



HAL
open science

Modélisation 3D du canal de propagation massive MIMO en environnement outdoor

Nada Bel-Haj-Maati

► **To cite this version:**

Nada Bel-Haj-Maati. Modélisation 3D du canal de propagation massive MIMO en environnement outdoor. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2021. Français. NNT : 2021IMTA0229 . tel-03286642

HAL Id: tel-03286642

<https://theses.hal.science/tel-03286642>

Submitted on 15 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE MINES-TELECOM ATLANTIQUE
BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE - IMT ATLANTIQUE

ECOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Télécommunications*

Par

Nada BEL-HAJ-MAATI

Modélisation 3D du canal de propagation massive MIMO en environnement outdoor

Thèse présentée et soutenue à IMT Atlantique – Campus de Brest, le 08/03/2021
Unité de recherche : Lab-STICC
Thèse N° : 2021IMTA0229

Rapporteurs avant soutenance :

Martine Lienard Professeur, Université de Lille
Rodolphe Vauzelle Professeur, Université de Poitiers

Composition du Jury :

Président :	Maryline Helard	Professeur, INSA de Rennes
Examineurs :	Martine Lienard	Professeur, Université de Lille
	Rodolphe Vauzelle	Professeur, Université de Poitiers
	Christophe Delaveaud	Directeur de recherche (HDR), CEA
	Nadine Malhouroux	Ingénieure de recherche, Orange Labs

Dir. de thèse : Michel Ney Professeur, IMT Atlantique

Invité(s)

Patrice Pajusco Directeur d'études, IMT Atlantique

*À la mémoire de ma mère Hafida,
À mon très cher père Hassan,
À ma sœur Myriam et mon frère Hamza,*

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent d'abord à Madame Nadine Malhouroux, mon encadrante de thèse à Orange Labs, et Messieurs Michel Ney et Patrice Pajusco, mon directeur et co-directeur de thèse à IMT Atlantique, pour leur précieux encadrement de cette thèse. Durant ces trois ans ils ont toujours été d'une disponibilité, d'un soutien et d'une attention exceptionnels.

Je remercie également Messieurs Emmanuel Brun et Daniel Milli, responsables de l'entité WEP (*Wireless Engineering and Propagation*) d'Orange Labs qui a accueilli cette thèse pour leur soutien et accueil.

J'exprime ma reconnaissance envers Madame Martine Liénard, Professeure à l'Université de Lille, et Monsieur Rodolphe Vauzelle, Professeur à l'Université de Limoges, pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de mes travaux. Toute ma gratitude s'adresse aussi à Madame la Professeure Maryline Héliard et Monsieur Christophe Delaveaud, Directeur de recherche à CEA, d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit et de participer à la soutenance de cette thèse.

Mes remerciements et ma reconnaissance vont également aux membres d'Orange Labs à Belfort et particulièrement à tous les membres de l'équipe WEP sans exception. Je tiens à remercier Jean-Marc et Philippe pour leur aide durant les campagnes de mesures, ainsi que toute l'équipe du projet *Starlight*.

Je passe ensuite une dédicace spéciale à mes amis qui m'ont accompagnée et soutenue durant toute cette aventure : Hajer, Yosra, Khadija, Maroua, Abdou, Cheikh, Ayoub et Cyril.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon père Hassan, ma petite sœur chérie Myriam et mon petit frère Doc Hamza qui m'ont toujours soutenue durant ces longues années d'études.

Je souhaite rendre hommage à ma petite maman Hafida qui nous a quitté très jeune le 15/07/2020 en laissant un grand vide dans nos vies. Merci Maman pour ton immense amour, tes encouragements et tes précieux conseils ! Sache que tu seras toujours dans mes pensées ... ♥!

Table des matières

Acronymes.....	10
Introduction générale.....	16
Chapitre 1 Autour de la 5G : Nouvelle génération des réseaux mobiles.....	17
1.1 Introduction.....	18
1.2 Qu'est-ce que la 5G ?	18
1.2.1. Introduction.....	18
1.2.2. Cas d'usage.....	19
1.3 Technologies clé pour la 5G.....	20
1.4 Le massive MIMO.....	23
1.4.1. Du MIMO au massive MIMO.....	23
1.4.2. Les réseaux d'antennes.....	25
1.4.2.1. Principe.....	25
1.4.2.2. Formation des faisceaux (<i>Beamforming</i>).....	26
1.4.2.3. Multiplexage spatial.....	27
1.4.3. Les avantages du <i>massive MIMO</i>	27
1.5 Conclusion.....	28
Chapitre 2 Canal de propagation radio : caractéristiques et modélisation.....	30
2.1. Introduction.....	32
2.2. La propagation multi-trajets.....	32
2.2.1. Les mécanismes des multi-trajets.....	32
2.2.2. Effets des multi-trajets.....	34
2.3. Le canal de propagation.....	36
2.3.1. Définition du canal de propagation.....	36
2.3.2. Modélisation du canal de propagation.....	36
2.4. Paramètres de caractérisation du canal.....	37
2.4.1. Paramètres temporels.....	37
2.4.1.1. Profil temporel de puissance.....	37
2.4.1.2. Dispersion des retards.....	38
2.4.1.3. Fenêtre et intervalle des retards.....	39
2.4.1.4. Bande de corrélation.....	40
2.4.2. Paramètres angulaires.....	40
2.5. Modèles de propagation.....	41
2.5.1. Modèles en bande étroite.....	42
2.5.2. Modèles à large bande.....	42
2.5.2.1. Modèles statistiques.....	43
2.5.2.2. Modèles déterministes.....	43
2.6 Modèle à rayons.....	44
2.6.1. Calcul des trajets.....	44
2.6.1.1. Lancer de rayons.....	44
2.6.1.2. Tracé de rayons.....	45

2.6.2. Calcul électromagnétique.....	46
2.6.2.1. L'optique géométrique.....	46
2.6.2.2. La théorie géométrique de la diffraction.....	49
2.6.2.3. La théorie uniforme de diffraction.....	51
2.7. Simulation déterministe du canal.....	51
2.8. Mesures du canal de propagation massive MIMO.....	54
2.9. Motivations des travaux de thèse.....	57
Chapitre 3 Caractérisation du canal de propagation MIMO au niveau de la BS.....	60
3.1. Introduction.....	61
3.2. Campagne de mesures <i>massive MIMO</i>	61
3.2.1. Équipements de mesures.....	61
3.2.1.1. Sondeur de canal	62
3.2.1.2. Réseau d'antennes à la réception : Scan64.....	63
3.2.1.3. Réseau d'antenne à la réception : PIFA-8.....	65
3.2.2. Configuration de la campagne de mesure.....	66
3.2.2.1. Environnement de mesure.....	66
3.2.2.2. Paramètres de mesure.....	68
3.2.3. Prétraitements des mesures.....	69
3.3. Estimation des DoA.....	69
3.4. Caractérisation du canal de propagation.....	72
3.4.1. Étude de cas.....	72
3.4.2. Analyse statistique.....	76
3.4.2.1. Dispersion temporel.....	76
3.4.2.2. Dispersion spatiale.....	77
3.4.2.3. Intercorrélation entre paramètres du canal.....	78
3.5. Conclusion.....	79
Chapitre 4 Caractérisation du canal de propagation SIMO au niveau de la MS.....	80
4.1. Introduction.....	82
4.2. Campagnes de mesures SIMO.....	82
4.2.1. Équipements de mesures.....	82
4.2.1.1. Sondeur de canal mobile.....	83
4.2.1.2. Réseau d'antenne virtuel.....	84
4.2.1.3. Chaîne d'émission.....	85
4.2.2. Configuration des campagnes de mesures.....	86
4.2.2.1. Parking ouvert « PARK ».....	87
4.2.2.2. <i>Street Canyon</i> urbain « SC ».....	88
4.2.2.3. Urbain « URB ».....	89
4.2.2.4. Suburbain « SU ».....	91
4.2.2.5. Rural « RL ».....	92
4.2.2.6. Zone commerciale « BES ».....	93
4.2.3. Prétraitement des mesures.....	94
4.3. Nouvelle méthode d'estimation des DoA en 3D.....	94
4.3.1. Introduction.....	95
4.3.2. La méthode d'estimation 2D-DoA.....	95

4.3.2.1. Principe de la méthode.....	95
4.3.2.2. Modélisation des mesures.....	96
4.3.2.3. Algorithme de la méthode.....	97
4.3.3. Évaluation de l’algorithme.....	98
4.3.3.1. Identification d’un trajet unique.....	98
4.3.3.2. Identification des multi-trajets.....	99
4.4. Post-traitement des mesures.....	103
4.5. Analyse des mesures et caractérisation du canal de propagation.....	104
4.5.1. Étude d’un lien BS-MS.....	104
4.5.1.1. En visibilité.....	104
4.5.1.2. En non visibilité.....	106
4.5.2. Analyse statistique des paramètres de propagation.....	109
4.5.2.1. Mesures en Street Canyon urbain.....	109
4.5.2.2. Mesures en environnement urbain.....	114
4.5.2.3. Mesures en environnement suburbain.....	123
4.5.2.4. Mesures en environnement rural.....	127
4.5.2.5. Mesures en espace ouvert (Parking).....	130
4.5.3. Synthèse.....	134
4.6. Conclusion.....	137
Chapitre 5 Caractérisation du canal de propagation par approche déterministe.....	140
5.1. Introduction.....	141
5.2. Simulation déterministe du canal de propagation.....	141
5.2.1. Identification des phénomènes de propagation pertinents.....	142
5.2.2. Comparaison du canal mesuré et simulé au niveau de la BS.....	144
5.2.2.1.Étude du lien BS-MS3 en visibilité.....	145
5.2.2.2.Étude du lien BS-MS4 en visibilité.....	146
5.2.3. Comparaison du canal mesuré et simulé au niveau du MS.....	148
5.2.3.1.Étude du lien BS-MS1 en visibilité.....	148
5.2.3.2.Étude du lien BS-MS2 en non visibilité.....	152
5.3. Analyse statistique du canal simulé.....	154
5.3.1. Environnement 1 : Urbain.....	155
5.3.1.1. Street canyon : Campagne de mesures SC.....	155
5.3.1.2. Place ouverte : Campagne URB.....	157
5.3.2. Environnement 2 : Suburbain.....	160
5.3.3. Environnement 3 : Parking ouvert.....	162
5.3.4. Synthèse.....	164
5.4. Conclusion.....	165
Conclusion générale et perspectives.....	180
Table des Figures.....	186
Table des Tableaux.....	194
Références.....	196

Acronymes

2D	: Bidimensionnel
3D	: Tridimensionnel
3GPP	: <i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	: 4 ^{ème} Génération de téléphonie mobile
5G	: 5 ^{ème} Génération de téléphonie mobile
ANR	: Agence Nationale de la Recherche
AAS	: <i>Azimuth Angular Spread</i>
BES	: Campagne de mesures en zone commerciale de Bessoncourt
BS	: <i>Base Station</i>
CDF	: <i>Cumulative Distribution Function</i>
CDMA	: <i>Code Division Multiple Access</i>
CLEAN	: Algorithme de déconvolution issu du domaine de la radioastronomie
COST	: Coopération européenne en Science en Technologie
COST231	: Projet Cost “ <i>Evolution of land mobile radio communications</i> ”
CPRI	: <i>Common Public Radio Interface</i>
C-RAN	: <i>Cloud-based Radio Access Network</i>
CWDM	: Multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière
D	: Diffraction
DoA	: <i>Direction of Arrival</i>
DoD	: <i>Direction of Departure</i>
DL	: <i>Down Link</i>
DS	: <i>Delay Spread</i>
DWDM	: Multiplexage par répartition en longueur d'onde dense
EAS	: <i>Elevation Angular Spread</i>
eMBB	: <i>enhanced Mobile BroadBand</i>
ESPRIT	: <i>Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques</i>
FD	: <i>Full-Duplex</i>
FDMA	: <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FDTD	: <i>Finite Difference Time Domain</i>
FPGA	: <i>Field Programmable Gate Array</i>
GPIO	: <i>General Purpose Input/Output</i>
GPS	: <i>Global Positioning System</i>
HetNets	: <i>Heterogeneous network</i>
IoT	: <i>Internet of Things</i>
LTE	: <i>Long Terme Evolution</i>
LoS	: <i>Line of Sight</i>

MIMO	: <i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
mMTC	: <i>massive Machine Type Communications</i>
mmWave	: <i>millimeter Wave</i>
MS	: <i>Mobile Station</i>
MU-MIMO	: <i>Multi-User MIMO</i>
MUSIC	: <i>MUltiple SIgnal Classification</i>
NFV	: <i>Network Function Virtualization</i>
NLoS	: <i>Non Line of Sight</i>
OG	: <i>Optique Géométrique</i>
PAP	: <i>Power Angular Profile</i>
PARK	: <i>Campagne de mesures dans un Parking ouvert</i>
PC	: <i>Personal Computer</i>
PAP	: <i>Power Azimuth Profile</i>
PDP	: <i>Power Delay Profile</i>
PEP	: <i>Power Elevation Profile</i>
PIFA	: <i>Planar Inverted-F Antenna</i>
R	: <i>Réflexion</i>
RAN	: <i>Radio Access Network</i>
RF	: <i>Radio Frequency</i>
RI	: <i>Réponse impulsionnelle</i>
RL	: <i>Campagne de mesures dans un environnement rural</i>
RX	: <i>Receiver</i>
SAGE	: <i>Space-Alternating Generalized Expectation-maximization</i>
SC	: <i>Campagne de mesures dans un environnement <i>street canyon</i> urbain</i>
SDR	: <i>Software Defined Radio</i>
SIMO	: <i>Single-Input Multiple-Output</i>
SISO	: <i>Single Input Single Output</i>
SU	: <i>Campagne de mesures dans un environnement suburbain</i>
SUPA	: <i>Slant Uniform Planar Array</i>
TDMA	: <i>Time Division Multiple Access</i>
TGD	: <i>Théorie Géométrique de la Diffraction</i>
TUD	: <i>Théorie Uniforme de la Diffraction</i>
TX	: <i>Transmitter</i>
UCA	: <i>Uniform Circular Array</i>
UIT	: <i>Union Internationale des Télécommunications</i>
UIT-R	: <i>Comité d'études en radiocommunications</i>
UL	: <i>Uplink</i>
ULA	: <i>Uniform Linear Array</i>
ULB	: <i>Ultra Large Band</i>
UMTS	: <i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UPA	: <i>Uniform Planar Array</i>

URB	: Campagne de mesures dans un environnement <i>urbain</i>
URLLC	: <i>Ultra Reliable and Low Latency Communications</i>
USRP	: <i>Universal Software Radio Peripheral</i>
UVA	: <i>Uniform Volume Array</i>
WiFi	: <i>Wireless Fidelity</i>
WSSUS	: <i>Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering</i>

Introduction générale

Le secteur des communications mobiles a connu une croissance exponentielle au cours des deux dernières décennies. La tendance a été initiée par la troisième génération de système de communication cellulaire (3G) déployée au début du siècle grâce au standard UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Le but de cette technologie était de permettre aux utilisateurs l'accès aux services multimédias à débit élevé en exploitant la bande de fréquences de 2 GHz. Avec l'arrivée de la 3G, la connectivité mobile est devenue une nécessité pour de nombreuses applications et cas d'usage, ce qui a fait exploser les besoins en capacité et en débit de transmission sans fil. Cette tendance est maintenue avec le déploiement du système de communication cellulaire très haut débit (4G) de quatrième génération où les données générées à l'échelle mondiale par le réseau mobile ont dépassé quatre fois le trafic de la 3G. En effet, l'apparition des objets connectés et la diversification des types de communication rend la génération actuelle 4G dans l'incapacité de suivre et gérer ce flux énorme de données, d'où l'intérêt de la nouvelle génération 5G. Ainsi, des avancées technologiques importantes sont nécessaires pour augmenter les performances des réseaux de téléphonie mobile, comme augmenter le nombre la bande de fréquence et/ou le nombre d'antennes. Aujourd'hui la bande de fréquences 3,4 – 3,8 GHz constitue la « bande-cœur » de la 5G attribuée en France.

Le *Massive MIMO* (*Multiple-Input Multiple-Output*) est devenu l'une des technologies de couche physique les plus prometteuses pour les futurs systèmes sans fil 5G. L'idée principale est d'équiper les stations de base de larges réseaux d'antennes (100 antennes ou plus) pour communiquer simultanément avec de nombreux terminaux et utilisateurs. En exploitant la diversité spatiale et en tirant profit de la propagation multi-trajet, le *massive MIMO* promet d'améliorer les performances du système en augmentant la capacité de transmission du canal et en améliorant l'efficacité spectrale et énergétique. Le MIMO massif combiné à répond alors aux nombreuses exigences de la 5G.

Le déploiement de la 5G nécessite d'abord une modélisation spatio-temporelle du canal de propagation *massive MIMO*, afin d'étudier la dimension spatiale au même niveau que la dimension temporelle. Pour ce faire, une parfaite connaissance de la propagation par multi-trajets en environnements extérieurs est nécessaire. Ainsi, la simulation des multi-trajets nécessite la mise en œuvre des modèles de propagation bien plus pointus que ceux utilisés pour modéliser les affaiblissements par propagation. C'est dans cette optique qu'*Orange Labs* a développé *Starlight*, un modèle de propagation à rayons, pour simuler les multi-trajets en environnement extérieur.

L'objectif de cette thèse est d'apporter une caractérisation paramètres spatio-temporelle 3D du canal de propagation *massive MIMO* à 3,7 GHz par une approche expérimentale basée sur les résultats de divers campagnes de mesures. En complément, les simulations

du canal avec *Starlight* ont été ensuite étudiées et comparées aux mesures afin de valider le modèle de propagation et examiner les différences entre le modèle théorique implémenté et le modèle expérimental.

Ce mémoire est constitué de cinq chapitres.

Le premier chapitre donne une présentation générale du contexte de la future génération des réseaux mobile 5G. Tout d'abord la technologie 5G, les différents cas d'usage envisagés et les exigences et les contraintes auxquelles elle doit répondre sont définis. Ensuite, les différentes technologies clés de la 5G sont explicitées avec une description approfondie de la technologie *massive MIMO*.

Le deuxième chapitre s'intéresse au canal de propagation radio, ses caractéristiques et ses différents types de modélisation. La propagation multi-trajet est présentée en explicitant les différents phénomènes physiques. Dans ce contexte, le modèle de propagation à rayons *Starlight* développé par *Orange Labs* est introduit et les mesures *massive MIMO* existant dans la littérature sont présentées.

Le troisième chapitre porte sur l'analyse du canal de propagation massive MIMO à 3,7 GHz au niveau de la BS dans un environnement urbain microcellulaire. Dans un premier temps, la campagne de mesures 8Tx×64Rx est présentée. Ensuite, une étude de cas en visibilité et non visibilité a été réalisée afin de permettre une analyse fine du canal de propagation. Enfin, une analyse statistique des résultats est établit.

Le quatrième chapitre est consacrée à l'analyse du canal de propagation à 3,7 GHz au niveau du mobile. Des campagnes de mesures SIMO ont été réalisées à dans différents environnements extérieurs (urbain, suburbain, rural et espaces ouverts). Le mobile a été équipé d'un réseau d'antennes UPA virtuel et un sondeur mobile a été utilisé pour la collecte des réponses impulsionnelles. Une nouvelle méthode paramétrique d'estimation des caractéristiques des trajets de propagation est introduite. Cette technique est basée sur les relations qui existent entre les directions d'arrivée et les déphasages engendrés par géométrie du réseau UPA. L'algorithme proposé permet une estimation rapide, peu couteuse et donne une représentation des mesures compacte. Ainsi, pour chaque environnement une caractérisation du canal de propagation en temps et en espace est réalisée ; afin de dégager les tendances et tirer des conclusions générales sur l'impact de l'environnement de mesures sur le comportement spatio-temporel du canal.

Le cinquième chapitre est destiné à l'étude des simulations déterministes du canal de propagation massive MIMO par *Starlight*. Les performances du modèle ont été évaluées par une comparaison des données mesurées obtenues dans les chapitres précédents aux données prédites par *Starlight* dans les mêmes conditions des mesures. Cette comparaison se fait à travers les paramètres spatio-temporels du canal.

Enfin, une conclusion générale clôture le manuscrit en récapitulant les différentes contributions de ce travail et propose quelques perspectives d'études complémentaires.

Chapitre 1 Autour de la 5G : Nouvelle génération des réseaux mobiles

Sommaire

1.1. Introduction.....	18
1.2. Qu'est-ce que la 5G ?.....	18
1.2.1. Introduction.....	18
1.2.2. Cas d'usage.....	19
1.3. Technologies clé pour la 5G.....	20
1.4. Le <i>massive MIMO</i>.....	23
1.4.1. Du MIMO au <i>massive MIMO</i>	23
1.4.2. Les réseaux d'antennes.....	25
1.4.2.1.Principe.....	25
1.4.2.2. Formation des faisceaux (<i>Beamforming</i>).....	26
1.4.2.3. Multiplexage spatial.....	27
1.4.3. Les avantages du <i>massive MIMO</i>	27
1.5. Conclusion.....	28

1.1. Introduction

Ce chapitre sert d'introduction au sujet. Il vise à décrire le contexte de la future génération des réseaux mobile 5G. Pour cela la première partie est dédiée à la définition de la 5G ainsi que les différents cas d'usage envisagés, les exigences et les contraintes auxquelles elle doit répondre. Ensuite, la deuxième partie explicite les différentes technologies identifiées pour atteindre les performances visées par la 5G pour déboucher sur la troisième partie pour une description approfondie de la technologie *massive MIMO*.

1.2. Qu'est-ce que la 5G ?

1.2.1. Introduction

De nos jours, le nombre de terminaux à desservir connaît une croissance exponentielle. En effet, la multiplication des objets connectés et la diversification des types de communication rend la génération actuelle de réseaux cellulaires (4G) dans l'incapacité de suivre et gérer ce flux énorme de données. C'est pourquoi, il a été nécessaire de mettre en place une cinquième génération de technologie téléphonie mobile (5G) conçue pour répondre à la très grande croissance des données et à la connectivité de la société moderne. L'augmentation des débits, la réactivité du réseau et la capacité à connecter plus d'objets et de personnes sont les principales caractéristiques de ce que sera le réseau 5G à terme. Cependant, son principal atout par rapport aux générations mobiles précédentes, est sa capacité à s'ajuster de façon différenciée aux usages et transparente pour l'utilisateur, parfois au cours d'une même connexion. La 5G propose donc une connectivité mieux distribuée, plus performante, plus intelligente et flexible. C'est pourquoi elle représentera une ouverture vers un large panel d'applications et de services extrêmement diversifiés : éducation, divertissement, santé, culture ...

L'union internationale des télécommunications (ITU) a établi dans l'IMT-2020 [1] les exigences pour les réseaux, dispositifs et services de la 5G. Dans ce rapport, huit indicateurs de performance sont listés pour préciser et quantifier les caractéristiques d'un réseau 5G. Le Tableau 1les rappelle et les compare aux performances de la 4G.

TABLEAU 1 : LES INDICATEURS DE PERFORMANCE 5G – IMT 2020

Performances	4G	5G
Débit maximal [Gbit/s]	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur [Mbit/s]	10	100
Efficacité spectrale	×1	×3
Vitesse [km/h]	350	500
Latence [ms]	10	1
Nombre d'objets connectés par km ²	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	×1	×100
Débit sur une zone [Mbit/s/m ²]	0,1	10

1.2.2. Cas d'usage

Face à la diversité des services qui seront fournis par ces futurs systèmes de communication, trois grandes catégories d'usage ont été définies en fonction des exigences requises du réseau : Les communications ultra haut débit (eMBB : *enhanced Mobile BroadBand*), les communications massives entre machines (mMTC : *massive Machine Type Communications*), et les communications ultra-fiables à très faible latence (URLLC : *Ultra Reliable and Low Latency Communications*). Ces différents types de communications sont représentés par la Figure 1 ci-dessous.

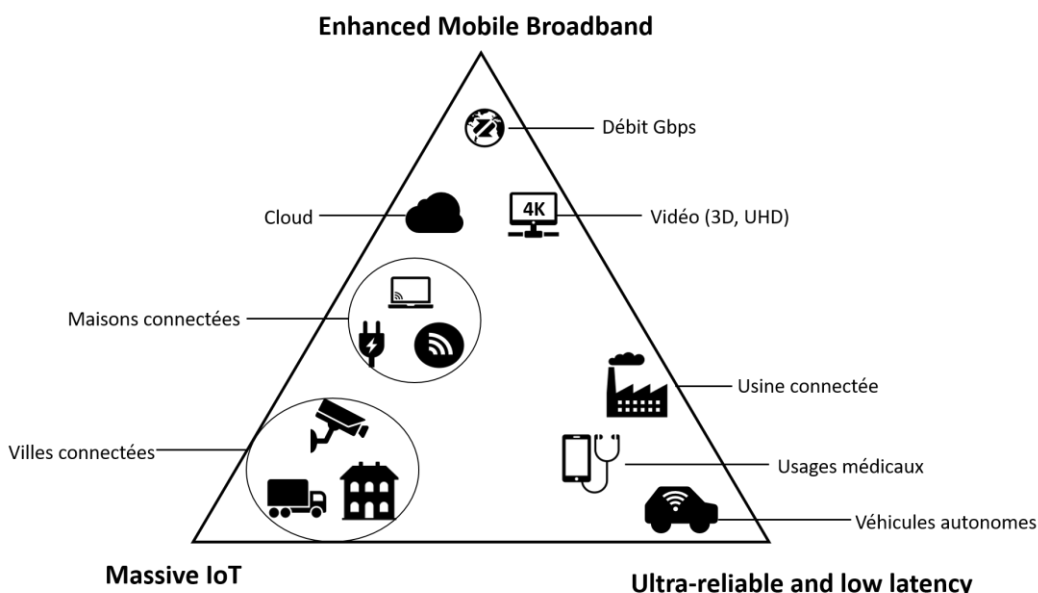


FIGURE 1 : LES USAGES ATTENDUS DE LA 5G

- **Les communications ultra haut débit : eMBB**

Le haut débit mobile amélioré (eMBB) regroupe toutes les applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, pour permettre par exemple de visionner des vidéos en ultra haute définition (8K) ou de «streamer» sans-fil des applications de

réalité virtuelle ou augmentée. Ces applications se concentrent sur la prise en charge du débit de données de l'utilisateur final en constante augmentation et sur la capacité du système. Pour ce faire, l'eMBB établit les exigences majeures suivantes :

- Débit maximal : 20 Gbps en liaison descendante (DL), 10 Gbps en liaison montante (UL).
- Débits de données expérimentés (débit utilisateur 5e pour cent) : 100 Mbps (DL), 50 Mbps (UL).
- Latence du plan utilisateur : 4 ms.

- **Les communications massives entre machines : mMTC**

Ce type concerne principalement tous les usages liés à l'internet des objets (IoT). Ce service nécessite une connectivité massive et une faible consommation énergétique pour pouvoir interconnecter des milliards d'objets et capteurs à faible coût. Contrairement à l'eMBB, le mMTC n'exige pas un haut débit de données mais d'autres exigences strictes doivent encore être satisfaites.

- Densité : 1 million d'appareils / km².
- Autonomie de la batterie de l'appareil : 10-15 ans.

- **Les communications ultra fiables à très faible latence : URLLC**

Cette classe regroupe toutes les applications nécessitant une réactivité extrêmement importante ainsi qu'une garantie très forte de transmission du message. Ces besoins se retrouvent principalement dans les transports (temps de réaction en cas de risque d'accident, par exemple), dans la médecine (chirurgie à distance) et, de manière générale, pour la numérisation de l'industrie. Pour ces communications de zone ultra-fiables et à faible latence, des exigences spécifiques sont nécessaires :

- Latence : inférieur à 1 ms.
- Fiabilité : 99.99%.

1.3. Technologies clé pour la 5G

Afin d'atteindre les performances requises par les différents cas d'usage des systèmes 5G énumérées dans la section précédente, différentes solutions technologiques ont été identifiées et étudiées par les chercheurs. Dans cette section, les principales technologies clés de la 5G sont présentées.

- **Massive MIMO**

La technologie massive MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) consiste à utiliser un nombre relativement élevé d'antennes d'émission (TX) et de réception (RX) pour les communications sans fil. Grâce à leur capacité à focaliser l'énergie vers plusieurs directions de l'espace, ces antennes intelligentes peuvent être utilisées pour les transmissions multi-utilisateurs. Elles permettront, d'une part, aux terminaux ciblés de bénéficier simultanément de la totalité de la bande passante et d'obtenir un débit très élevé, et d'autre part, aux stations de base de réduire considérablement leur consommation énergétique [2].

