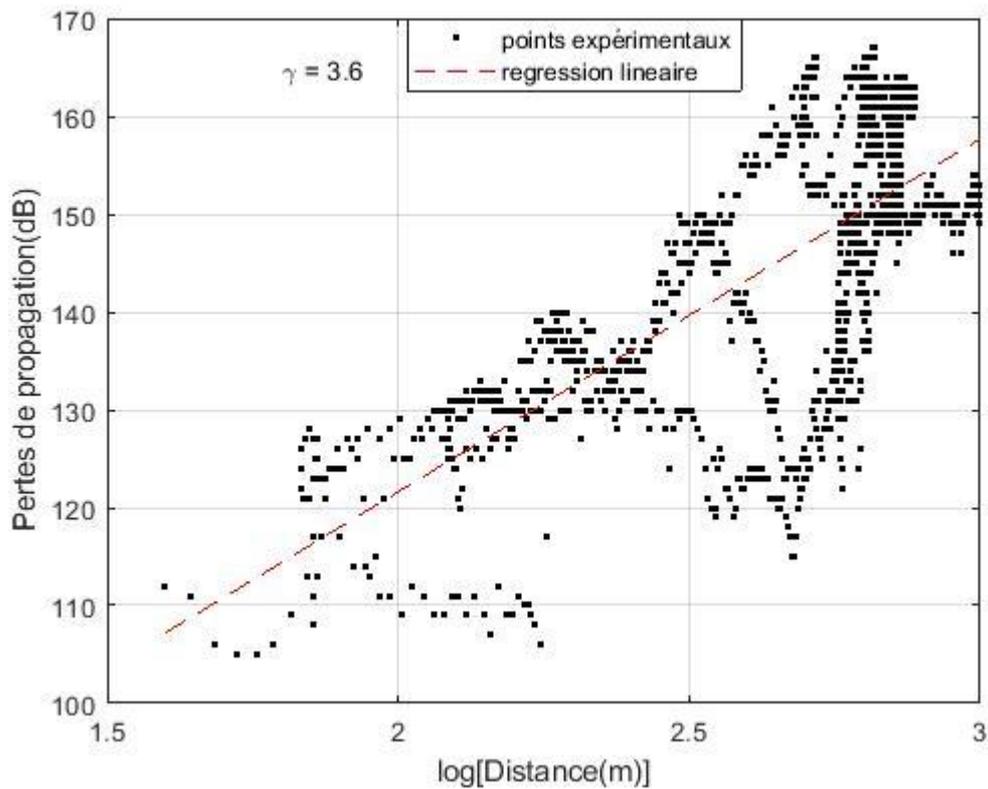


Figure 4. 8 : pertes de propagation pour l'environnement 2

Concernant l'environnement 2, le nombre de points de mesure utilisé pour l'estimation des paramètres de propagation est de 1215.

Avec la fréquence 2600 MHz, les différentes valeurs des exposants de propagations sont : 4.8 pour l'environnement 1 et 3.6 l'environnements 2.

Les figures ci-dessus représentent les pertes de propagation subies par le signal lors de sa propagation dans le canal radio mobile. Ces pertes de propagation dépendent de trois paramètres à savoir : les pertes dues aux effets de masque et d'évanouissement, les pertes constantes à une distance de référence et l'exposant de propagation. Ces différents paramètres sont déterminés par régression linéaire et varient d'un environnement à un autre pour chaque fréquence.

Les valeurs de ces paramètres du modèle de propagation sont regroupées dans le Tableau 4.2

Tableau 4. 2 : Paramètres des équations du modèle de propagation déterminés dans deux environnements pour trois fréquences

| Fréquences | Paramètres | Environnement 1 | Environnement 2 |
|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| 800 MHz | γ | 1.9 | 3.19 |
| | PL_0 | 74.73 | 42.46 |
| | Moyenne de X_σ | 3.7242e-15 | 5.6564e-15 |
| | Ecart type(σ) | 7.61 | 8.55 |
| 1800 MHz | γ | 3.98 | 3.31 |
| | PL_0 | 28.64 | 48.97 |
| | Moyenne de X_σ | 4.2450e-14 | -5.0247e-14 |
| | Ecart type(σ) | 3.69 | 7.36 |
| 2600 MHz | γ | 4.8 | 3.6 |
| | PL_0 | 15.90 | 49.46 |
| | Moyenne de X_σ | -5.1181e-14 | -1.6374e-13 |
| | Ecart type(σ) | 6.81 | 10.19 |

Le tableau 4.2 ci-dessus présente les paramètres du modèle de propagation déterminé. Ces paramètres sont :

γ : exposant de propagation

PL_0 : les pertes constantes à une distance de référence

X_σ : moyenne des pertes dues aux effets de masque et d'évanouissement

σ : écart type des pertes dues aux effets de masque et d'évanouissement

Nous constatons que les valeurs des paramètres du modèle de propagation diffèrent d'un environnement à l'autre pour différentes fréquences. En comparant les différentes valeurs de l'exposant de propagation, nous remarquons que dans les deux environnements, la plus grande fréquence d'émission possède les plus grandes valeurs de l'exposant de propagation et la plus petite fréquence possède les plus petites valeurs. Les résultats nous montrent aussi que les valeurs des exposants de propagation les plus grandes correspondent aux valeurs de PL_0 les plus faibles. Les moyennes du paramètre X_σ sont toutes presque nulles. Nous pouvons donc dire que les exposants de propagation évoluent en fonction des fréquences d'émissions.

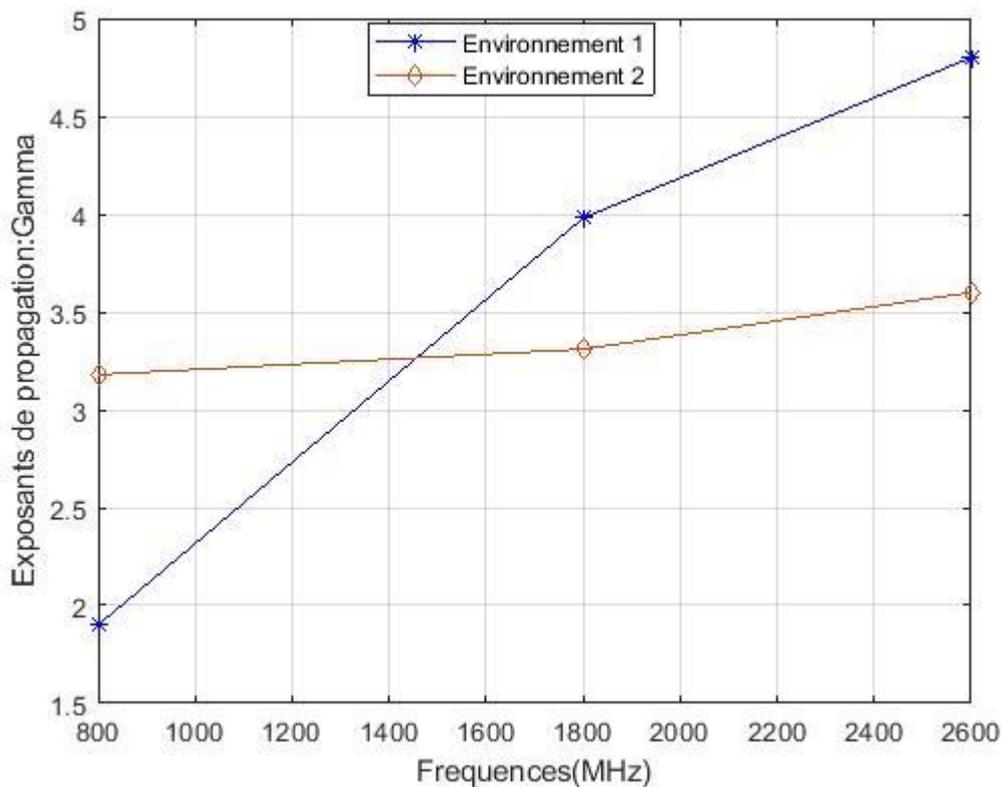


Figure 4. 9 : Variation des exposants de propagation en fonction des fréquences dans différents environnements

Les différentes valeurs des exposants de propagation montrent que les environnements n'ont pas les mêmes configurations en termes de densité des obstacles. En effet l'environnement qui contient plus d'obstacles affiche la plus grande valeur des exposants de propagation. Comme on peut apprécier dans la figure 4.9, la courbe bleue représentant l'évolution des exposants de propagation dans l'environnement 1 évolue plus rapidement que la courbe de la variation des exposants de propagation de l'environnement 2 représentée en orange.

4.4. Validation des résultats

Pour valider notre étude, nous comparons nos résultats à ceux trouvés dans la littérature. Les résultats de [Dasarathan et al., 2007] montrent que les exposants de propagation dans un réseau sans fil rural spécifique à 2,4 GHz varient de 1,2 à 2,2. Les valeurs des exposants de propagation allant de 2 à 2,85 sont obtenues dans un environnement extérieur pour un réseau WLAN 802.11 à 2,4 GHz [Zhou et al., 2009]. Les auteurs [George et al., 2017] ont trouvé les valeurs des exposants de propagation variant de 2 à 5 pour la fréquence de 0,5 GHz à 30 GHz.

Les exposants de propagation déterminés par [Wang et al., 2012] ont les valeurs entre 1,86 et 2,08 pour un réseau de capteurs sans fil à 2,4 GHz. Dans [ITU-R P, 2012], les valeurs des exposants de propagation sont comprises entre 2,2 et 3,32 à une fréquence de 3,705 GHz. Il est signalé que l'exposant de propagation peut généralement varier de 1,6 à 6,5 [Ren et al., 2011]. En plus de ces différentes valeurs, le tableau 4.3 montre les différentes valeurs des exposants de propagation en fonction des types d'environnements et de la distance entre émetteurs et récepteurs [Nuttapol, 2009].

Tableau 4. 3 : Exposants de propagation en fonction du type d'environnement

| Environnements | | Exposants de propagation (γ) |
|--------------------------|---------------------------|---|
| Extérieurs des bâtiments | Espace libre | 2 |
| | Urbain | 2,7-3,5 |
| | Dense urbain | 3-5 |
| Intérieurs des bâtiments | Présence de trajet direct | 1,6-1,8 |
| | Absence de trajet direct | 4-6 |

Notre étude étant effectuée en environnements extérieurs, nous comparons nos résultats avec ceux de la littérature pour les environnements extérieurs. Nous parlons d'environnement extérieur lorsque l'émetteur et le récepteur sont placés à l'extérieur des bâtiments. Pour la fréquence 800 MHz, dans l'environnement 1, notre valeur de γ est sensiblement proche de la valeur de γ en espace libre. Dans l'environnement 2 pour la même fréquence de 800 MHz, notre valeur de γ est supérieure à celle de l'espace libre et appartient à la gamme des valeurs de l'environnement urbain et dense urbain. Pour la fréquence 1800 MHz, dans l'environnement 1 notre valeur de γ est dans la gamme des valeurs de γ en environnement dense urbain et est supérieure aux valeurs de l'environnement urbain. Dans l'environnement 2 à cette même fréquence de 1800 MHz, notre valeur déterminée est supérieure à la valeur de γ en espace libre et est comprise entre les valeurs de γ en environnement urbain et dense urbain. Pour la fréquence 2600 MHz, dans les deux environnements, les valeurs de γ sont supérieures aux valeurs de γ dans l'environnement urbain et sont comprise dans les valeurs de γ en environnement dense urbain.

Après comparaison des valeurs des exposants de propagation de notre étude et celles de la littérature, nos valeurs sont nettement supérieures à certaines valeurs et sont sensiblement proches de d'autres.

- **Critiques du modèle de propagation déterminé**

Les critiques sur notre modèle de propagation consistent à présenter ses avantages et limites.

Les avantages du modèle proposé sont les suivants :

- Il peut être utilisé pour améliorer les pertes de propagation existantes,
- Il permet de développer de nouveaux modèles plus précis y compris des modèles pour les technologies nouvelles,
- Il favorise l'estimation des pertes de propagation sur une distance d'environ un kilomètre en considérant que la densité des obstacles dans l'environnement de propagation.

Bien que possédant des avantages, le modèle de propagation proposé présente quelques limites qui sont :

- C'est un modèle adapté seulement pour les environnements urbains outdoor,
- Il ne prend pas en compte les structures (formes géométriques, tailles...) des obstacles,
- Les fréquences d'utilisation sont comprises entre 800 MHz et 2600 MHz.
- Ce modèle est plus adapté à la zone d'étude qu'ailleurs

4.5. Conclusion du chapitre 4

Le canal de propagation est un moyen très important pour la qualité de la communication sans fil car il permet de connecter le terminal mobile au réseau. Cependant, la forte présence des obstacles perturbe considérablement la qualité des communications en réduisant la puissance émise à cause de la propagation multi trajet. Dans ce chapitre nous avons déterminé les paramètres du modèle de propagation proposé dans la dernière partie du chapitre précédent pour les fréquences d'émission 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz. Ces paramètres sont, l'exposant de propagation (γ), la moyenne des pertes dues aux effets de masques et d'évanouissement (X_σ) et les pertes constantes à une distance de référence (PL_0). Nous avons recueilli à partir des campagnes de mesures dans deux différents environnements, des puissances de réception et nous avons calculé ces différents paramètres par la méthode de régression linéaire. Ces paramètres de propagation nous ont permis d'estimer les pertes de propagation en zones urbaines dominée par une forte densité des obstacles. Les résultats de cette étude confirment ceux de la littérature scientifique car les valeurs moyennes des exposants de propagation sont comprises entre 1.9 et 4.8, ce qui explique la forte présence des obstacles dans les différents environnements. Nous pouvons dire que les pertes de propagation dans un canal radio mobile peuvent être estimées à partir des exposants de propagation. Les exposants de propagation dépendent à priori des conditions environnementales et des fréquences d'émission.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le déploiement des réseaux mobiles en zones urbaines est confronté aux conditions environnementales. La forte présence des obstacles tels que les bâtiments, immeubles et bien d'autres, ainsi que la mobilité du terminal constitue une problématique pour la modélisation du canal de propagation. Face à la densité du trafic et aux exigences en termes de qualité de service dans ces zones urbaines, une meilleure caractérisation du canal de propagation est nécessaire.

En effet, les modèles de propagation caractérisant la dynamique du canal radio mobile dans des configurations d'un type d'environnement ne sont pas adaptés à d'autres types.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à la problématiques du contrôle de puissance dans un canal de propagation radio mobile en environnements urbains extérieurs.

Nous avons vu que le mécanisme de contrôle de puissance le plus utilisé dans les systèmes de communication radio mobiles est basé sur l'algorithme Transmit Power Control (TPC). Ces algorithmes sont basés sur l'étude des performances du système à partir du contrôle des puissances d'émission. Nous nous sommes focalisés sur le contrôle de puissance en boucle ouverte. Ce mécanisme est basé sur l'analyse des paramètres P_0 et α sur les performance du système. Trois modèles de propagation existants adaptés aux environnements urbains extérieurs ont été utilisés pour évaluer l'impact des pertes de propagation sur les puissances d'émission. Nous avons constaté que la valeur de α égale à 0.2 optimise la puissance d'émission pour tous les trois modèles de propagation. La puissance d'émission est comprise entre -20 dBm et 20 dBm. En plus le modèle de WINNER II permet d'obtenir une puissance d'émission acceptable pour la valeur de α égale à 0.4.

Nous avons proposé une approche déterministe pour caractériser l'impact des environnements sur le canal de propagation à travers une plateforme de simulation. Cette approche est basée sur des mesures effectuées dans deux différents environnements à partir des fréquences de 800 MHz, 1800 MHz et 2600 MHz avec différentes largeurs de bande. Elle a nécessité d'enrichir les bases de données géographiques servant de support à la prédiction de propagation avec des détails statiques et dynamiques. Cette approche nous a permis de développer un modèle de propagation. Ce modèle de propagation fait partie des modèles empiriques à pente unique. Ils sont généralement utilisés en environnements urbains extérieurs, dans les cas où la structure exacte des obstacles n'est pas connue. Nous avons déterminé les paramètres du

modèle de propagation à savoir : les pertes dues aux effets de masques et d'ombrage (X_σ), les pertes constantes à une distance de référence (PL_0) et les exposants de propagation (γ) pour chaque environnement.

Les résultats de cette étude confirment ceux de la littérature scientifique car les valeurs moyennes des exposants de propagation qui constituent les principaux paramètres sont sensiblement comprises entre 2 et 5. Ce qui explique une forte présence des obstacles dans les différents environnements. Les pertes dues aux effets de masques et d'évanouissements suivent une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type σ dont les valeurs sont comprises entre 3 et 10.

Nous avons montré à partir de nos résultats que pour mieux gérer la puissance dans un canal de propagation radio mobile il est nécessaire d'optimiser la puissance d'émission du terminal mobile afin de lui garantir une bonne gestion de son énergie. Aussi il est important de proposer un modèle adapté à l'environnement de propagation afin de garantir une meilleure condition du canal radio mobile.

PERSPECTIVES

Les travaux de cette thèse ont mis principalement en œuvre un modèle de propagation empirique adapté aux environnements urbains extérieurs. Ce modèle bien que présentant certains avantages, nécessite des études complémentaires afin d'améliorer les performances du canal de propagation. Nous allons évaluer l'impact du modèle de propagation sur les performances du canal radio mobile en termes de taux d'erreur binaire (TEB) pour différents types de modulation (BPSK, QPSK et 16QAM) en fonction de la distance émetteur-récepteur, du rapport signal sur interférence et bruit (SINR), et la capacité du canal. Nous allons poursuivre notre étude en nous positionnant en scénarios indoor, nous ferons des mesures en considérant divers autres types d'obstacles (les hommes, les véhicules, etc....). Enfin nous allons étendre notre étude sur les hautes fréquences d'émission à savoir les fréquences de plus de 60 GHz et nous mènerons notre recherche dans d'autres types d'environnements (rural, suburbain, etc....).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [3GPP, 2009] 3GPP TS 23.110. (2009). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) access stratum; Services and functions, 9.0.0 Edition.
- [3GPP, 2010] 3GPP, “E-UTRA–UE radio transmission and reception”, TS 36.101 v9.1.0 (2010-06)
- [3GPP, 2002] 3GPP TS 25.214 version 3.10.0 Release 99, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer procedures (FDD), ETSI TS 125 214 V3.10.0 (2002-03)
- [3GPP, 2018] 3GPP TS 38.101-3 version 15.3.0 Release 15, 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios, ETSI TS 138 101-3 V15.3.0 (2018-10), 2018
- [Akinlabi et al, 2015] O. A Akinlabi, B.S. Paul, M. K. Joseph and H.C. Ferreira, Indoor Communication: Femtocell Behavior in an Indoor Environment, Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Vol II, March 2015
- [Alaa, 2011] Alaa CHOUMANE, Synthèse d’un canal de propagation par système multi antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité, UNIVERSITE DE LIMOGES, ECOLE DOCTORALE Science Technologie – Santé, FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES, INSTITUT DE RECHERCHE XLIM-UMR CNRS 6172, Thèse N°18, 2011
- [Alexandre, 2008] Alexandre Gondran. Modélisation et optimisation de la planification des réseaux locaux sans fil. Informatique [cs]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard; Université de Franche-Comté, 2008. Français. tel-00416060

- [Alexandre, 2016] Alexandre Chabory. Modèles Électromagnétiques pour les Systèmes et les Canaux de Transmission de l'Aéronautique. Electromagnétisme. Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2016. tel-01513077.
- [Amir et al., 2016] Amir. H, H. L. Seong, I. K. Dae, K. J. Hye and H. Seung, On uplink power control for small cell in LTE, ETRI, Conference Paper, January 2016.
- [Amir et al., 2018] Amir. H, R. S. Sinha and H. Seung-Hoon, Investigation of open-loop transmit power control parameters for homogeneous and heterogeneous small-cell uplinks, ETRI Journal 40(1) (2018), pp: 51-60
- [Andrea, 2005] Andrea. Goldsmith, WIRELESS COMMUNICATIONS, Stanford University, Cambridge University Press, 2005
- [ANFR, 2015] Rapport ANFR sur les phénomènes de propagation anormale : propagation par conduit et réflexion/réfraction sur les couches élevées de l'atmosphère. Référence ANFR(15)01. Janvier 2015
- [ANFR, 2019] Rapport ANFR(Agence Nationale des Fréquences). Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Juillet 2019
- [Anirudh et al, 2017] Anirudh Goel and Varun Jain, PERFORMANCE COMPARISON OF MOVING RELAY NODES IN LTE-ADVANCED (LTE-A), International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology Vol.(10) Issue(2), 2017, pp. 103-108 DOI: <http://dx.doi.org/10.21172/1.102.16>, e-ISSN:2278-621X
- [Artemenko et al., 2015] Artemenko O., Nayak A.H., Menezes S.B., Mitschele-Thiel A. (2015) Evaluation of Different Signal Propagation Models for a Mixed Indoor-Outdoor Scenario Using Empirical Data. In: Mitton N., Kantarci M., Gallais A., Papavassiliou S. (eds) Ad Hoc Networks. ADHOCNETS 2015. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 155. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25067-0_1

- [Asenov et al., 2013] Asenov, O., P. Koleva and V. Poulkov, Heuristic approach to dynamic uplink power control in LTE. Proceedings of the 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, Jul. 2- 4, IEEE Xplore Press, Rome, Italy, pp: 4799-0404. 2013 DOI: 10.1109/TSP.2013.6613927
- [Bamba, 2019] Bamba Sissokho. Gestion des interférences dans les systèmes MIMO massifs. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Limoges, 2019. Français. NNT : 2019LIMO0008. tel-02066900
- [Bendaoud, 2014] BENDAOU Fayssal , ABDENNEBI Marwen and DIDI fedoua. Allocation des ressources radio en LTE. International Congress on Telecommunication and Application'14, University of A. MIRA Bejaia, Algeria, 23-24 APRIL 2014
- [Bilal et al., 2010] B. Muhammad and A. Mohammed, "Uplink closed loop power control for LTE system," 2010 6th International Conference on Emerging Technologies (ICET), 2010, pp. 88-93, doi: 10.1109/ICET.2010.5638376.
- [Bouzigues, 2014] Marc-Antoine Bouzigues. Techniques vertes d'optimisation et d'adaptation du lien radio sans-fil. Sciences de l'ingénieur [physics]. INSA de Rennes, 2014. Français. NNT: 2014ISAR0021. tel01127554f
- [Buenestado et al., 2017] Buenestado, V., M. Toril, S. Luna-Ramírez and J. Ruiz Aviles, Self-Planning of base station transmit power for coverage and capacity optimization in LTE. Hindawi Mobile Inform. Syst., 2017, pp: 1-12. DOI: 10.1155/2017/4380676
- [Bhuvaneshwari et al., 2016] A. Bhuvaneshwari, R. Hemalatha, T. Satyasavithri, Semi Deterministic Hybrid Model for Path Loss Prediction Improvement, Procedia Computer Science, Volume 92, pp: 336-344, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.388>.
- [Castellanos et al., 2008] C. Ubeda Castellanos et al., "Performance of Uplink Fractional Power Control in UTRAN LTE," VTC Spring 2008 - IEEE

Vehicular Technology Conference, 2008, pp. 2517-2521, doi: 10.1109/VETECS.2008.554.