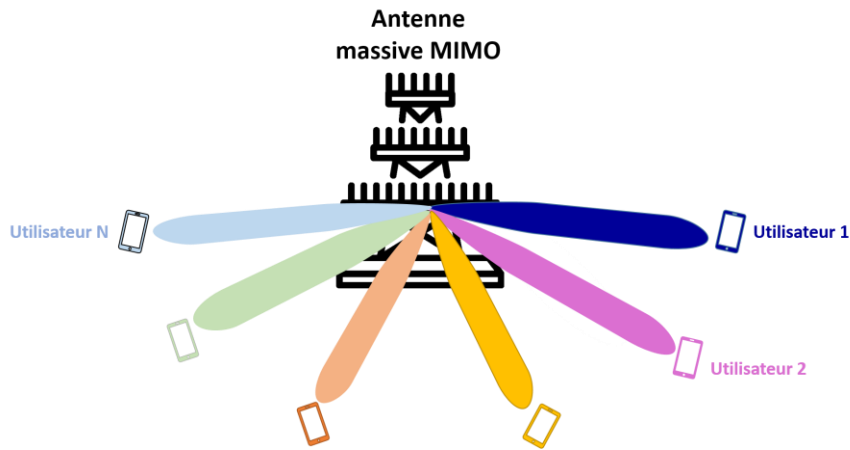


FIGURE 2 : LES ANTENNES MASSIVE MIMO

- **Ondes millimétrique (mmWave)**

Afin d’assurer une meilleure qualité de service par rapport à celle de la 4G et proposer de nouveaux services, il convient d’abord d’identifier une bande de fréquence prioritaire pour le déploiement des réseaux 5G. Comme la majorité des systèmes mobiles et sans fil utilisent les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz, une saturation est possible en raison de la croissance exponentielle du trafic de données sur le réseau [3]. Par conséquent, les bandes de fréquence millimétriques (30 – 300 GHz) suscitent l’intérêt des chercheurs grâce à leur disponibilité et leurs largeurs de bande qui dépassent le 1 GHz.

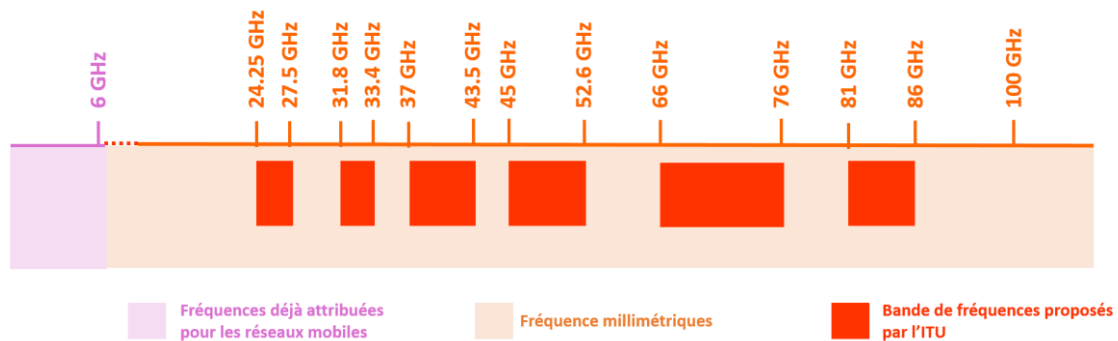


FIGURE 3 : BANDES DE FREQUENCES MILLIMETRIQUES POUR LA 5G

- **Densification des réseaux par *Small-cells***

Le déploiement des réseaux mobiles actuels se fait selon une organisation en nid d’abeilles. Dans ces réseaux, dit *macro-cells*, les stations de base (BS) sont placées sur de hautes tours et conçues pour desservir un certain nombre de terminaux se trouvant dans leurs zones de couverture. Pour le déploiement de la 5G, les réseaux *macro-cells* seront complétés par l’installation de petites antennes ou *small-cells* dans une configuration de réseaux hétérogènes (HetNets). Cette approche de densification est pratique pour améliorer la capacité du réseau de manière rentable, comme indiqué dans [4].

Dans un contexte 5G, cette architecture va dépendre des besoins des utilisateurs en termes de couverture et de capacité. Par exemple, une cellule serait capable de détecter la présence d'un utilisateur pour déclencher des services supplémentaires. Ainsi une réduction considérable de la consommation énergétique serait garantie. En plus de cet avantage, ces petites cellules permettront également une couverture totale c'est à dire une couverture omniprésente même dans les zones les plus isolées par exemple dans les zones rurales, les tunnels, etc. En revanche, l'utilisation de ces petites cellules pour la 5G se fait avec implication d'autres techniques pour répondre aux exigences de la 5G, comme l'utilisation des bandes millimétriques pour fournir des services à haut débit.

La figure 4 illustre l'architecture d'un réseau hétérogène composé d'une macro cellule et plusieurs *small-cells*.

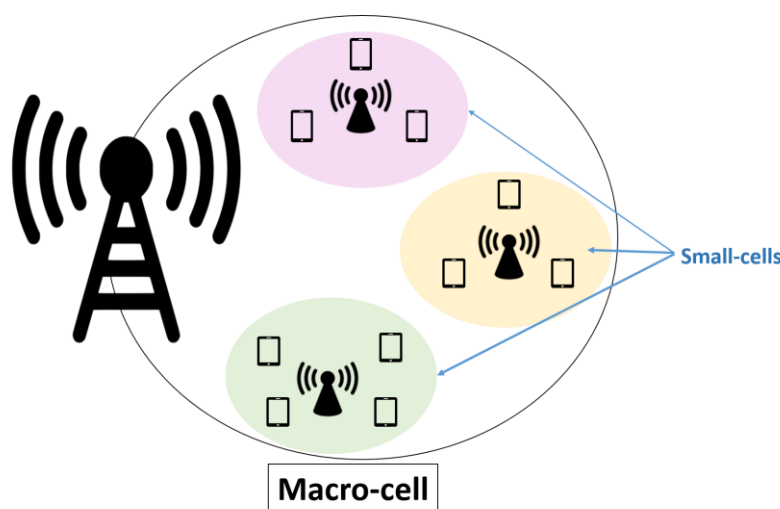


FIGURE 4: RESEAU HETEROGENE COMPOSE D'UNE MACRO CELLULE ET DE PLUSIEURS SMALL CELLS PERMETTANT DE SOULAGER LE TRAFIC DE DONNEES DE LA MACRO CELLULE

- **C-RAN (Cloud-based Radio Access Network)**

Le C-RAN est une architecture centralisée proposée pour les réseaux mobiles futurs. Elle est basée sur le *cloud computing* pour les réseaux d'accès radio (RAN). Cette architecture permet un déploiement à grande échelle, la prise en charge de la technologie radio collaborative et des capacités de virtualisation en temps réel. Il s'agit d'une évolution du système de communication sans fil actuel et utilise la dernière norme d'interface radio publique commune (CPRI), la technologie de multiplexage par répartition en longueur d'onde grossière ou dense (CWDM / DWDM) et la transmission par ondes millimétriques (onde MM) pour les signaux longue distance.

- **NFV (Network Function Virtualization)**

Les futurs réseaux 5G doivent répondre à des usages très variés et devraient donc être flexibles et adaptatifs. Cependant, les fonctions matérielles du réseau actuel sont défavorables à un déploiement continu de services réseau supplémentaires. Pour remédier à ce problème treize opérateurs se sont réunis en 2012 pour introduire le concept de NFV (virtualisation des fonctions réseau) [5]. Cette technologie se traduit par la capacité de dissocier le matériel du logiciel pour les équipements de réseau. Ce qui veut dire, par exemple, que plusieurs fonctions de réseau peuvent s'exécuter de manière

indépendante sur un même matériel générique. Les fonctions réseau peuvent également migrer d'un matériel à un autre.

- **Communications en FD (*Full-Duplex*)**

Les stations de base et les téléphones portables d'aujourd'hui reposent sur des émetteurs-récepteurs qui ne peuvent pas transmettre et recevoir des informations sur la même fréquence, ou utilisent des fréquences différentes si un utilisateur souhaite transmettre et recevoir des informations en même temps à cause de l'auto-interférence. Cependant, des études récentes [6][7][8] ont revendiqué la faisabilité de communications bidirectionnelles simultanées. Cette technique est appelée Full-Duplex (FP). En FD, il est théoriquement possible de diviser la bande de fréquence utilisée par deux ou de permettre un flux de données double en conservant la même bande de fréquences. Des études récentes ont ouvert la voie à des réalisations pratiques de FD [9][10] pour des transmissions bande étroite et à faibles distances.

1.4. Le massive MIMO

Comme le montre la partie 1.3, le massive MIMO est considéré comme l'une des technologies clé pour le déploiement de la 5G. Cette technique est essentielle pour les communications numériques afin d'améliorer les performances du système en augmentant la capacité et le débit. L'objectif de cette section est d'approfondir et d'explorer l'historique ainsi que les avantages de cette technologie.

1.4.1. Du MIMO au massive MIMO

Le terme MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) désigne une technologie antennaire destinée aux communications sans fil, qui consiste à utiliser plusieurs antennes tant au niveau de l'émetteur et celui du récepteur. Les antennes présentes à chaque extrémité du circuit de communication sont combinées pour minimiser les erreurs et optimiser le débit des données.

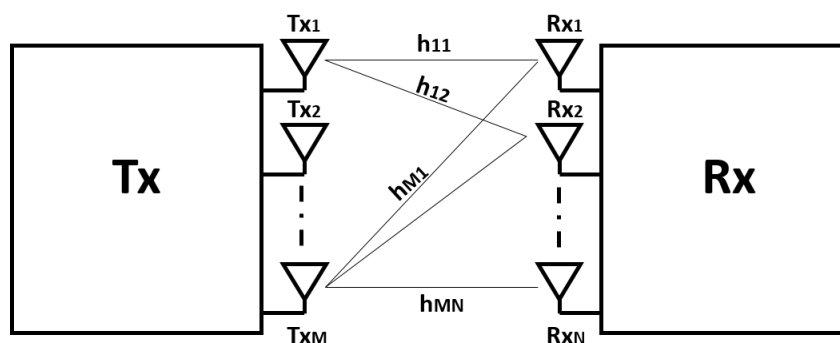


FIGURE 5 : SYSTEME MIMO

Dans le cadre de communications sans fil classiques, une seule antenne est utilisée côté source et une seule autre côté destination. Dans certains cas, ce procédé donne lieu à certains problèmes liés aux effets des trajets multiples. Ainsi, lorsqu'un signal rencontre des obstacles, tels que collines, canyons ou bâtiments, les échos transmis s'éparpillent,

empruntant de nombreux chemins distincts pour atteindre leur destination. Les parties éparpillées du signal arrivent à destination sous différents angles et à des moments différents. Le MIMO vise à remédier aux problèmes d'interférences entre les différents trajets pour en tirer profit. En effet, la technique exploite les trajets multiples en utilisant plusieurs émetteurs et récepteurs avec une dimension spatiale supplémentaire pour augmenter considérablement les performances et la portée[11].

En raison de ses avantages en termes d'amélioration de capacité et de fiabilité des liaisons, la technologie MIMO a été largement étudiée dans le passé et utilisée dans diverses normes telles que système universel de télécommunications mobiles (UMTS) et le *long terme evolution* (LTE)[12].

Les premières études se sont concentrées sur le système MIMO point-à-point, appelé MIMO conventionnel. Ce système met en œuvre une communication entre un émetteur et un récepteur, chacun ayant plusieurs antennes. On parle de point-à-point car, à un instant t et à une fréquence donnée, il n'y a qu'un seul utilisateur concerné par la transmission. En d'autres termes la BS rayonne dans toute la cellule et alloue pour chaque utilisateur une plage temporelle (TDMA, *Time Division Multiple Access*) ou fréquentielle (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) sur laquelle toutes les informations transportées par cette ressource leur sont destinées. Une répartition en code (CDMA, *Code Division Multiple Access*) est également possible et vise à séparer les différents utilisateurs en leur appliquant à chacun une séquence orthogonale. La Figure 6 (a) illustre une répartition en temps ou en fréquence (la ressource exploitée étant représentée par les différentes couleurs).

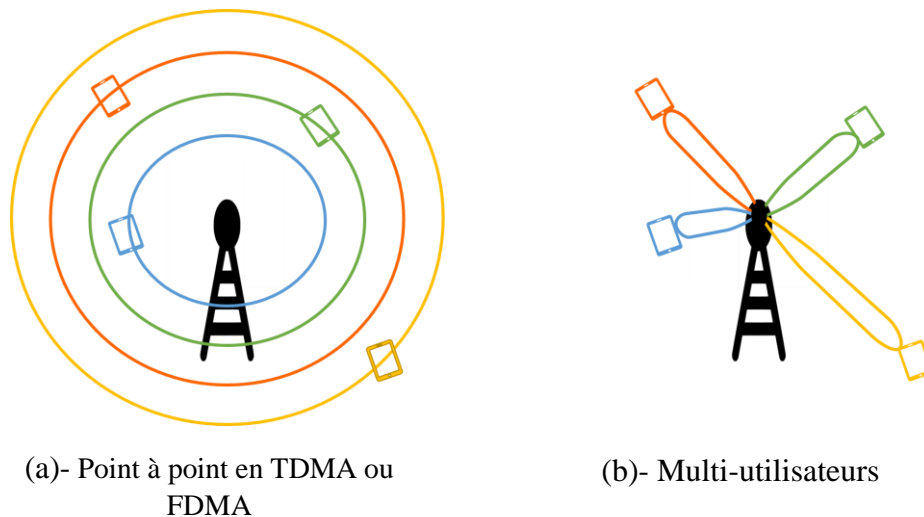


FIGURE 6 : ILLUSTRATION DU RAYONNEMENT D'UN SYSTEME POINT A POINT ET D'UN SYSTEME MULTI UTILISATEURS

Au fil du temps, l'activité de recherche s'est recentrée sur le système MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO). Dans ce système, les BS permettent de séparer spatialement les utilisateurs afin de leur allouer toute la bande passante. Cela revient à établir un lien RF entre la BS et chaque utilisateur. On voit en effet que sur la Figure 6 (b) les utilisateurs sont visés individuellement ce qui permet d'éviter tout rayonnement inutile dans des directions indésirables. Il en résulte une plus grande efficacité énergétique et une capacité améliorée grâce à la possibilité d'allouer la totalité de la bande.

Ceci explique que le MU-MIMO présente plus d'avantages par rapport au MIMO point à point conventionnel, dont le plus important est sa capacité à atteindre la diversité, ce qui rend les performances du système plus robustes à l'environnement de propagation. C'est pourquoi le MU-MIMO est de plus en plus utilisé dans le monde entier dans le cadre des normes de communications, telles que LTE et 802.11 (WiFi).

Une croissance soutenue des usages mobiles est observée au cours des dernières années. D'une part les utilisateurs sont de plus en plus nombreux, générant ainsi des milliards de données qui doivent être traitées de façon efficace et fiable. D'autre part les objets connectés sont de plus en plus présentes dans notre quotidien. Nous en comptons aujourd'hui 10 milliards et ce chiffre ne cessera d'augmenter dans le futur. La technologie MU-MIMO actuellement déployée dans le réseau 4G/LTE, s'avère incapable de gérer cet énorme afflux de trafic de données avec plus d'efficacité et de fiabilité. Le MU-MIMO utilisé en LTE limite le nombre d'antennes en BS (au plus 8), ce qui limite l'amélioration des débits et l'efficacité spectrale. Pour booster les performances du système, plusieurs études ont montré qu'augmenter le nombre d'antennes à la BS permet d'améliorer les performances du système[13]. D'où l'intérêt du *massive MIMO*, une extension du MIMO actuel, qui regroupe des centaines voire des milliers d'antennes à la station de base et dessert des dizaines d'utilisateurs simultanément[14][15].

1.4.2. Les réseaux d'antennes

1.4.2.1. Principe

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes élémentaires indépendantes et alimentées de façon synchrone. Les signaux envoyés ou reçus par chacune des antennes sont pondérés en amplitude et/ou en phase avant d'être sommés entre eux. Ces pondérations permettent aux réseaux d'antennes de produire des diagrammes de rayonnement ayant la forme souhaitée[16]. Ainsi, l'utilisation des réseaux d'antennes en émission permettra de créer plusieurs lobes simultanément ou un seul lobe dans la direction des utilisateurs. Ceci permettra d'augmenter la directivité et le gain du réseau. En réception, les réseaux d'antennes permettent d'améliorer la réception des signaux grâce à la diversité spatiale de l'antenne. De plus, associés aux techniques de traitement du signal, les réseaux d'antennes permettent d'accomplir différents traitements tels que le calcul des directions d'arrivées des signaux.

Les réseaux d'antennes sont utilisés pour plusieurs objectifs. Ainsi une antenne de réception directive permet d'augmenter la portée, réduire le nombre de stations de base nécessaires à la couverture cellulaire d'une zone géographique et augmenter les débits dans cette même zone. Il existe différentes géométries de réseaux d'antennes. Les plus classiques sont le réseau uniforme linéaire (ULA), planaire (UPA), cylindrique (UCA) et volumique (UVA).

Plusieurs exemples de réseaux d'antennes *massive MIMO* existent dans la littérature. La Figure 7 (a) est un réseau de type UCA contenant 128 antennes, utilisé par l'université Lund pour étudier les caractéristiques de propagation et évaluer la performance du système en environnement *outdoor*. Les Figure 7(b) et 7(c) représentent des réseaux

UPA. Le premier, qui contient 64 éléments, a été développé par l'université Rice pour des études en environnement indoor. Le second *LuMaMi* est un banc d'essai en temps réel pour évaluer les performances pratiques de MIMO massif dans des environnements *indoor*.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 7 : EXEMPLE DE RESEAUX D'ANTENNES MASSIVE MIMO

(a)- Cylindrique, Université Lund [19]

(b)- Planaire, Université Rice [27]

(c)- Planaire sous forme de T, Université Lund [28]

1.4.2.2. Formation des faisceaux (*Beamforming*)

La formation de faisceaux ou *beamforming* est l'une des techniques les plus importantes de traitement de signal utilisée par les antennes *massive MIMO* pour recevoir ou émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum. Elle peut être utilisée pour l'estimation des directions d'arrivée des signaux (DoA) ainsi que pour la suppression d'interférences. Cette technique est considérée comme un filtre spatial qui favorise le gain pour la direction d'intérêt et atténue les signaux émis dans les directions non désirées.

Les applications du *beamforming* sont diverses et concernent divers secteurs comme le radar, le sonar, les communications sans fil, l'écoute passive et l'imagerie biomédicale [17][18].

Le contrôle et la formation des diagrammes de rayonnement se fait en appliquant une pondération selon les critères fixes aux éléments rayonnants tel que la maximisation du gain dans une direction donnée, la maîtrise du niveau des lobes secondaires, etc.

La Figure 8 schématise le fonctionnement d'un formateur de faisceaux. Le signal émis est dirigé dans la direction de l'utilisateur principal, le gain obtenu dans cette direction est dit gain de *beamforming* et va permettre d'augmenter grandement le bilan de liaison. Ainsi les signaux ayant empruntés d'autres trajectoires (les multi-trajets) ou ceux provenant d'autres utilisateurs (interférences) seront plus atténués.

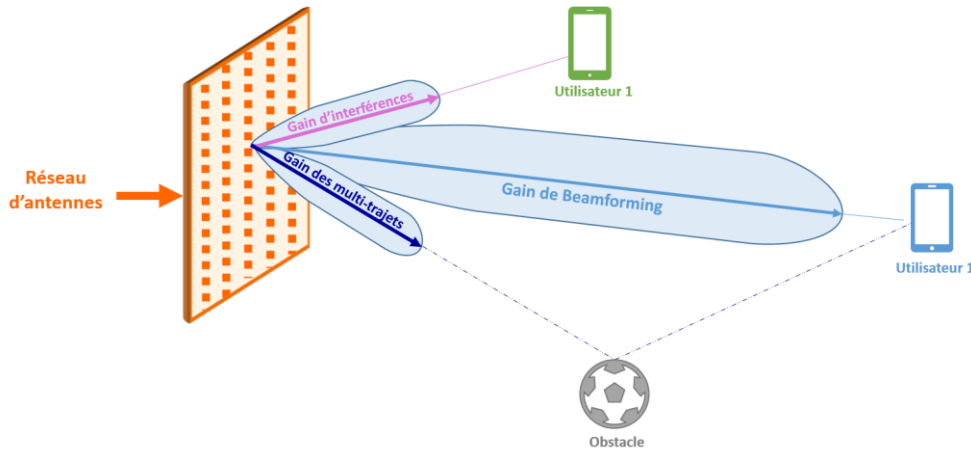


FIGURE 8 : CONCEPT DU BEAMFORMING

1.4.2.3. Multiplexage spatial

Pour augmenter la capacité d'un système *massive MIMO*, la technique dite de multiplexage spatial (*Spatial Multiplexing*) peut être mise en œuvre. L'objectif de ce type de technique est de réaliser plusieurs liaisons SISO (*Single Input Single Output*) indépendantes.

Le multiplexage spatial consiste à diviser la séquence de données en plusieurs flux ou trames et à les transmettre sur chacune des antennes et donc sur des canaux indépendants en espace. Ainsi, le but est d'augmenter la capacité par rapport à un système SISO. L'information à transmettre est divisée selon le nombre d'antennes émettrices avec un codage canal. Il est à noter que selon cette technique les antennes rayonnent d'une manière aveugle sans aucune préférence de direction particulière.

1.4.3. Les avantages du massive MIMO

Le MIMO massif est une technologie émergente a attiré l'attention dans la communauté de recherche en raison des principaux avantages suivants :

- **Efficacité spectrale**

La notion d'efficacité spectrale est très importante pour évaluer les performances des nouvelles techniques de communications sans fil. Elle définit la quantité des données binaires (en bits) qui peut être transmise durant une seconde sur la largeur de bande disponible. L'efficacité spectrale η s'exprime en (bit/s/Hz) et se calcule selon l'équation [20](1).

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_i}{T \omega M} \quad (1)$$

- χ_i représente le nombre de bits correctement par l'utilisateur i .
- N nombre total d'utilisateurs et M le nombre de cellules.
- ω largeur de bande de canal de transmission.
- T le temps nécessaire pour que les bits soient bien reçus par l'utilisateur.

Les systèmes MIMO massif peuvent améliorer considérablement l'efficacité spectrale via le multiplexage spatial. En effet, grâce aux larges antennes les évanouissements rapides, les interférences ainsi que le bruit du système de communications sont éliminés. En plus, cette technique, associée au *beamforming*, concentre l'énergie transmise seulement en direction de la cible visée, augmentant alors grandement l'efficacité spectrale globale.

- **Efficacité énergétique**

La technique du MIMO massif atteint ses performances en termes d'efficacité énergétique grâce au grand nombre d'antennes BS combinées à un traitement cohérent. Cela permet de réduire considérablement la puissance d'émission. Ceci est discuté dans[19][21]. Par conséquent, grâce à une combinaison cohérente à la réception et à la formation de faisceau à la transmission, l'efficacité énergétique peut être considérablement améliorée. Une étude sur les techniques du *massive MIMO* faibles en consommation énergétique est présentée dans[22].

- **Robustesse et fiabilité**

Le grand nombre d'antennes BS procure plus de diversité. Cela se traduit par une meilleure fiabilité de liaison. De plus, à mesure que le nombre d'antennes augmente, le bruit additif, l'évanouissement à petite échelle et les interférences cellulaires sont voués à disparaître. Les systèmes *massive MIMO* sont plus fiables grâce à la robustesse des différents canaux[23].

- **Réduction d'interférences**

L'interférence entre les utilisateurs d'un même canal peut dégrader les performances d'un utilisateur donné. Par conséquent, il peut être nécessaire de mettre en œuvre des schémas d'annulation ou de réduction d'interférence. L'alignement d'interférence[24], détection de multi-utilisateurs Maximum de vraisemblance [25] et le codage *Dirty paper coding* [26] peuvent être utilisés. Cependant, ces schémas souffrent d'un défaut majeur, à savoir une complexité de calcul élevée.

1.5. Conclusion

Ce premier chapitre a introduit le contexte général du développement de la nouvelle génération des réseaux mobile 5G, à savoir ses principales exigences, ses cas d'utilisation et ses applications ciblés. La 5G promet un saut de performances en garantissant des débits de communication très élevés, une capacité à connecter une forte densité d'utilisateurs et d'objets, une faible latence et une faible consommation

d'énergie. Pour répondre à ces exigences, différentes technologies parfois complémentaires existent, dont chacune présente des avantages et des limitations. Le *massive MIMO* est l'une de ces technologies pertinentes qui attiré l'attention de plusieurs chercheurs, grâce à ses nombreux avantages. Dans ce chapitre, une description approfondie de la technologie *massive MIMO* a été explicitée. Les notions de réseaux d'antennes, formations des faisceaux et multiplexage spatial ont été introduites.

Chapitre 2 Canal de propagation radio : caractéristiques et modélisation

Sommaire

2.1. Introduction.....	32
2.2. La propagation multi-trajets.....	32
2.2.1. Introduction.....	32
2.2.2. Effets des multi-trajets.....	34
2.3. Le canal de propagation.....	36
2.3.1. Définition du canal de propagation.....	36
2.3.2. Modélisation du canal.....	36
2.4. Paramètres de caractérisation du canal.....	37
2.4.1. Paramètres temporels.....	37
2.4.1.1. Profil temporel de puissance.....	37
2.4.1.2. Dispersion des retards.....	38
2.4.1.3. Fenêtre et intervalle des retards.....	38
2.4.1.4. Bande de corrélation.....	40
2.4.2. Paramètres angulaires.....	40
2.5. Modèles de propagation.....	41
2.5.1. Modèles en bande étroite.....	42
2.5.2. Modèle en large bande.....	42
2.5.2.1. Modèles statistiques.....	43
2.5.2.2. Modèles déterministes.....	43
2.6. Modèles à rayons.....	44
2.6.1. Calcul des trajets.....	44
2.6.1.1. Lancer de rayons.....	44
2.6.1.2. Tracé de rayons.....	45
2.6.2. Calcul électromagnétique.....	46
2.6.2.1. L'optique géométrique.....	46
2.6.2.2. La théorie géométrique de la diffraction.....	49
2.6.2.3. La théorie uniforme de diffraction.....	51

2.7. Simulation déterministe du canal.....	51
2.8. Mesures du canal de propagation <i>massive MIMO</i>.....	54
2.9. Motivations des travaux de thèse.....	57

2.1. Introduction

La caractérisation des canaux de propagation est une étape cruciale pour le déploiement des systèmes de communications sans fil et l'analyse de leurs performances. Elle vise à déterminer les différents phénomènes physiques qui interviennent lors de la propagation pour interpréter et analyser les variations temporelles et spatiales du canal radio. Pour ce faire, une bonne connaissance des mécanismes et effets de la propagation radio est exigée. Dans un environnement réel, la propagation se fait par un canal multi-trajets et est donc complexe à modéliser.

Dans ce chapitre, la propagation multi-trajets est d'abord introduite, en explicitant les phénomènes de propagation qui interviennent et les effets qui en résultent. Ensuite, une représentation du canal de propagation radio ainsi que les différents paramètres permettant de le caractériser sont donnés. Enfin, les principaux modèles de propagation pour les canaux *massive MIMO* sont présentés tout en détaillant leurs spécificités et leurs limites. Dans ce contexte, le modèle de propagation à rayons *Starlight* est introduit et les mesures *massive MIMO* existant dans la littérature sont présentées.

2.2. La propagation multi-trajets

2.2.1. Les mécanismes des multi-trajets

Dans un environnement réel, le signal transmis emprunte généralement différents trajets pour arriver à destination. Ces trajets varient en nombre et subissent différents phénomènes selon la nature de l'interaction entre l'onde et un élément de l'environnement. Il en résulte en réception un signal constitué d'une recombinaison de ces signaux arrivant avec des amplitudes, des phases et des temps d'arrivée différents. La présence de trajets multiples de propagation peut conduire à une distorsion importante du signal reçu. En outre, dans quelques configurations, un trajet en visibilité directe, ou *Line Of Sight* (LOS), n'est pas toujours disponible. Dans ce cas, ce sont les trajets en non-visibilité, ou *Non Line Of Sight* (NLOS), qui permettent la communication radio. La Figure 9 illustre le concept de propagation par trajets multiples, ainsi que les principaux phénomènes de propagation que le signal peut rencontrer dans un environnement *outdoor*.

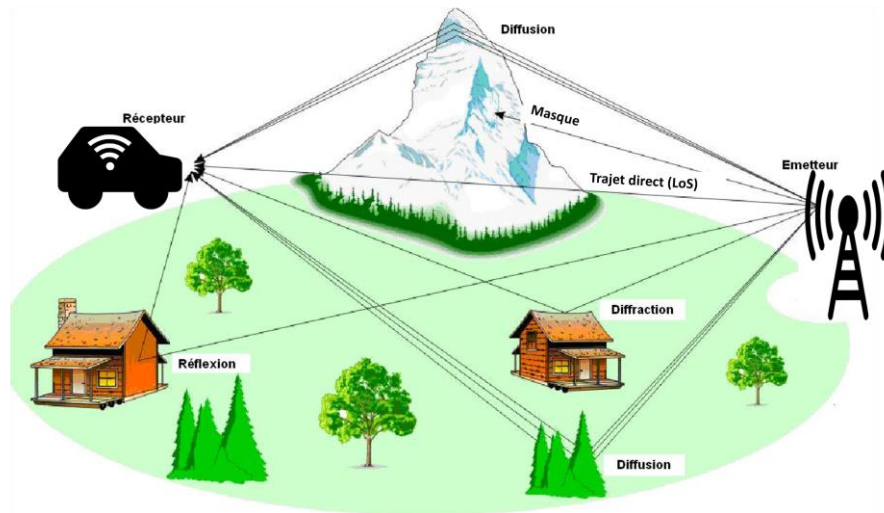


FIGURE 9: MODELISATION DE LA PROPAGATION MULTI-TRAJETS

Pour modéliser la propagation dans des environnements réels, les interactions entre l'onde et l'obstacle sont considérées à une échelle macroscopique. Dans cette hypothèse, les obstacles rencontrés par l'onde lors de sa propagation présentent de très grandes dimensions devant sa longueur d'onde. L'onde est généralement supposée plane pour des raisons de simplifications. Les principaux phénomènes de propagation sont illustrés sur la Figure 10 et décrits ci-dessous :

- **Réflexion**

La réflexion intervient sur des obstacles de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde. On distingue deux types de réflexions : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. Lorsque la surface qui sépare les deux milieux est infinie, parfaitement plane et le matériau est homogène, on parle de réflexion spéculaire. Dans ce cas, l'onde réfléchie est également plane dont la direction et l'amplitude sont obtenus analytiquement à partir des caractéristiques de l'onde incidente. Lorsque la surface n'est pas parfaitement plane et présente des irrégularités non négligeables devant la longueur d'onde, la réflexion est dite diffuse. Dans ce cas, l'onde incidente peut-être réfléchie dans plusieurs directions autour de la direction spéculaire.

- **Transmission**

Dans le cas où le milieu où intervient la réflexion n'est pas totalement radio-opaque, une partie de l'onde incidente pénètre dans le matériau. Pour un matériau donné, l'amplitude et la direction de l'onde transmise dépendent de la longueur d'onde, en raison de la variation de l'indice de réfraction du matériau. Il s'agit du phénomène de réfraction. La transmission correspond à la succession de deux réfractions chacune sur une des deux parois limitant l'épaisseur du milieu.

- **Diffraction**

La diffraction a lieu lors de l'interaction entre une onde plane et l'arête d'un obstacle de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde. Elle explique l'existence d'énergie dans les zones d'ombre d'un obstacle. Les ondes diffractées se répartissent de façon

radiale par rapport à l'arête diffractante, selon un cône (appelé cône de Keller [29]) dont l'angle correspond à l'angle d'incidence. Ce phénomène est très fréquent dans des environnements extérieurs sur les arêtes horizontales ou verticales des bâtiments.

- **Diffusion**

Lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un ensemble dense d'obstacles aléatoires dont la dimension est de l'ordre de la longueur d'onde, le phénomène observé correspond à la superposition d'un grand nombre de diffractions aléatoires. Dans ce cas, l'onde est redirigée dans toutes les directions avec une amplitude variable, et on parle de diffusion. Ce phénomène est le plus souvent observé en extérieur au contact de feuillages par exemple.

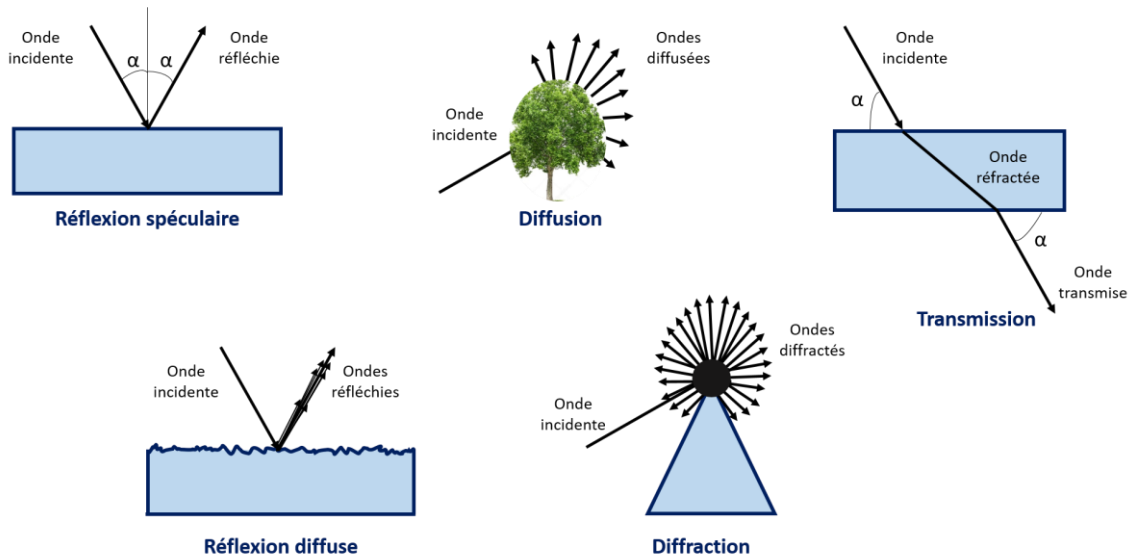


FIGURE 10 : PRINCIPALES INTERACTIONS MACROSCOPIQUES ENTRE ONDE ET OBSTACLE

2.2.2. Effets des multi-trajets

La propagation en espace libre est caractérisée par l'absence d'obstacles entre l'émetteur (Tx) et le récepteur (Rx). Dans ce cas, la puissance reçue P_r s'exprime en fonction de la puissance du signal émis P_e , des gains des antennes d'émission G_e et de réception G_r , la distance d séparant le Tx et Rx et la longueur d'onde λ .

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

Cette formule est valable que lorsque l'antenne Rx est en le champ lointain de celle d'émission. Un récepteur est dit en zone de champ lointain lorsque la distance d entre les antennes est supérieure à la distance de Fraunhofer d_F , qui est liée à la plus large dimension D de l'antenne d'émission et à la longueur d'onde λ du signal émis par la relation :

$$d_F = \frac{2 D^2}{\lambda} \quad (3)$$

La propagation en espace libre est un cas théorique de référence. Dans des conditions réelles, la propagation se fait par multi-trajets comme expliqué dans la section précédente. La propagation multi-trajets assure une certaine continuité de la couverture radio en permettant la communication dans le cas où l'émetteur et le récepteur ne sont pas en *LoS*. Néanmoins, cette multitude de trajets engendre des difficultés au niveau de la réception. En effet, les combinaisons de ces différents trajets peuvent être constructives ou destructives et se traduisent par une atténuation de l'amplitude du signal due au phénomène d'évanouissement du canal de propagation [30]. On distingue deux types d'évanouissements :

- **Evanouissements lents (*Slow Fading*)**

Ils caractérisent l'atténuation de la puissance du signal due à la distance émetteur-récepteur parcourue, ou aux obstacles rencontrés sur son chemin (immeubles, montagne, ...) appelé masquage (*shadowing*).

- **Evanouissements rapides (*Fast Fading*)**

Les évanouissements rapides présentent des variations irrégulières d'amplitude sur une échelle égale à une demi-longueur d'onde et pouvant atteindre jusqu'à 40 dB d'atténuation. Il en résulte des combinaisons constructives et destructives entre les différents trajets en réception.

Un exemple illustratif des effets des évanouissements sur la puissance reçue est donnée par la Figure 11.

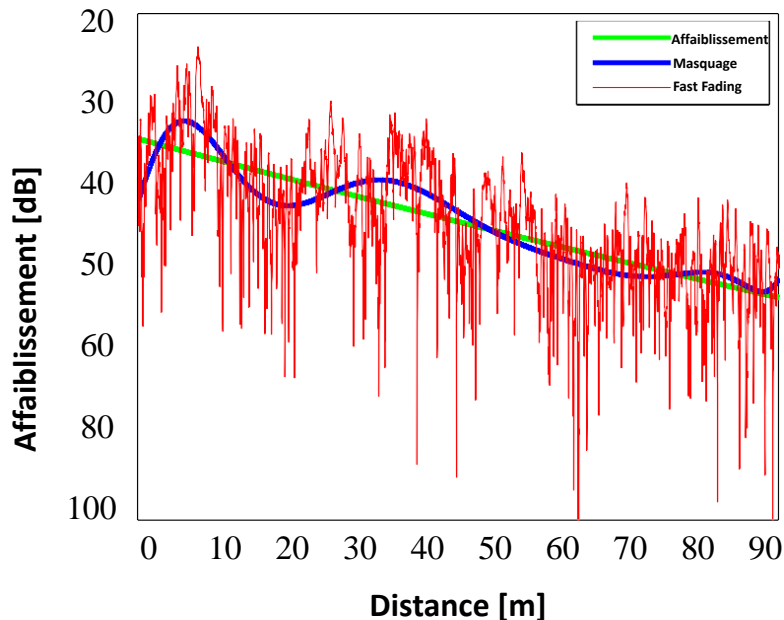


FIGURE 11 : LES VARIATIONS DE LA PUISSANCE REÇUE EN FONCTION DE LA DISTANCE ET EFFETS DES EVANOUISSEMENT

2.3. Le canal de propagation

2.3.1. Définition du canal de propagation

Par définition, un canal de propagation est le support de transmission des systèmes de communication sans fil. Il caractérise la propagation électromagnétique en tenant compte de ses interactions et de l'environnement de propagation. C'est pourquoi, il est essentiel de connaître avec précision tous les mécanismes et caractéristiques du canal pour modéliser les performances du système. Cependant, il est important de faire la distinction entre le canal de propagation et le canal de transmission illustrés sur la Figure 12.

Le canal de transmission est le quadripôle dont les accès sont les connecteurs des antennes Tx et Rx et inclut le diagramme de rayonnement des antennes utilisées. La fonction de transfert est très simple à obtenir en utilisant un analyseur de réseau vectoriel par exemple. Le canal de propagation est un concept plus abstrait car il est non mesurable directement. Il ne tient compte que des interactions du signal avec l'environnement, contrairement au canal de transmission qui inclut en plus les effets induits par les antennes.

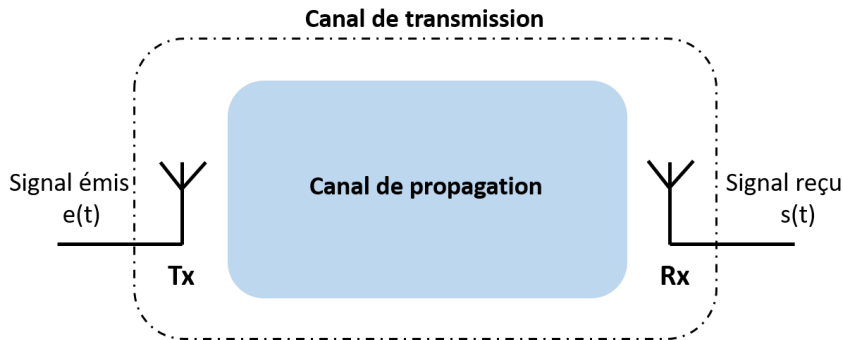


FIGURE 12 : DEFINITION DU CANAL DE TRANSMISSION ET DE PROPAGATION

2.3.2. Modélisation du canal de propagation

Le canal de transmission radio peut être considéré comme un filtre linéaire variable dans le temps. Par conséquent, il est caractérisé par une réponse impulsionnelle variable dans le temps $h(t, \tau)$ qui permet d'évaluer l'impact des multi-trajets sur le canal. La réponse impulsionnelle est une fonction à la fois de la variable t , qui représente le temps, et la variable τ , qui représente le retard des trajets multiples du canal pour une valeur fixée de t .

La réponse impulsionnelle du canal de propagation radio à trajets multiples est donnée par la relation (4). L représente le nombre total des multi-trajets, $a_k(t)$, $\tau_k(t)$ et $\theta_k(t)$ sont respectivement l'amplitude, le retard et la phase du $k^{\text{ème}}$ trajet. $n(t)$ est un bruit additif.

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^L a_k(t) e^{j\theta_k(t)} \delta(t - \tau_k(t)) + n(t) \quad (4)$$

Cette modélisation est adaptée aux canaux SISO. Dans le cas d'une liaison MIMO avec M antennes d'émission et N antennes de réception (représentée sur la Figure 5), le canal de propagation peut être représenté par une matrice H de taille $N \times M$. Chaque élément h_{ij} de la matrice H représente le gain complexe du canal reliant la $i^{\text{ème}}$ antenne de réception et la $j^{\text{ème}}$ antenne d'émission.

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & \cdots & h_{NM} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Le bruit additif $n(t)$ regroupe l'ensemble des signaux ne transportant pas d'information utile et perturbant le signal utile. Le bruit est donc indépendant du signal émis. On distingue deux types de bruits : un bruit externe lié au milieu de propagation des ondes (bruits atmosphériques, interférences entre utilisateurs, etc) et un bruit interne causé par les composants électroniques utilisés au niveau de la réception. En général, le bruit additif est considéré comme blanc gaussien et doit être éliminé avant toute étude du canal. Dans la suite le bruit additif est considéré comme négligeable.

2.4. Paramètres de caractérisation du canal

La caractérisation large bande du canal requiert la collecte d'un grand volume de données afin d'extraire les informations pertinentes permettant de quantifier le canal de propagation. Cette première étape est considérée comme indispensable pour la modélisation du canal. Elle permet de dégager des tendances et des valeurs typiques en fonction de l'environnement et de la configuration des antennes Tx et Rx. Pour ce faire, l'union internationale des télécommunications (UIT) recommande les paramètres à utiliser [31]. Ces paramètres spatio-temporels peuvent être catégorisés, selon l'espace dans lequel ils sont calculés, en paramètres temporels, fréquentiels et angulaires. Ces derniers sont calculés à partir des réponses impulsionnelles, fréquentielles et angulaires et décrivent différents aspects du canal.

Dans cette section, les paramètres utilisés dans l'analyse des canaux *massive MIMO* par la suite. Le canal est considéré ergodique et stationnaire au sens large et à diffuseurs non corrélés (WSSUS).

2.4.1. Paramètres temporels

2.4.1.1. Profil temporel de puissance

Le profil moyen de puissance ou PDP (*Power Delay Profile*) est défini comme la moyenne temporelle de la puissance des différentes réponses impulsionnelles $h(t, \tau)$ du canal. Le PDP permet de donner la répartition de puissance en fonction du retard τ . Elle présente un intérêt particulier dans l'étude de la propagation multi-trajets comme tous les paramètres temporels sont calculés à partir de lui. Le PDP est défini par l'expression suivante :

$$P(\tau) = \sum_k |h_k(t, \tau)|^2 \quad (6)$$

2.4.1.2. Dispersion des retards

Le retard moyen τ_m et la dispersion du retard τ_{rms} sont deux paramètres temporels qui sont calculés à partir du PDP et permettent de caractériser l'étalement en temps du canal. Le retard moyen représente le moment du premier ordre du PDP et se calcule par la relation suivante :

$$\tau_m = \frac{\int \tau P(\tau) d\tau}{\int P(\tau) d\tau} \quad (7)$$

La dispersion des retards DS (RMS *Delay Spread*) décrit la dispersion d'un signal à travers la propagation multi-trajets et est définie comme étant la racine carrée du moment d'ordre 2 du PDP et est donnée par (8). Elle représente la dispersion d'un signal à travers la propagation multi-trajets en tenant compte des retards de tous les trajets à la réception en se basant sur le premier trajet reçu. Il s'agit d'un paramètre très important et utilisé dans l'évaluation des performances des systèmes de communication, car il détermine la sélectivité du canal.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int (\tau - \tau_m)^2 P(\tau) d\tau}{\int P(\tau) d\tau}} \quad (8)$$

En outre, la dispersion des retards à X dB est définie comme étant le temps de retard durant lequel la puissance reçue sera X dB au-dessous de la puissance maximale. La Figure 13 représente un PDP et illustre les différents retards expliqués dans cette section.

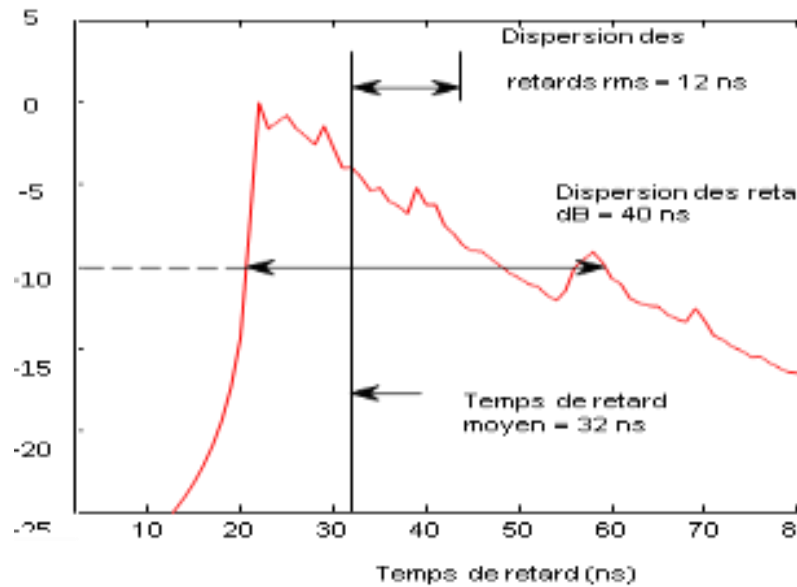


FIGURE 13 : ILLUSTRATION D'UN EXEMPLE DE PDP EN OUTDOOR AVEC RETARD MOYEN ET DISPERSIONS DE RETARD [47]

2.4.1.3. Fenêtre et intervalle des retards

Deux autres paramètres sont utilisés en plus pour caractériser l'étalement de la PDP. La fenêtre des retards (*delay window*) à $q\%$ est la durée de la portion centrale du PDP contenant $q\%$ de l'énergie totale. Elle est notée W_q et est obtenue selon l'équation suivante :

$$W_q = \tau_4 - \tau_2 \tag{9}$$

Les retards τ_2 et τ_3 sont définis par :

$$\int_{\tau_2}^{\tau_4} P(\tau) d\tau = \frac{q}{100} \int_{\tau_0}^{\tau_5} P(\tau) d\tau \tag{10}$$

Les retards τ_0 et τ_5 sont les retards pour lesquels le signal franchit un seuil de bruit donné. L'énergie se trouvant à l'extérieur de la fenêtre est divisée en deux parties égales. On utilise généralement des seuils à 90% et à 50% [32].

$$\int_{\tau_0}^{\tau_2} P(\tau) d\tau = \int_{\tau_4}^{\tau_5} P(\tau) d\tau \tag{11}$$

L'intervalle des retards à p dB (*Delay Interval*) I_p est la différence entre la valeur du retard pour laquelle la fonction $P(\tau)$ passe pour la dernière fois un seuil fixé à p dB en dessous de son maximum, et le retard pour lequel elle le dépasse pour la première fois.

La Figure 14 montre l'intervalle et fenêtre des retards.

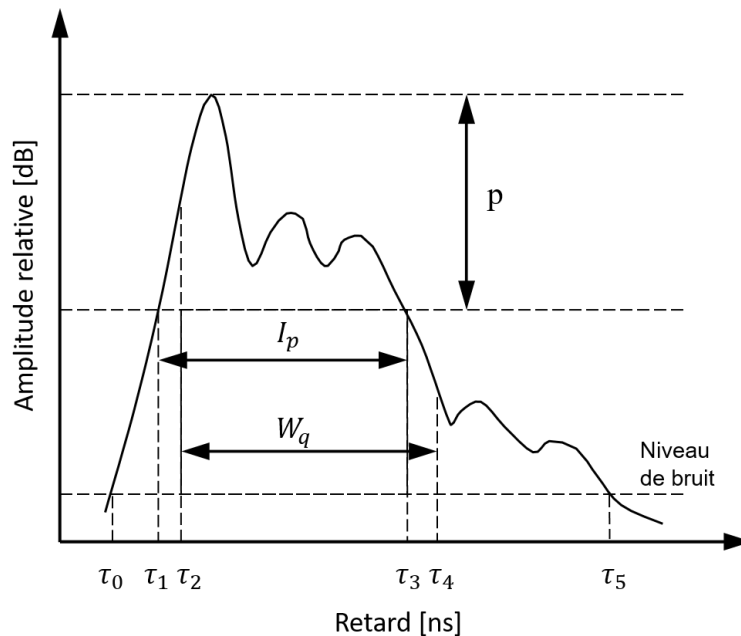


FIGURE 14 : PDP AVEC ILLUSTRATION DES FENETRES ET INTERVALLE DES RETARDS

2.4.1.4. Bande de corrélation

La bande de corrélation B_c (*frequency correlation bandwidth*) décrit l'effet sélectif en fréquence du canal de propagation. Elle évalue la bande de fréquence sur laquelle un signal est soumis à des atténuations similaires. Dans ce cas on dit que le canal est plat. Deux composantes de signal séparées en fréquence d'une valeur supérieure à la B_c auront des traitements différents par le canal. D'où l'impact de la bande de corrélation sur la propagation des signaux transmis :

- Si la largeur de bande du signal transmis est inférieure à la bande de corrélation du canal B_c , alors l'amplitude du signal subit des fluctuations rapides sans que le signal subisse une distorsion fréquentielle.
- Si la largeur de bande du signal est plus grande que la bande de corrélation, le signal reçu sera déformé.

Le calcul de la bande de corrélation se fait à partir de la transformée de Fourier (12) du PDP $C(f)$. Elle est déduite de $C(f)$ selon l'équation (13). De façon générale deux paramètres sont évalués : la bande de corrélation à 50% $B_{c_{50}}$ et la bande de corrélation à 90% $B_{c_{90}}$.

$$C(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\tau) e^{-2i\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

$$C(B_{c_x}) = \frac{x}{100} |C(0)| \quad (13)$$

Les bandes de corrélation $B_{c_{50}}$ et $B_{c_{90}}$ peuvent être approximées d'après [33] :

$$\begin{cases} B_{c_{50}} \approx \frac{1}{5 \tau_{rms}} \\ B_{c_{90}} = \frac{1}{50 \tau_{rms}} \end{cases} \quad (14)$$

2.4.2. Paramètres angulaires

Les techniques de transmission multi-antennaires nécessitent une caractérisation de la dimension spatiale du canal de propagation. Comme le domaine temporel, le domaine angulaire est caractérisé par un profil angulaire de puissance PAP (*Power Angular Profile*) $P(\theta, \phi)$ qui permet de représenter la distribution de la puissance en fonction de l'élévation θ et de l'azimut ϕ .

La dispersion angulaire (*Angular Spread*) en azimut AAS (*Azimuth Angular Spread*) et en élévation EAS (*Elevation Angular Spread*) caractérisent l'étalement spatial du signal du au caractère dispersif du canal. Plus la dispersion angulaire est importante, plus la sélectivité spatiale du canal est marquée. Contrairement à la dispersion temporelle, le calcul de la dispersion angulaire n'est pas trivial à cause de la périodicité angulaire.

C'est pourquoi plusieurs définitions existent dans la littérature. Les plus utilisées sont celles de Fisher[34], Fleury[35] et 3GPP[36].

Selon Fisher la dispersion angulaire est définie comme étant un écart-type circulaire :

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{-2 \log(R)} \quad (15)$$

Avec
$$R = \frac{|\sum_n P_n e^{j\theta_n}|}{\sum_n P_n} \quad (16)$$

Pour Fleury la dispersion angulaire se définit comme la racine carrée de la variance circulaire :

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{1 - R} \quad (17)$$

Cependant la définition la plus utilisée reste celle donnée par la 3GPP qui est calculée de la manière suivante :

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{\sum_n (\theta_n - \bar{\theta})^2 P_n}{\sum_n P_n}} \quad (18)$$

avec

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_n \theta_n P_n}{\sum_n P_n} \quad (19)$$

Dans le domaine angulaire on doit garantir une invariance du calcul quel que soit l'angle de référence. En d'autres termes, en remplaçant θ_n par $\theta_n + \Delta\theta$, la dispersion angulaire $\sigma_{\theta}(\theta_n)$ et $\sigma_{\theta}(\theta_n + \Delta\theta)$ doivent conduire à un résultat identique quel que soit la valeur de $\Delta\theta$. Pour satisfaire cette condition, le 3GPP a défini la valeur de la dispersion angulaire comme étant le minimum de $\sigma_{\theta}(\Delta\theta)$ pour toutes les valeurs de $\Delta\theta$:

$$\sigma_{\theta} = \min_{\Delta\theta} \sigma_{\theta}(\Delta\theta) \quad (20)$$

2.5. Modèles de propagation

Un modèle de propagation est un modèle mathématique qui permet de prédire les différents paramètres qui caractérisent le canal. Il existe différentes approches pour modéliser le canal de propagation radio selon les besoins spécifiques de chacune des technologies. On distingue deux grandes familles de modèle. La première est celle des modèles en bande étroite, destinés au calcul du bilan de liaison, utilisés pour déterminer la zone de couverture d'une antenne. L'autre famille concerne les modèles en large bande, destinés à l'évaluation des performances des systèmes, utilisés pour en améliorer leur conception.

2.5.1. Modèles en bande étroite

Les modèles en bande étroite permettent de prédire l'atténuation moyenne due à la propagation à partir des caractéristiques de l'émetteur. Il s'agit des modèles empiriques simples destinés au dimensionnement du réseau. Ils utilisent une connaissance très limitée de la liaison radio telle que le type d'environnement (urbain, urbain dense, rural, ...) et la distance émetteur-récepteur. La précision de ces derniers se limite pour des environnements similaires à celui pour lequel le modèle a été développé. Ces modèles empiriques sont rapides et obtenus à partir d'un grand nombre campagnes de mesures. En environnement extérieur, le modèle d'Okumura-Hata est devenu le modèle « par défaut » pour de nombreux outils de dimensionnement.

Le modèle d'Okumura [37] est le résultat d'une analyse méticuleuse qui a porté sur un large ensemble de données de mesure du champ, collectées au Japon dans différents environnements et sur plusieurs fréquences dans la gamme 150 – 1920 MHz. Ce modèle prend en considération plusieurs paramètres tels que l'irrégularité du terrain, la pente du sol et le type d'environnement. Ceci rend la mise en œuvre informatique du modèle très compliquée.

Le modèle d'Hata [38] (appelé modèle d'Okumura-Hata) est une version très simplifiée du modèle d'Okumura qui définit l'atténuation par l'équation (21) :

$$Aff = Aff_{Libre} + A_m(f, d) - G(h_e) - G(h_r) - G_{correction} \quad (21)$$

Aff est la valeur moyenne des pertes en dB, Aff_{Libre} représente les pertes en espace libre et est donné par (22) déduite de l'expression logarithmique de (2) :

$$Aff_{Libre} = -10 \log_{10} \left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \right) \quad (22)$$

$A_m(f, d)$ est l'atténuation moyenne relative en espace libre, $G(h_e)$ et $G(h_r)$ sont deux termes dépendant de la hauteur des antennes émettrices et réceptrice et $G_{correction}$ est un facteur correctif.

Le modèle d'Okumura-Hata a été conçu pour les macro-cellules ayant des diamètres de 1 à 100 km où la hauteur de l'antenne d'émission est comprise entre 30 et 1000 mètres. Ce modèle a connu un grand succès grâce à sa rigueur et sa simplicité. Il est considéré aujourd'hui comme le modèle le plus répandu pour modéliser les couvertures radio dans les systèmes de téléphonie mobile. En effet, le modèle COST231-Hata est une adaptation du modèle d'Okumura-Hata permettant d'étendre son utilisation dans des bandes de fréquences plus élevées et de prendre en compte autres types d'environnement (suburbain, urbain dense et rural). La même approche est utilisée en environnement intérieur avec le modèle *one slope* [39][40].