- [Chee et al., 2009] C. W. Tan, D. P. Palomar and M. Chiang, "Energy–Robustness Tradeoff in Cellular Network Power Control," in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 17, no. 3, pp. 912-925, June 2009, doi: 10.1109/TNET.2008.2003336.
- [Chen et al., 2015] Q. Chen, H. Zhao, L. Li, H. Long, J. Wang and X. Hou, "A Closed-Loop UL Power Control Scheme for Interference Mitigation in Dynamic TD-LTE Systems," 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2015.7145591.
- [Christine, 2005] Christine TURCK, Prédiction de couverture de champ radioélectrique pour les réseaux mobiles : L'apport de systèmes d'information géographique. Application en milieu urbain, Thèse, Université Louis Pasteur Strasbourg, P.174-183, 2005
- [Chuan et al., 2013] Chuan Chin Pu, Pei Cheng Ooi, and Wan-Young Chung, Accuracy and Stability Analysis of Path Loss Exponent Measurement for Localization in Wireless Sensor Network, International Journal of Digital Content Technology, and its Applications (JDCTA) Volume7, Number7, April 2013, pp: 1148-1156. DOI: 10.4156/jdcta.vol7.issue7.136
- [Dasarathan et al., 2007] V. Dasarathan, and al, Outdoor Channel Measurement, Pathloss Modelling and System Simulation of 2.4 GHz WLAN IEEE 802.11g in Indian Rural Environments, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007.
- [Dat-Duong, 2014] Dat-Duong Phan. Contrôle de la puissance pour les réseaux sans fil. Automatique / Robotique. Université de Poitiers, 2014. Français. <tel- 01095640v3>
- [Deussom et al., 2015] Deussom. D. E. M, Tonye. E .Optimisation du modèle d'Okumura Hata par la régression linéaire ; Application à la ville de Yaoundé au Cameroun, Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE).Volume 10, Issue 6, 2015 PP : 63-72. DOI : 10.9790/2834-10616372

- [Edenalisoa, 2017] Edenalisoa Rakotomanana, Association optimale d'utilisateurs dans un réseau cellulaire hétérogène, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2017
- [EFORT, 2018] Le Réseau Cœur 5G. EFORT 2018. <http://www.efort.com>.
- [EL Mahdi, 2014] EL Mahdi Driouch, Allocation Des Ressources Dans Les Réseaux Sans Fil Émergents, Université Du Québec À Montréal, 2014
- [Ericsson, 2017] Ericsson White Paper. 5G Systems. UEN 284 23-3251 rev B. January 2017
- [Erik et al, 2018] ERIK. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, ACADEMIC PRESS, Elsevier Ltd, 2018
- [Farhad et al., 2005] Farhad Meshkati, H. Vincent Poor, C. Stuart Schwartz and B. Narayan Mandayam, An Energy-Efficient Approach to Power Control and Receiver Design in Wireless Data Networks, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 53, NO. 11, pp :1885-1894, 2005
- [Fengming et al., 2013] Fengming, C. and F. Zhong, Downlink power control for femtocell networks. Proceedings of the 77th Vehicular Technology Conference, Jun. 2-5, IEEE Xplore Press, Dresden, Germany. 2013. DOI: 10.1109/VTCSpring.2013.6692518
- [Fernández et al., 2016] Fernández-Segovia, J.Á., S. Luna-Ramírez, M. Toril, A.B. Vallejo-Mora and C. Úbeda, 2016. A fast self-planning approach for fractional uplink power control parameters in LTE networks. Mobile Inform. Syst., 2016, pp:1-11. DOI: 10.1155/2016/8267407
- [Francisco et al., 2016] Francisco Martin-Vega, Gerardo Gómez, Mari Carmen Aguayo-Torres, Marco Di Renzo. Analytical Modeling of Interference Aware Power Control for the Uplink of Heterogeneous Cellular Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications,

Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, 15 (10), pp.6742 - 6757. Doi: 10.1109/TWC.2016.2588469. hal-01880149

- [Foschini et al., 1993] Foschini, Gerard J. and Zoran Miljanic, A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 42, NO. 4, NOVEMBER 1993, pp: 641-646
- [George et al., 2013] George. R. MacCartney, Junhong Zhang, Shuai Nie and T. S. Rappaport, "Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells," 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013, pp. 3948-3953, doi: 10.1109/GLOCOM.2013.6831690.
- [George et al., 2017] R. George, and Theodore S. Rappaport, Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 35, NO. 7, JULY 2017, pp.1663-1677
- [Góra et al., 2010] J. Góra, K. I. Pedersen, A. Szufarska and S. Strzyz, "Cell-Specific Uplink Power Control for Heterogeneous Networks in LTE," 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETEFCF.2010.5594439.
- [Grochla et al., 2019] Krzysztof Grochla and Mariusz Slabicki, Transmit power optimization in cellular networks with nomadic base stations, The Institution of Engineering and Technology, Vol. 13 Iss. 18, 2019, pp. 3068-3074
- [Gururaj et al., 2012] Gururaj, D. and P. Pandiaraj. D. Gururaj, P. Pandiaraj, Power Control Optimization for Lte-Advanced Relay Networks, Procedia Engineering, Volume 38, 2012, pp: 2866-2873, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.335>.

- [Hamouda, 2007] Hamouda. S, Analyse et amélioration de la gestion des ressources radio du système radio mobile de troisième génération UMTS et au-delà, thèse, Juin 2007
- [Holma et al., 2004] Holma. H and Toskala. A, WCDMA FOR UMTS Radio Access for Third Generation Mobile Communications, Third Edition, Jhon Willey & sons, Ltd, ISBN 0-470-87096-6, 2004
- [Holma et al., 2009] Holma, H., et Toskala, A, LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-99401-6, 2009
- [Huang, 2013] J. Huang, Open-loop and closed-loop uplink power control for LTE system, International Journal of Computer Applications (2013), pp:1-6
- [Huang et al., 2019] Huang, C., Ruisi He, Zhangdui Zhong, B. Ai, Yangli-ao Geng, Zhimeng Zhong, Qingyong Li, K. Haneda and Claude Oestges. "A Power-Angle-Spectrum Based Clustering and Tracking Algorithm for Time-Varying Radio Channels." IEEE Transactions on Vehicular Technology 68 (2019): 291-305.
- [Ian et al., 2009] Ian.C. Wong, O. Oteri, and W. McCoy, Optimal Resource Allocation in Uplink SC-FDMA Systems, IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 8, NO. 5, 2009, pp: 2161-2165
- [Isotalo, 2010] Isotalo. T, and Lempiainen, J. (2010). Measurements on HSUPA with uplink diversity reception in indoor environment. European Wireless Conference (EW) 2010.IEEE, pp: 523-527
- [ITU-R P., 2012] RECOMMENDATION ITU-R P.1411-6, Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor

radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, 2012

- [Janaswamy, 2003] R. Janaswamy, "Path loss predictions in the presence of buildings on flat terrain: a 3-D vector parabolic equation approach," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 8, pp. 1716-1728, Aug. 2003, doi: 10.1109/TAP.2003.815415.
- [Jankiraman, 2004] M. Jankiraman, *Space-time Codes and MIMO systems*. Artech House 2004
- [Jean-François, 2004] Jean-François PARDONCHE, *Systèmes de transmission sans fil multi-émetteurs, multi-récepteur pour des applications transports. Etude des modèles de canal de propagation*, Université des Sciences et Technologies de LILLE, No d'ordre : 3440, 2004
- [Jeffrey, 2005] Jeffrey G. Andrews. *Interference Cancellation for Cellular Systems: A Contemporary Overview*. IEEE Wireless Communications. April 2005
- [Jerzy, 2017] Jerzy. M., *QoS-based power control and resource allocation in cognitive LTE-femtocell networks*. Proceedings of the 24th International Conference on Computer Networks, Jun. 20-23, Springer, 2017, Cham, pp: 44-54. DOI: 10.1007/978-3-319-59767-6_4
- [Jiayin et al., 2012] Jiayin. Z, Pablo. S, Yongming. L, Lei. Z, Kuilin. C, *Pathloss Determination of Uplink Power Control for UL CoMP in Heterogeneous Network*, GC'12 Workshop: International Workshop on Cloud Base-Station and Large-Scale Cooperative Communications, 978-1-4673-4941-3/12/\$31.00 ©2012 IEEE, pp: 250-254.
- [Kaiming et al., 2015] K. Shen and W. Yu, "A coordinated uplink scheduling and power control algorithm for multicell networks," 2015 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2015, pp. 1305-1309, doi: 10.1109/ACSSC.2015.7421353.

- [Kambiz et al., 2003] Kambiz. S, J. L. Speyer and G. J. Pottie, "Integrated predictive power control and dynamic channel assignment in mobile radio systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 2, no. 5, pp. 976-988, Sept. 2003, doi: 10.1109/TWC.2003.817418.
- [Kaoutar, 2014] Kaoutar El Hariri Essamlali. Modélisation hybride du canal de propagation dans un contexte industriel [En ligne].Thèse Optoélectronique et micro-ondes. Poitiers : Université de Poitiers, 2014. Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>
- [Kemal, 2015] Kemal Davaslioglu. Energy Efficiency and Load Balancing in Next-Generation Wireless Cellular Networks. UNIVERSITY OF CALIFORNIA IRVINE. DOCTOR OF PHILOSOPHY in Electrical and Computer Engineering. 2015
<https://escholarship.org/uc/item/3gq7n4h2>
- [Khan, 2009] F. Khan, LTE for 4G Mobile Broadband: air interface technologies and performance. Cambridge, Royaume-Uni: Cambridge University Press, 2009.
- [Loic, 2017] Loïc Martin. Conception d'une antenne compacte de station de base pour réseaux cellulaires. Electronique. UNIVERSITE DE NANTES, 2017. Français. <tel-01575650>
- [Marceau et al., 2011] Marceau Coupechoux and Jean-Marc Kélif. How to Set the Fractional Power Control Compensation Factor in LTE? IEEE Sarnoff Symposium, May 2011, Princeton, United States. pp.1-5, 2011. <hal-00721232>
- [Maviel, 2013] Laurent Maviel. Modélisation et simulation des réseaux sans fil hétérogènes et non-stationnaires. Application aux topologies de petites cellules. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Lyon, 2013. Français. <tel-00942972>

- [Masoud et al., 2013] Masoud. H. and I. Kostanic. Path Loss Models for LTE and LTE-A Relay Stations. Universal Journal of Communications and Network 1(4): 119-126, 2013. DOI: 10.13189/ujcn.2013.010401
- [Mazda, 1993] Fraidoon Mazda, Telecommunications Engineer's Reference Book, Butterworth-Heinemann, 1993, ISBN 9780750611626, Livre,
<https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1162-6.50068-X>.
 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978075061162650068X>)
- [Müllner et al., 2009] Müllner. R., F. Carsten Ball, and K. Ivanov, Contrasting Open Loop, and Closed-Loop Power Control Performance in UTRAN LTE Uplink by UE Trace Analysis, IEEE ICC 2009
- [Mohammed, 2010] Mohammed Cheikh. Etude du canal de propagation radio pour les systèmes embarqués sans fil automobile. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Institut National Polytechnique de Toulouse -INPT, 2010. Français. tel-01067457
- [Nie et al., 2007] Nie. N, C. Cristina, and P. Agrawal, A Game Theoretic Approach to Interference Management in Cognitive Networks, pp: 1-21, 2007
- [Noman et al., 2011] Noman Shabbir, Muhammad T. Sadiq, Hasnain Kashif and Rizwan Ullah, Comparison of Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE) Network, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.3, No.3, September 2011, pp: 27-41. doi: 10.5121/ijngn.2011.3303
- [Nuttapol, 2009] Nuttapol Prayongpun. Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. tel-00396666

- [Pajusco, 2006] Patrice Pajusco. Modèles de propagation pour les systèmes radio mobiles. Vers des radiocommunications reconfigurables et cognitives : journées Scientifiques CNFRS, Mar 2006, Paris, France. Hal-02316306.
- [Pajusco et al., 2009] Patrice Pajusco, Nadine Malhouroux-Gaffet. Relation entre canal de propagation et canaux virtuels MIMO : étude et expérimentation. Journées scientifiques 2009 : "Propagation et télédétection", Mar 2009, Paris, France. hal-01912165
- [Pagani, 2005] Pascal Pagani. Caractérisation et modélisation du canal de propagation radio en contexte Ultra Large Bande. Autre. INSA de Rennes, 2005. Français. tel-00011220
- [Paulraj et al., 2003] Paulraj. A, R. Nabar and D. Gore, Introduction to Space-Time wireless communications, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2003
- [Pekka et al., 2008] Pekka, K., J. Meinilä, L. Hentilä and X. Zhao, 2008. IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 v1.2 WINNER II channel models
- [Pierre, 2003] Pierre, S. Réseaux et systèmes informatiques mobiles: Fondements, Architectures et applications. Presses inter Polytechnique. (2003).
- [Pierrick,1995] Pierrick Seïté. Capacité d'un réseau DS-CDMA micro cellulaire et détection multiutilisateurs. Université Paul Verlaine - Metz, 1995. Français. NNT: 1995METZ032S. tel-01777088
- [Pijcke, 2010] Benoit Pijcke. Contribution à la modélisation des interférences dans les systèmes cellulaires. Application à l'optimisation des débits. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. 2010
- [Pratibha et al., 2014] Pratibha Maina, Gopal Chandra Manna, Namrata Sahayam, Validation study of path loss models on wimax at 2.6 ghz frequency band in suburban environment for cell size planning, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.6, No.2, June 2014.

- [Premchandra et al., 2015] Premchandra Kumar., Bhushan Patil and Suraj Ram, Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution (LTE) Network, International Journal of Engineering Research and General Science Volume 3, Issue 1, pp: 373-379, 2015
- [Priti et al., 2017] Priti, D. Mukherjee, A. and De, D. Study of Indoor Path Loss Computational Models for Femtocell Based Mobile Network. Wireless Pers Commun 95, 3031–3056 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11277-017-3983-z>
- [Rasmus, 2012] Rasmus Birkelund Nielsen, Mauritio B. G. M. Nielsen, and Kim Højgaard-Hansen. Physical Layer measurements in 3GPP LTE. Aalborg University. Institut for Elektroniske Systemer Elektronik & IT. February 3, 2012
- [Rappaport, 2002] RAPPAPORT, T. S. Wireless Communications: principles and practice. Prentice Hall, seconde édition. 2002.
- [Ren et al., 2011] Z. Ren, G. Wang, Q. Chen, and H. Li. Modelling and simulation of Rayleigh fading, path loss, and shadowing fading for wireless mobile networks. Simulation Modeling Practice and Theory, 19(2):626–637, 2011. 15
- [Roxana, 2010] Roxana Burghilea. Contribution à la Simulation Déterministe de Canaux Radios Hétérogènes ULB :Problématique de la Prise en Compte Réaliste de l'Antenne. Electronique. UNIVERSITÉ DE RENNES 1, 2010. Français. tel-01131227
- [Saad et al., 2016] SAAD Sawsan Ali, ISMAIL Mahamod, et NORDIN Rosdiadee. DYNAMIC PARTIAL PATH-LOSS COMPENSATION-BASED POWER CONTROL TECHNIQUE IN LTE-A FEMTOCELL NETWORKS. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2016, vol. 83, no 2. pp: 303-312
- [Salma, 2016] Salma OUDJI. Analyse de la robustesse et des améliorations potentielles du protocole Radio Fréquences Sub-GHz KNX utilisé

pour l'IoT domotique. Université de Limoges Ecole Doctorale n°521 Sciences et Ingénierie de l'Information Laboratoire Xlim-RESYST UMR CNRS 7252. 2016

- [Sami et al., 2009] Sami, M.A. and G.L. Stuber, Interference Aware Subcarrier and Power Allocation in OFDMA-Based Cognitive Radio Networks. In: Multi-Carrier Systems and Solutions, Plass, S., A. Dammann, S. Kaiser and K. Fazel (Eds.), Springer, Dordrecht, ISBN-10: 9048125308, pp: 35-45. 2009
- [Sanchez et al., 2007] Sanchez. J and Thioune. M, UMTS, ISTE, Livre, 2007
- [Shan et al., 2010] Shan. Y, Q. Cui, X. Huang, X. Tao, An Effective Uplink Power Control Scheme in CoMP Systems, IEEE ,2010
- [Sinan et al., 2016] Sinan.G. A. A., B. M. Dani, M. M. Z. Mahfudz, R. A. Rahman, A. Saif, M. I. Yusof, M. A. Mansor and F. H. Azmat, an interference mitigation scheme for LTE based femtocell networks, American Institute of Physics, Conference Proceedings 1774, 2016, pp. 1-7
- [Sivaraj et al., 2016] Nirmala Sivaraj, Padmaloshani Palanisamy, Soft Computing Based Power Control for Interference Mitigation in LTE Femtocell Networks, Procedia Computer Science, Volume 79, 2016, pp: 93-99, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.03.013>.
- [Smith et al., 2002] Smith, C and Collins, D. 3G Wireless Networks, McGraw-Hill Professional. (2002).
- [Sonia et al, 2014] Sonia. M, Malik. N, P. Kanwar Singh Rekhi, S. Singh Malik, Uplink Power Control Schemes in Long Term Evolution, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), ISSN: 2249 – 8958, Volume-3, Issue-3, February 2014
- [Tehseen et al., 2018] Hassan, T.U.; Gao, F.; Jalal, B.; Arif, S. Interference Management in Femtocells by the Adaptive Network Sensing Power Control

Technique. Future Internet 2018, 10, 25.
<https://doi.org/10.3390/fi10030025>

- [Tejaswi et al., 2013] Tejaswi. E and Suresh B, Survey of Power Control Schemes for LTE Uplink, International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT), Vol. 4 (2), 2013, pp: 369-373
- [Tesserault, 2008] Tesserault Guillaume, Modélisation multi-fréquences du canal de propagation, Université de Poitiers, Faculté des sciences fondamentales et appliquées, Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur & Aéronautique, 2008
- [Tonyé et al., 2015] TONYE Emmanuel and DEUSSOM DJOMADJI Éric Michel, Optimisation de modèles de propagation à partir des données de mesures radio de la ville de Yaoundé, JOURNAL OF THE CAMEROON ACADEMY OF SCIENCES, Vol. 12 No. 3, pp : 189-205, 2015
- [UIT, 2002] UIT(Union internationale des télécommunications). Propagation des ondes radioélectriques dans le service mobile terrestre de Terre, dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques. Bureau des radiocommunications Edition 2002
- [Van, 2005] van Yem Vu. Conception et réalisation d'un sondeur de canal multi capteur utilisant les corrélateurs cinq-ports pour la mesure de propagation à l'intérieur des bâtiments. domain_other. Télécom ParisTech, 2005. English. pastel-00001791
- [Wang et al., 2012] D. Wang, and al, Near-Ground Path Loss Measurements and Modeling for Wireless Sensor Networks at 2.4 GHz, International Journal of Distributed Sensor Networks Volume 2012, Article ID 969712, 10 pp.1-10. DOI:10.1155/2012/969712
- [Weilian et al., 2017] Weilian. Su, T. Huseh Tien, and T. Ha, Power Control Weakness in Long Term Evolution Network, IEEE 4th International Conference on Cyber Security and Cloud Computing, 2017, pp :84-90, DOI: 10.1109/CSCloud.2017.33
- [Xiongwen et al., 2014] Xiongwen Zhao et al., "Comparisons of Channel Parameters and Models for Urban Microcells at 2 GHz and 5 GHz [Wireless Corner]," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 56, no. 6, pp. 260-276, Dec. 2014, doi:10.1109/MAP.2014.7011070.

- [Xudong et al., 2013] Xudong. X, C. Lin, X. Chen, and X. Shen, Toward Optimal Admission Control and Resource Allocation for LTE-A Femtocell Uplink, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, pp :1-15. DOI: 10.1109/TVT.2014.2351837
- [Yu et al., 2016] Y. Liu, L. Xu, Y. Chen, Y. Fan, B. Xu and J. Nie, "A novel power control mechanism based on interference estimation in LTE cellular networks," 2016 16th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2016, pp. 397-401, doi: 10.1109/ISCIT.2016.7751659.
- [Yuvraj, 2012] Yuvraj, S., Comparison of Okumura, hata and COST-231 models on the basis of path loss and signal strength. *Int. J. Comput. Applic.*, 59: 0975-8887. 2012.
- [Zachaeus et al., 2016] Zachaeus, K. A., O. K. Ogunremi and A. O. Akande. Genetic Algorithm Based Pathloss Optimization for Long Term Evolution in Lagos, Nigeria. *International Journal of Applied Science and Technology*. 2016. pp: 79-88 Vol. 6, No. 2
- [Zaher, 2017] Zaher Sayegh. Contribution à l'étude du canal de propagation à l'intérieur des bâtiments par simulations et mesures. Autre. INSA de Rennes, 2017. Français. NNT: 2017ISAR0029. tel-01924736
- [Zhang et al., 2020] H. Zhang and J. Zuo, "Optimization of Uplink Power Control Parameters in Wireless Cellular Networks," 2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), 2020, pp.738-741, doi: 10.1109/ICCCS49078.2020.9118456.
- [Zhenwei et al., 2011] Z. Wang, W. Xiong, C. Dong, J. Wang and S. Li, "A novel downlink power control scheme in LTE heterogeneous network," 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), 2011, pp: 241-245, doi: 10.1109/ICCP.2011.6089792.
- [Zhong et al., 2011] Zhong. Z, J. Hamalainen and Y. Yang, On Uplink Power Control Optimization and Distributed Resource Allocation in Femtocell Networks, *IEEE*, 2011

[Zhou et al]

T. Zhou, and al, A Deterministic Approach to Evaluate Path Loss Exponents in Large Scale Outdoor 802.11 WLANs, IEEE 34th Conference on Local Computer Networks (LCN 2009) Zürich, Switzerland; 20-23 October 2009, pp. 348-351 DOI: 10.1016/j.procs.2016.03.013

ANNEXE A: Publications scientifiques

Original Research Paper

Evaluation of the Impact of Obstacles on the Capacity of a LTE Network in Urban Area in the Uplink

¹Akohoule Alex, ^{1,2}Konate Adama, ^{2,3}Brou Pacôme and ^{1,2}Asseu Olivier

¹Institut National Polytechnique - Houphouët BOIGNY, Yamoussoukro/Côte d'Ivoire
Ecole Doctorale Polytechnique (EDP)

²Ecole Supérieure Africaine des TICs (ESATIC), Abidjan-Treichville/Côte d'Ivoire
Direction de la Recherche et l'Innovation Technologique (DRIT),

³Université Nangui Abrogoua (UNA), Abidjan/Côte d'Ivoire
Laboratoire des Mathématiques et informatique (LMI)

Article history

Received: 12-12-2018

Revised: 26-12-2018

Accepted: 14-01-2019

Corresponding Author:

Brou Pacôme

ESATIC/Direction de la
Recherche et de l'Innovation
Technologique, Treichville,
Zone 3, Km4/ Abidjan/ Côte
d'Ivoire

Email: pacome.brou@esatic.ci
broupacom@hotmail.fr

Abstract: Power control is a major issue in the deployment of 4G mobile networks. Indeed, environmental constraints (relief, Air, noise,...) affect the propagation channels of mobile network systems. The new multimedia services, which consume large amounts of radio resources (frequencies), then lead to an optimization of power control in the cellular coverage in the uplink direction. The aim is to optimize the capacity of radio resources in the cellular coverage based on a COST-231 Walfisch-Ikegami semi-empirical propagation model for power control in the upward direction. It is a question of studying the signal quality between a mobile station and the base station under the constraint of obstacles (Buildings) in order to evaluate the effect of propagation losses on the transmission power in Uplink using different frequencies of the network. Results show that the transmission power is strongly influenced by the path losses that depend on the carrier frequency. Higher the transmission frequency, the less the wave propagates due to propagation and penetration losses due to different barriers.

Keywords: 4G Networks, Uplink Power Control, Semi-Empirical Model COST-231 Walfisch-Ikegami

Introduction

In recent years, wireless technologies have developed rapidly. As a result of this evolution, transmission systems are likely to support a wide range of applications: voice, pictures, video and data. These applications require a high quality of service, which is why it is useful to have a robust system capable of managing this traffic. LTE technology in mobile networks addresses these concerns by offering several advantages, including:

- Improved throughput in Uplink and downlink
- Reducing interference

However, there are constraints that face these expectations such as:

- Cellular coverage
- Energy management

- Capacity of the access network
- Intercellular interference to edge of the cells
- Presence of obstacles is either natural or artificial

In this article, we will discuss the problem of the network's ability to ensure good cellular coverage in dense traffic areas under the constraint of the presence of obstacles, based on the parameters of power control. Aim is to analyse the effects of propagation losses on the signal transmitted at LTE-Advanced frequencies in order to optimize network capacity and cellular coverage from power control. Flowchart of this article is presented as follows: Section II presents work on LTE power control in the uplink. Section III presents the Uplink power control algorithm proposed in this paper. Section IV describes the experimental conditions, then the results of the simulations are presented and discussed. Finally, a conclusion on the research work will close this article by indicating a way forward for the further work to be carried out.

Related Work

Power control is a major challenge in today's telecommunications world. Indeed, transmission power has a significant influence on the quality of coverage and network capacity: on the Quality of Service (QoS). This is an issue that is the subject of intense research in mobile networks. Indeed, without power control, a single mobile terminal transmitting at too high a power could prevent the other terminals in the cell from communicating because several users transmit at the same frequency. So each user can be a source of interference for others. Thus, it is important to implement a mechanism that allows terminals to adjust their transmission power while ensuring good reception at the base station and also to keep their batteries as long as possible. This power problem arises both in terms of the power emitted by the mobile user and in terms of the power emitted by the base station to limit interference. The power control mechanism is used in LTE-A networks to manage: energy savings, coverage improvement, access network capacity and interference problems. Power control strategies can be divided into three categories (Belannague, 2012):

- Energy saving
- Minimization of interference at the edge of the cells
- Increased connectivity

In the literature, several studies have been proposed to solve these problems related to quality of service in LTE networks. Jerzy (2017) has proposed in his work an algorithm to reduce the transmission power in Femtocells LTE cognitive networks by satisfying a maximum number of users.

Gururaj and Pandiaraj (2012) have developed an algorithm to reduce interference from the power control of access points in a Femtocell network; to do this, they propose two methods to control the power of access point transmissions using flexible computing techniques: The neuro-controller for the Femtocells access point transmission power control strategy and the fuzzy logic controller for the Femtocells access point transmission power control. The reuse of frequencies in the latest generation mobile networks (4G+) results in the problem of interference in cellular coverage. There are two types of interference: intracellular interference, which is interference within the same cell and intercellular interference for adjacent cells. The development of Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) access technology has solved the problem of intracellular interference. However, with regard to intercellular interference, power control mechanisms are proposed to address it. This is the case in particular

with (Sami and Stuber, 2009). Who present two algorithms of sub-carrier and power allocation sensitive to interference to solve this problem within cognitive radio networks based on OFDMA technology (Sami and Stuber, 2009; Chee *et al.*, 2009) define methods for managing interference in cellular coverage in Uplink, therefore they hypothesize that power control in the upward direction in a network limited by interference can minimize energy consumption as well as some signal interference (Chee *et al.*, 2009). On the other hand, Kambiz *et al.* (2003) are developing a new predictive power control algorithm based on a Dynamic Channel and Power Allocation (DCPA) scheme; This algorithm makes it possible to optimally manage the allocation of resources in non-uniform and stationary environments due to the ever-increasing capacity requirements in mobile radio systems. Thus, power control can be done in both directions: from the base station to the mobile (Downlink) and from the mobile station to the base station (Uplink) (Kambiz *et al.*, 2003). In order to evaluate the overall performance of a multicellular network from the Uplink power control, Shen and Yu propose an interference-sensitive algorithm using the technique of programming the sum of the ratios to solve the problems associated with them (Kaiming and Wei, 2014). On the other hand, Asenov *et al.* (2013) use a heuristic approach to power control to improve the performance of the LTE network by considering the preferences of users with similar properties in cell coverage in the ascending direction (Asenov *et al.*, 2013).

In addition to interference problems in a cell, power control is also used to improve cellular coverage of LTE networks. In general, the cell coverage problem is to optimize from propagation models. These propagation models are essential tools for radio planning in mobile networks. They make it possible to evaluate the strength of the signal received by a mobile terminal, to evaluate the coverage radii and to deduce the number of cells required to ensure coverage of a given area (Riad *et al.*, 2017). Propagation models are used to characterize the attenuations undergone by a signal between two entities of a considered space (Base Station and Mobile Station). One of the important parameters to consider is distance. The further away the source is, the weaker the signal is. Radio propagation is essential for emerging technologies, so appropriate design, deployment and management strategies are developed for wireless networks. It is highly site-specific and can vary considerably depending on the terrain, operating frequency, mobile terminal speed, interface sources and other dynamic factors (Yuvraj, 2012). The quality of the signal during radio transmission depends on the losses recorded during the journey and the distance between the transmitter and the receiver. Thus, the relationship between path loss and distance from

transmitter and receiver defined by the propagation model gives an idea of the allowed path loss, the maximum range of cells. Environmental and atmospheric conditions, operating frequency and distance between transmitter and receiver are factors that can affect signal path loss (Premchandra *et al.*, 2015). Sivaraja and Palanisamy (2016) explain that cellular coverage can be evaluated from the Non-Line Of Sight (NLOS) path loss (Path-Loss) formula by considering the distance between the different equipment and some network parameters (Sivaraja and Palanisamy, 2016). Buenestado *et al.* (2017) propose a self-planning algorithm that adjusts the transmission power of a base station in the system (network) cell by cell by improving the overall spectral efficiency of the network in the downward direction with reduction of the transmission power of specific cells to eliminate interference problems (Buenestado *et al.*, 2017). In addition, Fengming and Zhong (2013) show that downlink power control can effectively balance performance, reduce interference and optimize cell coverage by providing a method of self-organization within the femto cell (Fengming and Zhong, 2013). Also the capacity of the E-UTRAN access network can be optimized using the power control mechanisms. In the upward direction, this is UpLink Power Control (ULPC). Indeed, ULPC is an important Radio Resource Management (RRM) process in mobile networks because it has a direct impact on signal levels; interference received and battery consumption of the mobile station (Smartphone, tablet, etc.) (Fernández-Segovia *et al.*, 2015). In the literature, there are two main methods of Uplink power control for Advanced LTE networks. Open Loop Power Control (OLPC) and Closed Loop Power Control (CLPC) (Amir *et al.*, 2016).

The OPCL makes it possible to evaluate the channel losses between the base station and the mobile user in order to define the power at which the mobile terminal must emit to compensate for fading phenomena; while the CLPC compensates for rapid fading that degrades the signal regularly. In the upward direction, it is based on the principle that the base station makes frequent estimates of the Signal to Interference Ratio (SIR) and compares them to a target value. The base station asks the mobile terminal to decrease its power if the estimated value is higher than the target value and to increase its power if it's lower than the target value. With this in mind, Robert *et al.* propose to improve performance at the edge of the cells by giving an overview of the behaviour of the different types of Uplink power control such as: fractional power control and complete path loss compensation (PL), as well as the impact of specific parameters set using a complete simulation environment at the system level (Mullner *et al.*, 2009). In addition, the Fractional Power Control (FPC) technique used in OLPC is characterized by two main parameters: the received power

P_0 and the compensation factor α (Coupechoux and Jean-Marc, 2011). It allows mobile terminals (MS) to partially correct their path loss, thus promoting dynamic changes in transmission power (Buenestado *et al.*, 2017). On this analysis, Fernández-Segovia *et al.* (2015) developed a self-planning approach method for Fractional Power Control (FPC) parameters by evaluating the nominal PUSCH power p_0 and the trajectory loss compensation α (Fernández-Segovia *et al.*, 2016).

Power Control Algorithm in Uplink

LTE power control algorithms are based on both an Open Loop (OL) or Closed Loop (CL) scheme or a combination of both. Indeed, the LTE uplink has three physical channels: Physical Random Access Channel (PRACH), Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) and Physical Uplink Control Channel (PUCCH) (Fernández-Segovia *et al.*, 2015). The power control algorithm we propose aims to improve access network capacity and LTE cellular coverage in the presence of obstacles. Thus we jointly evaluate the impact of the transmission power on:

- Signal loss during transmission between the base station and the mobile station
- Cellular coverage

The transmission power used to improve Uplink capacity in LTE networks is that determined at the PUSCH physical channel level and defined in (Mullner *et al.*, 2009) by:

$$P_{Tx} = \text{Min}\{P_{\max}, 10 \cdot \log_{10} M + P_0 + \alpha \cdot PL + \Delta_{TF} + f(\Delta_i)\}. \quad (1)$$

In order to help in understanding the different parameters in the formulation in (1), the reader should consult the articles referenced in (Mullner *et al.*, 2009; Bilal and Abbas, 2009):

- P_{\max} : Maximum permissible EU transmission power, by example at 23 dBm (200 mW)
- M : Size of PUSCH resource allocation to a specific EU expressed as number of Resource Blocks (RB) or number of Resource Blocks (RB) allocated to the EU
- P_0 Parameter specific to the cell/UE. It's used to control target SNR and is signalled by Radio Resource Control (RRC)
- α Path loss compensation factor. This is a parameter specific to a 3-bit cell in the range [0-1] reported by RRC:
 - If $\alpha = 1$, this is a total compensation for loss of way. We then have conventional power control
 - If $0 < \alpha < 1$ it's a fractional compensation for loss of path. This involves fractional power control

- If $\alpha = 0$ there is no compensation for loss of way. So no power control. This means that all UEs will use the maximum allocated transmission power (Bilal, 2008)
- *PL*: Loss of way between UE and eNodeB
- Δ_{TF} : Is the cell or EU-specific modulation and coding scheme defined in the 3GPP specifications for LTE. It depends on the Transport Format (TF)
- $f\Delta_i$ defines the specific correction term Close Loop Power Control (CLPC) with increase or decrease of relative or absolute power depending on the function

The correction values Δ_i are generated by comparing the level and quality measurements filtered in Uplink with specific targets defined by a two-dimensional decision matrix. This matrix is implemented in the eNodeB and is designed generically and scalably to use QoS, PL estimates and interference in neighbouring cells to increase or decrease power. UE defines its initial transmission power according to the parameters received from the eNodeB and the calculation of its path loss. It is interesting to note that Δ_i is reported by eNodeB to any EU after establishing its initial transmission power.

That is, Δ_i has no contribution to the initial setting of the UE transmission power. The expression on the basis of which an EU establishes its initial power, can be obtained from Equation (1) by ignoring Δ_{TF} and the closed loop correction while the power limitation can be neglected because it corresponds to the EU to comply with it (Bilal, 2008). Thus, this equation becomes:

$$P_{Tx} = 10 \cdot \log_{10}(M) + P_0 + \alpha \cdot PL \quad (2)$$

Most of the authors who studied power control from Equation (2) focused on the evaluation of the parameters P_0 and α . However, we focus on the

Propagation Loss (PL) parameters that are important for the evaluation of transmission power.

Propagation Losses

Propagation Losses (PL) are calculated from propagation models which are essential tools for radio planning and optimization in mobile networks. They make it possible to evaluate the power of the signal emitted or received by a mobile terminal, the coverage radii and to deduce the number of cells required to cover a given area (Riad *et al.*, 2017). They can therefore be used to characterize the attenuations experienced by a signal between the base station and the mobile station. Figure 1 illustrates this point.

Radio propagation assessment is essential for the development of appropriate design, deployment and management strategies for any wireless network as it is highly site-specific. There are different propagation models for LTE and by comparing them, the selection of one of them is made according to the objectives sought. The appropriate radio propagation model is chosen taking into account the behaviour of the signal during transmission and factors that may affect path loss such as environmental conditions, operating frequency, atmospheric conditions, transmitter-receiver distance and mobile terminal speed (Premchandra *et al.*, 2015). Propagation models are used to estimate the value of the path attenuation. Thus there are several types of propagation models that can be grouped into two main categories (Yuvraj, 2012):

- **Empirical Models:** These are mathematical formulas used to predict the impact of a transmitter on a certain reception area
- **Physical Models:** Predict the propagation of radio waves and calculate its paths taking into account reflection and diffraction phenomena

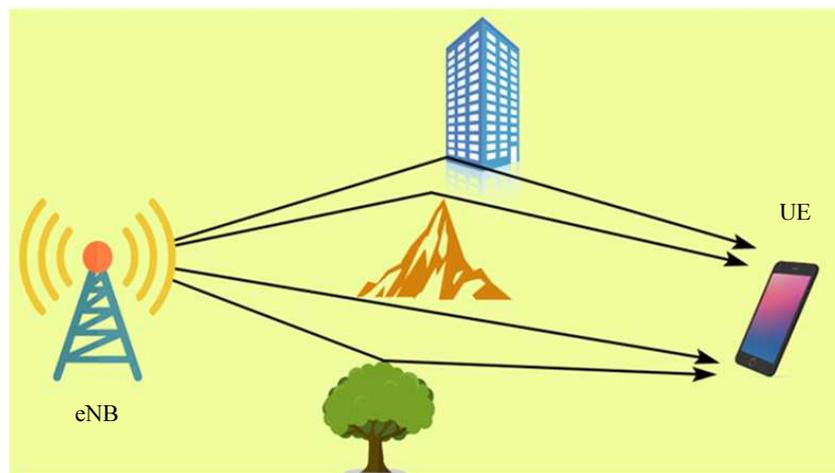


Fig. 1: Attenuation effect on a signal in the presence of obstacles

However, there are some who have characteristics of both. These are semi-empirical models.