2.5.2. Modèles à large bande

Ces modèles permettent de caractériser le canal de propagation en large bande. Ils permettent de prédire les réponses impulsionnelles du canal de propagation. Ainsi, il est possible d'étudier les paramètres large-bande du canal, comme les dispersions

temporelle et angulaire, qui impactent les performances et la qualité de service des systèmes radios avancés (*Massive MIMO*, ULB, ...) afin de permettre leur conception. Ces modèles sont classifiés en deux catégories : déterministes et statistiques.

2.5.2.1. Modèles statistiques

Les modèles statistiques prédisent d'une manière aléatoire et globale les paramètres large bande du canal pour représenter les caractéristiques radios d'un environnement donné. Le comportement statistique du canal est obtenu à partir d'un grand nombre de campagnes de mesures. Une loi statistique est associée à un ensemble d'environnements ou de configurations ayant les mêmes spécificités : fréquences, type d'environnement, distance de l'émetteur, En général, ces modèles sont plus simples et rapides mais restent moins précis que les modèles déterministes.

En 1972, un modèle de propagation multi-trajet dans un milieu urbain a été étudié par Turin *et al* [41]. Cette étude a démontré que la distribution des retards suit une loi de Poisson, ainsi que cette dernière ne dépend pas de la distance émetteur-récepteur mais dépend de l'environnement où se trouve le récepteur. Suzuki [42] a proposé en 1977 un processus de Poisson modifié pour modéliser le temps d'arrivée des différents trajets. Le modèle mathématique de Turin a été utilisé par Hashemi en 1979 pour simuler le canal de propagation multi-trajet dans un environnement urbain[43].

Pour les environnements intérieurs, le modèle statistique le plus étudié dans la littérature est le modèle de Saleh et Valenzuela [44]. Ce modèle modélise la réponse impulsionnelle par un ensemble de *clusters*. La notion de *cluster* définit un ensemble de trajets ayant des propriétés similaires (origine physique identique). Les caractéristiques des *clusters* et des rayons associés sont obtenus par un processus aléatoire de Poisson.

2.5.2.2. Modèles déterministes

Les modèles déterministes sont caractérisés par la connaissance de la description géométrique précise de l'environnement et de ses propriétés électromagnétiques. Ils nécessitent des grandes puissances de calcul ainsi que des données des reliefs (hauteur du terrain) et des formes des bâtiments qui sont très coûteuses. Dans ce contexte, on distingue deux types de modèles déterministes :

- **Les modèles numériques**

Ces modèles permettent de caractériser le comportement électromagnétique des objets de formes complexes ou de petites tailles. Ils consistent à résoudre les équations de Maxwell en les discrétisant. Ce sont des méthodes rigoureuses mais très coûteuses en temps de calcul.

La FDTD (*Finite Difference Time Domain*) est la méthode la plus répandue dans la littérature. Elle a été proposée par Yee en 1966 [45]. Cette méthode discrétise l'environnement en cellules tridimensionnelles et résout les équations de Maxwell dans le domaine temporel par approximation des opérateurs en différences finies. Elle calcule, à chaque instant discret, les composantes du champ électromagnétique dans chaque cellule 3D. Néanmoins, cette méthode présente plusieurs contraintes. En effet, outre la

grande taille de mémoire requise par la méthode et de son très lent temps de calcul, cette dernière souffre de deux problèmes majeurs d'ordre numérique, qui détériorent ses performances, soit la stabilité et la dispersion numérique.

- **Les modèles à rayons**

Ces modèles apportent une solution asymptotique approchée des équations de Maxwell. Elles sont utilisées dans le cas où les objets modélisés sont grands par rapport à la longueur d'onde du signal. Ces modèles sont plus utilisés que les modèles FDTD pour prédire le canal de propagation en environnement intérieur et extérieur. Ils calculent tous les trajets possibles entre un émetteur et un récepteur. Ensuite, des techniques asymptotiques, tel que l'optique géométrique (OG) et la théorie uniforme de la diffraction (TUD), sont appliquées pour calculer l'amplitude, la phase, le retard et la polarisation de chaque trajet. Une étape finale consiste à combiner tous les rayons atteignant le récepteur tout en considérant les caractéristiques des antennes. Parmi les méthodes existantes pour déterminer l'ensemble des trajets possibles entre un émetteur et un récepteur on retrouve le lancer de rayons et le tracé de rayons. Ce type de modèle sera détaillé dans la section suivante.

2.6. Modèle à rayons

Le principe des modèles à rayons est de caractériser le canal de propagation par un ensemble de rayons calculés à partir de la configuration émetteur-récepteur et la base de données géographiques. Cette approche est très utile, notamment pour l'étude des canaux *massive MIMO*, car les propriétés spatio-temporelles sont automatiquement obtenues à partir des rayons. Le calcul de ces derniers se fait selon l'une des deux méthodes : le lancer et le tracé de rayons. Les lois de réflexion, réfraction et diffraction sont ensuite appliquées aux rayons pour obtenir les caractéristiques de chaque rayon (amplitude, phase, polarisation). Ceci permettra d'avoir les réponses impulsionnelles en chaque point de réception et puis d'en extraire les propriétés spatio-temporelles du canal.

2.6.1. Calcul des trajets

2.6.1.1. Lancer de rayons

Le principe de l'algorithme de lancer de rayons consiste à lancer un nombre limité de rayons suivant différentes directions de l'espace depuis l'antenne d'émission [46] sans connaissance préalable de la position du récepteur. Afin de produire des résultats fiables, un angle constant de séparation entre les rayons lancés doit être spécifié. Une fois le rayon est lancé, il peut subir des réflexions, des réfractions et des diffractions successives. Au niveau de l'antenne réceptrice, une sphère de réception doit être employée pour capturer tous les rayons passant au voisinage du récepteur. Certains critères peuvent arrêter la propagation du rayon lancé tels que le nombre de phénomènes de propagation à considérer ou une puissance trop faible.

L'avantage majeur du lancer de rayons et de pouvoir calculer simultanément, avec un seul lancer, les rayons reçus par plusieurs récepteurs. Ceci peut être utilisé pour le calcul des zones de couverture d'un émetteur. L'exactitude de la méthode du lancer de rayons est réduite pour les rayons ayant de longues distances parcourues. Cela est dû à l'erreur cumulée dans la direction des rayons, où des trajets importants peuvent être manqués. Par conséquent, un volume plus grand de la sphère de réception sera nécessaire [47]. La complexité de calcul de cette méthode peut être réduite en réduisant le nombre de rayons émis. Cependant, cela va augmenter le risque de sous-échantillonnage. Le principe de cette méthode est illustré sur la Figure 16.

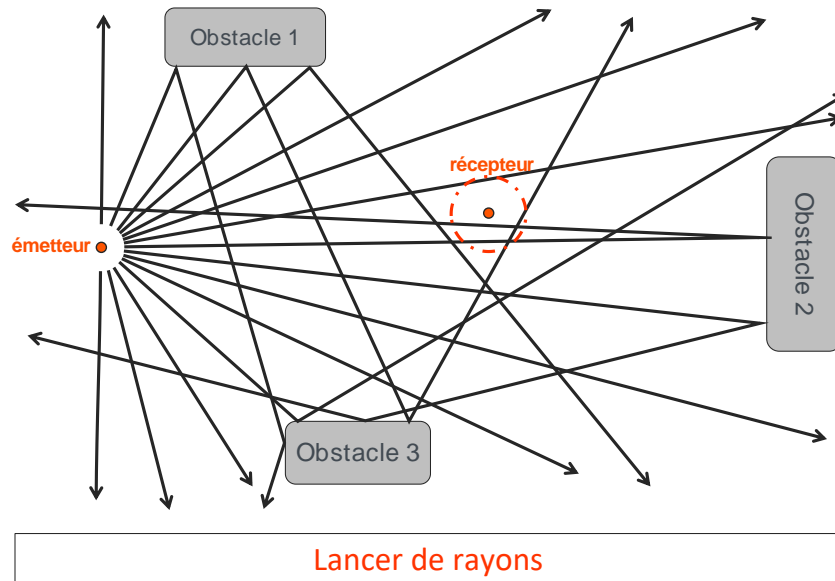


FIGURE 15 : ILLUSTRATION DU CONCEPT DE LANCER DE RAYONS

2.6.1.2. Tracé de rayons

Cette méthode s'appuie sur la connaissance des positions de l'émetteur et du récepteur. Elle consiste à chercher avec précision tous les trajets possibles entre les deux antennes. Contrairement au lancer de rayons, cette méthode a un algorithme de type point par point. C'est-à-dire que le calcul de rayons est effectué pour chaque configuration émetteur-récepteur. Afin de couvrir une grande surface de prédiction, le récepteur doit être sur chaque point de la surface. Le temps de calcul est alors proportionnel au nombre de points de réception.

Le principe du tracé de rayons est basé sur la théorie des images. Par exemple, dans le cas d'une réflexion simple, l'image $Tx_{virtuel}$ de l'émetteur par rapport au plan de réflexion est d'abord construite. Ensuite, le récepteur est relié à $Tx_{virtuel}$ par une ligne droite qui passe par le point de réflexion. Ceci reste valable aussi dans le cas de plusieurs réflexions. La Figure 16 illustre un exemple de tracé de rayons.

Contrairement au lancer de rayons, cette méthode permet de construire les « vrais » rayons d'un point de vue géométrique. Cependant, le problème de cette méthode reste le temps de calcul très élevé. Ainsi, il est indispensable de bien choisir les combinaisons de

phénomènes à considérer pour alléger le temps de calcul. Il existe également de nombreuses méthodes d'accélération (voxelisation, arbre de visibilité...).

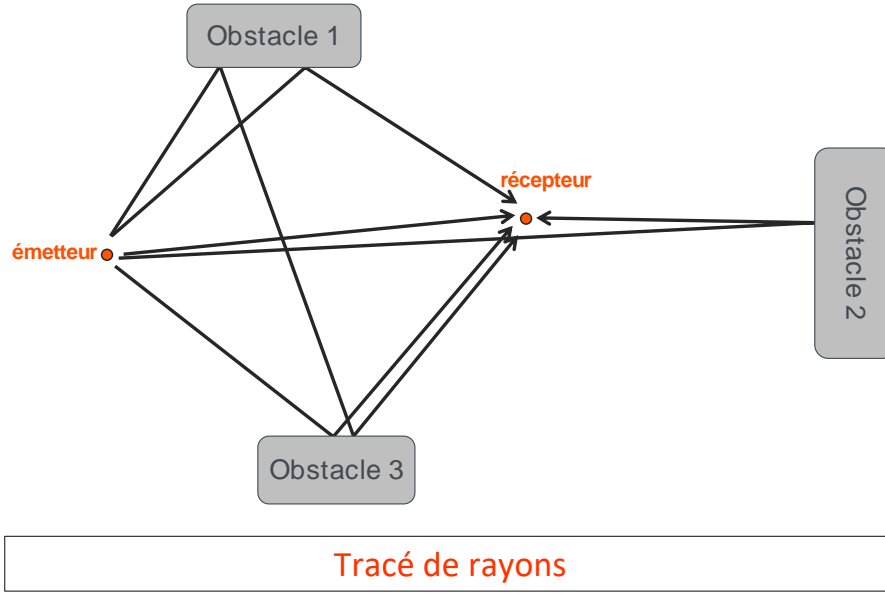


FIGURE 16 : ILLUSTRATION DU CONCEPT DU TRACE DE RAYONS

2.6.2. Calcul électromagnétique

Les ondes radios ayant des fréquences élevées tendent à se comporter de la même manière que la lumière. De ce fait, lorsque ces ondes rencontrent des obstacles de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde, les principes de l'optique géométrique peuvent être appliqués. Les rayons directs, réfléchis et transmis sont modélisés par à l'OG. De plus, plusieurs modèles de diffraction sont utilisés en complément à l'optique géométrique comme la théorie géométrique de la diffraction (TGD) et la théorie uniforme de la diffraction (TUD). Ceci permet d'inclure l'effet des coins et arêtes sur les rayons.

2.6.2.1. L'optique géométrique

- **Equations de Maxwell**

La propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu de permittivité ϵ et de perméabilité μ est régie par les équations de Maxwell. Ces équations établissent les relations entre les variations en temps et en espace des vecteurs champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} . Dans un milieu homogène, isotrope et sans charges, les quatre équations sont données en régime fréquentiel par :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E}(\vec{r}, \omega) + \mu \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, \omega)}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H}(\vec{r}, \omega) - \epsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, \omega)}{\partial t} = 0 \quad (24)$$

$$div \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (25)$$

$$div \vec{H}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (26)$$

\vec{r} représentant le vecteur coordonné du point d'observation et ω la pulsation de l'onde.

L'équation de Helmholtz en termes de $\vec{E}(\vec{r}, \omega)$ ou de $\vec{H}(\vec{r}, \omega)$ peut être obtenue en manipulant les équations (23) et (24) et en introduisant (25) ou (26). Cette équation vectorielle représente la propagation des ondes et est définie par l'équation (27).

$$\nabla^2 \vec{U}(\vec{r}, \omega) + k^2 \vec{U}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (27)$$

\vec{U} représente le champ électrique \vec{E} ou magnétique \vec{H} , $k = \frac{\omega}{v}$ où v est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré, ∇ est l'opérateur nabla.

L'optique géométrique est une solution de l'équation de Helmholtz. Elle permet d'écrire le champ électromagnétique $\vec{U}(\vec{r}, \omega)$ sous la forme d'une série de puissance entière appelée série asymptotique de Lunenberg-Kline [48][49] :

$$\vec{U}(\vec{r}, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{U}_n(\vec{r})}{(jk)^n} e^{jkS(\vec{r})} e^{-j\omega t} \quad (28)$$

où $S(\vec{r})$ est la phase du point d'observation. Il a été démontré que pour les hautes fréquences, une approximation peut être faite et seul le premier terme d'ordre 0 de la série sera considéré. La solution est donnée sous la forme simplifiée suivante :

$$\vec{U}(\vec{r}, \omega) = \vec{U}_0(\vec{r}) e^{jkS(\vec{r})} e^{-j\omega t} \quad (29)$$

Les lois de l'OG permettent de calculer le champ en tout point d'un rayon. Ces lois concernent la continuité de la phase et de l'amplitude le long du rayon et la conservation de la polarisation. Elle permet de modéliser les phénomènes de réflexion et de réfraction. Pour ce faire, les champs électromagnétiques seront exprimés dans une base orthonormée directe $(\vec{k}, \vec{e}_{\parallel}, \vec{e}_{\perp})$ où \vec{e}_{\parallel} est le vecteur unitaire parallèle au plan d'incidence Π et \vec{e}_{\perp} le vecteur perpendiculaire à Π . Dans cette base, le champ \vec{E} (on ne considérera que ce champ, \vec{H} lui étant toujours perpendiculaire et proportionnel par le facteur η) se décompose en deux composantes \vec{E}_{\parallel} et \vec{E}_{\perp} comme le montre Figure 17. Les champs électrique est donc la somme linéaire des deux composantes parallèle et perpendiculaire :

$$\vec{E} = E_{\parallel} \vec{e}_{\parallel} + E_{\perp} \vec{e}_{\perp} \quad (30)$$

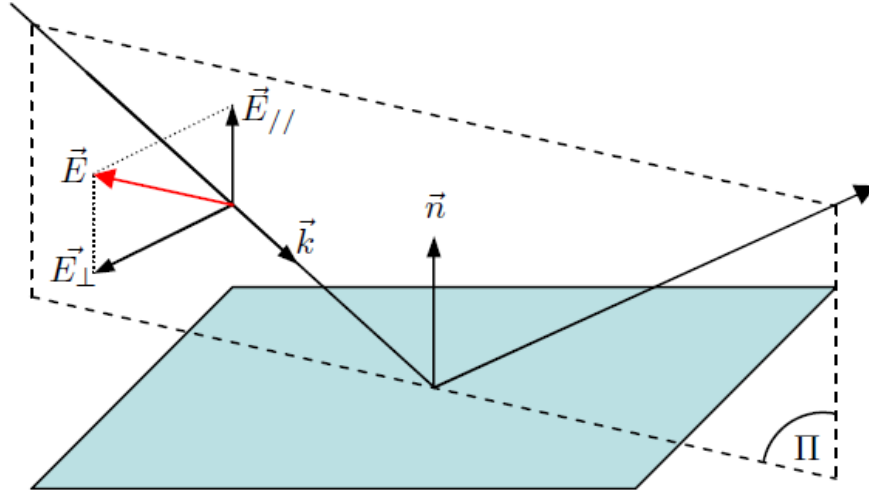


FIGURE 17 : ILLUSTRATION DE LA BASE ORTHONORMÉE $(\vec{k}, \vec{e}_{\parallel}, \vec{e}_{\perp})$

- **Champs réfléchis et transmis**

La Figure 18 illustre les phénomènes de la réflexion et de transmission. Dans le cas de la réflexion, l'onde incidente se réfléchit selon les lois de Descartes. Les plans d'incidence et de réflexion, qui sont formés respectivement par les directions des rayons incidents \vec{k}^i et réfléchis \vec{k}^r avec la normale \vec{n} au point Q. De plus, les angles d'incidence θ_i et de réflexion θ_r sont égaux.

Le champ réfléchi s'exprime sous la forme matricielle (31), en fonction de du champ incident au point de réflexion Q.

$$\begin{bmatrix} E_{\parallel}^r(Q) \\ E_{\perp}^r(Q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\parallel} & 0 \\ 0 & R_{\perp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\parallel}^i(Q) \\ E_{\perp}^i(Q) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Les coefficients de réflexion R_{\parallel} et R_{\perp} sont exprimés par :

$$\begin{cases} R_{\parallel} = \frac{\varepsilon \cos(\theta_t) - \sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}}{\varepsilon \cos(\theta_t) + \sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}} \\ R_{\perp} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}} \end{cases} \quad (32)$$

Comme pour la réflexion, la relation entre l'angle d'incidence θ_i et l'angle de transmission θ_t s'obtient à partir de la loi de Snell-Descartes.

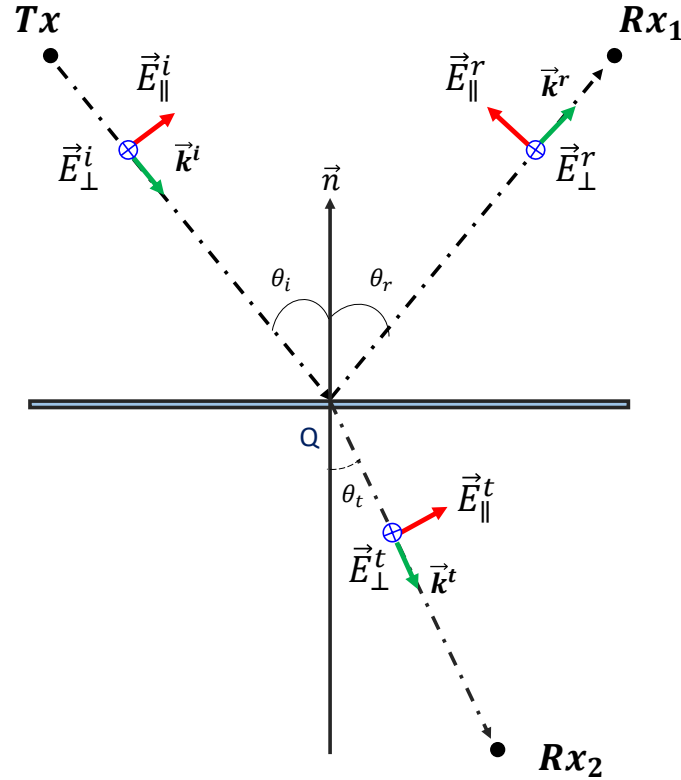


FIGURE 18 : DEFINITION DES LOIS DE REFLEXION ET DE TRANSMISSION

De la même manière, on peut calculer les composantes parallèle et perpendiculaire du rayon transmis et les coefficients de transmission seront exprimés par :

$$\begin{cases} T_{\parallel} = \frac{2\sqrt{\varepsilon}\sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}}{\varepsilon \cos(\theta_t) + \sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}} \\ T_{\perp} = \frac{2 \cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon - \sin(\theta_i)^2}} \end{cases} \quad (33)$$

Dans cette section, les coefficients de réflexion et de transmission ont été exprimés en fonction de la permittivité du matériau où l'interaction en question a eu lieu. C'est pourquoi, la connaissance des propriétés diélectriques des matériaux existants dans l'environnement de propagation est nécessaire. Ces propriétés peuvent être trouvées dans la littérature. L'ITU [50] a proposé une modélisation de la permittivité et de la conductivité en tenant compte de la fréquence.

2.6.2.2. La théorie géométrique de la diffraction

Les fondements de la théorie géométrique de la diffraction (TGD), ont été exposés par Keller [29] en 1962. Cette théorie constitue une prolongation de l'optique géométrique, car elle permet de modéliser le phénomène de diffraction. Les rayons seront diffractés suivant le cône de Keller. La Figure 19 présente un exemple de cône de Keller. Cette théorie décrivant le comportement d'un rayon diffracté a été élaborée à partir de trois postulats :

- **Premier postulat :** *Le rayon diffracté satisfait le principe de Fermat généralisé*

Keller a démontré que les rayons diffractés obéissent au principe de Fermat généralisé, ces rayons se comportent alors de la même manière qu'en optique géométrique. La position du point de diffraction et la direction du rayon diffracté peuvent se déduire du type de corps diffractant "dit canonique". Pour un dièdre, les rayons diffractés engendrent un cône ayant pour axe la tangente de la ligne de discontinuité de l'arête. Pour une pointe de cône, les rayons diffractés engendrent une sphère ayant pour centre la pointe du corps diffractant. Enfin dans le cas d'une surface régulière, les rayons diffractés rampent le long de la surface et s'en détachent tangentiellement en donnant un point caustique du faisceau de rayons diffractés.

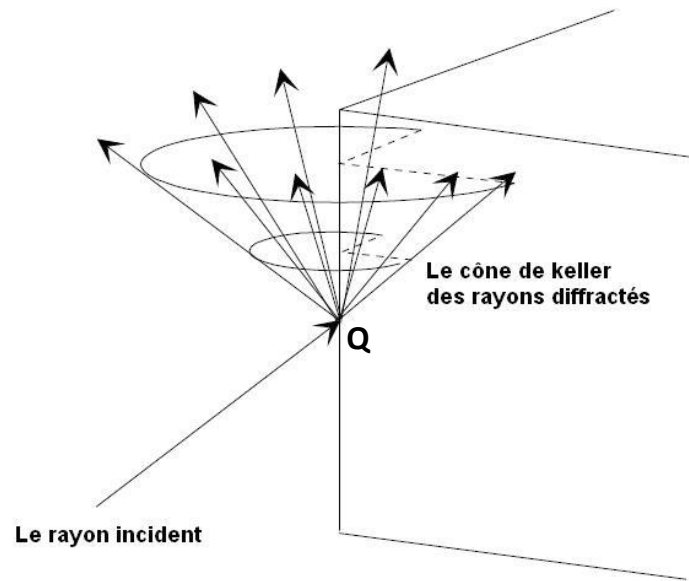


FIGURE 19 : ILLUSTRATION DE LA DIFFRACTION SUIVANT LE CONE DE KELLER

- **Deuxième postulat :** *Les rayons diffractés satisfont les lois de l'OG loin de la surface*

Loin de la surface, le rayon diffracté satisfait les lois de l'optique géométrique. Ce faisceau de rayons diffractés satisfait les lois de l'optique géométrique en quittant le voisinage du point d'impact Q de l'obstacle. De la même manière que pour l'onde réfléchie et transmise, les propriétés de continuité de la phase, de l'amplitude et les propriétés de la polarisation le long d'un rayon permettent de déduire l'équation du champ électrique diffracté en un point d'observation P :

$$E^d(P) = D E^i(Q) \sqrt{\frac{\rho_d}{S_d(\rho_d + S_d)}} e^{-jkS_d} \quad (34)$$

- S_d est la distance séparant le point de diffraction Q et le point d'observation P.
- D est le coefficient de diffraction relatif à l'obstacle canonique considéré.
- ρ_d est une distance particulière liée au rayon de courbure [29].

- $\sqrt{\frac{\rho_d}{s_d(\rho_d+s_d)}}$ est un facteur de divergence.

Pour un dièdre parfaitement conducteur à faces planes, Keller a donné une expression asymptotique du coefficient de diffraction en polarisations parallèle et perpendiculaire dans les trois régions de l'espace comme le montre la Figure 20. Ceci est valable que si le point d'observation est assez loin des frontières de réflexion et d'ombre.

- **Troisième postulat :** *En hautes fréquences, la diffraction est un phénomène local*

En haute fréquence, la dimension de l'objet tend à être beaucoup plus grande que la longueur d'onde. Cela signifie que la diffraction ne dépend que de la nature de la surface et du champ incident au voisinage du point de diffraction. En ce voisinage, l'obstacle peut donc être modélisé par une forme canonique dont la solution exacte est connue. Ces formes canoniques ont été explicitées dans le premier postulat.

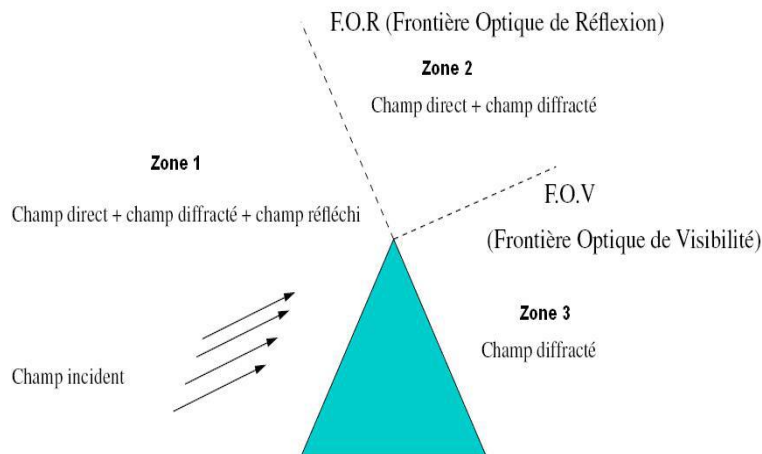


FIGURE 20 : LES 3 REGIONS DE L'ESPACE DEFINIES PAR LA THEORIE GEOMETRIQUE DE DIFFRACTION

2.6.2.3. La théorie uniforme de diffraction

La théorie uniforme de diffraction permet d'éliminer le problème de divergence de la théorie géométrique de diffraction. Elle permet aussi d'assurer la continuité du champ total au niveau des frontières optiques d'ombre-lumière.

Cela revient, d'un point de vue pratique, à multiplier les coefficients de Keller par une fonction de transition qui vaut 1 loin des frontières et tend vers 0, ainsi que l'ajout de nouveaux termes de diffraction de manière à compenser la divergence du coefficient de Keller lorsqu'on s'approche de celles-ci.

2.7. Simulation déterministe du canal

La modélisation de canal de propagation à tracé/lancer de rayons 3D est très utilisé dans le domaine des télécommunications. Elle permet de prédire le comportement des ondes

électromagnétiques dans différents environnements de propagation et de calculer les différents paramètres du canal en bande étroite et en large bande. En effet, lors de sa propagation, par multi-trajets, l'onde connaît plusieurs variations de ses propriétés électromagnétiques (amplitude, polarisation, phase). Ces dernières sont causées par les interactions avec l'environnement telles que la réflexion, la transmission et la diffraction. Dans ce contexte, le modèle de propagation à rayons *Starlight* a été développé par *Orange Labs* afin de simuler les canaux de propagation dans des environnements riches en multi-trajets en *outdoor*.

Starlight est un outil de simulation du canal de propagation à rayons développé dans le laboratoire WEP (*Wireless Engineering and Propagation*) d'*Orange Labs*. Cet outil implémente une technologie hybride entre le lancer de faisceaux et le tracé de rayons afin de combiner les avantages de la précision et la rapidité. *Starlight* opère dans la gamme de fréquences 40 MHz – 40 GHz et permet de calculer tous les trajets possibles entre un émetteur Tx et un récepteur Rx. Le modèle prend en compte les phénomènes de réflexion, transmission et diffraction, et utilise les principes de l'optique géométrique et de la théorie uniforme de la diffraction. Le champ total reçu est calculé par une sommation complexe de tous les champs associés aux différents rayons reçus par le récepteur.