In our study we use the formulas of the COST propagation model Walfisch-Ikegami which is part of the semi-empirical models (Yuvraj, 2012) to evaluate the impact of obstacles on path loss in emission with LTE frequencies.

Model Description

The COST-231 Walfisch-Ikegami model is an extension of the COST231-Hata model

It's a combination of the trajectory loss parameters of the Walfisch-Bertoni model and the Ikegami model (Noman *et al.*, 2011; Premchandra *et al.*, 2015). It's suitable for macro, micro and picocellular urban environments (valid from 20 m) in direct (Line Of Sight) and non-direct (Non Line Of Sight) visibility. It takes into account the diffraction and reflection properties of buildings by offering good accuracy (average building height and separations, average street widths, etc.) (Noman *et al.*, 2011). COST-231 Walfisch-Ikegami model is characterized by two functions:

- The function of line of sight, the wording of which is as follows:

$$PL_{LOS}(dB) = 20\log(d) + 42.64 + 20\log(f) \quad (3)$$

- The non-direct visibility function given by:

$$PL_{NLOS}(dB) = PL_{LOS} + PL_{RST} + PL_{MSD} \quad (4)$$

For the rest of this article, our work is based on the model of non-direct visibility. Thus:

- PL_{LOS} is the free space attenuation and is described as follows:

$$PL_{LOS} = 20\log(d) + 32.45 + 20\log(f) \quad (5)$$

- PL_{RST} represents the diffraction from the roof to the street and is defined as:

$$PL_{RST} = -16.19 - 10\log(w) + 10\log(f) + 20\log(h_b - h_r) + PL_{ORI} \quad (6)$$

Where:

h_r : Size of mobile station

h_b : Size of base station

w : The street width

- PL_{ORI} is a function of the antenna orientation with respect to α street (in degrees) and is defined as follows:

$$PL_{ORI} = \begin{cases} -10 + 0.35\alpha & \text{for } 0 \leq \alpha \leq 35 \\ 25 + 0.0075(\alpha - 35) & \text{for } 35 \leq \alpha \leq 55 \\ 4 + 0.114(\alpha - 55) & \text{for } 55 \leq \alpha \leq 90 \end{cases} \quad (7)$$

- PL_{MSD} Representing the diffraction attenuation due to multiple obstacles is specified by:

$$PL_{MSD} = BL_{BSH} + K_A + K_D \log(d) + K_F \log(f) - 9\log(S_B) \quad (8)$$

Or:

$$PL_{BSH} = \begin{cases} -18\log(1 + h_r - h_b) & \text{for } h_b \leq h_r \\ 54 + 0.8(h_r - h_b)2d & \text{for } h_r \leq h_b \text{ and } d \leq 0.5\text{km} \end{cases} \quad (9)$$

$$K_A = \begin{cases} 54 & \text{for } h_b \leq h_r \\ 54 + 0.8(h_r - h_b) & \text{for } h_r \leq h_b \text{ and } 0.5 \text{ km} \leq d \end{cases} \quad (10)$$

$$K_D = \begin{cases} 18 + 15\left(\frac{h_r - h_b}{h_b}\right) & \text{for } h_b \leq h_r \\ 18 & \text{for } h_r \leq h_b \text{ and } 0.5 \text{ km} \leq d \end{cases} \quad (11)$$

$$K_F = -4 + K\left(\frac{f}{924}\right) \quad (12)$$

$k = 0,7$ for suburban centres and 1.5 for metropolitan centres.

To simplify our work, we use the formula proposed by Jerzy (2017):

$$PL_{NLOS}(dB) = 20\log(d) + 46.4 + 20\log(f) + L_w \quad (13)$$

Where:

d : Distance in meter between the base station and UE.

f : Carrier frequency (MHz).

$L_w = n_w PL_w$: Expresses penetration losses due to obstacles (dB).

$L_w = 20n_w$: For thick obstacles (exterior walls)

$L_w = 5n_w$: For light obstacles (interior walls). n_w Represents the number of obstacles between the base station and mobile station.

Indeed, penetration losses can be defined as the amount of signal power (measured in dB) lost when the signal passes through an obstacle (it can be a building, a ground, a tree...). The reason for these losses is the reflection of the wave trying to pass through the obstacle and the additional absorption made by it. The calculation of these losses is important for the total loss of path. So tolerating them could be critical, especially in environments with many obstacles.

The mobile station may be moving in the cell, so there will be a variation in the number of obstacles, which can affect the propagation of the wave. To simplify our study we consider the case where the mobile station is outside the buildings and is not moving in the cell. Equation (3) is obtained from the free space propagation formula given by the following Friis relationship:

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot (\lambda / 4\pi d)^2 \quad (14)$$

Where:

- P_R : Received signal strength
- P_T : Power of the transmitted or transmitted signal
- G_R : Antenna reception gain
- G_T : Gain of the transmitting antenna
- λ : Wave length

Commonly if:

$$G_T = G_R = 1; \text{ alors } : \frac{P_T}{P_R} (4\pi d / \lambda)^2 = (4\pi df / c)^2 \quad (15)$$

Thus:

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) \quad (16)$$

$$P_L(dB) = 10 \log (4\pi df / c)^2 = 20 \log (4\pi df / c) \quad (17)$$

Experimental Conditions: Materials and Data

In our simulation we used a laptop PC equipped with a processor, i3-2310M CPU core(TM) @ 2.10 GHz (4 CPUs), 4Gb RAM, Intel(R) HD and a Windows10 professional 64bits OS. We did our simulations with MATLAB R2015b software.

The performance of the system is assessed analytically. The analyses are made for the case of medium-sized cells with a radius $r = 1000\text{m}$; hence the estimated path loss at a distance of 1000 m. In our calculations, we use parameters such as carrier frequencies, distance and the presence of three obstacles between transmitter and receiver. The LTE system under consideration uses a channel width of 5 MHz, i.e., 25

Resource Blocks (RB) of 180 kHz each. Uplink transmission is limited to 5 resource blocks per User Equipment (UE), which represents a reasonable compromise between throughput, power propagation and increased bandwidth noise. The path loss and transmission power are calculated from Equations (2) and (4) above. Resulting graphs are plotted using MATLAB. Radio propagation model describes the behaviour of the signal when it is transmitted from the transmitter to the receiver. It gives a relationship with the distance between transmitter and receiver and the loss of path. From the loss of path, we can get an idea of the power that the mobile terminal must emit to access the radio resources in the cell. The loss of trajectory or propagation depends on frequencies, the environment (rural, urban, suburban) and the distance between transmitter and receiver. The simulation parameters are given in Table 2. They are used in the simulation scenario to obtain the given results. To make our scenario more practical in the simulations, NLOS is used in urban conditions because of the traffic density in this type of environment.

Simulation Results

LTE technology transmits on six (6) different channels. Each channel is assigned to a frequency and each frequency type determines a number of resource blocks available (See Table 1).

The following figures are the results of the simulations obtained with the parameters mentioned in Table 2. In the first graph (Fig. 2) we present the results of the transmitted power and trajectory in the absence of obstacles (buildings). Then we show the results with the presence of obstacles in the second graph (Fig. 3).

Table 1: Bandwidths for the LTE network per channel

| Number of channel | Channel bandwidth (Mhz) | Number of resource blocks |
|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | 1.4 | 6 |
| 2 | 3.0 | 15 |
| 3 | 5.0 | 25 |
| 4 | 10.0 | 50 |
| 5 | 15.0 | 75 |
| 6 | 20.0 | 100 |

Table 2: System-level simulation model parameters

| Parameters | Values |
|---|---|
| Frequency band (Mhz) | $f = 1.4; 3; 5; 10; 15; 20$ |
| Number of resource blocks M | $M = 6; 15; 25; 50; 75; 100$ |
| Transmitter distance $d(\text{m})$ | $d = 1000 \text{ m}$ |
| Path loss compensation factor α | $\alpha = 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 0.9; 1$ |
| Rated power contained in a resource block P_o | $P_o = -110; -105; -100; -90; -80; -60$ |
| Loss of penetration P_{LW} (dB) | 20Db |
| Loss of path with obstacle (dB) | $PL_{NLOS}(\text{db}) = 20 \log(d) + 46.4 + 20 \log(f) + L_W$ |
| Loss of path with obstacle (dB) | $P_{TX} = 10 \cdot \log_{10} M + P_o + \alpha PL$ |
| Number of obstacles | 3 (Building) |

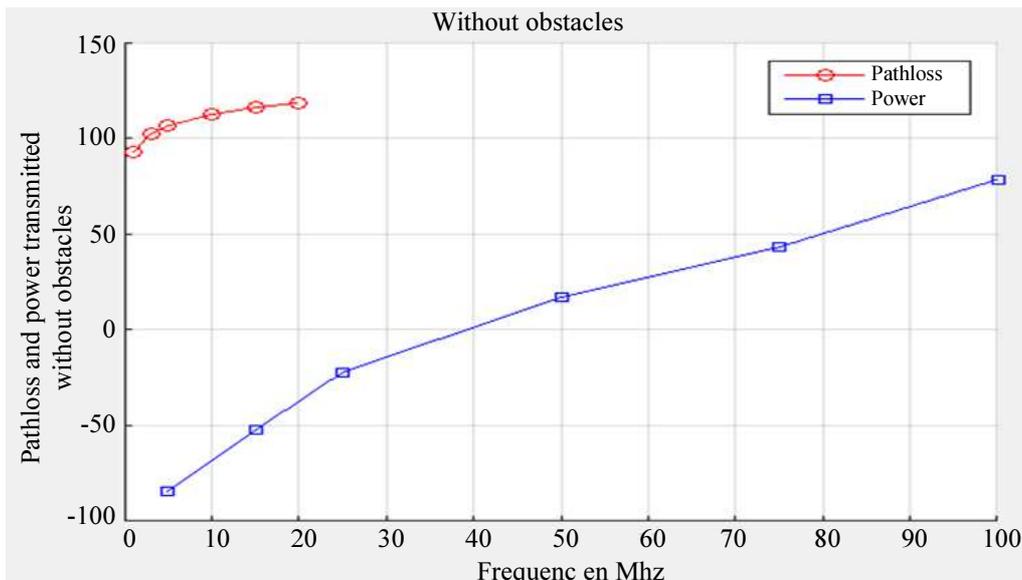


Fig. 2: Propagation and transmission power in the absence of obstacles

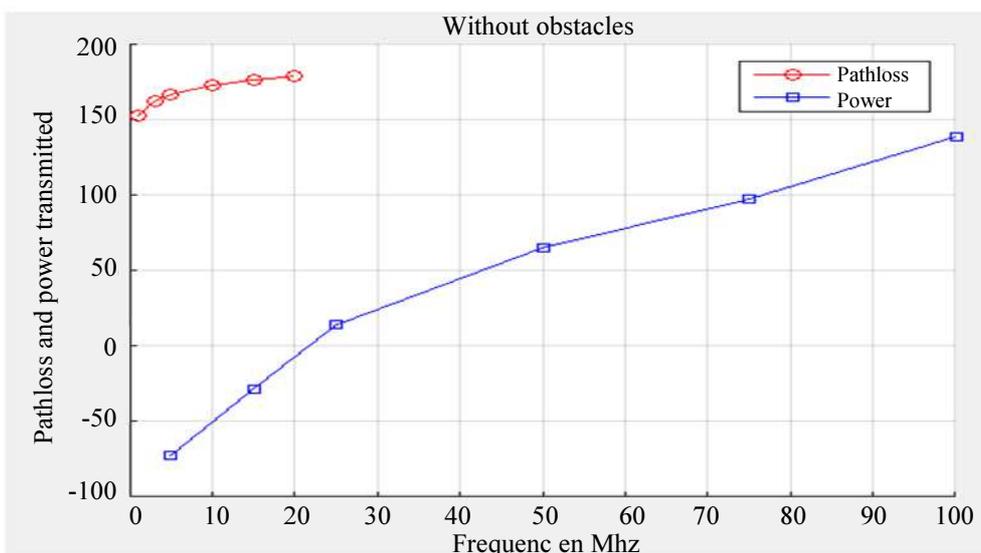


Fig. 3: Propagation and transmission power in the presence of obstacles

Analyses and Interpretations

In Fig. 2 and 3, the red curves represent the propagation losses and the blue curves represent the transmission power. Figure 2 shows the propagation losses and transmission power in the absence of obstacles. Figure 3 shows the propagation losses and transmission power in an environment with buildings present we limited ourselves to three obstacles (buildings: buildings) to simplify our study. In the absence of buildings (Fig. 2), for the 1.4 MHz frequency, the propagation loss is less than 100 dB

and with the frequencies of 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz and 20 MHz the losses are greater than 100 dB. In the same environment, we notice that the emission powers for the frequencies of 1.4 Mhz, 3 Mhz and 5 Mhz are less than 0 dB. Unlike the frequencies of 10 Mhz, 15 Mhz and 20 Mhz where the emitted powers are greater than 0 dB. On the other hand, the emitted powers are greater than 0 dB for the frequencies of 5 Mhz, 10 Mhz, 15 Mhz and 20 Mhz. In Fig. 4, we simultaneously evaluated the effect of propagation losses on emission powers in environments with buildings at each frequency.

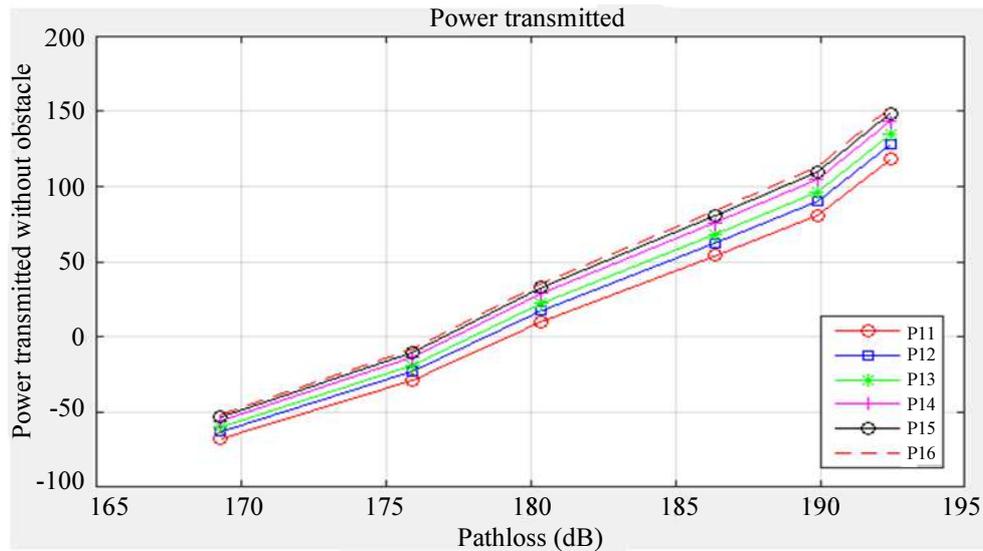


Fig. 4: Transmitting power as a function of propagation losses for each frequency

In this figure we also see that only propagation losses using the frequencies of 1.4 Mhz and 3 Mhz allow acceptable emission powers, i.e. less than 0 dB.

We can therefore say that the higher the frequencies, the greater the propagation losses. This is due to the fact that high frequencies emit at short wavelengths. Also the presence of obstacles such as buildings considerably degrades the transmitted signal. Likewise, the increase in path losses weakens the transmitted signal due to multi-path effects; this leads to a need to increase the transmission power in order to maintain the minimum level of the signal up to the receiver. Thus, the battery life of mobile stations can be reduced and also create interference, especially for those at the edge of the cells. Therefore, to minimize the transmission power it is preferable to choose low frequencies which are also limited in number of resource blocks.

Discussion

Transmission power as a function dependent on propagation losses was studied using frequencies from LTE technology. Indeed, data traffic is carried out through the radio waves transmitted and received by the various equipment that make up the network (base stations and UEs). These waves are emitted from a certain number of frequencies: from 1.4Mhz to 20Mhz. The impact of propagation losses on transmission power is evaluated using formulae (2) and (13). In Fig. 2, with propagation losses below 150dB, transmission powers are below 100dB. This is due to the absence of obstacles in the environment. With propagation losses greater than 150 dB in (Fig. 3),

the transmission power is above 100 dB for only frequencies greater than 15 Mhz. We developed our scenario with the presence of 3 obstacles (buildings) between the base station and the EU. It can therefore be said that the higher the frequencies, the greater the propagation losses and this leads to an increase in transmission power (Fig. 4). High frequencies transmit at short distances, unlike low frequencies which transmit over long distances. As a result, the transmission power decreases as you move further away from the transmitter and the wave encounters obstacles in its path. The presence of obstacles such as buildings considerably degrades the transmitted signal due to multi-path effects. Thus, based on path or propagation losses depending on frequencies, the environment (rural, urban, suburban) and the distance between transmitter and receiver, the transmission power of the mobile phone in a cell can be estimated. The high presence of obstacles in an environment requires an increase in transmission power to maintain the signal level to the receiver. However, increasing power can degrade system capacity, reduce the resistance of mobile station batteries and create interference at cell edges. It's therefore necessary to optimize the transmission power by taking into account the different obstacles in the propagation environment in order to guarantee the quality of service.

Conclusion

In this work we analyzed the impact of propagation loss on transmission power in the cellular coverage of LTE-Advanced networks in Uplink with the presence of obstacles. An analytical approach has been adopted for parameters such as frequency, resource blocks and path losses. We have shown that transmission power is

influenced by path losses, which in turn depend on the carrier frequency. The higher the transmission frequency, the less the wave propagates due to propagation and penetration losses due to different obstacles. Thus, it is preferable to transmit on frequencies but they are unfortunately limited in terms of the number of resource blocks.

In our future work, we will propose a model for optimizing uplink power control. This model will take into account the main parameters relating to obstacles such as: building size, weight, wall thickness, as well as EU mobility. Indeed, these parameters represent a real challenge for the optimization of LTE-Advanced

Author's Contributions

All authors equally contributed (Literature review, model definition, experiments and interpretation of results) to the success of the manuscript. Also, all authors participated in writing the manuscript.

Ethics

This article has not been published in any other scientific journal or elsewhere. This article is an original research paper.