Une description précise de la scène de propagation en 3D est requise, afin de prendre en compte l'effet de l'environnement. Pour ce faire, l'environnement est décrit par un ensemble de facettes planes dont chacune est associée à un type de matériau caractérisé par une permittivité, conductivité et épaisseur. Les matériaux typiques rencontrés dans des environnements extérieurs ainsi que leurs propriétés diélectriques sont donnés par le Tableau 2.

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DIELECTRIQUES DES MATERIAUX UTILISES PAR STARLIGHT EN ENVIRONNEMENT EXTERIEUR

Matériau	Permittivité complexe	Épaisseur [m]
Béton	5,31 – j0,57	10
Sol	14,73 – j1,61	10

La Figure 21 donne un exemple d'une scène de propagation 3D de *Starlight* composée par des bâtiments en béton représentés en gris et du sol représenté en blanc. La scène de propagation illustrée ici est sous l'hypothèse d'un sol plat.

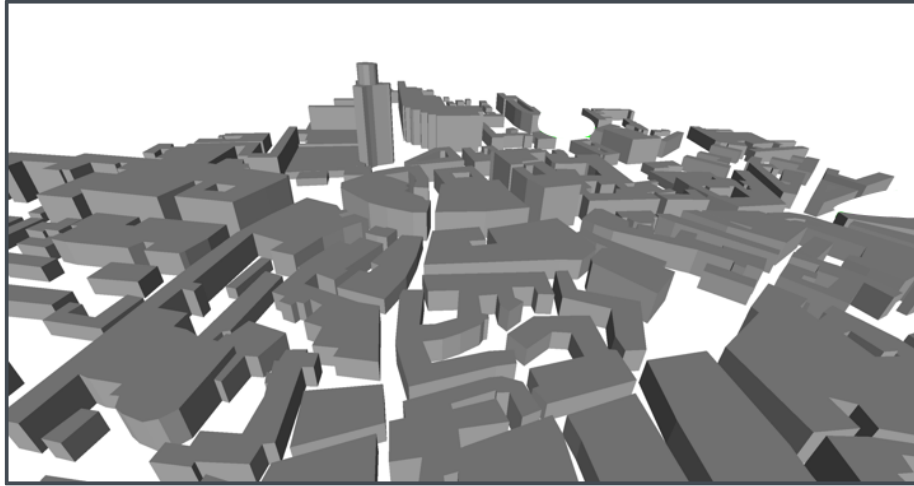


FIGURE 21: ILLUSTRATION D'UNE SCENE DE PROPAGATION 3D SUR STARLIGHT

Le modèle à rayons Starlight est compatible avec les diagrammes d'antennes en 3D, tous les types de polarisation et les systèmes MIMO. Pour son fonctionnement, Starlight a besoin de quelques fichiers d'entrée :

- **Un fichier facette** : donnant une description complète en 3D de la scène de propagation, en précisant le matériau de chaque facette.
- **Un fichier matériau** : explicitant les propriétés diélectriques de chaque matériau.
- **Des fichiers émetteur/récepteur** : avec les positions en 3D de Tx et Rx, ainsi que les paramètres de propagation : fréquence, polarisations et puissance émise.

Starlight fournit en sortie une liste de tous les rayons identifiés. Pour chaque rayon, la trajectoire complète avec toutes les interactions, la puissance, la phase, le temps du retard, les directions de départ (DoD) et d'arrivée (DoA). Ce qui nous permet d'obtenir la réponse impulsionnelle et tous les paramètres spatio-temporels caractéristiques du canal de propagation à multi-trajets. Figure 22: Synoptique du simulateur Starlight résume les différentes entrées/sorties de *Starlight*.

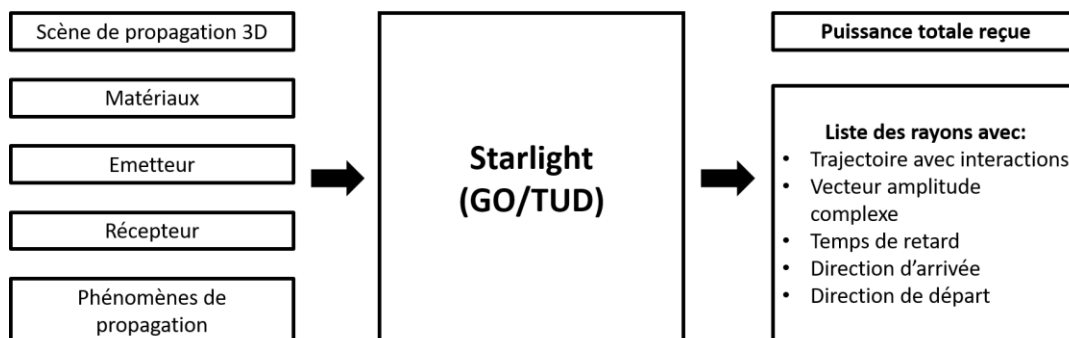


FIGURE 22: SYNOPTIQUE DU SIMULATEUR *STARLIGHT*

Toutefois, le temps de calcul des outils de simulations à tracé de rayons dépend des phénomènes de propagation pris en compte lors des simulations. C'est pourquoi, il est nécessaire de bien définir le nombre et la nature des phénomènes suffisants pour

caractériser un environnement donné. Pour ce faire, il faut limiter le nombre de phénomènes pour ne garder que ceux qui ont une influence sur les paramètres spatio-temporels du canal.

2.8. Mesures du canal de propagation *massive MIMO*

Les mesures de canal de propagation sont indispensables pour l'étude et l'évaluation des performances de toute technologie de communication sans fil. En effet, ces mesures permettent à la fois d'apporter une modélisation physique du canal de propagation ainsi que de calibrer les modèles déterministes à rayons. Par conséquent, plusieurs recherches se sont intéressées à la modélisation de canaux *massive MIMO* via la réalisation des campagnes de mesures dans des environnements extérieurs dans un contexte 5G. Dans cette section, les principales campagnes de mesures *massive MIMO* en environnement extérieur sont discutées.

Les environnements extérieurs urbains microcellulaires UMi (*Urban Microcells*) et macrocellulaires UMA (*Urban Macrocells*) représentent des scénarios typiques du déploiement de la 5G. Dans le cas d'un environnement UMi, la station de base BS est installée au-dessus du niveau moyen des toits alors que la station mobile MS est au niveau des utilisateurs. L'environnement UMA assure une couverture plus large que l'UMi, car la BS est placée à une très grande hauteur (20 m ou plus). Ainsi, la majorité des mesures *massive MIMO* présentes dans la littérature s'intéressent au canal de propagation dans des environnements urbains UMi et UMA pour des fréquences allant de 2,2 GHz à 3,7 GHz. Le Tableau 3 résume les paramètres et les configurations de ces mesures ainsi que les caractéristiques étudiées.

La quasi-totalité des mesures [51], [52], [53], [56], [57], [59], [60] se sont intéressées au canal de propagation en milieu urbain. Certaines d'entre elles étudient des liens SIMO (*Single-Input-Multiple-Output*) en utilisant des antennes réseau *massif* en réception [51] [55] [57]. Ces dernières ainsi que celles dans [53] permettent de fournir une caractérisation des paramètres spatio-temporels au niveau du mobile MS en calculant les directions d'arrivées DoA. Les mesures réalisées dans [57] à 3,33 GHz avec une antenne ULA à 64 éléments en réception, analysent les paramètres du canal tels que PDP, PAP, DS et AS.

Une caractérisation 3D du canal de propagation massive MIMO à la fois au niveau de la station de base et du mobile se trouve dans [52], [56], [59] et [60]. Dans [52] les mesures ont été réalisées dans un scénario macrocellulaire à 2,5 GHz dans la vieille ville de Cologne. En émission, une antenne virtuelle de type 900-UCA a été placée à une position fixe à 30 m du sol, et en réception une antenne 32-UCA a été montée sur le toit d'un véhicule. Les mesures ont été effectuées à plusieurs positions de Rx dans les canyons, les ruelles et les espaces ouverts. L'algorithme RIMAX [61] a été ensuite utilisé pour extraire les multi-trajets et une étude statistique des paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS a été réalisée. Dans [56], l'émetteur était équipé d'une antenne 32-UPA et le récepteur d'une antenne à 50 éléments sous forme de couronne (*crown shaped*). Les mesures ont été effectuées à 2,6 GHz dans le quartier «high-tech» de la ville de Xi'an en Chine. Les scénarios macrocellulaires (Tx à 40 m) et

microcellulaire (Tx à 14 m) ont été explorés en LoS et NLoS. L'extraction des multi-trajets a été faite via l'algorithme SAGE [62]. Une étude statistique des paramètres DS, AAS et EAS au niveau de la BS et du mobile pour les deux scénarios UMi et UMa a été réalisée. L'article [59] présente des mesures de canal de propagation en environnement urbain macrocellulaire à 3,5 GHz avec deux largeurs de bandes : 100 MHz et 200 MHz. Pour ce faire, une antenne 256-UPA virtuelle a été utilisée en émission et une antenne omnidirectionnelle à 16 éléments en réception. Cet article étudie statistiquement les paramètres DS, AAS et EAS en LoS et en NLoS. Les résultats montrent que les valeurs du DS sont plus grandes quand la largeur de bande est plus étroite. Dans [60], les mesures de canal ont été effectuées à 3,7 GHz dans un environnement urbain de type *canyon* à Séoul. Les Tx et Rx ont été équipées tous les deux d'une antenne 8-UCA et ont été placées tous les deux sur les toits de deux véhicules à 1,9 m du sol. Les DS et AAS ont été calculés en LoS et NLoS.

Cette thèse se situe dans le contexte de caractérisation d'un canal de propagation à 3,7 GHz en environnement extérieur. L'étude bibliographique des mesures, montre que les mesures qui se rapprochent le plus du contexte de la thèse sont [59] et [60]. En effet, [60] étudie le canal de propagation à la même fréquence dans un environnement extérieur. Cependant, d'une part un seul type d'environnement (*canyon*) a été étudié, d'autre part, cette étude n'explore pas le canal en 3D car seuls les retards et azimuts sont calculés. En ce qui concerne la modélisation du canal donnée dans [59], elle s'inscrit dans un contexte légèrement différent. En effet, cette étude est réalisée à 3,5 GHz une fréquence voisine de celle d'intérêt. Toutefois, cette modélisation inclut tous les aspects de la modélisation 3D. Les étalements angulaires en azimut et en élévation, ainsi que l'étalement temporel sont calculés. Néanmoins, les modèles de canaux de propagation pour le massive MIMO dans la bande 3,4 - 3,8 GHz (la « bande-cœur » de la 5G) restent limités. Pour promouvoir les techniques massive MIMO de la théorie à la pratique, davantage de caractérisations du canal dans différents environnements et scénarios sont nécessaires.

TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DES MESURES *MASSIVE MIMO* PROPOSEES DANS LA LITTERATURE

Reference	Fréquence [GHz]	Largeur de bande [MHz]	Scénario	Antenne Tx	Antenne Rx	Caractéristiques étudiées
[51]	2,2	62,5	Uma	1	UPA 21 × 21	DS, AAS, EAS à la MS
[52]	2,5	20	Uma	UCA 16× 60	UCA 32	DS, AAS, et EAS
[53]	2,5	2 × 45	UMa	ULA 16	UCA 48	DS, AAS, EAS à la MS
[54]	2,6	50	UMa	1	UCA 128 ULA virtuel 128	Calcul de capacité
[55]	2,6	50	UMa	1	ULA virtuel 128	K-factor, DoA
[56]	2,6	35	UMi UMa	UPA 32	Couronne 50	DS, AAS, et EAS
[57]	3,3	100	UMa	1	ULA 64	PDP, PAP, DS, AAS
[58]	3,5	160	Suburbain	UPA 4 × 8	UCA 4 × 8	DoD, DoA, PAP
[59]	3,5	100 200	UMa	UPA Virtuel 256	Omni 16	DS, AAS, EAS
[60]	3,7	100	Urbain Canyon	UCA 8	UCA 8	DS, AAS

2.9. Motivations des travaux de thèse

L'état de l'art effectué dans le chapitre 2 a permis de présenter d'une manière générale les caractéristiques du canal de propagation radio. En premier lieu, la propagation multi-trajet a été présentée en explicitant les différents phénomènes de propagation et effets qui y sont associés. Dans ce contexte, le signal reçu est une combinaison de plusieurs répliques du signal émis caractérisées par des amplitudes, des phases et des temps d'arrivée différents engendrant ainsi des évanouissements fréquentiels et temporels dans le canal. En second lieu, une représentation du canal de propagation et les paramètres associés ont été donnés. En dernier lieu, les différents concepts de la modélisation en bande étroite et en large bande ont été présentés. Les modèles empiriques sont simples, rapides et permettent la prédiction de l'atténuation liée à la propagation. La modélisation à large bande se fait à travers les modèles statistiques et déterministes. Les modèles statistiques sont déduits à partir de campagnes de mesures. Ils représentent un comportement typique et doivent être ajusté pour chaque environnement. Les modèles déterministes tels que les modèles à rayons permettent à la fois de prédire l'atténuation et de caractériser le canal en large bande. Ces modèles calculent tous les rayons entre un émetteur et un récepteur à partir d'une description précise de l'environnement.

Un modèle de propagation 3D à rayons *Starlight* a été développé par *Orange Labs* afin de mener des simulations des multi-trajets dans la bande de fréquences 40 MHz – 40 GHz. Cependant, la validation de ce modèle nécessite des mesures de canal en masse dans un contexte 5G à 3,7 GHz. L'étude bibliographique a montré que peu de recherches ont été menées dans le cadre de la caractérisation du canal de propagation *massive MIMO* pour des fréquences allant de 2 GHz à 3,7 GHz dans des environnements extérieurs. De plus, la quasi totalité de ces dernières ont été effectuées dans des environnements urbains macrocellulaires. Cependant, la caractérisation des systèmes *massive MIMO* requiert davantage de mesures du canal dans différents environnements et scénarios.

De ce fait, l'objectif dans cette thèse est de réaliser de nombreuses mesures du canal de propagation à 3,7 GHz dans plusieurs environnements représentatif du déploiement 5G (urbain, suburbain, rural) afin de permettre, d'une part, d'apporter une caractérisation expérimentale du canal de propagation en 3D, via une analyse de paramètres spatio-temporels pour chacun des environnements. D'autre part, ces mesures vont permettre d'ajuster le modèle de propagation *Starlight* en examinant les différences entre le modèle théorique implémenté et le modèle expérimental. Ces travaux doteront Orange d'un modèle de propagation performant pour la 5G aussi bien pour les besoin d'ingénierie que pour des recherches plus amont

Chapitre 3 Caractérisation du canal de propagation MIMO au niveau de la BS

Sommaire

3.1. Introduction.....	61
3.2. Campagne de mesures massive MIMO.....	61
3.2.1. Équipements de mesures.....	61
3.2.1.1. Sondeur de canal	62
3.2.1.2. Réseau d’antennes à la réception : Scan64.....	63
3.2.1.3. Réseau d’antenne à la réception : PIFA-8.....	65
3.2.2. Configuration de la campagne de mesure.....	66
3.2.2.1. Environnement de mesure.....	66
3.2.2.2. Paramètres de mesure.....	68
3.2.3. Prétraitements des mesures.....	69
3.3. Estimation des DoA.....	69
3.4. Caractérisation du canal de propagation.....	72
3.4.1. Étude de cas.....	72
3.4.2. Analyse statistique.....	76
3.4.2.1. Dispersion temporel.....	76
3.4.2.2. Dispersion spatiale.....	77
3.4.2.3. Intercorrélation entre paramètres du canal.....	78
3.5. Conclusion.....	79

3.1. Introduction

Dans le chapitre 2, un aperçu du modèle de propagation à rayons *Starlight* et ses caractéristiques a été présenté. Ce modèle est assez général car il opère dans une large bande de fréquence et permet de prédire les réponses impulsionnelles dans des environnements riches en multi-trajets. Ceci lui permet de s'appliquer à un grand nombre de configurations et d'environnements différents. Afin de valider et paramétrer ce modèle dans un contexte 5G, un grand nombre de mesures sont nécessaires notamment dans la nouvelle bande de fréquence 3,4 – 3,8 GHz. L'étude bibliographique a montré que peu de mesures massive MIMO ont été réalisées dans ce contexte.

Dans ce cadre, une campagne de mesures massive MIMO a été réalisée à 3,7 GHz, dans un environnement extérieur, avec un réseau d'antennes à 8 éléments en émission et un réseau d'antennes à 64 éléments (*Scan64*) en réception. Dans cette configuration, le réseau d'antennes *Scan64* représente la station de base et le mobile est représenté par le réseau à 8 éléments. Ces mesures permettent dans un premier temps de caractériser le canal de propagation, en temps et en espace, au niveau de la station de base. Dans un second temps, les résultats de ces mesures vont être comparés à ceux des simulations avec le modèle *Starlight* afin de valider et paramétrer le modèle.

Dans ce chapitre, une description de la campagne de mesures est présentée. Les équipements, la configuration et l'environnement de mesures sont décrits. Ensuite, le post-traitement des mesures permettant d'en extraire les paramètres spatio-temporels est donné. Enfin, les résultats de la caractérisation du canal *massive MIMO* issus de cette campagne de mesures sont donnés.

3.2. Campagne de mesures massive MIMO

3.2.1. Équipements de mesures

Afin de permettre la caractérisation spatio-temporelle du canal de propagation, il est nécessaire de mettre en place des dispositifs de mesures qui permettent d'explorer la dimension spatiale. Ainsi, les équipements utilisés doivent être capables de mesurer les directions d'arrivées (DoA) en 3D. Ces dernières ne peuvent être obtenues qu'avec utilisation des antennes multi capteurs (système multi-antenne). La campagne de mesures présentée dans cette section a été réalisée avec un sondeur de canal pour collecter les réponses impulsionnelles via un réseau d'antennes à 64 éléments. Le synoptique complet de la chaîne de mesures est donné par la Figure 23.

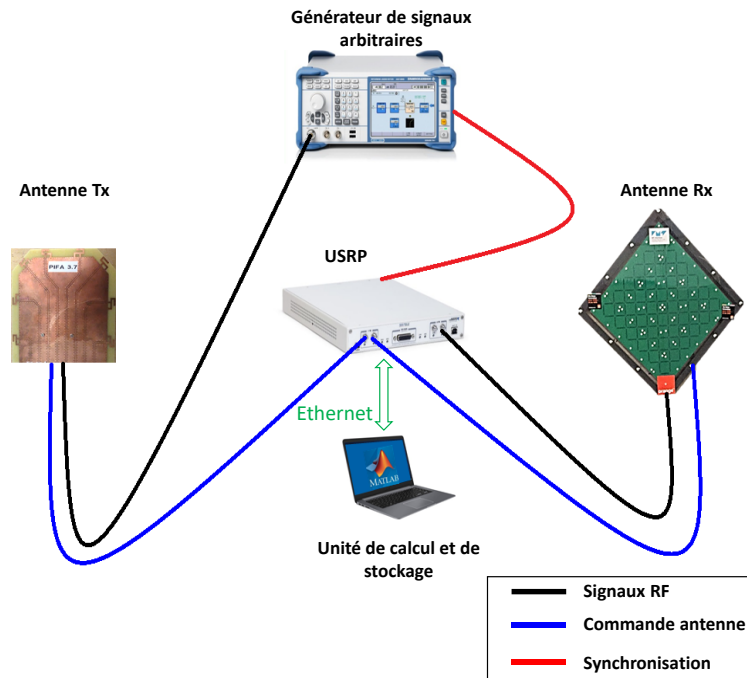


FIGURE 23 : SYNOPTIQUE COMPLET DE LA CHAÎNE DE MESURE

Dans un premier temps, un rappel sur les techniques de sondage est présenté avant de décrire le sondeur de canal utilisé dans nos mesures. Ensuite, les caractéristiques du réseau d'antennes *Scan64* et de la chaîne d'émission sont présentées.

3.2.1.1. Sondeur de canal

- **Techniques de sondage du canal**

Le sondage du canal est une méthode qui a pour but de mesurer la fonction de transfert ou la réponse impulsionnelle du canal de transmission. En pratique, les sondeurs de canal interviennent au niveau de l'émission et de la réception. D'une part, à l'émission le sondeur sert à exciter le canal en générant un signal de sondage. D'autre part, à la réception il permet de mesurer le signal reçu après passage par le canal de transmission, puis de calculer la réponse impulsionnelle via un traitement spécifique des signaux émis et reçu. Les principales caractéristiques d'un sondeur de canal sont : sa bande d'analyse qui correspond à la bande de fréquences sur laquelle est estimée la réponse impulsionnelle, et sa résolution temporelle qui caractérise sa capacité à distinguer deux trajets différents arrivant avec des retards très proches.

L'arrivée des systèmes *MIMO* ont nécessité le développement de nouvelles techniques de sondage multi capteurs du canal. On distingue deux approches d'acquisition sur un réseau d'antennes :

- Approche parallèle : vise à dupliquer les chaînes de mesures à l'émission ainsi qu'à la réception. Cette approche reste couteuse de point de vue calcul car nécessitent autant d'émetteurs et récepteurs que d'antennes.

Cette remarque est d'autant plus vraie pour des « systèmes antenne massif ».

- Approche par commutation : permet de mesurer successivement chacune des liaisons émetteur-récepteur. Cette approche est beaucoup moins coûteuse car elle utilise un seul récepteur. Cependant, cela requiert une stationnarité de l'environnement durant la mesure.

- **Sondeur de canal spatio-temporel**

Le sondeur de canal utilisé a été développé par IMT Atlantique dans le cadre du projet collaboratif « *Spatial Modulation* » financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) ainsi que de contrat bilatéraux avec Orange Labs. Il s'agit d'un sondeur large bande basé sur une architecture SDR (*Software Defined Radio*) qui offre une grande capacité d'évolution.

Le cœur du dispositif repose sur un équipement USRP 2953, de la société *National Instruments*. Cet équipement a pour rôle de convertir les signaux réels reçus par les antennes en un signal numérique exploitable par le système de traitement. L'USRP est doté de deux récepteurs qui couvrent la bande de 1,2 à 6 GHz, soit une grande partie des systèmes de téléphonie mobile, une horloge interne de 10 MHz, un circuit FPGA et offre une bande passante instantanée qui peut atteindre 120 MHz. Le sondage du canal MIMO massif consiste à utiliser des signaux pseudopériodiques afin de caractériser le canal. Ainsi, l'acquisition se fait par multivoies et repose sur une approche par commutation, les signaux reçus sont donc mesurés successivement.

Le FPGA contrôle la commutation des antennes via une interface. Celle-ci est chargée de mettre en forme les signaux de commande et fournir une alimentation à l'antenne. La synchronisation fréquentielle entre l'émetteur et le récepteur est assurée via un câble coaxial de référence 10 MHz. L'équipement SDR est contrôlé par un PC sous linux qui assure l'acquisition des données et l'interface graphique. Le système en entier a été intégré dans un rack afin qu'il soit facilement transportable. Enfin, le post-traitement des données collectées se fait sous MATLABTM.

3.2.1.2. Réseau d'antennes à la réception : Scan64

Les réseaux d'antennes jouent un rôle important dans la modélisation des canaux de propagation pour les systèmes *massive MIMO* car permettent d'estimer les directions d'arrivées, ainsi que les amplitudes des différents multi-trajets. Pour notre campagne de mesures, le réseau d'antenne *Scan64* a été utilisé. Ce dernier a été conçu dans le cadre d'un contrat de recherche avec *IMT Atlantique*.

Le *Scan64* est un réseau UPA de 64 antennes à fentes et à double polarisation dont 32 sont en polarisation verticale (polar V) et 32 en polarisation horizontale (polar H). Ces capteurs sont espacés uniformément de $\lambda/2$ pour respecter le critère d'échantillonnage spatial, et ainsi d'éviter les lobes de réseaux. Le réseau *Scan64* possède une ouverture de 120° en azimut et en élévation. Ce qui permet de mesurer uniquement les rayons ayant

un azimut et une élévation compris entre -60° et 60° . Ainsi, le Scan64 peut être utilisé en station de base dans une configuration cellulaire.

Dans [63], la notion de réseau uniforme planaire incliné SUPA a été introduite. En effet, une étude sur l'effet de la géométrie du réseau UPA sur ses performances a montré que l'utilisation d'un réseau SUPA permet d'augmenter la résolution angulaire sur le plan horizontal et diminue les lobes secondaires par rapport à un UPA classique ayant le même nombre d'éléments. La forme du *Scan64* est illustrée dans la Figure 24.

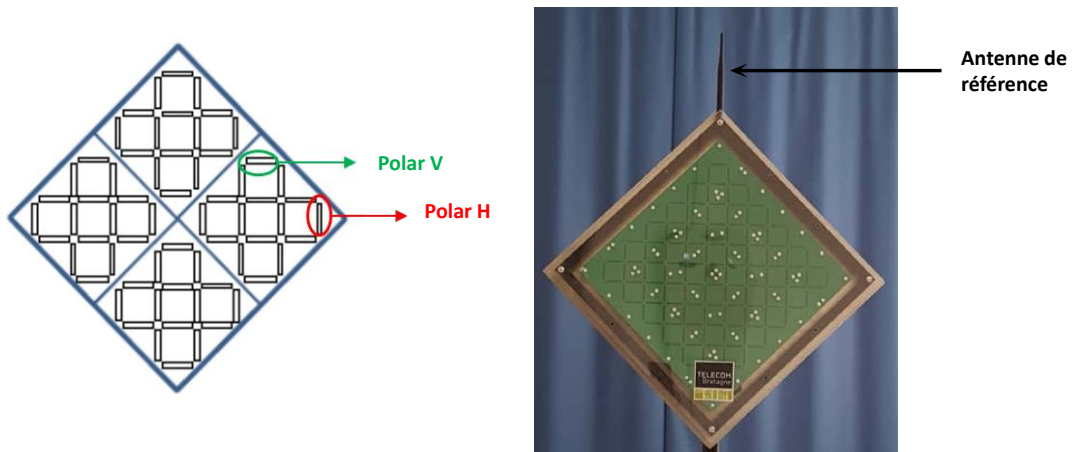


FIGURE 24 : RESEAU D'ANTENNE SCAN64

La bande de fréquence choisie pour ce réseau est 3,6 – 3,8 GHz qui correspond à la plage de fréquence allouée pour la 5G en France. Parmi les choses qui font l'originalité du Scan64 il y a l'intégration des circuits commutés et l'architecture SUPA de l'antenne. La Figure 25 donne le prototype de l'antenne. Cette antenne à 64 éléments a été construite avec 4 modules élémentaires chacun contenant 16 éléments. Au sein de chaque secteur, 4 commutateurs SPT4, en jaune, sont déployés pour connecter les 16 éléments rayonnants du secteur. Ces derniers sont connectés à leurs tours au commutateur, en orange, du module élémentaire. Enfin les 4 commutateurs des 4 modules sont reliés au commutateur rouge.

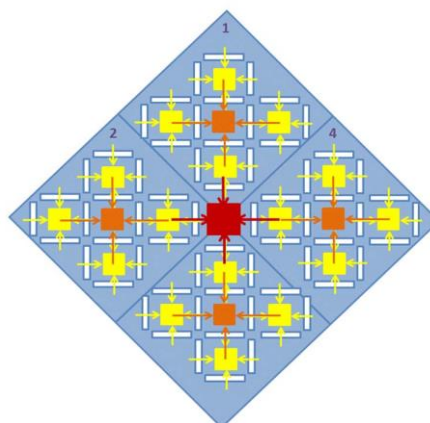


FIGURE 25 : PROTOTYPE DU RESEAU SCAN64

3.2.1.3. Réseau d'antenne à la réception : PIFA-8

La chaîne d'émission se compose d'un générateur de signaux arbitraires synchronisé sur un bon oscillateur. Ce type d'équipement est utilisé pour émettre un signal de référence utilisable par le sondeur de canal. Dans cette campagne de mesures, le SMBV100A est utilisé. La puissance varie dans une gamme de -144 dBm à $+18$ dBm avec une largeur de bande maximum de 200 MHz.