References

- Amir, H., H.L. Seong, I.K. Dae, K.J. Hye and H. Seung, 2016. On uplink power control for small cell in LTE. Dongguk University.
- Asenov, O., P. Koleva and V. Poulkov, 2013. Heuristic approach to dynamic uplink power control in LTE. Proceedings of the 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, Jul. 2-4, IEEE Xplore Press, Rome, Italy, pp: 4799-0404. DOI: 10.1109/TSP.2013.6613927
- Belannague, T., 2012. Modélisation mathématique du contrôle de puissance, de l'affectation des canaux et de la capacité dans les réseaux sans fil maillés (MESH). Université du QUÉBEC.
- Bilal, M. and M. Abbas, 2009. Performance evaluation of uplink closed loop power control for LTE system. Proceedings of the IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall, Sept. 20-23, IEEE Xplore Press, Anchorage, AK, USA, pp: 1-5. DOI: 10.1109/VETECF.2009.5378852
- Bilal, M., 2008. Closed loop power control for LTE uplink. MSc Thesis, Blekinge Institute of Technology School of Engineering.
- Buenestado, V., M. Toril, S. Luna-Ramírez and J. Ruiz-Avilés, 2017. Self-Planning of base station transmit power for coverage and capacity optimization in LTE. *Hindawi Mobile Inform. Syst.*, 2017: 1-12. DOI: 10.1155/2017/4380676
- Chee, W.T., D.P. Palomar and C. Mung, 2009. Energy-robustness tradeoff in cellular network power control. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 17: 912-925. DOI: 10.1109/TNET.2008.2003336
- Coupechoux, M. and K. Jean-Marc, 2011. How to set the fractional power control compensation factor in LTE? Proceedings of the 34th IEEE Sarnoff Symposium, May, 3-4, IEEE Xplore Press, Princeton, NJ, USA, pp: 1-5. DOI: 10.1109/SARNOF.2011.5876464
- Fengming, C. and F. Zhong, 2013. Downlink power control for femtocell networks. Proceedings of the 77th Vehicular Technology Conference, Jun. 2-5, IEEE Xplore Press, Dresden, Germany. DOI: 10.1109/VTCSpring.2013.6692518
- Fernández-Segovia, J.Á., S. Luna-Ramírez, M. Toril, A.B. Vallejo-Mora and C. Úbeda, 2015. A computationally efficient method for self-planning uplink power control parameters in LTE. *EURASIP J. Wireless Commun. Network.* DOI: 10.1186/s13638-015-0320-7
- Fernández-Segovia, J.Á., S. Luna-Ramírez, M. Toril, A.B. Vallejo-Mora and C. Úbeda, 2016. A fast self-planning approach for fractional uplink power control parameters in LTE networks. *Mobile Inform. Syst.*, 2016: 1-11. DOI: 10.1155/2016/8267407
- Gururaj, D. and P. Pandiaraj, 2012. Power control optimization for LTE-advanced relay network. *Proc. Eng.*, 38: 2866-2873. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.335
- Jerzy, M., 2017. QoS-based power control and resource allocation in cognitive LTE-femtocell networks. Proceedings of the 24th International Conference on Computer Networks, Jun. 20-23, Springer, Cham, pp: 44-54. DOI: 10.1007/978-3-319-59767-6_4
- Kaiming, S. and Y. Wei, 2014. A coordinated uplink scheduling and power control algorithm for multicell networks. Proceedings of the 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 8-11, IEEE Xplore Press, Pacific Grove, CA, USA. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421353
- Kambiz, S., L. Jason and J. Gregory, 2003. Integrated predictive power control and dynamic channel assignment in mobile radio systems. *Trans. Wireless Commun.*, 2: 976-988. DOI: 10.1109/TWC.2003.817418
- Mullner, R., C.F. Ball, K. Ivanov and J. Lienhart, 2009. Uplink Power Control Performance in Utran LTE Networks. In: *Multi-Carrier Systems and Solutions*, Plass, S., A. Dammann, S. Kaiser and K. Fazel (Eds.), Springer Science and Business Media B.V., Dordrecht, ISBN-10: 978-90-481-2530-2, pp: 175-184.
- Noman, S., T. Muhammad, K. Hasnain and U. Rizwan, 2011. Comparison of radio propagation models for Long Term Evolution (LTE) network. *Int. J. Next-Generat. Net.* 3: 23-41

- Premchandra, K., P. Bhushan and R. Suraj, 2015. Selection of radio propagation model for Long Term Evolution (LTE) network. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, 3: 373-379.
- Riad, S., L. Saidi and Z.E.A. Regai, 2017. Contribution to the performance of mobile radio systems by optimizing the okumura hata model by linear regression: Application to the city of Annaba in Algeria. *Int. J. Electrical Eng. Inform.*, 9: 4. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.4.3
- Sami, M.A. and G.L. Stuber, 2009. Interference Aware Subcarrier and Power Allocation in OFDMA-Based Cognitive Radio Networks. In: *Multi-Carrier Systems and Solutions*, Plass, S., A. Dammann, S. Kaiser and K. Fazel (Eds.), Springer, Dordrecht, ISBN-10: 9048125308, pp: 35-45.
- Sivaraja, N. and P. Palanisamy, 2016. Soft computing based power control for interference mitigation in LTE femtocell networks. *Proc. Comput. Sci.*, 79: 93-99. DOI: 10.1016/j.procs.2016.03.013
- Yuvraj, S., 2012. Comparison of Okumura, hata and COST-231 models on the basis of path loss and signal strength. *Int. J. Comput. Applic.*, 59: 0975-8887.



POWER CONTROL MECHANISM BASED ON THE ESTIMATION OF PROPAGATION LOSSES IN LTE TECHNOLOGY

Adama Konate^{1,2}, Alex Akohoule¹, Pacôme Brou² and Olivier Asseu^{1,2}

¹Institut National Polytechnique - Houphouët Boigny

Ecole Doctorale Polytechnique (EDP)

UMRI Électricité, Électronique Appliqués (UMRI 78)

Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²Ecole Supérieure Africaine des TIC (ESATIC)

Laboratoire des Sciences Technologiques,

de l'Information et de la Communication (LASTIC)

Équipe Mathématiques, Application et Complexité (MAC)

Equipe Optique Non-linéaire,

Réseaux Optiques et Télécommunications (ONET)

Abidjan, Côte d'Ivoire

Abstract

Urbanization of cities is a problem for the quality of signal transmission power. Thus, the objective of this paper is to define a power control mechanism based on an estimation of the propagation losses due to obstacles (buildings, houses) in an LTE/LTE-advanced network. Our methodology focuses on a comparison between different radio propagation models that can be used in LTE/LTE-advanced technology such as: the propagation models COST 231 Walfisch-Ikegami, 3GPP, WINNERII and the one proposed by Saulis-Vitas in

Received: May 1, 2020; Accepted: June 6, 2020

Keywords and phrases: power control, LTE/LTE-advanced technology, COST 231 Walfisch-Ikegami model, Saulis-Vitas model, propagation loss.

an urban area based on the following parameters: base station height, building height, obstacle density, mobile position, street width and carrier frequency. From simulations made on the MATLAB platform, the results show that the COST 231 Walfisch-Ikegami model has more propagation loss compared to the Saulis-Vitas model which provides better results in loss compensation by optimizing power control for a value of $P_0 = -60$ dBm and $\alpha = 0.2$.

1. Introduction

Rapid growth in mobile broadband subscriptions has increased demand in terms of data throughput. According to Ericsson's mobility report, by 2021, the number of mobile broadband subscriptions will reach 9 billion, of which 7.7 billion will use mobile data (Sajjad et al. [18]). In addition, the growth of data and video traffic on smartphones will increase by a factor of 20 and 25, respectively (Sajjad et al. [18]). All these challenges motivated the 3GPP (3rd Generation Partnership Project) to propose LTE-advanced (long term evolution advanced) from 2010 to reach the required level of data rates. LTE-advanced is a promising technology offering download speeds of 300Mbps and 150Mbps with spectral efficiency. In practice, the system shall use a total bandwidth of 100MHz composed of five separate components of 20MHz each. However, the deployment of these new technologies in urban areas faces many environmental challenges. Indeed, these areas are characterized by a density of dwellings (buildings and apartment blocks) which constitute an obstacle to the propagation of waves and can degrade the transmission power which is a necessary resource for maintaining signal quality. Wave propagation and signal transmission power are more disturbed by the density of obstacles. Thus, mobile user inside buildings mainly suffers from poor signal reception due to low signal penetration through walls and attenuation that can lead to total signal loss (Priti et al. [16]). However, outdoors, it is subject to losses due to diffraction, refraction and reflection effects caused by buildings, houses and trees.

Indeed, level of the received signal power determines the quality of the message at the destination. However, in case of high path loss, the

transmission power is considerably lower than that defined by the total path loss compensation mechanism, which results in fewer resource blocks being allocated by the adaptive transmission bandwidth and, consequently, lower throughput for frontier cell users (Huang [9]).

Methodology for writing this article is as follows: Section 2 presents a state of the art on power control in LTE/LTE-advanced technology and some propagation models. Section 3 briefly introduces the LTE/LTE-advanced network. Section 4 describes the simulation scenarios. Finally, results of the simulations are discussed in Section 5, and we conclude this article with a conclusion, indicating the prospects for further research.

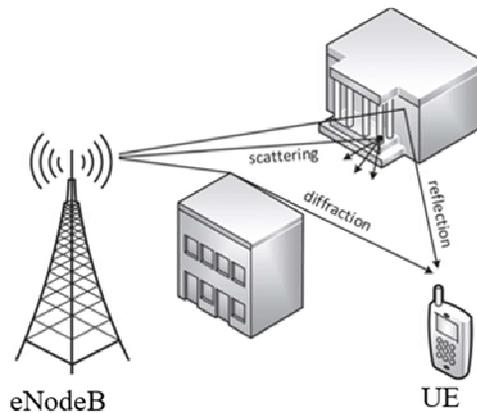


Figure 1. The effects of buildings and houses on the transmitted signal.

2. Related Works

Researches aimed at the development of power control mechanisms in 4G LTE networks are very varied and prolific. Most of these algorithms aim at improving system performance in scenarios where the user equipment (UE) is likely to be power-limited, especially in urban environments characterized by a high density of obstacles (buildings and houses) whose presence can deteriorate the quality of the transmitted and received power. Thus, 3GPP (3rd Generation Partnership Project) standard introduced transmission power control (TPC) to enable power control on both the

downlink and uplink in LTE/LTE-advanced cellular coverage (Amir et al. [3]). Yu et al. [23] proposed a power control mechanism based on interference estimation. They demonstrated that there is an optimal value of P_0 that can provide the best airframe on-board performance. Amir et al. [2] evaluated open-loop power control for the LTE uplink of a small cell network. They adopted an analytical approach to calculate the transmit power at the mobile station, power received by the eNodeB, interference in the network and the received SINR (signal interference noise ratio). They have shown that the values of $\alpha = 1$ and $P_0 = -100\text{dBm}$ are the right choice for the best network performance. However, if network is limited by interference, the operator can choose a lower or higher P_0 value to optimize system performance. Thus, fractional power control with $P_0 = -52\text{dBm}$ and $\alpha = 0.7$ is an efficient way to achieve high user throughput in large areas of the cell (Huang [9]). Bilal and Mohammed [5] have shown that the performance of closed-loop power control can be improved with the value of $\alpha = 0.8$. With this value, the power margin ratio is triggered at periodic intervals and changes the propagation loss of the UE (user equipment). In LTE/LTE-advanced network, uplink power control performance also depends on propagation losses (Yu et al. [23]), operating frequency, cell type (macro/micro/pico) and cell radius. Therefore, in case of high propagation losses, the transmission power is considerably lower than that defined by the total propagation loss compensation mechanism. This will result in fewer resource blocks allocated by the adaptive transmission bandwidth and lower throughput for users at the edge of the cell (Huang [9]). In addition, the level of received signal power determines the quality of the message at the destination. Then, by minimizing propagation losses, better signaling can be provided to the receiver and this can help to estimate cell-to-cell interference (Priti et al. [16]). Several works have proposed power control mechanisms based on interference mitigation in cellular coverage (Sinan et al. [20], Tehseen et al. [21], Chen et al. [17] and Zhenwei et al. [25]). However, very little study has been done on power control based on the estimation of

propagation losses. Thus, we are focusing our study on this axis. Several propagation models exist to estimate propagation losses. These models are classified in three (3) main categories (Cavalcanti et al. [6]):

- Empirical models: are based on the collection of data, the statistical analysis of which makes it possible to determine the equations giving an average value of attenuation.
- Deterministic models: are based on the fundamental laws of physics, give much more accurate results but require a large amount of information about the area where they will be applied. In addition, they require a lot of computing time.
- Semi-empirical models: combine the advantages of each of the two previous models. They combine both theoretical and measurement aspects. They take into account the topology of area to be covered.

One of the difficulties underlying the application of a propagation loss prediction model lies in the fact that environments do not have the same compositions. It is therefore difficult to formulate an exact propagation loss model for all environments. In order to solve these problems, parameters of some propagation models need to be adjusted with reference to target environment.

3. Materials and Methods

3.1. Propagation models

We compare the propagation losses of four main models. These propagation models make it possible to characterize the attenuations undergone by a signal between a transmitter and a receiver in an environment in the presence of obstacles. Indeed, the attenuation of signals at different frequencies depends on environment and is predicted by propagation models that give different results in different environments (Zachaeus et al. [24]). Propagation models used in our study are used in outdoor environments.

- 3GPP model predicts path loss in 2GHz band (Masoud and Kostanic [10]) and is dedicated to eNodeB relay links for non-line-of-sight scenarios. These models can be applied to any wireless system operating in frequency range of 2 to 6GHz with an RF (radio frequency) bandwidth of up to 100MHz (Kyösti et al. [14]). These models have been widely applied to current design of 3G and 4G channel models (George et al. [7]), but they do not have the temporal resolution (lack of sufficient bandwidth, for example) to model or simulate future multi-gigabit/s wireless links with ultra-low latency. They can be used both in direct visibility (line of sight: LoS) and non-direct visibility (non line of sight: NLoS) using the formulas in (Kyösti et al. [14]).

- COST 231 Walfisch-Ikegami model (COST 231 - WI) is a semi-deterministic model based on Walfisch-Bertoni model and Ikegami model. It distinguishes between LoS and NLoS propagation, includes some empirical corrections to adapt model to characteristics of large cities. This model is developed by European Research Committee and is able to reflect different urban characteristics. It is therefore more suitable for the urban environment and can be used for frequencies above 2000MHz (Noman et al. [13]). This model is compared with the results of field tests carried out in many European cities and gives good results in area, with fairly uniform heights on a regular grid of streets, but it performs poorly in the area where the distribution of buildings is complex and irregular. COST 231 - WI model contains three elements: free space losses, losses due to roof diffractions and losses due to multiple screen.

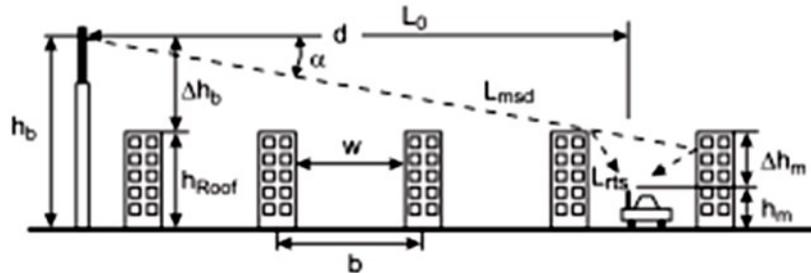


Figure 2. The parameters of the COST 231 - WI model.

▪ Saulius-Vitas model (Japertas and Grimaila [19]) was developed from measurements made by Saulius Japertas and Vitas Grimaila of the Department of Telecommunications at Kaunas University of Technology in Lithuania. They evaluated the nature of variation in path loss behind buildings of ten different heights in a microcell. Then they calculated the errors to assess the accuracy of results. Finally, they compared their experimental results with seven models existing in the literature. After analyzing the variation in propagation losses for different building heights and for different mobile technologies, this can be approximated by the following linear equation:

$$PL = a \cdot d_{BS} + b, \quad (1)$$

where coefficient a represents the slope and depends on the height of the building (h_b):

$$a = -(0.0037 \cdot h_b + 0.1249), \quad (2)$$

d_{BS} : distance between the base station and the mobile station, and coefficient b represents the power of signal at the starting point of measurement. It depends on the distance from the base station to building (d_{BS-b}) and frequency:

$$b = (0.2125 \cdot d_{BS-b} + 20 \log(f) + 62.8) \cdot CF, \quad (3)$$

CF : correction factor depends on the angle of inclination according to Figure 3:

$$CF = \begin{cases} 1 & \text{if } tg\varphi > 0.05, \\ -8.98tg\varphi + 1.436 & \text{if } tg\varphi \leq 0.05. \end{cases} \quad (4)$$

Thus:

$$PL = -(0.0037 \cdot h_b + 0.1249) d_{BS} + (0.2125 \cdot d_{BS-b} + 20 \log(f) + 62.8) \cdot CF. \quad (5)$$

In our study, $\varphi = 60^\circ$, so CF will be equal to 1.

This model describes path loss for GSM, UMTS and LTE mobile technologies. Results of this model can be used to improve existing propagation loss models and develop new, more accurate models, including models for new technologies (such as 5G).

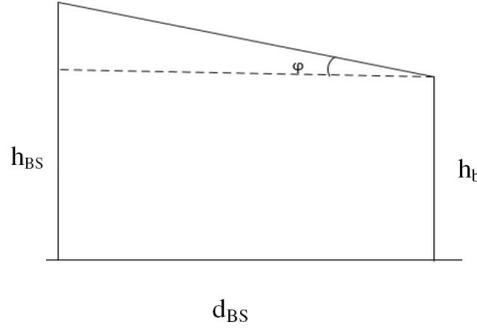


Figure 3. Diagram explaining the angle φ .

Table below summarizes the models considered and their properties.

Table 1. Expression of propagation patterns

| Propagation models | Description | Properties |
|---------------------------|---|---|
| 3GPP | $PL_{3GPP} = 125.2 + 36.3 \log(d)$ | $f = 2 \text{ GHz}$ |
| WINNERII | $PL_{WINNERII} = 30 \log(d) + 46.4 + 23 \log(f) + X$ | $30 \text{ m} < d < 1.5 \text{ km}$ $2 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$ $X = n_B PL_B$ obstacle $PL_B = 20 \text{ dBm}$ n_B : barriers number |
| COST 231 Walfisch-Ikegami | $PL_{WI} = \begin{cases} PL_0 + PL_{msd} + PL_{rts}, PL_{msd} + PL_{rts} > 0 \\ PL_D, PL_{msd} + PL_{rts} \leq 0 \end{cases}$ | $800 \text{ MHz} < f < 2 \text{ GHz}$ $PL_0 = 20 \log(d) + 32.45 + 20 \log(f)$ $PL_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log(d) + K_f \log(f) - 9 \log(b)$ $PL_{rts} = -16.9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{ori}$ |
| Saulius-Vitas | $PL = -(0.0037.h_b + 0.1249) d_{BS} + (0.2125.d_{BS-b} + 20 \log(f) + 62.8).CF$ | $h_{BS} > h_b$ h_b : building height h_{BS} : base station height $900 \text{ MHz} < 2200 \text{ MHz}$ $100 \text{ m} < d_{BS} < 500 \text{ m}$ |

3.2. LTE/LTE-advanced network

LTE/LTE-advanced systems are an important technology originally designed to achieve high data rates and minimize latency by providing flexible bandwidth deployment. They use frequency bands of 700, 1800, 1900, 2100 and 2600MHz in different regions of the world (Noman et al. [13]) and significantly meet user needs by targeting mobile broadband applications (bandwidths up to 100Mhz) with enhanced mobility, enable efficient execution of emerging Internet services. They are based on packet switching processes. LTE/LTE-advanced systems use simultaneous time division multiplexing (TD) and frequency division multiplexing (FD). The access methods are OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) for the downlink (downlink: eNodeB-UE) and SC-FDMA for the uplink (uplink: UE-eNodeB). Thus, 3GPP has defined the requirements of the new LTE/LTE-advanced system to adapt them to the modern requirements of Radio Access Technology (RAT), the most important of which are described by AL-AALOOSI [1].

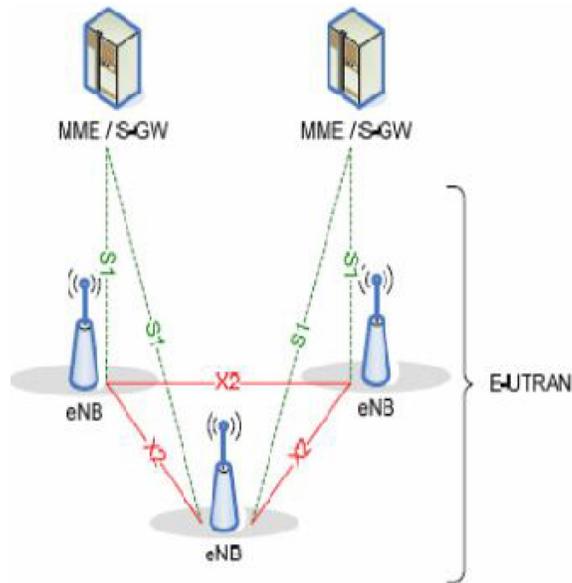


Figure 4. Radio access technology (RAT) of LTE.

3.3. Power control

In general, power control is the intelligent selection of transmitter output power in a communication system to achieve good system performance. LTE/LTE-advanced uplink power control is a combination of an open loop and closed loop mechanism. It is based on the following equation:

$$P_{Tx} = \min\{P_{\max}, 10 \cdot \log_{10} M + P_0 + \alpha \cdot PL + \Delta_{TF} + f(\Delta_i)\}, \quad (6)$$

P_{\max} : maximum permissible EU emission power, e.g., at 23dBm (200mW),

M : number of resource blocks (RB) allocated to the UE,

P_0 : cell/UE specific parameter. It is used to control target SNR and is reported by radio resource control (RRC). It represents the nominal power contained in a resource block,

α : path loss compensation factor. This is a 3-bit cell specific parameter in the range [0 - 1] reported by RRC.

- When $\alpha = 1$, it is a total loss of path compensation. Then we have conventional power control.

- $0 < \alpha < 1$ is fractional path loss compensation which implies fractional power control. If $\alpha = 0$, there is no path loss compensation, this implies that there is no power control. Then all EUs will use the maximum allocated transmission power (Gururaj and Pandiaraj [8]).

PL : loss of path between UE and eNodeB (path loss),

Δ_{TF} : the cell or UE-specific modulation and coding scheme. It is defined in the 3GPP specifications for LTE/LTE-advanced and depends on the transport format (TF),

$f(\Delta_i)$: defines the term specific correction close loop power control (CLPC) with relative or absolute power increase or decrease according to the function $f(\cdot)$.

The Δ_i correction values are generated by comparing the uplinked filtered level and quality measurements with specific targets defined by a two-dimensional decision matrix. This matrix is implemented in the eNodeB and designed in a generic and scalable way to use QoS, PL estimates and interference in neighbouring cells to increase or decrease power.

Close loop power control allows the UE to adjust the uplink transmission power according to the closed-loop correction value. It is also called transmit power control (TPC) (Bilal [4]). We are interested in our work on open-loop power control because of our objective to evaluate the propagation losses.

Open loop power control allows the transmitting UE to set its uplink transmit power to a specified value suitable for the receiver (Sonia et al. [12]). Transmission power of the terminal depends on the estimated downlink propagation losses and the channel configuration. Open loop power control is performed on the following physical channels:

- PRACH: physical random-access channel. It is used to transmit the RACH.

- PUSCH: physical uplink shared channel. It is used for the transmission of user data.

- PUCCH: physical uplink control channel. It is used for the transmission of HARQ acknowledgements and resource allocation.

Open loop uplink power control for the PUSCH channel is given by the following formula:

$$P_{OL} = \min\{P_{\max}, 10 \cdot \log_{10} M + P_0 + \alpha \cdot PL\} [\text{dBm}]. \quad (7)$$

P_{OL} is uplink power, defined by the open loop power control.

If we estimate the number of resource blocks M at 1, then the transmission power is:

$$P_{tx} = P_0 + \alpha \cdot PL. \quad (8)$$

Thus, the received power is determined by the following formula:

$$P_{rx} = P_{tx} - PL = P_0 - (1 - \alpha)PL. \quad (9)$$

In LTE-advanced network, performance of the uplink power control depends on trajectory or propagation losses (path loss) (Yu et al. [23]). These losses are defined on the basis of propagation models.

Our study consists in defining a power control mechanism based on equations (8) and (9). We estimate the propagation losses provided by the models of (Japertas and Grimaila [19]) and COST 231 Walfisch-Ikegami. Then we calculate the transmitting and receiving powers of the mobile stations at different positions of the base station. Finally, we make a comparison between these two models and determine which one best improves power control for our environmental scenario. The following section describes our study scenario in more detail.

4. Simulation Scenario

Scenario is as follows: either a microcell with a coverage radius of 500 meters, or a mobile station in the cell in outdoor movement between several obstacles in a cell as shown in (Figure 5) taking different positions.

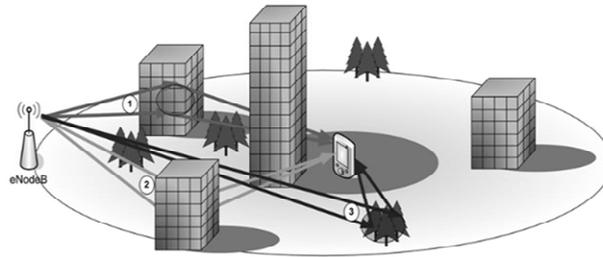


Figure 5. The urban environment of study.

The objective is to calculate the propagation losses as well as transmit and receive powers.

In practice, not all buildings are the same in height, shape and materials. Also, the spacings between buildings do not have the same value. But, to

simplify our study, we consider them identical and with the same spacing. Trees have a significant attenuating effect on the radio signal. Their attenuation varies according to their height, shape, density, season, and ambient humidity. In urban areas, they are a few, so their effects are negligible.

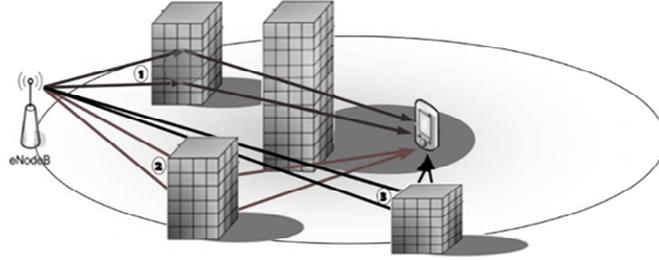


Figure 6. The urban environment of study in absence of trees.

In Table 2, we have the different simulation parameters.

Table 2. Propagation model and power control simulation parameters

| Parameters | Values |
|--|--|
| Carrier frequency (Mhz) | $f = 2100$ Mhz |
| Average building height (m) | $h_r = 80$ |
| Maximum distance between base station and mobile station d (m) | $d = 500$ m |
| Path loss compensation factor α | $\alpha = 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1$ |
| Rated power contained in a resource block P_0 (dBm) | $P_0 = -60$ (dBm) |
| Orientation angle | $\Phi = 60^\circ$ |
| Distance between obstacles b (m) | 50m |
| Street width w (m) | $w = 30$ m |
| Height of base station (m) | $h_b = 30$ m |
| Height of mobile station antenna (m) | $h_m = 1$ m |
| Loss of penetration Pl_B (dBm) | 20dBm |
| Transmission power (dBm) | P_{Tx} (dBm) = $P_0 + \alpha \cdot PL$ |
| Receiving power (dBm) | P_{Rx} (dBm) = $P_0 - (1 - \alpha) PL$ |
| Number of buildings in the environment (n_B) | $n_B = 5$ |
| Distance between base station and last building d_{BS-b} (m) | d_{BS-b} (m) = 300m |

We have created a code to implement the different models such as: COST 231 Walfisch-Ikegami, 3GPP, Saulius-Vitas and WINNERII, using Matlab, to observe their behaviour in non light of sight conditions in an outdoor scenario. Then the transmit power based on propagation losses is calculated and plotted by considering these propagation models.

5. Results and Discussions

In this section, we present the results of batteries of tests performed and then discuss these results. Figures provided in this section are the results of simulations obtained with the parameters described in Tables 1 and 2.

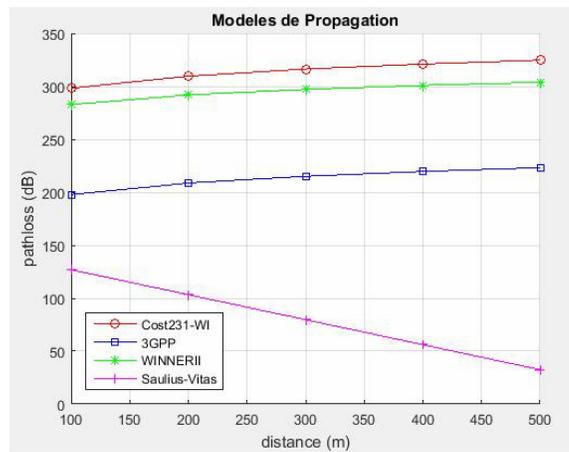


Figure 7. Comparison of propagation models.

In the first graph (Figure 7), we present the results of comparison of propagation losses for different models as a function of distance. Results show that the Saulius-Vitas model provides less path loss. From 100m, losses have a value below 150dB and decrease as the distance increases. COST 231 - WI (COST 231 Walfisch-Ikegami) model provides the most propagation losses. For this model, loss values increase from 300dBm with distance. Then we show the results of transmit and receive power versus path loss and loss compensation values for COST 231 Walfisch-Ikegami and Saulius-Vitas models. Here the values for propagation loss compensation

were compared within the framework of fractional power control. For the COST 231 Walfisch-Ikegami model, the transmission or emitted power (P_{Tx}) is higher, above 250dBm for $\alpha = 1$ and lower with $\alpha = 0.2$ slightly above 0dB (Figure 8). The received or received power (P_{Rx}) is stable around -50 dBm for $\alpha = 1$ and decreases to below -300 dBm for $\alpha = 0.2$ (Figure 9).

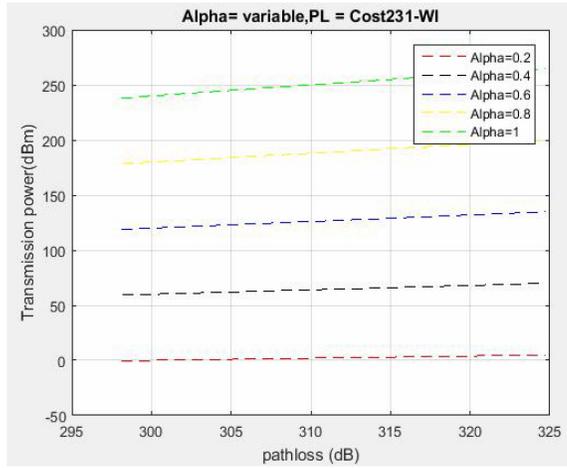


Figure 8. Transmitted power according to COST 231 - WI model.

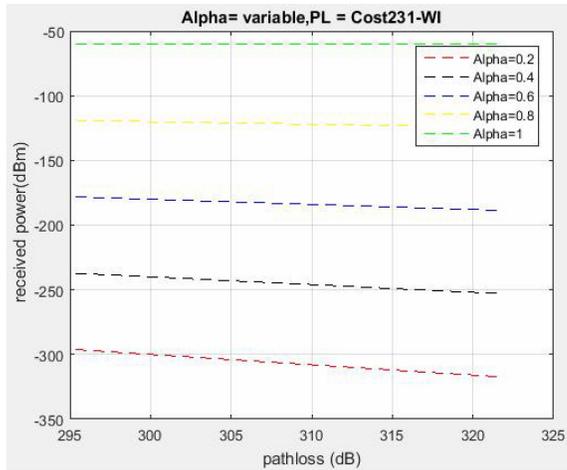


Figure 9. Received power according to COST 231 - WI model.

Saulius-Vitas model has the lowest transmission power around -60dBm for the value of $\alpha = 0.2$ and a transmission power that evolves to around 60dBm for $\alpha = 1$ (Figure 10). The receiving power is stable and its value $P_{Rx} = -60\text{dBm}$ for $\alpha = 1$ while it is lower for $\alpha = 0.2$ (Figure 11).

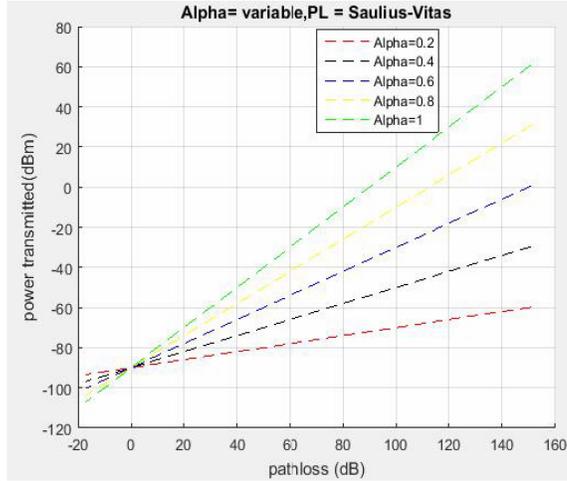


Figure 10. Transmitting power according to Saulius-Vitas model.

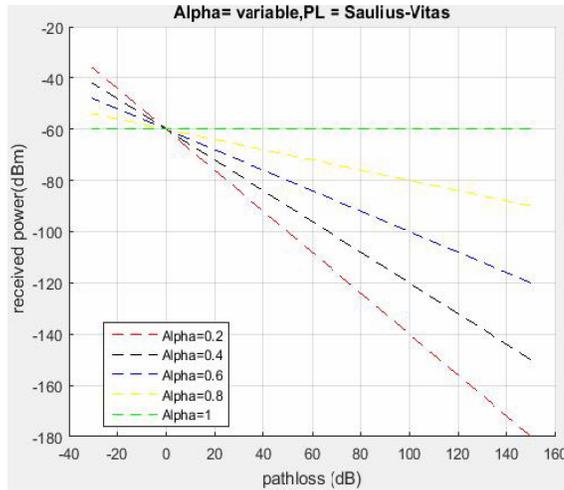


Figure 11. Receiving power according to Saulius-Vitas model.

For these two propagation models, we find that the receiving powers are stable for the value of $\alpha = 1$. This is due to full compensation of propagation losses when $\alpha = 1$. In all the cases, we observe that the transmission powers increase while the reception powers decrease. There is therefore a variation in power levels. Then we can say that the presence of obstacles in the cell *influences* the quality of the signal.

Transmission powers are compared with the value of the maximum power allowed in the EU. This value is 23dBm (Amir et al. [2]). We estimate the received power from the threshold values of the received power of the reference signal (RSRP) summarized in the table below (Ahamed et al. [1]).

Table 3. Rough classification of RSRP

| Classification | RSRP |
|----------------|----------------|
| Good | Above -95dBm |
| Medium | -95 to -108dBm |
| Poor | Below -108dBm |

Concerning COST 231 - Walfisch-Ikegami model, only the value of $\alpha = 0.2$ provides a transmission power slightly higher than 0dBm. This power is acceptable because it is below the maximum power which is 23dBm. For the same value from α , reception power is very bad because it is below -108dBm. Only the values of $\alpha = 0.8$ and $\alpha = 1$ provide acceptable reception powers.

Concerning the Saulius-Vitas propagation model, EU emits a low power for loss compensation $\alpha = 0.2$. This allows it to supply less energy and thus conserves its battery for longer. For the other values from α , the transmission powers slightly exceed 23dBm as the propagation losses increase.

Reception powers are above -95dBm for all values on α when losses are below 0dBm. However, when the losses are higher than 0dBm, only the value of $\alpha = 1$ provides good reception power. Power is stable with a value of -60dBm. Thus, after comparing the transmitted and received powers obtained from these two propagation models, we can say that the model

proposed by Saulius-Vitas is *best adapted* to our study environment and *optimizes* power control.

6. Conclusion

A path loss (pathloss) model in non-line-of-sight (presence of obstacles: buildings and houses) was proposed using Matlab models. We compared four (4) propagation models based on path loss estimates. We find that the Saulius-Vitas model provides fewer losses, whereas the COST 231 Walfisch-Ikegami model increases propagation losses. From the path loss estimates provided by the COST 231 Walfisch-Ikegami and Saulius-Vitas models, we simulated on Matlab the transmission and reception power for different loss compensation values (α). Simulation results show that the value of $\alpha = 1$ provides more transmitting power and stabilizes the receiving power, while $\alpha = 0.2$ provides the lowest power in both transmit and receive. In this perspective, we consider the impact of the geometric shape of the buildings, and speed of the mobile in the cell on the quality of the signal to evaluate the impact of the emission of radio waves on health.

Acknowledgements

The authors would like to thank institutional authorities of ESATIC (Ecole Supérieure Africaine des TICs) and its LASTIC Laboratory (Laboratoire des Sciences Technologiques, de l'Information et de la Communication) and its research teams in basic sciences:

- Team Mathématiques, Application et Complexité (MAC),
- Team Optique Non-linéaire, Réseaux Optiques et Télécommunications (ONET).

References

- [1] Ahmed Basim Atta AL-AALOOSI, Inter-cell interference mitigation in LTE-advanced heterogeneous mobile networks, University of Salford, School of Computing, Science and Engineering, 2017.

- [2] H. Amir, H. L. Seong, I. K. Dae, K. J. Hye and H. Seung, On uplink power control for small cell in LTE, ETRI, Conference Paper, January 2016.
- [3] H. Amir, R. S. Sinha and H. Seung-Hoon, Investigation of open-loop transmit power control parameters for homogeneous and heterogeneous small-cell uplinks, ETRI Journal 40(1) (2018), 51-60.
- [4] M. Bilal, Closed loop power control for LTE uplink, M.Sc. Thesis, Blekinge Institute of Technology, School of Engineering, 2008.
- [5] M. Bilal and A. Mohammed, Uplink closed loop power control for LTE system. Performance evaluation with the open loop error, TPC Command Delay and Power Headroom Reporting, 2010.
- [6] B. J. Cavalcanti, G. A. Cavalcante et al., A hybrid path loss prediction model based on artificial neural networks using empirical models for LTE and LTE-A at 800MHz and 2600MHz, J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl. 16(3) (2017), 708-722.
- [7] R. George, J. MacCartney, J. Zhang, S. Nie and T. S. Rappaport, Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells, IEEE Global Communications Conference, Exhibition and Industry Forum (GLOBECOM), 9-13 Dec., 2013.
- [8] D. Gururaj and P. Pandiaraj, Power control optimization for LTE-advanced relay network, Proc. Eng. 38 (2012), 2866-2873. doi:10.1016/j.proeng.2012.06.335.
- [9] J. Huang, Open-loop and closed-loop uplink power control for LTE system, International Journal of Computer Applications (2013), 1-6.
- [10] H. Masoud and I. Kostanic, Path loss models for LTE and LTE-A relay stations, Universal Journal of Communications and Network 1(4) (2013), 119-126.
- [11] Maruf Ahamed, Z. Islam, S. Hossain and S. Faruque, LTE network coverage prediction for multi-traffic users in an urban area, IEEE International Conference on Electro-Information Technology, EIT, 2013.
- [12] M. Sonia, N. Malik, P. K. S. Rekhi and S. S. Malik, Uplink power control schemes in long term evolution, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) 3(3) (2014), 260-264.
- [13] S. Noman, T. Muhammad, K. Hasnain and U. Rizwan, Comparison of radio propagation models for long term evolution (LTE) network, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) 3(3) (2011), 27-41.

- [14] P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentilä and X. Zhao, IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 v1.2 WINNER II channel models, 2008.
- [15] V. I. Popov, V. A. Skudnov and A. S. Vasiljev, Mathematical models and algorithms of radio wave propagation in cellular networks of mobile communication, *Technologijos ir menas* (2016), 102-111.
- [16] D. Priti, A. Mukherjee and D. Debashis, *Study of Indoor Path Loss Computational Models for Femtocell based Mobile Network*, Springer Science + Business Media, New York, 2017.
- [17] Q. Chen, H. Zhao, L. Li, H. Long, J. Wang and X. Hou, A Closed-loop UL Power Control Scheme for Interference Mitigation in Dynamic TD-LTE Systems, 2015.
- [18] A. K. Sajjad, M. Asshad, K. Küçük and A. Kavak, A power control algorithm and software tool for femtocells in LTE-A network, *Sakarya University Journal of Science* 22(4) (2018), 1124-1129.
- [19] Saulius Japertas and Vitas Grimaila, Mobile signal path losses in microcells behind buildings, *Radioengineering* 26(1) (2017), 191-197.
- [20] G. A. A. Sinan, B. M. Dani, M. M. Z. Mahfudz, R. A. Rahman, A. Saif, M. I. Yusof, M. A. Mansor and F. H. Azmat, An interference mitigation scheme for LTE based femtocell networks, *American Institute of Physics, Conference Proceedings* 1774, 2016, pp. 1-7.
- [21] U. H. Tehseen, F. Gao, B. Jalal and S. Arif, *Interference Management in Femtocells by the Adaptive Network Sensing Power Control Technique*, 2018.
- [22] G. Vaibhav and T. Wagh, *Overview of Power Optimization in LTE Network*, 2015.
- [23] L. Yu, L. Xu, Y. Chen, Y. Fan, B. Xu and J. Nie, A novel power control mechanism based on interference estimation in LTE cellular networks, 2016.
- [24] K. A. Zachaeus, O. K. Ogunremi and A. O. Akande, Genetic algorithm based path loss optimization for long term evolution in Lagos, Nigeria, *International Journal of Applied Science and Technology* 6(2) (2016), 79-88.
- [25] W. Zhenwei, W. Xiong, C. Dong, J. Wang and S. Li, *A Novel Downlink Power Control Scheme in LTE Heterogeneous Network*, 2011.