Le réseau d'antenne utilisée en émission est constitué de 8 antennes PIFA identique (*Planar Inverted-F Antenna*). L'ensemble du réseau (PIFA-8) de taille $13 \times 72 \times 37$ mm est représenté sur la Figure 26. Elle a été développée par le laboratoire RIO/ANT d' Orange Labs à Sophia Antipolis. Un circuit de commutation a été ajouté par IMT Atlantique pour pouvoir connecter le réseau d'antennes au sondeur de canal. Étant compact et à profil simple, ce type d'antenne est utilisé principalement dans les techniques de communication sans-fil en guise de station mobile, comme les téléphones portables. C'est pourquoi elle est utilisée en station mobile dans notre campagne de mesures.

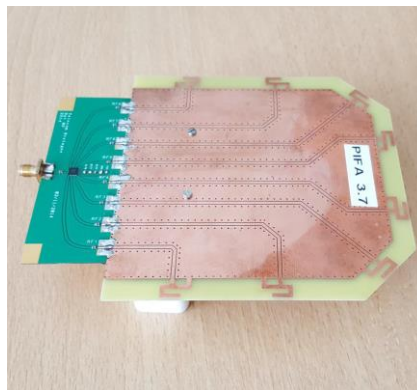


FIGURE 26 : ANTENNE PIFA-8

L'antenne PIFA-8 utilisée est à large bande $3,3 - 3,9$ GHz. Bien qu'elle soit compacte, chaque antenne a son propre diagramme de rayonnement. La PIFA-8 peut être considérée alors comme un réseau d'antennes à faible corrélation. Les diagrammes de rayonnement de chacune des antennes sont donnés par la Figure 27. Le diagramme de rayonnement du réseau PIFA est obtenu en moyennant les 8 diagrammes d'antennes du réseau PIFA-8.

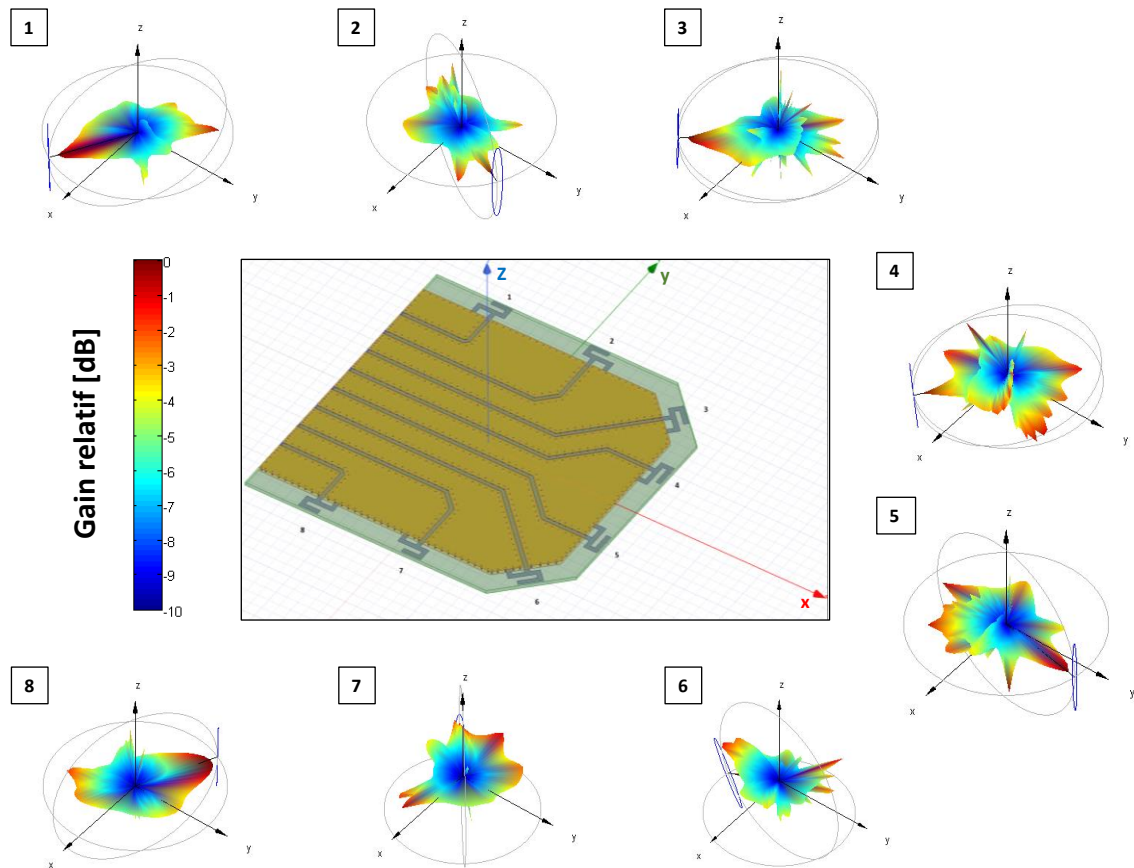


FIGURE 27 : LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DE CHAQUE ANTENNE DU RESEAU PIFA-8

3.2.2. Configuration de la campagne de mesure

3.2.2.1. Environnement de mesure

La campagne de mesures a été réalisée en *outdoor* dans le campus industriel *Techn'hom* à Belfort où se situent les locaux de notre laboratoire. L'environnement de mesures est représenté sur Figure 28. Il est assimilable à une microcellulaire avec des bâtiments ne dépassant pas 10 mètres en hauteur.



FIGURE 28 : ILLUSTRATION DE L'ENVIRONNEMENT DE MESURES

le réseau d'antenne *Scan64*, qui représente la station de base, a été placé à 7,5 m du sol, c'est-à-dire sous le niveau moyen des toits, favorisant ainsi la propagation le long des rue (configuration micro-cellulaire). L'antenne PIFA-8, qui représente l'utilisateur, a été montée sur un mât à 1 m du sol.

L'antenne de la BS est maintenue dans une position fixe, alors que celle du MS a été placée dans différentes positions pour se mettre dans des conditions LoS et NLoS. La Figure 29 montre un exemple d'un lien BS-MS.

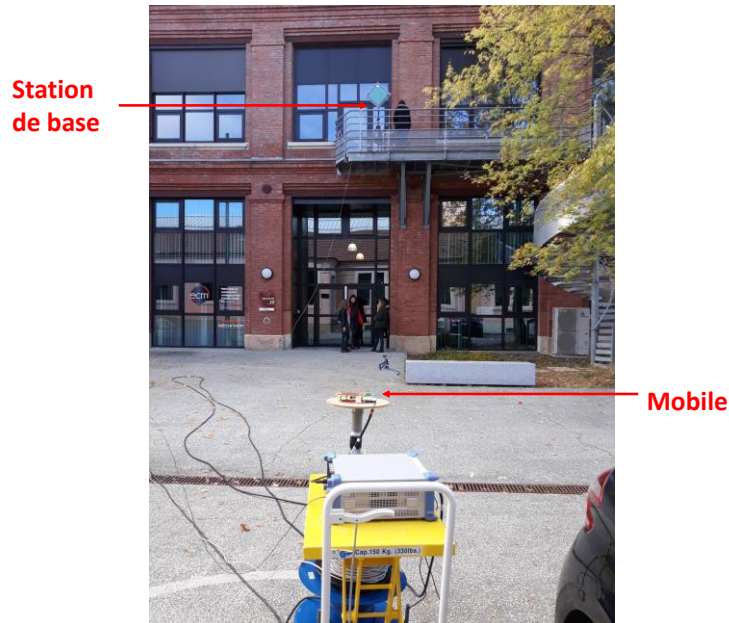


FIGURE 29 : EXEMPLE D'UN LIEN BS-MS

Durant la campagne de mesure, 11 configurations BS-MS ont été mesurés. Une configuration BS-MS correspond à la mesure des 512 (64×8) réponses impulsionnelles sur les réseaux d'antennes. La distance BS-MS varie entre 13 m et au maximum à 54 m. En effet, la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur se fait via un câble coaxial ce qui limite le déplacement du mobile par rapport à la BS.

L'ensemble des configurations BS-MS sont répertoriés dans la Figure 30. Le point rouge représente la position de la station de base dans l'environnement de propagation. Les autres points représentent les positions du mobile. Les flèches sur chaque position désignent orientation de l'antenne. Sur la Figure 30, on distingue trois catégories de positions du MS selon l'orientation du réseau d'antennes PIFA-8 : En rose, les positions où l'antenne est orientée vers l'est, en vert pour antenne orientée vers le nord et en bleu pour antenne orientée vers le sud.

3.2.3. Prétraitements des mesures

Les mesures brutes sont présentées sous forme de fichiers *.dat* contenant les fonctions de transfert mesurées. Un fichier *.dat* avec $8 \times 64 = 512$ fonctions de transfert est associé à chaque position du mobile. Pour permettre l'analyse et l'étude spatio-temporelle de ces mesures, un prétraitement est nécessaire.

Dans notre cas, le prétraitement a été effectué en trois étapes :

- **Calibrage des mesures**

Le calibrage s'effectue alors suivant la méthode *back-to-back*. Ainsi, une mesure est réalisée en câblant directement le récepteur à l'émetteur. Ceci permet de prendre en compte l'ensemble des imperfections de l'émetteur et du récepteur. Cette mesure doit inclure tous les câbles utilisés dans la mesure. Ensuite, les fonctions de transfert sont déduites de la mesure par traitement numérique.

- **Calcul des réponses impulsionnelles**

Lors du calcul des réponses impulsionnelles du canal, une fenêtre de Hanning a été appliquée aux fonctions de transfert avant la transformée de Fourier afin de diminuer l'effet des lobes secondaires et améliorer la dynamique. Une fois les réponses impulsionnelles calculées, ces dernières ont été stockées dans des fichiers *.mat* pour qu'elles soient exploitables, sous MATLABTM.

- **Tri des mesures**

Pour avoir des mesures exploitables pour le calcul des paramètres de dispersion temporelle et des directions d'arrivée, une phase de tri des mesures est essentielle. Ainsi, seules les mesures dont la dynamique est supérieure à 25 dB sont conservées.

3.3. Estimation des DoA

Cette campagne de mesures en configuration Massive MIMO a été réalisée dans le but de caractériser la dispersion spatiale et temporelle du canal de propagation au niveau de la station de base. Pour ce faire, une phase post-traitement est nécessaire afin de déterminer les paramètres spatio-temporels à partir des mesures collectées. Dans cette section, est donnée la méthode *beamforming* pour l'estimation des DoA appliquée aux mesures *massive MIMO* 8×64 .

La détection des DoA nécessite l'utilisation d'un réseau d'antennes associée à un algorithme de détection des DoA. Dans notre cas, le choix de l'algorithme s'est porté sur la méthode de formation de faisceaux (*Beamforming*) pour sa simplicité et sa rapidité en termes de temps de calcul et de traitement.

Le *beamforming* peut être considéré comme un filtre spatial. Il est appliqué à toutes les directions de l'espace afin de calculer celles qui favorisent le gain. Ces directions sont caractérisées par un azimut ϕ et une élévation θ . En pratique, lorsque le réseau

d'antennes reçoit un signal, ce dernier n'est pas reçu de la même manière par toutes les antennes du réseau. En effet, les différentes antennes sont espacées d'une distance $\lambda/2$, ce qui engendre un déphasage et un retard différents sur les signaux mesurés pour chacune des antennes du réseau.

Pour illustrer le principe de la formation de faisceaux, nous nous plaçons dans une condition monochromatique. Considérons un réseau d'antennes contenant N éléments rayonnants. Les gains de rayonnement de ces derniers, dans la direction (θ, ϕ) , sont notés $B_1(\theta, \phi), \dots, B_N(\theta, \phi)$. Les signaux reçus par les différentes antennes du réseau sont stockés dans le vecteur : $x(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T$, où $x_n(t)$ représente le signal reçu par la $n^{\text{ème}}$ antenne du réseau.

Le principe du *beamforming* peut être assimilé à une antenne synthétique. Cela se traduit par l'application des coefficients complexes, appelés pondération, aux signaux reçus sur chaque antenne du réseau. Les signaux pondérés sont ensuite combinés pour construire un filtre spatial qui permet de privilégier ou de supprimer certaines composantes spatiales du signal reçu. En notant $p(\theta, \phi) = [p_1(\theta, \phi), \dots, p_N(\theta, \phi)]^T$ le vecteur des pondérations complexes, le signal $y(t)$ à la sortie du filtre s'obtient à partir d'une combinaison linéaire entre le signal reçu $x(t)$ et la pondération $p(\theta, \phi)$:

$$y(\theta, \phi, t) = p(\theta, \phi) x(t) \quad (35)$$

soit

$$y(\theta, \phi, t) = \sum_{n=1}^N p_n(\theta, \phi) x_n(t) \quad (36)$$

Dans notre cas, la pondération a été calculée à partir des gains de rayonnements $B(\theta, \phi)$ et est donnée par l'équation (40):

$$\forall n \leq N \quad p_n(\theta, \phi) = \frac{B_n^*(\theta, \phi)}{\|B_n(\theta, \phi)\|} \quad (37)$$

Par analogie au filtrage temporel, il est possible d'appliquer une fenêtre de pondération bidimensionnelle aux diagrammes d'antennes afin de réduire l'effet des lobes secondaires. Dans le cadre de notre étude, une fenêtre spatiale de Tchebychev $w = [w_1, \dots, w_n]$ 2D a été appliquée afin de réduire le niveau des lobes secondaires et faciliter la détection des DoA des signaux reçus. Néanmoins cette fenêtre augmente la largeur du lobe principal. Les gains de rayonnements $B_n(\theta, \phi)$ dans l'équation (40) deviennent :

$$\forall n \leq N \quad G_n(\theta, \phi) = w_n B_n(\theta, \phi) \quad (38)$$

La Figure 31 montre la structure d'un *beamformer* linéaire.

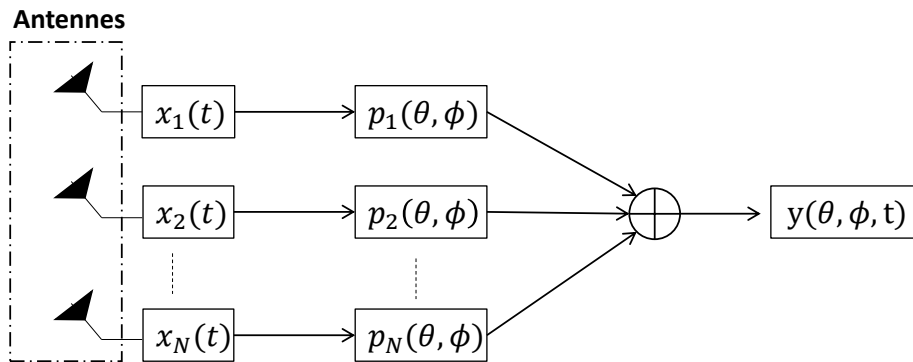


FIGURE 31 : PRINCIPE DU *BEAMFORMING LINEAIRE*

Bien que la méthode de formation de faisceaux soit rapide et simple à utiliser, cette dernière souffre d'une pauvre résolution angulaire, un paramètre très important pour évaluer les performances d'une méthode d'estimation des DoA. En effet, ce paramètre permet d'évaluer la capacité de la méthode d'estimation à séparer deux rayons provenant de sources proches de l'espace. Pour le *beamforming*, la résolution angulaire dépend de la géométrie du réseau d'antennes et de la largeur du lobe principal, définie par son ouverture à -3 dB . La Figure 32 présente une définition des paramètres de résolution angulaire en élévation (R_θ) et en azimut (R_ϕ).

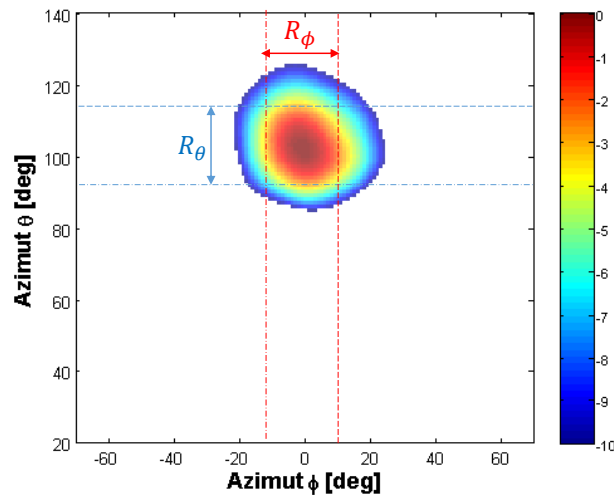


FIGURE 32 : RESOLUTION ANGULAIRE EN ELEVATION ET EN AZIMUT

La fenêtre de Tchebychev utilisée permet de trouver un bon compromis entre la résolution angulaire et l'amplitude des lobes secondaires.

La Figure 33 montre un exemple d'estimation d'une DoA d'un rayon arrivant au réseau *Scan64* avec une incidence de 100° en élévation et 0° en azimut. Les résultats montrent que le fenêtrage permet de réduire les lobes secondaires mais élargit le lobe principal ce qui fait diminuer la résolution angulaire.

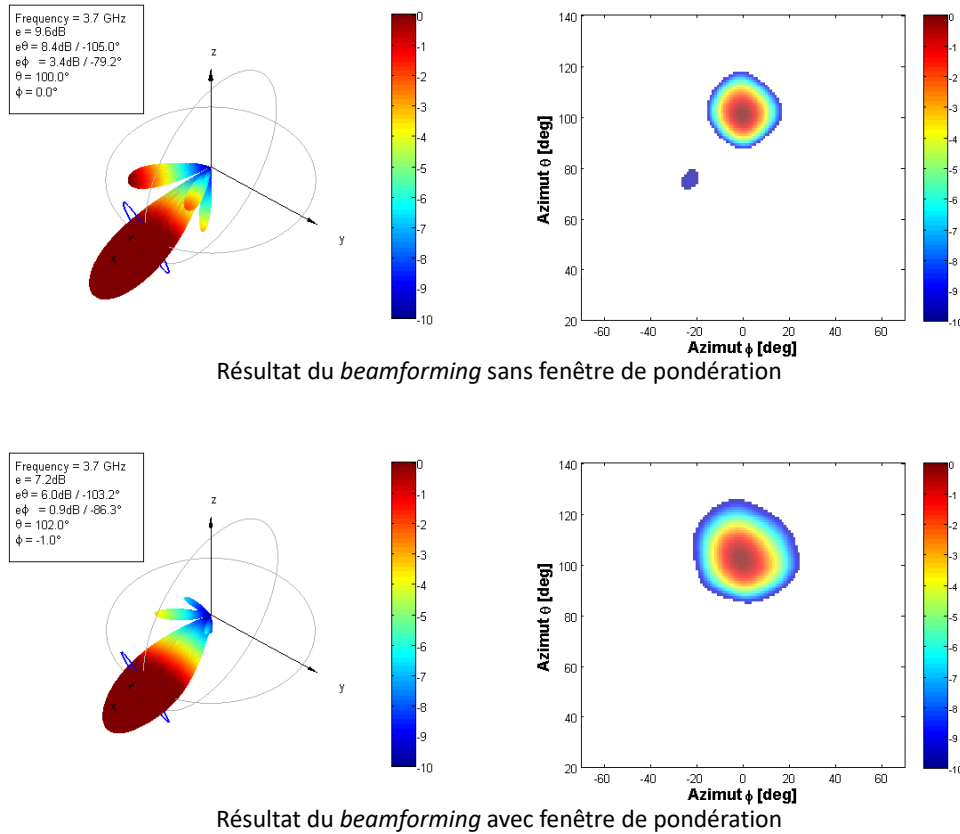


FIGURE 33 : EXEMPLE DE CALCUL DE DOA PAR BEAMFORMING AVEC ET SANS FENETRAGE

3.4. Caractérisation du canal de propagation

Afin de caractériser le canal de propagation au niveau de la station de base, plusieurs liens BS-MS ont été mesurés, en plaçant le mobile dans différentes positions en visibilité et non visibilité avec la BS. Cette partie, a pour but d’analyser les résultats des mesures afin de permettre une caractérisation du canal. Dans un premier temps, une étude de cas est présentée dans le but d’identifier les différents mécanismes de propagation rencontrés dans les environnements urbains et puis illustre les propriétés spatio-temporelles du canal. Ensuite, dans un second temps, une étude statistique a été réalisée afin de présenter une analyse succincte des paramètres spatio-temporels du canal dans cet environnement.

3.4.1. Étude de cas

Deux configurations ont été identifiées pour les mesures : LoS et NLoS. C’est pourquoi, un exemple pour chaque configuration est présenté dans cette section. La Figure 34 présente un aperçu de l’environnement de propagation avec les positions de la BS et des MS3 et MS4 positions du mobile.

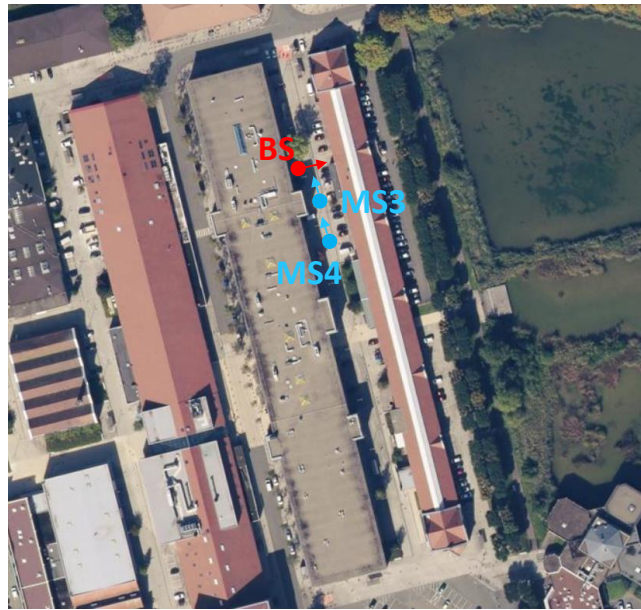


FIGURE 34 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION AVEC LES POSITION BS, MS3 ET MS4

Le premier exemple analysé est celui en visibilité BS-MS3. Le mobile dans ce cas est à 17 m de la BS et l'antenne du MS est orientée vers la BS. La Figure 35 présente le PDP en calculée pour le lien BS-MS3. Les PDP ici sont tracées en fonction de la longueur des trajets et en puissance normalisée pour simplifier l'interprétation des différents multi-trajets. La dispersion des puissances en fonction des retards montre l'existence de différents multi-trajets, mais le trajet directe est le plus prépondérant et représente 65% de l'énergie totale. La visualisation de la Figure 36, qui représente la répartition spatiale de l'énergie, confirme que la plus grande proportion d'énergie arrive de la direction ($\theta = 80^\circ, \phi = -20^\circ$) qui correspond au trajet direct. En plus, une source d'énergie non négligeable a été identifiée à la direction ($\theta = 140^\circ, \phi = 27^\circ$). Cette dernière, correspond au trajet à 33 m qui a subi au moins une réflexion et une diffraction sur le bâtiment se trouvant face à la BS. D'autres trajets avec des combinaisons de diffraction et réflexions ont été identifiés avec des puissances relativement faibles. En outre, les Figure 35 et Figure 36 montrent un étalement de l'énergie autour du trajet LoS, ce qui illustre l'existence de l'énergie diffuse. De même les profils angulaire de puissance (Figure 37) montrent que le maximum d'énergie correspond au trajet direct, identifient une source d'énergie secondaire et confirme le caractère diffus du canal de propagation mesuré.

Les étalements des retards, azimuts et élévations calculés pour cette configuration sont respectivement 12 ns, 47° et 45°.

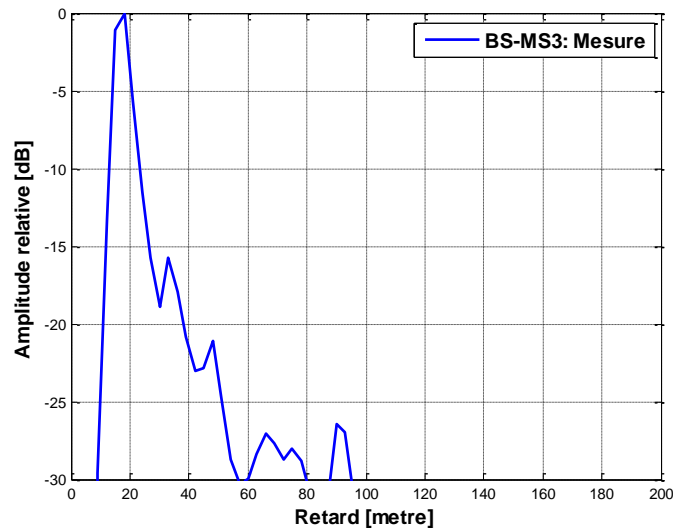


FIGURE 35 : PDP MESURE EN LOS POUR BS-MS3

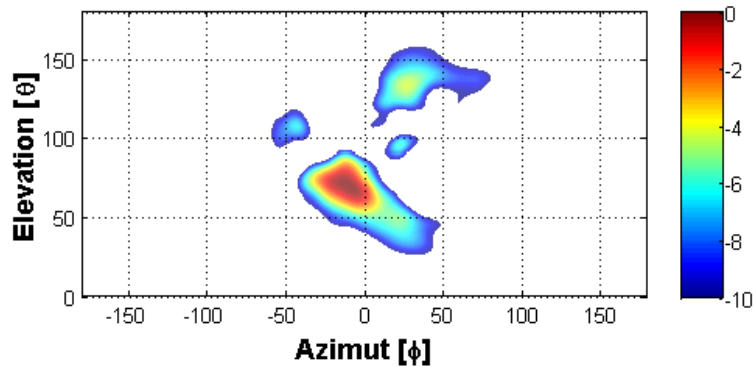


FIGURE 36 : REPARTITION SPATIALE DE L'ENERGIE EN LOS POUR BS-MS3

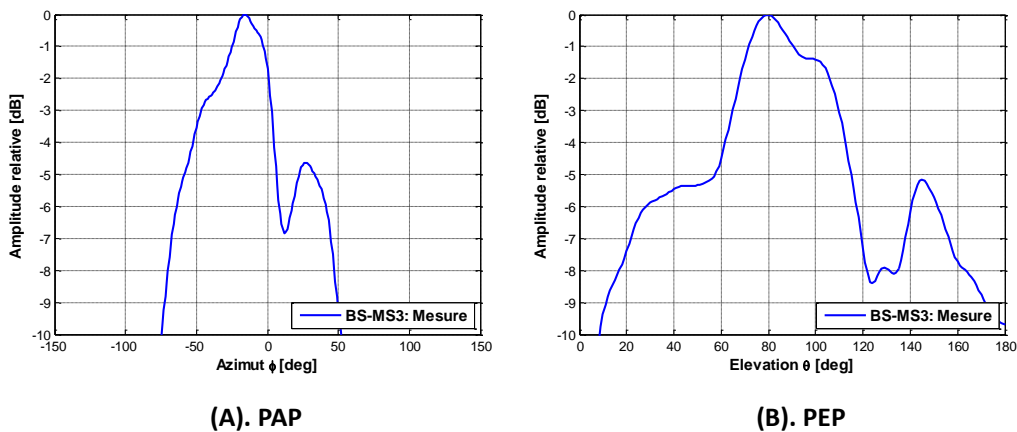


FIGURE 37 : PAP ET PEP MESURE EN LOS POUR BS-MS3

Le deuxième exemple présente le lien BS-MS4 où le mobile et la station de base ne sont pas en visibilité. La station de base et le mobile sont distants de 27 m et sont séparés par un mur d'un bâtiment en béton. Le PDP mesuré présenté dans la Figure 38, possède deux trajets principaux qui arrivent avec quasiment la même puissance relative. La

distance parcourue par le premier trajet équivaut à la distance BS-MS4 et sa direction d'arrivée ($\theta = 60^\circ, \phi = -10^\circ$) coïncide avec la direction du mur séparant le MS et la BS. Ceci dit, dit que le premier trajet a subi une diffraction rasante sur le coin de mur. Le deuxième trajet arrive avec 13 mètre de plus et 1 dB de moins que le premier trajet. Ses directions d'arrivées ($\theta = 94^\circ, \phi = 15^\circ$) indiquent qu'il arrive en face à la BS. Les autres trajets identifiés comme le troisième (60 m) ou le quatrième (70 m) sont les résultats de plusieurs réflexions puis arrivent à la BS soit par le bâtiment d'en face (directions voisines au 2^{ème} trajet), ou par le mur qui sépare la BS et le MS et dans ce cas ses DoA sont voisines au premier trajet. Les Figure 39 et Figure 40 et montre l'existence de deux sources d'énergie principales pour cette configuration contrairement à la configuration en LoS. Le canal de propagation est donc plus riche en multi-trajets dans une configuration NLoS. Les étalements des retards, azimuts et élévations sont respectivement : 38 ns, 37° et 25°.