Journal Homepage: [-www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/12556
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/12556>



RESEARCH ARTICLE

MEASUREMENTSBASEDEVALUATION OF PATHLOSSEXPONENTS IN URBAN OUTDOORENVIRONMENTS

Akohoule Alex¹, Bamba Aliou², Kamagaté Aladji², KonateAdama¹, Oussama Tabbabi³ and Asseu Olivier¹

1. Institut National Polytechnique - Houphouët BOIGNY, Yamoussoukro/ Côte d'IvoireEcoleDoctorale Polytechnique (EDP), UMRI Électricité, Électronique Appliqués (UMRI 78)
2. Ecole Supérieure Africaine des TICs (ESATIC), Abidjan/ Côte d'Ivoire Laboratoire des Sciences Technologiques, de l'Information et de la CommunicationÉquipe ONET (Optique Non-linéaire Et Télécommunications),
3. Sup'Com University of Carthage, Tunisia, TunisiaInnov'comResearchLaboratory, HigherSchool of Communications of Tunis.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 05 January 2021

Final Accepted: 09 February 2021

Published: March 2021

Key words: -

Path Loss Exponent, Propagation Model, Measurements, Outdoor, Channel

Abstract

In wireless networks, propagation models are used to assess the received power signal and estimate the propagation channel. These models depend on the pathloss exponent (PLE) which is one of the main parameters to characterize the propagation environment. Indeed, in the wireless channel, the path loss exponent has a strong impact on the quality of the links and must therefore be estimated with precision for an efficient design and operation of the wireless network. This paper addresses the issue of path loss exponents estimation for mobile networks in four outdoor environments. This study is based on measurements carried out in four outdoor environments at the frequency of 2600 MHz within a bandwidth of 70 MHz. It evaluates the path loss exponent, and the impact of obstacles present in the environments. The parameters of the propagation model determined from the measurements show that the average power of the received signal decreases logarithmically with the distance. We obtained path loss exponents values of 4.8, 3.53, 3.6 and 3.99 for the site 1, site 2, site 3 and site 4, respectively. Clearly the density of the obstacles has an impact on the path loss exponents and our study shows that the received signal decrease faster as the transmitter and receiver separation in the dense environments.

Copy Right, IJAR, 2021,. All rights reserved.

Introduction:-

The propagation of radio waves depends on various factors such as reflection, refraction, and diffraction [1]. Propagation methods are important to calculate the coverage of mobile networks in outdoor environments.

These models predict the signal power at a given point by determining the path loss, that is, the difference between the transmit power and the received power, from the base station to the mobile station. They are particularly important for planning new network deployments, processing field measurements, as well as network simulation environments [2]. However, to produce accurate simulation results of a given environment, it is important to faithfully determine the parameters of these propagation models, in particular the path loss exponent.

Corresponding Author:- Akohoule Alex

Address:- Institut National Polytechnique - Houphouët BOIGNY, Yamoussoukro/ Côte d'IvoireEcoleDoctorale Polytechnique (EDP), UMRI Électricité, Électronique Appliqués (UMRI 78).

An over or under estimation of the path loss exponent results in large differences in the received power produced by the simulation tools. Therefore, precise estimation of path loss exponent is required.

Moreover, the path loss or received power prediction is valuable in the power control [3].

This paper presents a generic practical analysis of path loss exponents. The experiment is performed in urban outdoor environments, at a frequency of 2.6 GHz. The Received Signal Strength Indicator (RSSI) measurements were obtained over one thousand meters (1000 m) to determine path loss exponents and the standard deviation of the log-normal fading. From the simulations performed on the MATLAB platform, we have represented the point clouds of the measured powers as well as the lines of the linear regressions for four different environments called: site 1, site 2, site 3 and site 4. Then the path loss exponents were calculated from the measurement data and the path loss equations were determined and compared.

This article is organized as follows: Section II presents the theoretical concepts of radio propagation models. Section III discusses work on pathloss and path loss exponents. Section IV describes the environments and the methodology for the measurements. Section V describes the simulation scenarios, and the experimental results are shown as well. Finally, Section VI ends the paper with a conclusion, and prospects for further research.

Related Works:

Propagation models for large-scale outdoor wireless networks include free space, two-ray ground, and lognormal shadowing models [2]. Radio propagation is important for growing technologies, with appropriate design, development, and management strategies for any wireless network. It is specific to a given environment and varies considerably depending on the terrain, the frequency of use, the speed of the mobile terminal, and many other parameters [4].

Propagation models are used to characterize the losses or attenuations suffered by a signal between a base station and a mobile station. One of the most important parameters to consider is the distance, because as the distance increases, the received signal decreases [5][6][7]. This phenomenon is the large-scale fading. When obstacles are present, multiple copies of the original signal are generated from reflection, diffraction, scattering with different phases and amplitudes and the signal power is decreased. This last phenomenon is the small-scale fading. Indeed, the signal power in any wireless communication system is governed by the environment and depends on the distance, the transmission frequency and the obstacles between base station and mobile stations. Thus, the attenuation of signals at different frequencies and distances depends on the environment and is predicted by propagation models. These models give different results in different environments. In addition, one of the underlying difficulties in applying a path loss prediction model is that the environments do not have the same composition. It is therefore difficult to formulate an exact propagation model for all environments. To solve these problems, the parameters of some propagation models must be adjusted with reference to the target environment. The path loss can be calculated by the following equation [1]:

$$P_{RX} = EIRP - PL \quad (1)$$

Where P_{RX} is the Received Power (dBm), PL is the path loss (dB) gives an estimate of the loss that the transmitted signal undergoes, it indicates the quality of a radio environment. The knowledge of the path loss allows that of the received power, as indicate in (1).

A general propagation model which includes the path loss exponent and the shadow fading factor is given by the following equation:

$$PL = PL_0 + 10\gamma \log(d) + X_\sigma \quad (2)$$

where γ is the path loss exponent, representing the slope of the equation in its linear form. X_σ represents a zero-mean Gaussian random variable (dB) with standard deviation σ and PL_0 is the intercept point at the reference distance $d_0 = 1 \text{ m}$. d is the separation between the transmitter and the receiver.

The path loss can be determined from the received power or the RSSI during measurement campaigns in a real environment.

The path loss can be determined from the received powers or the RSSI during measurement campaigns in a real environment.

The average received power decreases logarithmically with the distance between the transmitter and the receiver. A Gaussian random variable is added to this pathloss to account for environmental influences at the transmitter and receiver [8].

In most models, the path loss exponents need to be measured. The path loss exponent (PLE) is a parameter indicating how quickly the received signal strength varies with distance. Its value depends on the specific propagation environment.

Measurement campaigns:

The measurement campaigns were carried out to determine our propagation equation. This section describes the progress of the measurement campaign.

Description of The Measurements Environment:

Measurements were carried out in four different environments in the city of Fez Morocco, at the frequencies of 2600 MHz with a bandwidth of 80 MHz. These environments are characterized by the density of obstacles, such as buildings, houses, and trees. It is also important to indicate the presence of some trees is less than buildings and houses. The difference between these environments is about the density of the obstacles, buildings to buildings distance that vary from fifteen meter (15 m) to thirty meters (30 m), the average buildings heights that can reach forty meters (40 m) and street widths that is around thirty meters. The transmitter coverage distance ranges from one (1) to two (2) kilometers (Km). We specify that the site 2 and site 3 have similar configurations in terms of obstacles compared to the others (figure 2).



Figure 1:- General view of two environments.

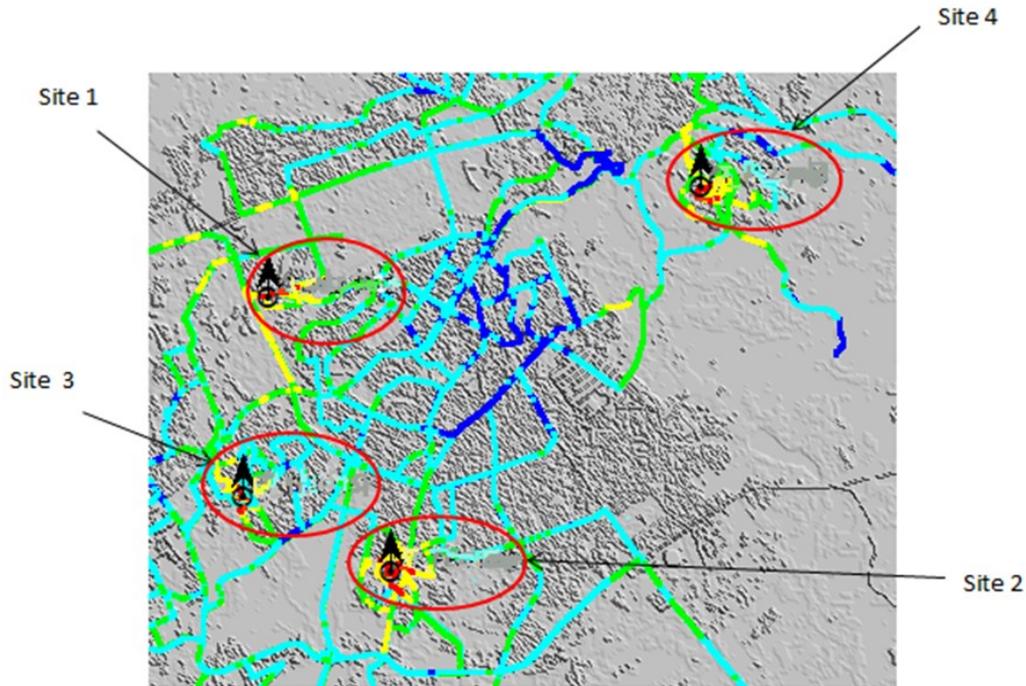


Figure 2: -Position of different sites.

The figure 2 shows the map of the different environments where the radio measurements were performed. The geographical coordinates of the measurement environments and the heights of the transmitters are presented in Table 1.

| Base station | Latitudes | Longitudes | Height(m) |
|--------------|-----------|------------|-----------|
| Site1 | 34,0397 | -5,0314 | 26 |
| Site2 | 34,00245 | -5,01357 | 23 |
| Site3 | 34,013 | -5,03674 | 21 |
| Site4 | 34,05214 | -4,96199 | 26 |

Table1: - Base station characteristics.

Measurement equipments and methods: -

Measurement equipments:

To ensure that a good model reflecting the reality of predictions with the maximum fidelity is obtained, an analogue measurement chain is used to collect the measurements during the drive test campaigns. The used received antennas are magnetic antennas located on the roof of the car. A geo localization software was used to trace the route and analyze the power of the acquired measurements. The transmission chain is composed of the following equipment shown in Figure 3:

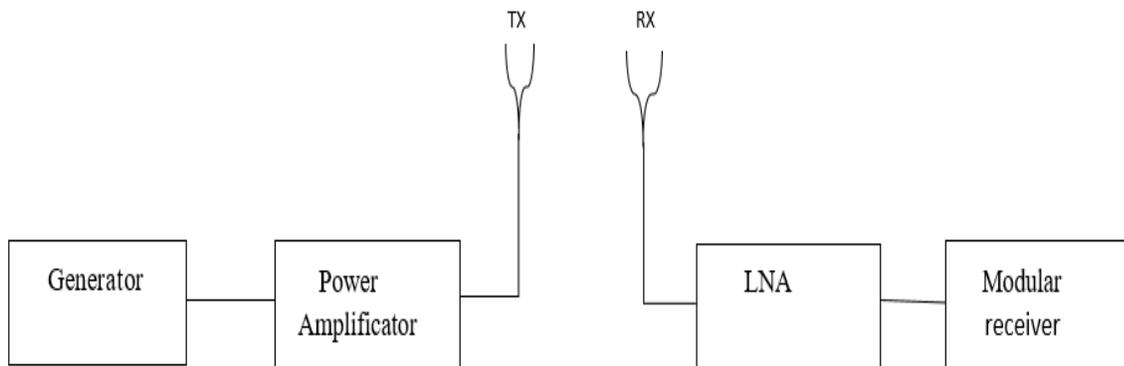


Figure 3:- Simplified transmission chain.

The transmission chain is composed with an analog signal generator, an amplifier, and a wideband omnidirectional antenna. The generator is of type Agilent N9310A with a maximum power of 13 dBm and a frequency range of 0.9 - 3 GHz. The amplifier is an Amplifier Research 25S1G4A and has a 16 dBi gain within a frequency range of 0.8 - 4.2 GHz.

The reception chain is composed of a multi-band receiver, GPS, and magnetic antennas. The receiver is Coyote Modular Receiver and can support several bands by changing the appropriate modules. It is a Berkeley Varitronics Systems Coyote Modular Receive type with a sensitivity range of -118 dBm / -30 dBm to +/- 1 dB, adjacent channel rejection greater than 45 dB. The GPS is a modular receiver composed of 12-channels with active antenna. The magnetic antennas have cable gains and losses which are compensated by the reception modules.

Measurement methodology:

The measurements were performed using Continuous Wave (CW) analog signals with sample rates that respects the criterion of Lee to eliminate the problems related to fast fading. The number of samples can be configured at the receiver side. We used approximately 256 samples per second for all bands. For each frequency, the number of samples, the averaging and the exact frequency of reception have been fixed. As already mentioned, the number of samples per second is between 128 and 256.

During this measurement campaign, the minimum duration of drives test was three hours, and the radius was at least 1 km in all the sites. Measurements started when all the conditions were met and with the aim of obtaining regular measurements, the following conditions were met:

1. Stay in the same soil class as much as possible.
2. Avoid coming back several times on the same route
3. Driving at low speed (max 50 km/h)
4. Stop when the field weakens (< -115 dBm)

Simulation's interpretations of results and validation:

Simulation and interpretation:

In mobile radio propagation channels, the received signal strength varies with time, space, and frequency. During the measurement campaigns, the mobile receiver powers were collected. Concerning the processing of these data, we represent the path loss point clouds as well as the linear regression lines for four (4) environments from equation (1). This method allows us to characterize our study environment by determining the path loss exponents (γ) for each environment.

The figure 4, figure 5, figure 6, and figure 7 show the path loss at 2600 MHz for the site 1, site 2, site 3 and site 4, respectively. The path loss is calculated from (1).

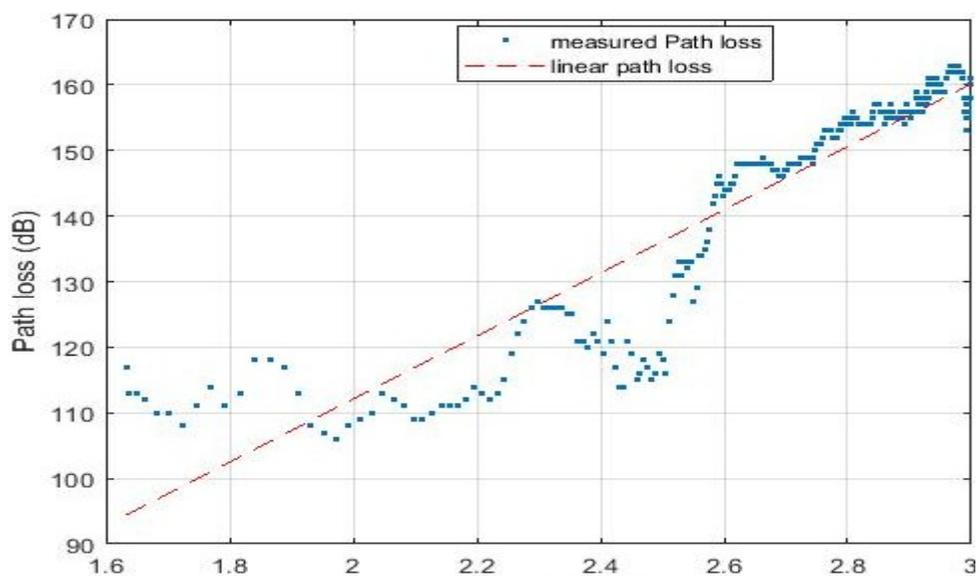


Figure 4:- Pathloss for site 1.

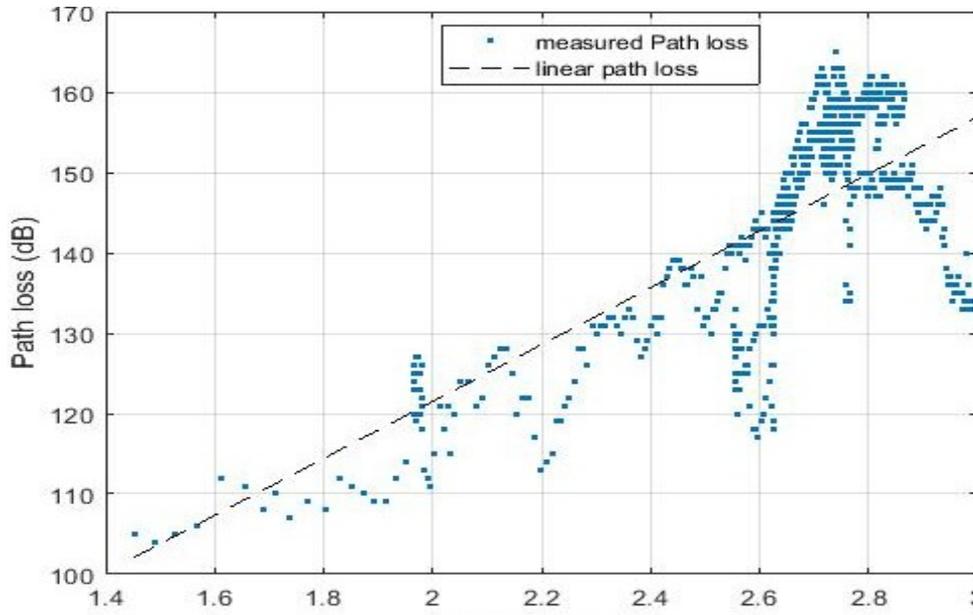


Figure 5:- Pathloss forsite 2.

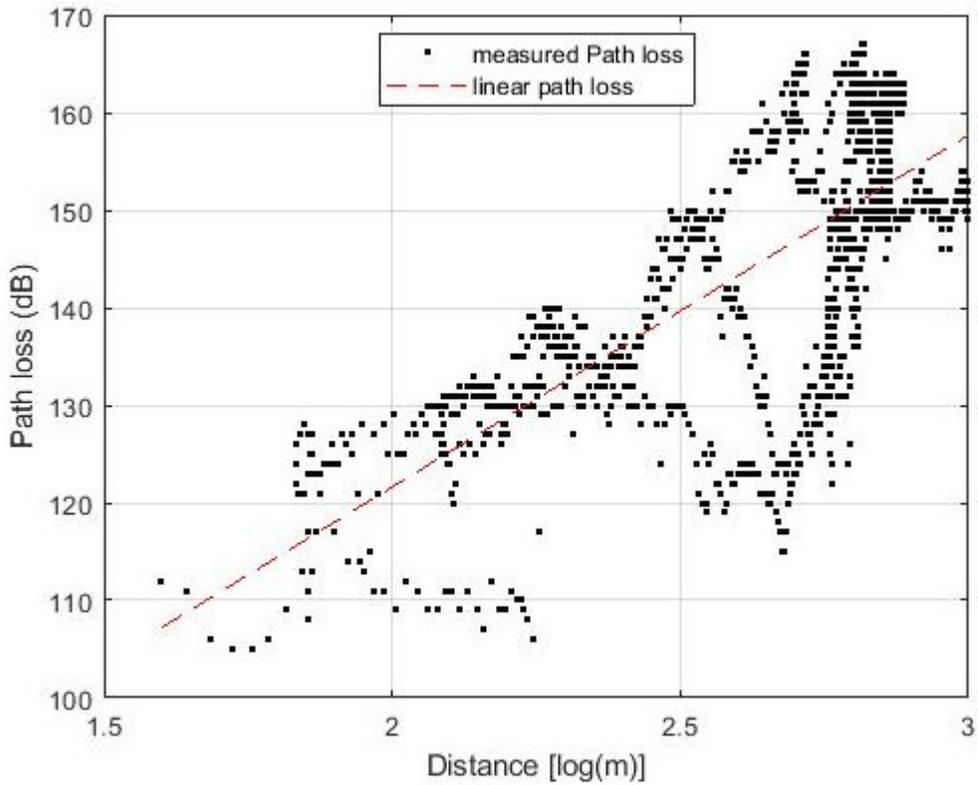


Figure 6:- Pathloss forsite 3.