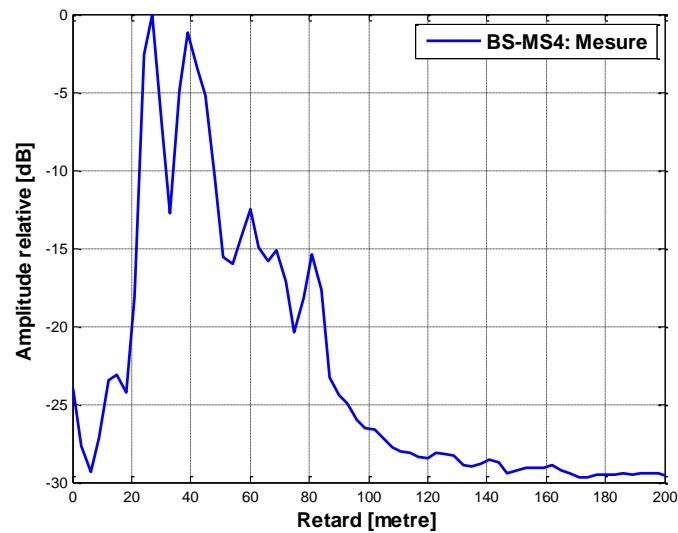


FIGURE 38 : PDP MESURE EN NLOS POUR BS-MS4

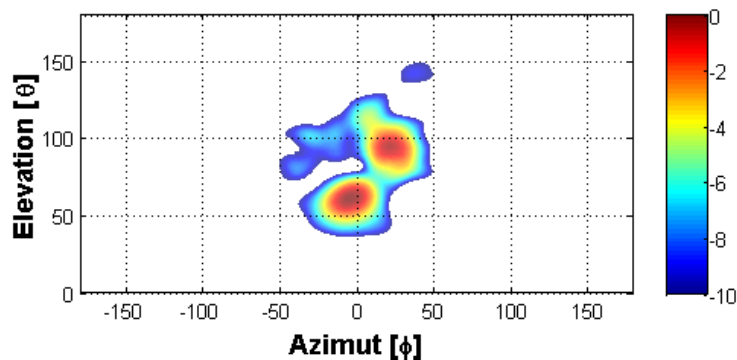


FIGURE 39 : REPARTITION SPATIALE DE L'ENERGIE EN NLOS POUR BS-MS4

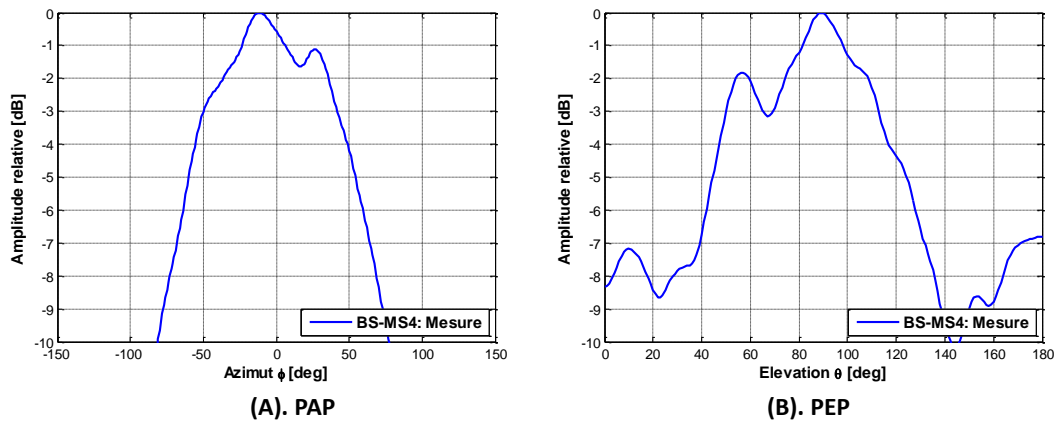


FIGURE 40 : PAP ET PEP MESURE EN LOS POUR BS-MS4

3.4.2. Analyse statistique

Dans la partie précédente, deux exemples de liens BS-MS ont été étudiés pour caractériser le canal en LoS et NLoS. Cependant, cette étude reste insuffisante. C'est pourquoi dans cette partie, une étude statistique est présentée afin d'identifier les tendances générales et réaliser une caractérisation complète du canal de propagation au niveau de la BS. La campagne de mesures a permis de mesurer 11 liens BS-MS. Les paramètres de dispersion DS, AAS et EAS ont été calculée pour chaque lien BS-MS.

3.4.2.1. Dispersion temporel

La Figure 41 présente la fonction de distribution cumulative des étalements des retards. Les valeurs du DS varient de 7 à 60 ns pour tout lien BS-MS confondus. La moyenne des étalements des retards est de 25 ns. Cette valeur correspond à celle donnée dans [91], pour des mesures de canal à 2,9 GHz avec des antennes Tx et Rx peu élevées. Ces valeurs indiquent que le canal de propagation mesuré est riche en multi-trajets. En effet, les mesures ont été réalisées dans une rue avec BS et MS à faible hauteurs. Dans ces conditions, la propagation des ondes se fait principalement par des réflexions successives sur les bâtiments bordant la rue. Ainsi, l'environnement de propagation peut être assimilé à un guide d'onde virtuel.

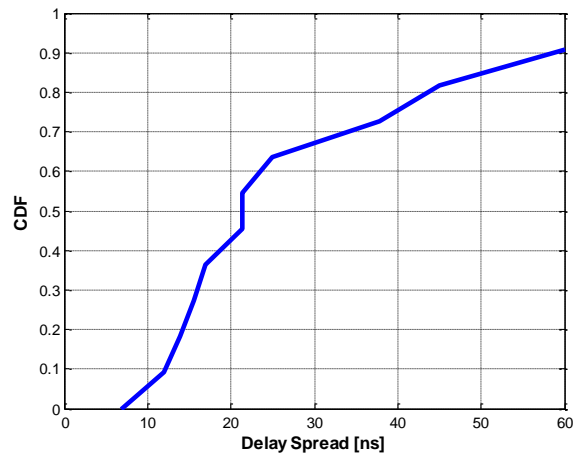


FIGURE 41 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DU DS

3.4.2.2. Dispersion spatiale

Les Figure 42 et Figure 43 montrent respectivement les fonctions de distribution cumulées des azimuts AAS et des élévations EAS. Les valeurs des étalements angulaires ne dépassent pas 52° en azimut et 46° en élévation. Les moyennes des AAS et EAS sont tous les deux égales à 34° . Les bâtiments étant très proches du mobile et de la BS, plusieurs rayons sont réfléchis par les bâtiments et arrivent à la BS avec une puissance relativement élevée. Ainsi, ces multi-trajets apportent une contribution non négligeable à la puissance reçue par la BS. Par conséquent, les AAS et l'EAS dépendent de la largeur et la hauteur des bâtiments.

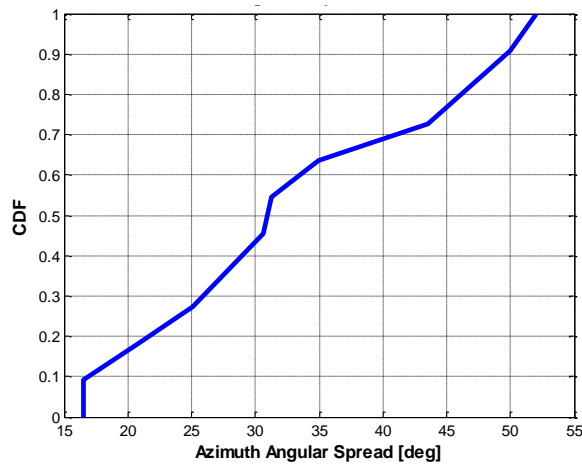


FIGURE 42 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DE L' AAS

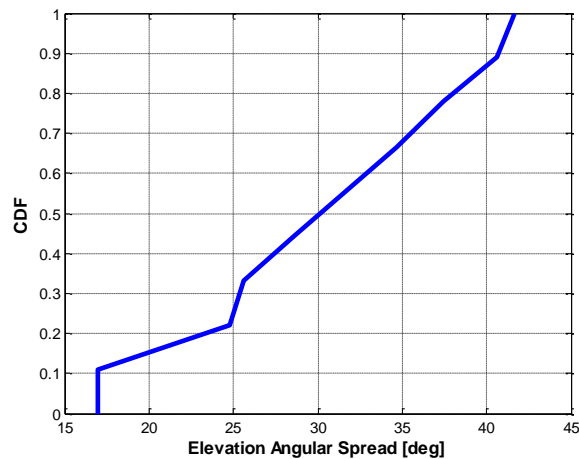


FIGURE 43 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DE L'EAS

Les valeurs des étalements des retards, des azimuts et des élévations calculés pour les 11 liens BS-MS sont répertoriées dans le Tableau 5.

TABLEAU 5 : PARAMETRES D'ETALEMENT CALCULE POUR CHAQUE LIEN BS-MS

Position MS	Distance BS-MS [m]	Configuration	DS [ns]	AAS [deg]	EAS [deg]
MS1	9	LoS	22	31	34
MS2	10		22	30	34
MS3	17		12	43	41
MS4	26	NLoS	38	37	25
MS5	40		45	50	45
MS6	54		60	52	46
MS7	39	LoS	16	25	20
MS8	27		14	21	24
MS9	30		25	30	28
MS10	21		7	17	16
MS11	21		17	34	37

3.4.2.3. Intercorrélation entre paramètres du canal

Bien que les mesures étudiées dans ce chapitre soient très limitées en termes de points de mesure, l'intercorrélacion entre les paramètres du canal est étudiée. En effet, la connaissance de la corrélation entre certains paramètres permet de mieux comprendre le canal de propagation. Cette information peut être utilisée aussi pour ajuster les paramètres des modèles de propagation 3D.

Les résultats du calcul de l'intercorrélacion sont donnés dans le Tableau 6. D'abord, les résultats ne montrent pas une forte corrélation entre les paramètres de dispersion et la distance BS-MS. Cependant, les paramètres de dispersion présentent une corrélation entre eux, notamment entre AAS et EAS pour qui le coefficient de corrélation est de 0,92.

TABLEAU 6 : COEFFICIENT D'INTERCORRELATION DES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DU CANAL

	Distance BS-MS	DS	AAS	EAS
DS	0,62	1	0,75	0,72
AAS	0,36	0,75	1	0,92
EAS	0,20	0,72	0,92	1

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une campagne de mesures massive MIMO $8T_x \times 64R_x$ a été réalisée à 3,7 GHz dans le but de caractériser le canal de propagation au niveau de la station de base. Dans un premier temps, une analyse spatio-temporelle 3D détaillée sur deux exemples de liens BS-MS a été faite afin d'identifier les différents multi-trajets et les phénomènes de propagation correspondant. Dans cet environnement, par exemple, la propagation est guidée par les bâtiments qui bordent la rue. La comparaison entre les deux liens BS-MS étudiée a montré que le canal de propagation en NLoS est plus dispersé en temps. En complément, une analyse statistique sur 11 liens BS-MS a dégagé des tendances globales. Ensuite, la corrélation entre les paramètres de dispersion du canal et la distance BS-MS a été évaluée. Les résultats ne montrent pas de dépendance entre les distances BS-MS et les paramètres DS, AAS et EAS. Cependant, les paramètres spatio-temporels semblent être bien corrélés, surtout les deux paramètres de dispersion angulaire AAS et EAS. Compte tenu du faible nombre de mesures et du peu de références qui caractérisent le canal dans ces configurations, d'autres mesures sont nécessaires pour confirmer la dépendance entre les paramètres d'étalement temporel et angulaires.

4.5.2. Analyse statistique des paramètres de propagation.....	109
4.5.2.1.Mesures en Street <i>Canyon</i> urbain.....	109
4.5.2.2.Mesures en environnement urbain.....	114
4.5.2.3.Mesures en environnement suburbain.....	123
4.5.2.4.Mesures en environnement rural.....	127
4.5.2.5.Mesures en espace ouvert (Parking).....	130
4.5.3. Synthèse.....	134
4.6. Conclusion.....	137

4.1. Introduction

Dans le chapitre 3, des mesures *massives MIMO* $8T_x \times 64R_x$ ont été réalisées afin de caractériser le canal de propagation au niveau de la station de base. Ces mesures ont été réalisées dans un environnement urbain microcellulaire et une dizaine de lien BS-MS ont été étudiés. Dans la même continuité, la caractérisation du canal de propagation au niveau du mobile a également été étudiée. Dans ce cas, le mobile est équipé d'un réseau massif et des mesures SIMO suffisent pour cette caractérisation. Les campagnes de mesures SIMO, menées dans cette optique, sont décrites dans ce chapitre.

Les campagnes de mesures SIMO ont été réalisées à $3,7\text{ GHz}$ dans différents environnements extérieurs. Un réseau d'antennes UPA virtuel et un sondeur mobile ont été utilisés en réception, et une antenne omnidirectionnelle en émission. Ces campagnes ont été conduites dans plusieurs environnements extérieurs (urbain, suburbain, rural et espaces ouverts) ainsi que dans différentes configurations (macrocellulaire, microcellulaire).

Le premier objectif de ces mesures est de caractériser le canal de propagation en temps et en espace au niveau du mobile dans différents environnements. Cette étude permettra ensuite de dégager les tendances et tirer des conclusions générales sur l'impact de l'environnement de mesures sur le comportement spatio-temporel du canal. Ensuite, comme le chapitre précédent, ces mesures seront utilisées pour la validation et l'évaluation du modèle *Starlight*.

La caractérisation spatio-temporelle du canal nécessite de mettre en place une méthode de calcul des DoA précise et pas trop coûteuse en terme de complexité de calcul. Ainsi, un algorithme paramétrique d'estimation des DoA pour un réseau planaire a été développé. Cet algorithme permet d'obtenir une représentation plus compacte des mesures.

Dans ce chapitre, une description des campagnes de mesures est présentée. Les équipements, la configuration et l'environnement de mesures sont décrits. Ensuite, le post-traitement des mesures permettant d'en extraire les paramètres spatio-temporels est détaillé. La méthode d'estimation des DoA développée pour un UPA est décrite. Enfin, les premiers résultats de la caractérisation spatio-temporelle du canal issus des campagnes de mesures sont présentés.

4.2. Campagnes de mesures SIMO

4.2.1. Équipements de mesures

La caractérisation du canal de propagation au niveau du mobile nécessite de mettre en place des dispositifs de mesures assez robustes et compatibles avec un mobile en mouvement. Dans ce contexte, des campagnes de mesures ont été réalisées avec un

sondeur de canal radio mobile et un réseau antennaire embarqué sur le toit d'un véhicule en mouvement.

Ces mesures étant de type SIMO, une seule antenne a été utilisée au niveau de l'émission. En réception, le réseau antennaire utilisé est un réseau planaire virtuel de grande taille (36×105) obtenu à partir d'un réseau linéaire à 36 éléments et le déplacement du véhicule. La chaîne de mesure SIMO est présentée dans la Figure 44.

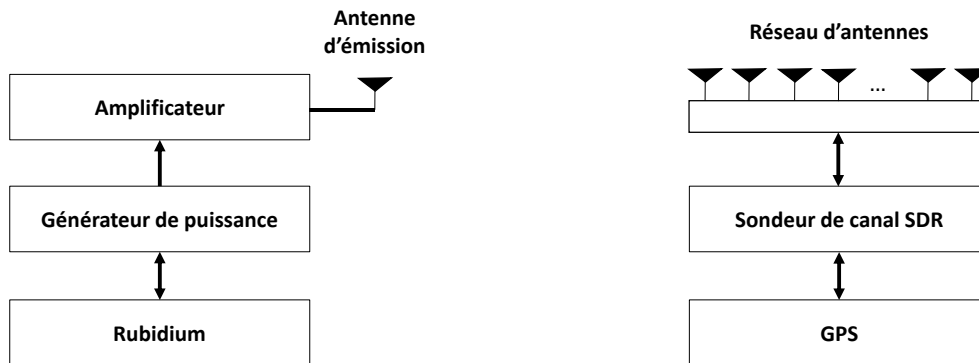


FIGURE 44 : CHAÎNE DE MESURE

Dans cette section, le sondeur de canal mobile utilisé dans la campagne de mesures est d'abord décrit. Ensuite, le réseau d'antenne virtuel est exposé en se focalisant sur les caractéristiques et les limites du dispositif. Enfin, les équipements utilisés au niveau de l'émission sont présentés.

4.2.1.1. Sondeur de canal mobile

Le sondeur spatio-temporel mobile utilisé dans ces campagnes de mesures est basé sur le même principe du sondeur de canal présenté dans le chapitre 3. Il s'agit d'un sondeur basé sur une architecture SDR qui opère en large bande.

Le dispositif radio-logiciel utilisé pour le sondage mobile est l'USRP X310, de la société *Ettus Research*. Cet USRP a été choisi pour sa large bande passante allant jusqu'à 160 MHz, son interface GPIO et son circuit programmable *Xilinx Kintex-7*. L'interface GPIO va permettre d'assurer le contrôle du réseau d'antennes et de simplifier sa connectique avec l'USRP. En effet, le GPIO permet la transmission des signaux en série en mode différentiel. Ainsi, un seul câble RF est nécessaire quel que soit le nombre d'antennes. Pour assurer un fonctionnement en temps réel, le FPGA *Xilinx Kintex-7* de l'USRP a été programmé pour générer des signaux de commutation sur l'interface GPIO. Ceci permettra de contrôler un réseau contenant jusqu'à 4096 antennes.

Le sondage du canal mobile est réalisé au moyen d'une transmission d'un signal périodique. Le module SDR est utilisé pour générer le signal de commutation. La synchronisation émetteur-récepteur, se fait via des modules GPS fournissant les références de temps et de fréquence.

Pour les mesures réalisées dans ce chapitre, le réseau linéaire uniforme (ULA) monté sur le toit du véhicule utilisera la même approche : un accès RF unique pour l'ensemble du réseau et une unité de commutation incluse dans le réseau. L'ensemble du système, contrôlé par un PC, a été intégré dans un rack de 19 pouces à des fins de portabilité, comme indiqué dans la figure 2.

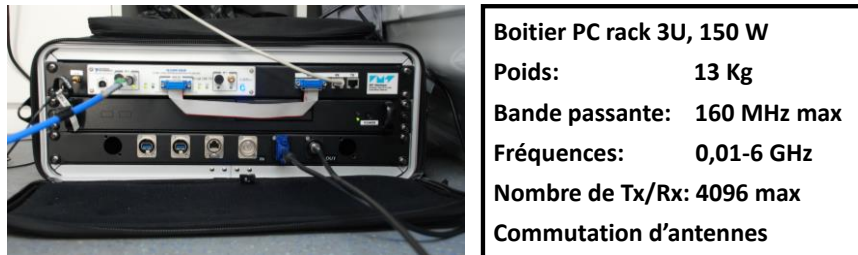


FIGURE 45 : SONDEUR SPATIO-TEMPOREL MOBILE

4.2.1.2. Réseau d'antenne virtuel

La mesure des DoA au niveau du mobile nécessite l'utilisation d'un réseau d'antennes embarqué sur le toit d'un véhicule. Le choix s'est porté sur un très large réseau planaire virtuel 36×105 . En effet, l'utilisation d'un réseau d'antennes permet de réaliser un échantillonnage spatial du signal reçu. Ainsi, plus la taille du réseau est grande plus les paramètres (notamment angulaire) mesurés sont précis.

La construction du réseau UPA virtuel s'effectue en déplaçant un réseau linéaire d'antennes à 36 éléments fixé sur le toit du véhicule. En effet, les ULA sont largement utilisés dans la conception des réseaux d'antennes, pour leur simplicité de mise en œuvre et leur applicabilité à de nombreux algorithmes pour la détection de directions d'arrivée. La Figure 46 illustre le réseau ULA utilisé.



FIGURE 46 : RESEAU LINEAIRE D'ANTENNES MONTE SUR LE TOIT DU VEHICULE DE MESURES

Comme pour toute approche par réseau virtuel, la stationnarité et la stabilité de phase constituent une préoccupation majeure. Chaque voie est sélectionnée successivement au moyen d'une commande numérique. Une horloge synchronisée via GPS est utilisée pour

l'émission et la réception. La synchronisation, fournie ici par GPS, est très importante afin d'exploiter le principe de commutation et de garantir une stabilité de la phase entre la mesure de chaque antenne et ainsi permettre une mise en réseau virtuel.

Les éléments de l'antenne ULA sont espacées de $0,4\lambda$ afin d'éviter l'apparition des lobes de réseau. Cette antenne constitue la première dimension de l'antenne UPA virtuelle. La seconde dimension est obtenue grâce au déplacement du véhicule. La distance entre deux ULA dépend alors de la vitesse v du véhicule et du temps de mesures t_{meas} . Le temps t_{meas} est le temps de mesures entre deux ULA et vaut $3,6\text{ ms}$. Le réseau planaire résultant peut contenir plus d'un millier d'antennes et assure un excellent compromis entre résolution angulaire (en azimut et en élévation). Le principe de création d'une antenne virtuelle est illustré dans la Figure 47. Ce réseau planaire disposé horizontalement permet de calculer les azimuts entre -180° et 180° et les élévations entre 0° et 90° .

Le réseau virtuel UPA utilisé pour les mesures contient 36×105 antennes. Le véhicule se déplace selon l'axe \vec{ox} .

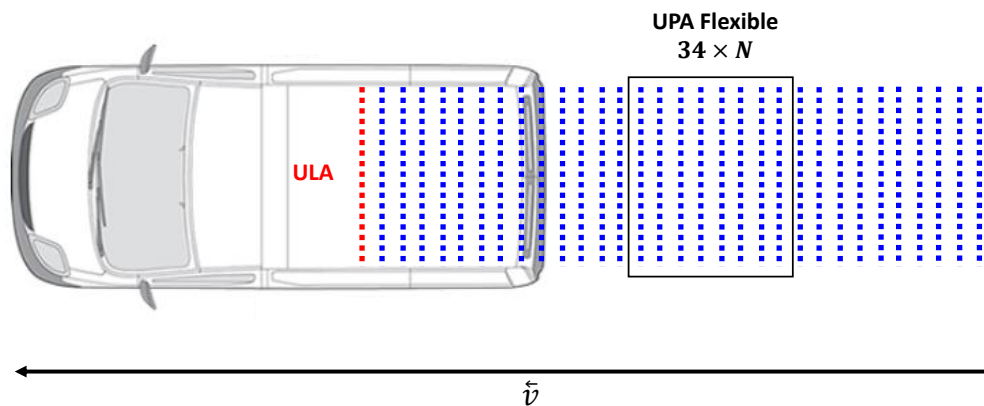


FIGURE 47 : PRINCIPE DU RESEAU VIRTUEL D'ANTENNES

4.2.1.3. Chaîne d'émission

Du côté de l'émetteur, une antenne omnidirectionnelle large bande à polarisation verticale a été utilisée. La forme d'onde du signal émis est transmise à l'antenne via le générateur de puissance. Les mesures dans un environnement *outdoor* nécessitent l'utilisation d'un amplificateur de puissance à la sortie du générateur de puissance pour permettre de mesurer à des distances Tx-Rx suffisamment grandes. Un rubidium a été utilisé pour maintenir la synchronisation émetteur-récepteur. L'ensemble des dispositifs de la chaîne de mesure sont présentés dans la Figure 48.



FIGURE 48 : CHAÎNE D'ÉMISSION

4.2.2. Configuration des campagnes de mesures

Les mesures de canal ont été réalisées dans des environnements *outdoor* avec un réseau planaire virtuel de 36×105 antennes en MS et une antenne omnidirectionnelle en BS. Les réponses impulsionnelles ont été collectées avec le sondeur du canal spatio-temporel mobile, présenté dans 4.2.1.1, sur une largeur de bande de 100 MHz autour d'une fréquence centrale de 3.7 GHz. Ainsi, la résolution temporelle des réponses impulsionnelles est de l'ordre de de 10 ns. Les réponses impulsionnelles mesurées comportent 500 échantillons ce qui correspond à des échos au maximum de $5 \mu s$. La puissance du signal émis a été définie selon les configurations des mesures pour avoir une longue portée du signal.

Les campagnes de mesures ont été menées dans différents environnements extérieurs. Plusieurs configurations ont été investiguées pour déterminer les influences sur les caractéristiques du canal de propagation. La MS a été placée sur le toit d'un véhicule à 2,2 mètres du sol et la BS a été montée sur un mât à hauteur variable et placée sur le toit d'un camion de mesures. Ceci permet de déplacer la BS dans plusieurs sites ainsi que de et d'étudier plusieurs hauteurs d'émission. Dans la suite, on distinguera trois types de scénarios selon la hauteur du BS : BS1 pour BS à 5 mètres, BS2 pour BS à 10 mètres et BS3 pour BS à 12 mètres.

Au total, six campagnes de mesures ont été réalisées dont deux en environnement urbain, une en suburbain, une en rural et deux en espace ouvert (parking). Pendant toutes les mesures, la station de base est maintenue dans une position fixe et le mobile se déplace suivant de nombreux parcours caractérisant ainsi plusieurs liens BS-MS par parcours. Un lien BS-MS correspond à 3780 réponses impulsionnelles mesurées. La totalité des mesures collectées représente plus de 250 Go de données bruts.

Les paramètres de mesures communs à toutes les campagnes sont résumés dans le Tableau 7. Dans la suite, les configurations et scénarios de chaque campagne sont décrits en détails et classifiés selon leurs environnements de propagation. Les liens BS-MS sont identifiés par le nom de l'environnement, le scénario et le parcours.

TABLEAU 7 : PARAMETRES DE MESURES COMMUNS POUR LES CAMPAGNES DE MESURES SIMO

Paramètre	Caractéristique
Fréquence [GHz]	3,7
Largeur de bande [MHz]	100
Longueur de la RI [μ s]	5
Temps de mesures ULA [ms]	0,36
Nombre d'antennes BS	1
Nombre d'antennes MS	36×105
Type du BS	Omni

4.2.2.1. Parking ouvert « PARK »

La première campagne a eu lieu dans un parking ouvert situé dans le campus Techn'hom. Les mesures ont eu lieu pendant la journée avec la présence de quelques voitures garées sur le parking. Ces premières mesures ont été réalisées dans le but de valider le concept de détection des directions d'arrivée à l'aide du réseau planaire virtuel mobile. Les mesures sont réalisées dans une configuration LoS sur 5 parcours. La BS a été placée à deux hauteurs d'abord à 5 mètres puis 10 mètres du sol. La puissance du signal émis était de 14 dBm et les distances BS-MS variaient de 13 à 113 mètres. La Figure 49 illustre un lien BS-MS sur le parking pour BS à 5 mètres du sol.



FIGURE 49 : ILLUSTRATION D'UN LIEN BS-MS SUR LE PARKING POUR BS A 5M

La Figure 50 présente un aperçu de l'environnement de propagation avec la position de la BS et parcours de la MS. Le véhicule roulait à une vitesse quasi-constante de 20 km/h pendant la totalité des parcours.

Dans la suite du chapitre, PARK-BS1 et PARK-BS2 indiquent les mesures effectuées sur le parking respectivement dans les scénarios BS1 et BS2.

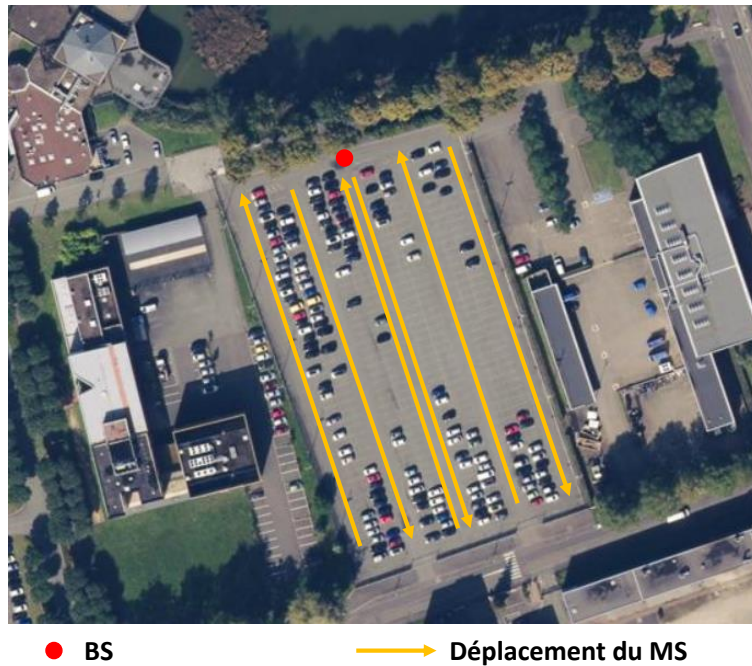


FIGURE 50 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION AVEC LA POSITION DE LA BS ET LES PARCOURS DE LA MS

4.2.2.2. *Street Canyon urbain « SC »*

Ces mesures ont été réalisées dans un environnement urbain de type *Street Canyon* (SC) au centre-ville de Belfort. La station de base a été placée à une position fixe au milieu d'une rue, considérée comme la rue principale de la ville, à deux hauteurs différentes. La circulation dans la rue est dense et les bâtiments sont élevés avec des hauteurs variables comme le montre la Figure 51. On peut voir sur la même figure l'existence d'arbres qui bordent la rue par endroit.