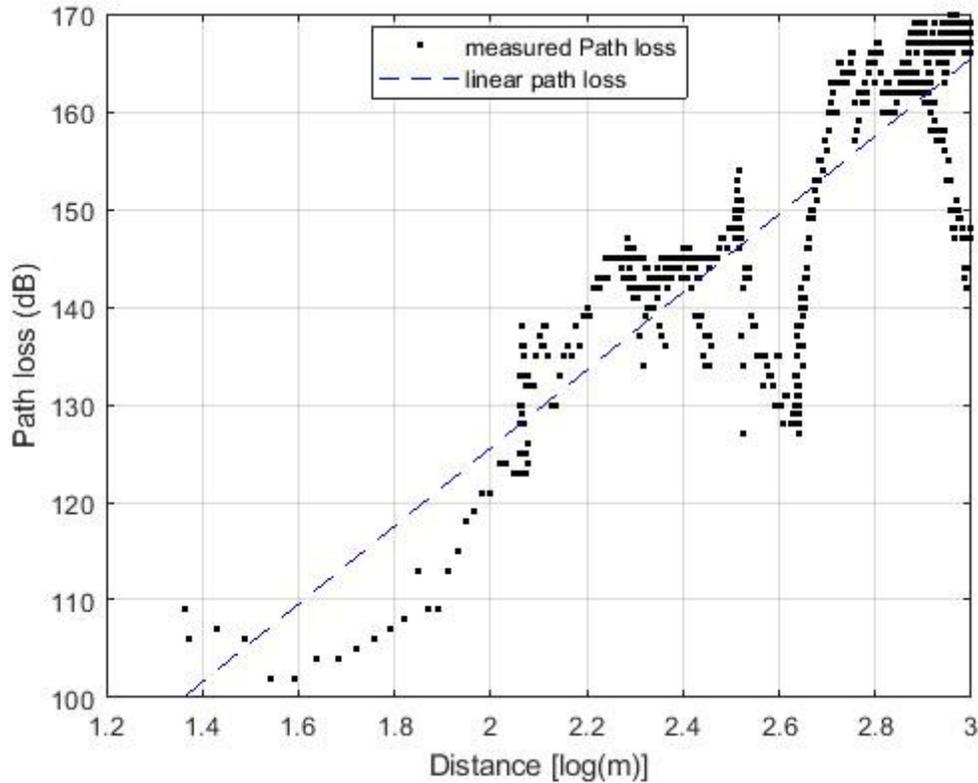


Figure 7:- Pathloss for site 4.

Figures 4 to figure 7 show that the path loss values increase with increasing distance. The colored points represent the measured propagation losses, and the lines their linear regression. For the site 1, site 2, site 3, and site 4, we have determined the path loss in 256, 740, 1214, and 660 measurement points, respectively. We determine the parameters expressed in (2) i.e., γ , PL_0 et X_σ , from the measurements. Among these parameters, the path loss exponent is the most important as it represents the slope of the linear regression line.

Tables 2:- summarizes the different parameters of the model.

| Sites | Site 1 | Site 2 | Site 3 | Site 4 |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| γ | 4,8 | 3,53 | 3,6 | 3,98 |
| PL_0 | 15,90 | 50,71 | 49,46 | 45,68 |
| mean (X_σ) | -5.1181e-14 | -3.3568e-14 | -1.6374e-13 | 6.7609e-15 |
| Standard Deviation(σ) | 6.81 | 9.78 | 10.19 | 7.90 |

Table 2:- Parameters of the model.

We note that the average path loss exponents range from 3.53 to 4.8. The largest of these values is very close to 5, and corresponds to site 1, which proves that we are in an outdoor environment with a high density of obstacles around the transmitter. The lowest path loss exponent corresponds to the site 2. The obtained values of path loss exponents then justify the strong presence of obstacles in the measurement environments.

We notice that the path loss exponent values and intercept points PL_0 for sites 2 and 3 are very close. This is explained by the fact that these sites are adjacent and have practically the same environmental configuration. The difference in path loss exponent values is due to the non-uniformity of obstacle density in the propagation zones.

We observed that the mean values of the parameter X_σ is zero (0) for all the sites. The distribution of the shadowing values is the same for all the sites. Therefore, we can say that the parameter X_σ is a Gaussian random variable with a zero mean value and with standard deviation σ and it characterizes the shadowing effect.

Results validation:

To validate our study, we compare the obtained results with the literature. In [9], the measurement results show that the path loss exponents in a specific rural wireless at 2.4 GHz vary from 1.2 to 2.2. The path loss exponents values from 2 to 2.85 are obtained for an 802.11 WLANs outdoor environment at 2.4 GHz [2]. [10] found values of the path loss exponents from 2 to 5 for frequency from 0.5 GHz to 30 GHz. The path loss exponents measured in [11], range from 1.86 to 2.08 for a wireless sensor network at 2.4 GHz. In [12], the path loss exponents values range from 2.2 to 3.32 at 3.705 GHz.

Comparing path loss exponent values from our experiments those found in literature, we obtain a good agreement.

Conclusion et perspectives: -

In this paper we have determined the pathloss exponents for a mobile network in outdoor urban environments. Our study was based on measurements of the received powers of a mobile station in urban environments. We determined the parameters of the propagation equation from which a propagation model was developed. This propagation model is developed for mobile networks using 2.6 GHz frequencies in urban outdoor environments. We obtained the values of the following propagation exponents: 4.8, 3.53, 3.6 and 3.98 for site 1, site 2, site 3 and site 4, respectively. Our results are consistent with the scientific results from the literature and correspond to the values of the propagation exponents in urban environments.

As future work, we will extend our research to several frequencies to experiment with different mobile network technologies, especially the 5G technology. Also, we will study the impact of these propagation exponents on power control in a propagation channel. Finally, we may conduct the study in an indoor environment.

References:-

1. P. Maina, and al, Validation Study of Path Loss Models On Wimax at 2.6 Ghz Frequency Band In Suburban Environment For Cell Size Planning, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.6, No.2, June 2014, pp. 17-29.
2. DOI: 10.5121/ijngn.2014.6202
3. T. Zhou, and al, A Deterministic Approach to Evaluate Path Loss Exponents in Large Scale Outdoor 802.11 WLANs, IEEE 34th Conference on Local Computer Networks (LCN 2009) Zürich, Switzerland; 20-23 October 2009, pp. 348-351.
4. L. Yu, and al, A Novel power control mechanism based on interference estimation in LTE cellular networks, 2016.
5. D. Sharma, and R.K. Singh, The Effect of Path Loss on QoS at NPL, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(7), 2010, ISSN: 0975-5462, pp. 3018-3023.
6. A. Adeyemi, and al, A Performance Review of the Different Path Loss Models for LTE Network Planning, Conference Paper, Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol I, WCE 2014, July 2 - 4, 2014, London, U.K.
7. K. Premchandra, and al, Selection of radio propagation model for Long Term Evolution (LTE) network. Int. J. Eng. Res. Gen. Sci., 3: pp. 373-379, 2015.
8. N. Sivaraja, and P. Palanisamy, Soft computing-based power control for interference mitigation in LTE femtocell networks. Proc. Comput. Sci., 79: pp. 93-99, 2016. DOI: 10.1016/j.procs.2016.03.013
9. T. S. Rappaport, Wireless Communications Principles & Practice, 2000.
10. V. Dasarathan, and al, Outdoor Channel Measurement, Pathloss Modelling and System Simulation of 2.4 GHz WLAN IEEE 802.11g in Indian Rural Environments, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007.
11. R. George, and Theodore S. Rappaport, Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 35, NO. 7, JULY 2017, pp. 1663-1677.
12. D. Wang, and al, Near-Ground Path Loss Measurements and Modeling for Wireless Sensor Networks at 2.4 GHz, International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2012, Article ID 969712, 10 pp. 1-10, doi: 10.1155/2012/969712.
13. RECOMMENDATION ITU-R P.1411-6, Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, 2012.

ANNEXE B: Données recueillies lors des campagnes de mesure

- Environnement 1

Données recueillies à 800 MHz

| Latitudes | Longitudes | P _{mesurées} (dBm) |
|-----------|------------|-----------------------------|
| 34,03988 | -5,031488 | -48 |
| 34,03985 | -5,031638 | -46 |
| 34,03963 | -5,031805 | -42 |
| 34,03983 | -5,031786 | -40 |
| 34,03951 | -5,031765 | -41 |
| 34,03975 | -5,031846 | -46 |
| 34,03938 | -5,031758 | -41 |
| 34,03926 | -5,031767 | -46 |
| 34,03913 | -5,031775 | -52 |
| 34,039 | -5,031778 | -49 |
| 34,03888 | -5,031777 | -49 |
| 34,03875 | -5,031782 | -52 |
| 34,03863 | -5,031794 | -50 |
| 34,03851 | -5,031764 | -51 |
| 34,03845 | -5,031349 | -56 |
| 34,03845 | -5,031501 | -54 |
| 34,03844 | -5,031194 | -55 |
| 34,03845 | -5,031654 | -52 |
| 34,03844 | -5,031036 | -58 |
| 34,03843 | -5,03073 | -57 |

Données recueillies à 1800 MHz

| Latitudes | Longitudes | P _{mesurées} (dBm) |
|-----------|------------|-----------------------------|
| 34,040051 | -5,031535 | -35 |
| 34,040033 | -5,031603 | -30 |
| 34,04002 | -5,031673 | -30 |
| 34,040006 | -5,031743 | -36 |
| 34,039992 | -5,031813 | -37 |
| 34,039978 | -5,031882 | -43 |
| 34,039964 | -5,031953 | -46 |
| 34,039951 | -5,032023 | -42 |
| 34,03994 | -5,032094 | -41 |
| 34,039931 | -5,032166 | -42 |
| 34,039922 | -5,032238 | -43 |
| 34,039914 | -5,03231 | -44 |
| 34,039907 | -5,032383 | -47 |
| 34,039901 | -5,032454 | -48 |
| 34,039895 | -5,032526 | -46 |
| 34,03989 | -5,032599 | -46 |
| 34,039887 | -5,03267 | -45 |
| 34,039887 | -5,032742 | -48 |
| 34,039888 | -5,032814 | -56 |
| 34,039889 | -5,032886 | -60 |
| 34,039892 | -5,032958 | -58 |
| 34,039898 | -5,03303 | -60 |
| 34,039907 | -5,033101 | -64 |
| 34,039918 | -5,033171 | -64 |
| 34,039932 | -5,033241 | -62 |
| 34,039946 | -5,033311 | -59 |
| 34,039963 | -5,033379 | -55 |
| 34,039981 | -5,033447 | -59 |
| 34,039999 | -5,033517 | -64 |
| 34,040016 | -5,033588 | -63 |
| 34,040034 | -5,033656 | -62 |
| 34,040056 | -5,033724 | -62 |
| 34,04008 | -5,03379 | -62 |
| 34,040104 | -5,033856 | -62 |
| 34,040128 | -5,033922 | -62 |
| 34,040152 | -5,033989 | -63 |
| 34,040176 | -5,034054 | -59 |
| 34,040204 | -5,034118 | -63 |
| 34,040237 | -5,034178 | -64 |
| 34,040273 | -5,034234 | -57 |

Données recueillies à 2600 MHz

| Latitudes | Longitudes | P _{mesurées} (dBm) |
|-----------|------------|-----------------------------|
| 34,040066 | -5,031549 | -57 |
| 34,04008 | -5,031502 | -53 |
| 34,040055 | -5,031597 | -53 |
| 34,040045 | -5,031646 | -53 |
| 34,040036 | -5,031694 | -52 |
| 34,040026 | -5,031743 | -50 |
| 34,040016 | -5,031792 | -50 |
| 34,040006 | -5,03184 | -48 |
| 34,039996 | -5,031889 | -51 |
| 34,039986 | -5,031938 | -54 |
| 34,039976 | -5,031986 | -51 |
| 34,039967 | -5,032036 | -53 |
| 34,039959 | -5,032085 | -58 |
| 34,039952 | -5,032134 | -58 |
| 34,039946 | -5,032184 | -57 |
| 34,039939 | -5,032234 | -53 |
| 34,039934 | -5,032284 | -48 |
| 34,039929 | -5,032333 | -47 |
| 34,039924 | -5,032383 | -46 |
| 34,03992 | -5,032433 | -48 |
| 34,039917 | -5,032483 | -49 |
| 34,039915 | -5,032534 | -50 |
| 34,039911 | -5,032583 | -53 |
| 34,039908 | -5,032634 | -52 |
| 34,039909 | -5,032684 | -51 |
| 34,039909 | -5,032734 | -49 |
| 34,039909 | -5,032784 | -49 |
| 34,03991 | -5,032834 | -50 |
| 34,039911 | -5,032884 | -51 |
| 34,039913 | -5,032935 | -51 |
| 34,039916 | -5,032985 | -51 |
| 34,03992 | -5,033035 | -52 |
| 34,039926 | -5,033084 | -54 |
| 34,039933 | -5,033134 | -53 |
| 34,039941 | -5,033183 | -52 |
| 34,039951 | -5,033232 | -53 |
| 34,039961 | -5,03328 | -55 |
| 34,039972 | -5,033329 | -59 |
| 34,039984 | -5,033376 | -62 |
| 34,039997 | -5,033424 | -64 |
| 34,04001 | -5,033472 | -66 |
| 34,040021 | -5,03352 | -67 |

- **Environnement 2**

Données recueillies à 800 MHz

| Latitudes | Longitudes | P _{mesurées} (dBm) |
|-----------|------------|-----------------------------|
| 34,013516 | -5,036688 | -30 |
| 34,012478 | -5,03684 | -47 |
| 34,012466 | -5,036686 | -46 |
| 34,012498 | -5,036995 | -51 |
| 34,012451 | -5,036536 | -47 |
| 34,012516 | -5,037147 | -49 |
| 34,012433 | -5,036386 | -46 |
| 34,013641 | -5,036695 | -32 |
| 34,012546 | -5,037292 | -48 |
| 34,012423 | -5,036236 | -40 |
| 34,012701 | -5,037525 | -35 |
| 34,013756 | -5,036749 | -40 |
| 34,012766 | -5,037655 | -50 |
| 34,012406 | -5,036086 | -48 |
| 34,013861 | -5,036832 | -39 |
| 34,0124 | -5,035936 | -51 |
| 34,012806 | -5,037798 | -54 |
| 34,013965 | -5,036916 | -33 |
| 34,012397 | -5,035786 | -52 |
| 34,012825 | -5,037947 | -51 |
| 34,013446 | -5,035611 | -46 |
| 34,013557 | -5,035683 | -50 |
| 34,013662 | -5,035765 | -50 |
| 34,013333 | -5,035542 | -43 |
| 34,013768 | -5,035845 | -52 |
| 34,013226 | -5,035464 | -45 |
| 34,014068 | -5,037003 | -35 |
| 34,012377 | -5,035636 | -55 |
| 34,013882 | -5,035908 | -52 |
| 34,012864 | -5,038087 | -56 |
| 34,013127 | -5,035372 | -49 |
| 34,014 | -5,035962 | -52 |
| 34,014176 | -5,037076 | -33 |
| 34,013027 | -5,035281 | -53 |
| 34,012945 | -5,038203 | -58 |
| 34,012365 | -5,035485 | -55 |
| 34,014121 | -5,03602 | -54 |
| 34,012923 | -5,035195 | -52 |
| 34,013034 | -5,038309 | -58 |
| 34,014284 | -5,037152 | -37 |

Données recueillies à 1800 MHz

| Latitudes | Longitudes | P _{mesurées} (dBm) |
|-----------|------------|-----------------------------|
| 34,013327 | -5,036794 | -33 |
| 34,013383 | -5,03682 | -34 |
| 34,01344 | -5,036839 | -38 |
| 34,013497 | -5,03686 | -39 |
| 34,013553 | -5,036885 | -36 |
| 34,012387 | -5,036838 | -53 |
| 34,012381 | -5,036765 | -54 |
| 34,012394 | -5,03691 | -54 |
| 34,013605 | -5,036918 | -34 |
| 34,012375 | -5,036693 | -53 |
| 34,0124 | -5,036983 | -58 |
| 34,012371 | -5,036622 | -51 |
| 34,012403 | -5,037056 | -60 |
| 34,012364 | -5,036551 | -55 |
| 34,012409 | -5,037127 | -58 |
| 34,012358 | -5,03648 | -56 |
| 34,013657 | -5,036951 | -37 |
| 34,012424 | -5,037196 | -57 |
| 34,012452 | -5,037258 | -57 |
| 34,012491 | -5,037313 | -54 |
| 34,012533 | -5,037364 | -46 |
| 34,012355 | -5,036408 | -55 |
| 34,012574 | -5,037417 | -46 |
| 34,012609 | -5,037475 | -50 |
| 34,012357 | -5,036337 | -56 |
| 34,013713 | -5,036976 | -38 |
| 34,012639 | -5,037537 | -57 |
| 34,012354 | -5,036266 | -56 |
| 34,016117 | -5,032611 | -89 |
| 34,015513 | -5,032032 | -78 |
| 34,01632 | -5,04066 | -67 |
| 34,016173 | -5,032634 | -90 |
| 34,016228 | -5,032662 | -89 |
| 34,01645 | -5,032916 | -87 |
| 34,015375 | -5,041615 | -66 |
| 34,016282 | -5,032693 | -90 |
| 34,016379 | -5,040671 | -68 |
| 34,015539 | -5,031967 | -78 |
| 34,016337 | -5,032724 | -90 |
| 34,01543 | -5,04164 | -64 |

Données recueillies à 2600 MHz

| Latitudes | Longitudes | P _{mesurées} (dBm) |
|-----------|------------|-----------------------------|
| 34,013357 | -5,036733 | -52 |
| 34,013395 | -5,036752 | -51 |
| 34,013433 | -5,036772 | -46 |
| 34,013472 | -5,03679 | -45 |
| 34,013509 | -5,036812 | -45 |
| 34,013544 | -5,036838 | -46 |
| 34,013581 | -5,036861 | -49 |
| 34,012392 | -5,036832 | -64 |
| 34,012387 | -5,036782 | -62 |
| 34,012396 | -5,036882 | -66 |
| 34,012382 | -5,036732 | -61 |
| 34,012398 | -5,036932 | -67 |
| 34,012378 | -5,036682 | -61 |
| 34,01362 | -5,036876 | -53 |
| 34,012401 | -5,036982 | -68 |
| 34,012374 | -5,036632 | -61 |
| 34,012405 | -5,037032 | -67 |
| 34,012537 | -5,037278 | -51 |
| 34,01237 | -5,036582 | -63 |
| 34,012508 | -5,037242 | -57 |
| 34,012566 | -5,037315 | -48 |
| 34,012479 | -5,037206 | -65 |
| 34,012414 | -5,03708 | -67 |
| 34,012592 | -5,037354 | -53 |
| 34,012452 | -5,037169 | -67 |
| 34,01243 | -5,037126 | -65 |
| 34,012366 | -5,036532 | -63 |
| 34,012615 | -5,037395 | -57 |
| 34,01366 | -5,036891 | -61 |
| 34,012361 | -5,036482 | -63 |
| 34,012635 | -5,037439 | -64 |
| 34,012359 | -5,036432 | -64 |
| 34,012358 | -5,036382 | -64 |
| 34,012653 | -5,037484 | -66 |
| 34,013697 | -5,036912 | -57 |
| 34,012357 | -5,036332 | -64 |
| 34,012667 | -5,037531 | -67 |
| 34,012354 | -5,036282 | -66 |
| 34,013736 | -5,036929 | -54 |
| 34,012361 | -5,036234 | -65 |
| 34,012679 | -5,037579 | -67 |
| 34,012363 | -5,036189 | -61 |

ANNEXE C: Equipements et scénarios de mesures

Equipements de mesures

Pour assurer l'obtention d'un bon modèle qui reflète la réalité des prédictions avec le maximum de fidélité, une chaîne de mesures analogique est utilisée pour la collecte des mesures obtenues lors des campagnes de drive test. Les antennes utilisées sont des antennes magnétiques pour la fixation sur toit de la voiture. Un logiciel de géo localisation a été utilisé pour permettre le traçage du parcours et analyser les puissances des mesures acquises.

La chaîne d'émission est composée des équipements suivants :

Générateur analogique de signaux

- Type : Agilent N9310A,
- Puissance maximale : 13dBm,
- Plage de fréquences : 0.9 – 3GHz.



Générateur analogique de signaux

Amplificateur

- Type : Amplifier Research 25S1G4A,
- Puissance maximale : 45dBm,
- Plage de fréquences : 0.8 - 4.2GHz.



Amplificateur



Antenne omnidirectionnelle large bande



Mât télescopique

Le récepteur est composé de « Coyote Modular receiver »

Récepteur multi-bande

- Type: Berkeley Varitronics Systems Coyote Modular Receiver,
- Plage de sensibilité : -118dBm/-30dBm à +/- 1dB,
- Réjection canal adjacent : > 45dB,
- Modules de réception,
- GPS : récepteur modulaire 12-canaux avec antenne active,
- Antennes magnétiques (gains et pertes câble compensés par les modules de réception),
- Lissage : 512 échantillons/récepteur/seconde et lissage 40-lambda.



Coyote Modular receiver



Antenne réceptrice et GPS posés sur un véhicule