FIGURE 51 : ENVIRONNEMENT DE MESURES AVEC MS ET BS A 10 MÈTRES

Dans cet environnement, les deux scénarios étudiés ont été BS1 et BS2 et seront identifiés respectivement par SC-BS1 et SC-BS2. Pour chaque scénario, la station mobile effectue 3 parcours :

- **SC1** : Il s'agit d'un parcours en LoS, où la MS se déplace le long de la rue où se trouve la BS. Ce parcours a permis de mesurer 90 liens BS-MS pour des distances allant de 10 à 130 mètres.
- **SC2, SC3** : Les deux parcours sont en NLoS, dans deux rues perpendiculaires à la rue où se trouve la BS. Environ 100 liens BS-MS ont été mesurés sur chacun des parcours pour des distances allant de 30 à 220 mètres.

La circulation dense dans cet environnement a fait que la vitesse n'était pas constante sur la totalité des parcours. Cependant, elle était toujours autour de 30 km/h. La Figure 52 représente un aperçu de l'environnement de mesures avec les 3 parcours du MS et la position de la BS.



FIGURE 52 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION SC

4.2.2.3. Urbain « URB »

La 3^{ème} campagne de mesures a eu lieu dans la vieille ville de Belfort pour un environnement urbain. L'environnement est moins dense que dans le centre-ville et la hauteur des bâtiments est relativement variable. Plusieurs arbres bordent les rues et les places dans cet environnement. Les mesures ayant été réalisées pendant la matinée, le trafic automobile est léger. La vitesse du véhicule du MS pour cet environnement n'était pas toujours constante. La Figure 53 illustre l'environnement de mesures.



FIGURE 53 : ENVIRONNEMENT DE MESURES URBAIN AVEC BS À 12 MÈTRES ET MS

Cette campagne étudie trois scénarios BS1 (URB-BS1), BS2 (URB-BS2) et BS3 (URB-BS3) pour BS à 12 mètres. Pour chaque scénario, les liens BS-MS ont été mesurés sur 6 parcours du MS répertoriés dans la Figure 54. On distingue 3 types de parcours par rapport à la BS :

- **Rep** : Le parcours Rep correspond à l'ensemble des mesures réalisées autour de la place « République », où se trouve la BS. En moyenne, 70 positions du MS sont mesurées pour des distances BS-MS de 10 à 80 mètres. Ce parcours est considéré en LoS.
- **Transversal (T1, T2, T3)** : Ces parcours ont été effectués dans des rues transversales en face de la BS. À l'exception du T3, les parcours ont été effectués que pour les scénarios Urb-BS1 et Urb-BS2. Ces parcours sont de 100 à 120 mètres et permettent de mesurer une centaine de liens BS-MS.
- **Parallèle (P1 et P2)** : Ces parcours ont été réalisés dans des rues parallèles à la BS sur 55 mètres où environ une centaine de liens BS-MS ont été mesurés.

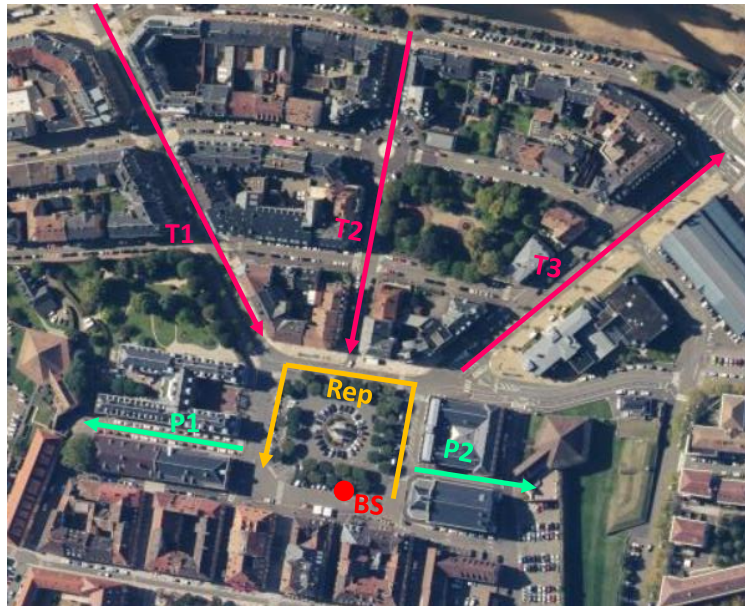


FIGURE 54 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN DE PROPAGATION AVEC LA POSITION DE LA BS ET LES PARCOURS DE LA MS

4.2.2.4. Suburbain « SU »

Cette campagne de mesures a été conduite dans le quartier Le Mont, un quartier résidentiel suburbain de Belfort. Les habitations sont en général de moins de deux étages, les rues à deux voies et le trafic automobile est léger. La végétation dans cet environnement se présente sous forme de feuillage plus ou moins dense par endroit. La Figure 55 présente un aperçu de cet environnement qui sera identifié dans la suite par SU.



FIGURE 55 : ENVIRONNEMENT DE MESURES AVEC MS ET BS A 10 MÈTRES

La BS a été montée à une hauteur de 10 mètres par rapport au sol, et la MS a effectué 4 parcours dont 1 en LoS le long de la rue où la BS a été placée et 3 dans des rues perpendiculaires. La BS étant au-dessus du niveau des toits, la propagation peut s'effectuer au-dessus des toits. Les parcours du MS ont permis de mesurer 229 liens BS-MS en LoS pour R1 et en moyenne 120 liens BS-MS pour R2, R3 et R4, les parcours dans les rues perpendiculaires.

La Figure 56 présente une photographie aérienne de l'environnement avec la position du BS et les parcours du MS.



Figure 56 : Aperçu de l'environnement SU avec la position BS et les parcours du MS

4.2.2.5. Rural « RL »

Ces mesures ont été réalisées dans le village d'Evette-Salbert situé à 7 km de la ville de Belfort. Il s'agit d'un environnement typiquement rural composé de petites maisons entourées de jardins. Les mesures ont eu lieu pendant la matinée, la circulation automobile était très légère. Deux scénarios ont été étudiés BS1 (RL-BS1) et BS2 (RL-BS2). La Figure 57 présente un aperçu de l'environnement réel de propagation.



FIGURE 57 : ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION RURAL POUR BS A 10 MÈTRES

Trois parcours de 200 mètres ont été réalisés : C1, C2 et C3 pour mesurer 300 liens BS-MS chacun. Ces parcours ainsi que la position du BS sont illustrés dans la Figure 58.

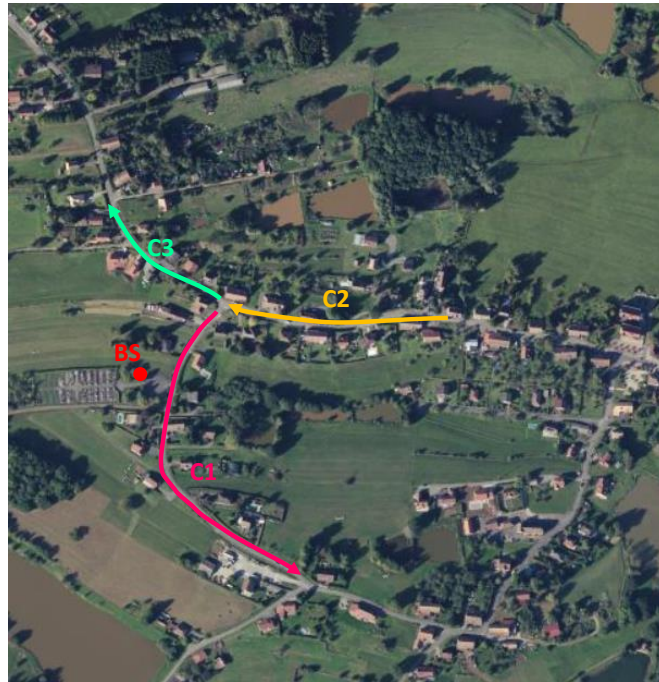


FIGURE 58 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT RURAL AVEC LA POSITION BS ET LES PARCOURS DU MS

4.2.2.6. Zone commerciale « BES »

Cette campagne de mesures a eu lieu dans un parking de la zone commerciale de Bessancourt située à 11 km de Belfort. L'environnement peut être considéré comme suburbain car constitué de plusieurs magasins très peu élevés (1 étage). La BS a été placée sur le parking à 5 et 10 mètres et la MS a réalisé grand parcours sous forme d'une boucle sur le même parking. La Figure 59 illustre l'environnement de propagation.



FIGURE 59 : ENVIRONNEMENT DE MESURES ZONE COMMERCIAL AVEC MS ET BS À 5 MÈTRES

Comme pour les autres campagnes, on distingue deux scénarios : Bes-BS1 pour BS à 5 mètres et Bes-BS2 pour BS à 10 mètres. Le parcours en boucle effectué a permis de mesurer 400 positions du MS dont les distances BS-MS varient de 30 à 230 mètres. La Figure 60 donne un aperçu sur l'environnement de mesures avec la position du BS et le parcours du MS.



FIGURE 60 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT DE PROPAGATION AVEC POSITION DU BS ET PARCOURS DE LA MS

4.2.3. Prétraitement des mesures

Les mesures brutes sont présentées sous forme de fichiers contenant $36 \times 105 = 3780$ fonctions de transfert associé à chaque position du mobile. Pour permettre l'analyse et l'étude spatio-temporelle de ces mesures, un prétraitement est nécessaire. Comme pour les mesures *massive MIMO* du chapitre 3, la phase du prétraitement de ces mesures se fait en trois étapes : calibrage, calcul des réponses impulsionnelles et tri des mesures.

Le calibrage des mesures se fait suivant la méthode *back-to-back* décrite précédemment. Le calcul des réponses impulsionnelles se fait de la même manière en appliquant une fenêtre Hanning aux fonctions de transferts.

Pour avoir des mesures fiables pour le calcul des paramètres de dispersion temporelle et des directions d'arrivée, une phase de sélection des mesures est essentielle. Un filtrage est effectué selon deux critères : la dynamique et la vitesse du véhicule. Ainsi, seules mes mesures avec une dynamique au moins égale à 25 dB sont conservées. Ensuite, la vitesse n'est pas constante sur la totalité du parcours. Ceci devra être pris en compte lors de la construction du réseau d'antennes qui dépend de la vitesse. Pour ce faire, les résultats sont calculés sur des tronçons de parcours où la vitesse est constante.

4.3. Nouvelle méthode d'estimation des DoA en 3D

La technique de transmission *massive MIMO*, qui s'appuie sur des réseaux d'antennes avec de nombreux éléments, requière l'utilisation des modélisations du canal de propagation de plus en plus pointues. Dans les modèles les plus évolués, le canal de

propagation est représenté par un ensemble de trajets dont chacun étant caractérisé par une amplitude, une polarisation, un temps de propagation et des directions d'arrivées en 3 dimensions. Pour ce faire, des algorithmes d'estimations de ces paramètres doivent être appliqués aux mesures collectées du canal.

Dans cette partie, une nouvelle technique d'extraction des trajets en 3D est détaillée. Elle permet une estimation des DoA à partir d'un modèle paramétrique. Cette méthode est à la fois simple et rapide, car elle permet l'extraction simultanée des caractéristiques des trajets. Les performances de cette méthode sont évaluées par des simulations avant d'être appliquée aux mesures.

4.3.1. Introduction

L'estimation 2D des directions d'arrivée, est une technique de traitement de signal très utilisée pour les communications cellulaires (sonar, radar, navigation, etc.). C'est pourquoi, de nombreuses recherches se sont intéressées à ce sujet et différentes méthodes ont été explorées. Les plus anciennes sont les méthodes linéaires qui utilisent l'analyse de Fourier appliquée au domaine spatial comme la technique du *beamforming* expliquée dans le chapitre 3. Ces méthodes sont simples et rapides à mettre en œuvre mais limitées en termes de résolutions angulaire et temporelle. Par conséquent, des méthodes à haute résolution ont été proposées pour permettre la détection des DoA avec de meilleures résolutions.

Les méthodes haute résolution sont basées sur la représentation paramétrique du canal pour obtenir une représentation discrète, compacte et compatible avec les modélisations de canaux. Parmi les méthodes les plus connues on trouve la méthode à décomposition en sous-espaces MUSIC [64], la méthode d'estimation via des techniques d'invariance par rotation ESPRIT [65] et la méthode du maximum de vraisemblance SAGE [66]. Malgré leurs bonnes performances, ces méthodes restent confrontées à un problème majeur dans le cas 2D, c'est le coût calculatoire élevé. Ceci rend son utilisation dans des outils d'ingénierie très compliquée. Ces techniques d'estimation n'ont pas été abordées au cours de la thèse donc ne sont détaillées.

Dans cette partie, nous tirons parti des caractéristiques du réseau planaire et dérivons un nouveau algorithme de méthode d'estimation des 2D-DoA à partir d'une représentation paramétrique des mesures. Cette méthode est précise, à faible coût calculatoire et facile à appliquer dans des outils d'ingénierie, car compatible pour un fonctionnement en temps-réel et facile à mettre en œuvre.

4.3.2. La méthode d'estimation 2D-DoA

4.3.2.1. Principe de la méthode

Dans cette thèse, nous proposons une solution efficace qui exploite véritablement la structure rectangulaire de l'antenne utilisée dans les mesures tout en réduisant la complexité d'estimation. L'approche proposée utilise le principe de la méthode CLEAN

dans la recherche des trajets à partir d'une représentation paramétrique des données mesurées. En effet, la méthode utilise les déphasages introduits par le réseau pour estimer simultanément les directions d'arrivées en azimut et en élévation, ce qui permet de réduire considérablement la complexité calculatoire.

4.3.2.2. Modélisation des mesures

Nous considérons un réseau antennaire planaire (UPA) de taille $M \times N$, constitué de N réseaux linéaires ULA, contenant chacun M antennes. La première antenne est considérée comme l'origine du système de coordonnées. Le véhicule se déplaçant selon l'axe $o\vec{y}$, l'inter-distance entre les réseaux d'antennes ULA dépend du temps de mesures t_{meas} et la vitesse du véhicule v : $\Delta y = v \times t_{meas}$. La distance séparant les antennes est fixé à $\Delta x = 0,4\lambda$ pour éviter les lobes de réseau. Ce réseau est schématisé dans la Figure 61.

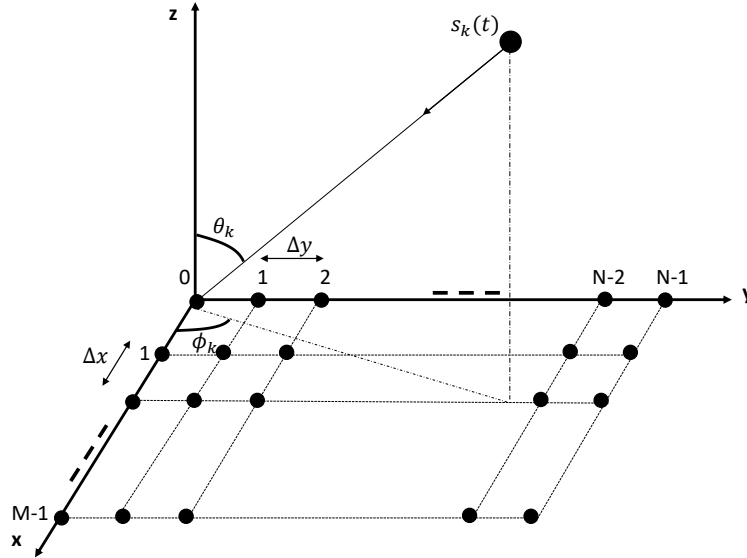


FIGURE 61 : RESEAU D'ANTENNES UPA SCHEMATISE

Supposons que le réseau UPA reçoit K rayons ayant empruntés des trajets différents et que chaque rayon k arrive d'une direction (θ_k, ϕ_k) avec une amplitude $A_k(\tau, x, y)$. Les signaux reçus d'un réseau planaire peuvent être considérés comme des échantillons spatiaux du signal reçu. Ainsi, des déphasages géométriques sont introduits par le réseau respectivement suivant les axes $o\vec{x}$ et $o\vec{y}$:

$$\varphi_{x_k} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x (k-1) f_{x_k} \text{ et } \varphi_{y_k} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta y (k-1) f_{y_k} \text{ avec :} \quad (39)$$

$$\begin{cases} f_{x_k} = \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ f_{y_k} = \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \end{cases}$$

Les réponses impulsionnelles collectées par le réseau s'écrivent alors :

$$\forall (x, y) \in [1, N] \times [1, M] \quad h(\tau, x, y) = \sum_k A_k(\tau, x, y) e^{j2\pi(f_{x_k}x + f_{y_k}y)} \quad (40)$$

L'équation (40) montre que pour identifier les différents trajets arrivant à l'antenne, il suffit d'estimer les vecteurs A , f_x et f_y contenant les caractéristiques : amplitude et directions d'arrivées des trajets. Ensuite, pour un trajet k les DoA sont déduites à partir de (39) et (40) :

$$\begin{cases} \theta_k = \sin^{-1} \left(\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \right) \\ \phi_k = \arctan \left(\frac{f_y}{f_x} \right) \end{cases} \quad (41)$$

4.3.2.3. Algorithme de la méthode

L'algorithme correspondant est détaillé dans la Figure 62. Il s'agit d'un algorithme itératif qui permet à chaque itération d'identifier un trajet et calculer ses caractéristiques. À chaque itération la contribution du trajet identifié sera retranchée des données initiales pour continuer la recherche des trajets.

Les données initiales sont constituées par la réponse impulsionnelle récupérée avec l'antenne *massive* $h(\tau, x, y)$. La première étape consiste à appliquer la transformée de fourrier tridimensionnelle aux RI mesurées (42) afin d'identifier l'amplitude, le temps de retard, et les fréquences f_{x_k} et f_{y_k} concentrant le plus d'énergie selon l'équation (43). Ensuite, les directions d'arrivée θ_k et ϕ_k sont calculées au niveau de ce temps de retard à partir des fréquences f_{x_k} et f_{y_k} estimées suivant l'équation (41). Cette étape diminue le temps de calcul, car elle permet d'estimer simultanément toutes les caractéristiques du trajet.

$$H(\tau, \nu_x, \nu_y) = TF\{h(\tau, x, y)\} \quad (42)$$

$$\begin{cases} (\tau_k, f_{x_k}, f_{y_k}) = \arg \max H(\tau, f_x, f_y) \\ A_k = H(\tau_k, f_{x_k}, f_{y_k}) \end{cases} \quad (43)$$

Une fois le trajet identifié, si sa puissance est suffisante le trajet est conservé et une RI est construite à partir de ses caractéristiques. Dans le cas contraire, le trajet identifié est rejeté et son temps de retard est exclu de la zone exploration.

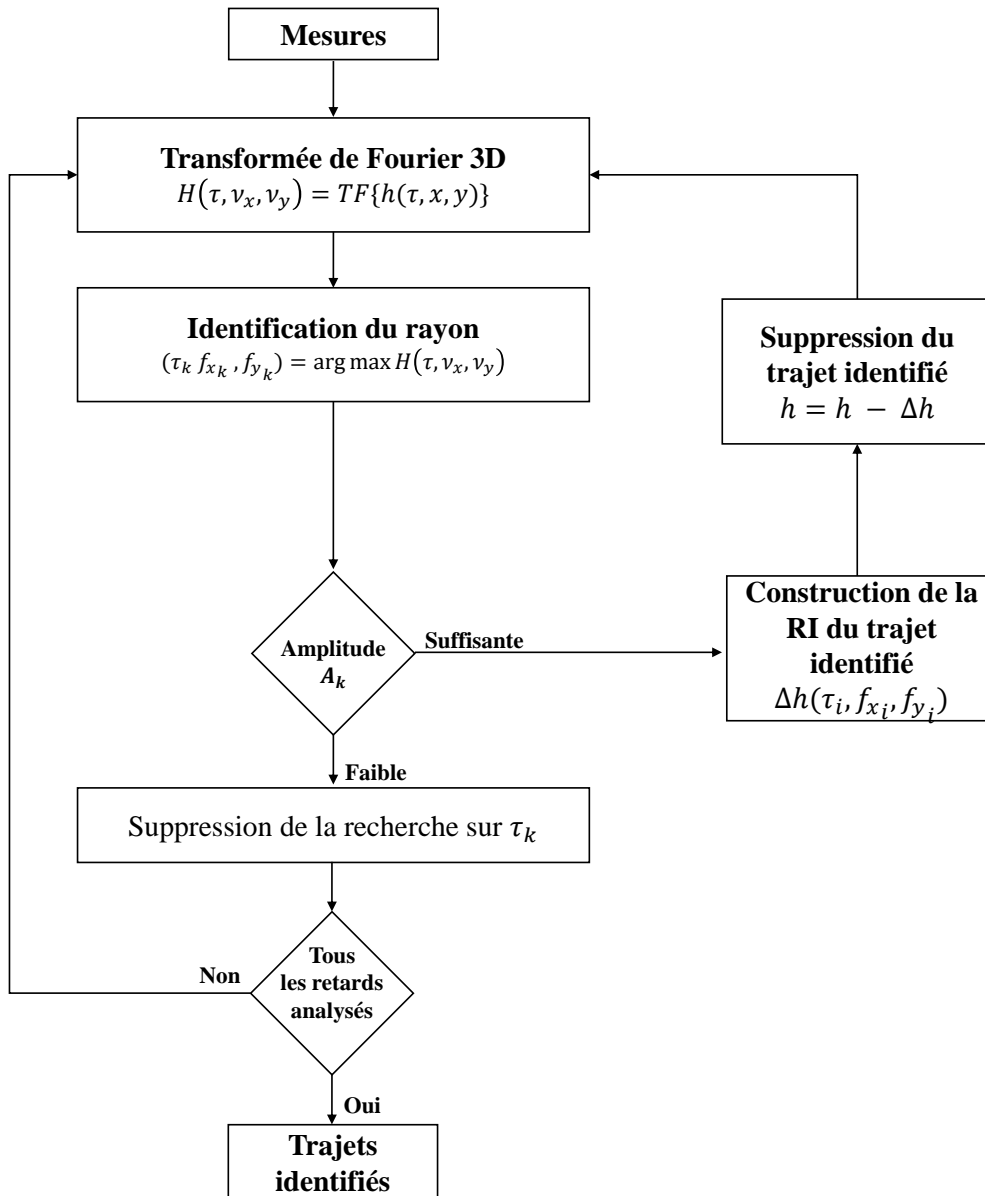


FIGURE 62 : DESCRIPTION DE L'ALGORITHME D'ESTIMATION 2D-DOA

4.3.3. Évaluation de l'algorithme

4.3.3.1. Identification d'un trajet unique

Pour évaluer les performances de cet algorithme, plusieurs simulations ont été réalisées sous MATLABTM. La configuration antennaire UPA retenue pour les simulations est celle utilisée pour les mesures 36×105 et une réponse impulsionnelle 3D $h(\tau, x, y)$ est simulée. Dans un premier temps, une série de simulations contenant un unique trajet avec des caractéristiques aléatoires a permis de vérifier le bon fonctionnement de l'algorithme. Ce trajet est toujours bien estimé et la reconstruction de la réponse impulsionnelle est parfaite quelles que soit ces caractéristiques. La Figure 63 illustre

trois exemples d'estimation d'un unique rayon dont les caractéristiques sont différentes. En bleu le trajet simulé et en rouge son estimé.

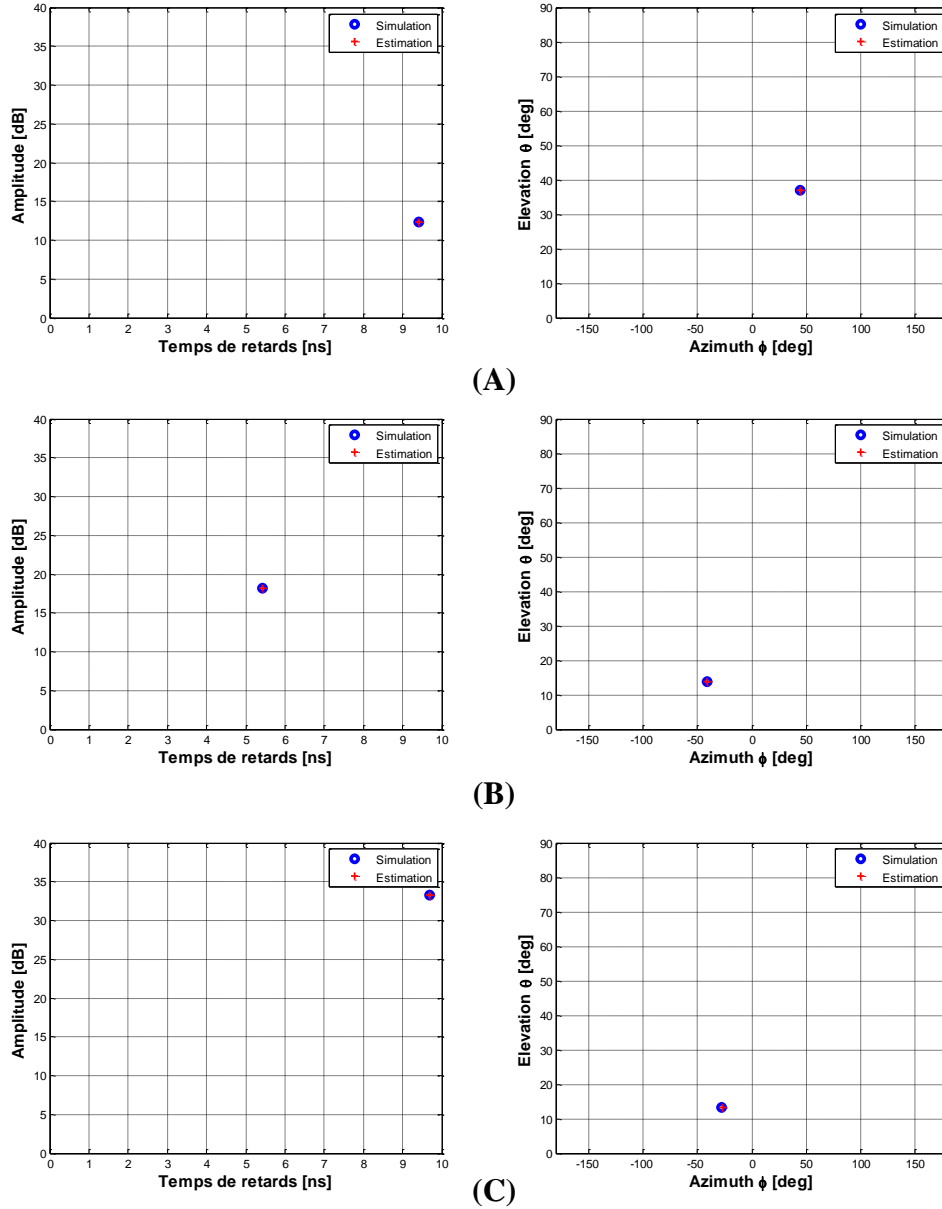


FIGURE 63 : ESTIMATION D'UN TRAJET UNIQUE AVEC DES CARACTERISTIQUES DIFFÉRENTES

4.3.3.2. Identification des multi-trajets

Pour se rapprocher de configurations réalistes des mesures de propagation, un canal à 20 trajets a été simulé. Comme pour les premières simulations, le réseau d'antenne considéré est de 36×105 et les caractéristiques des trajets sont choisis d'une manière aléatoire. Les simulations ont été effectuées pour des temps de retard des trajets uniformément distribués dans un intervalle de 10 ns.

Les 20 premiers trajets calculés par l'algorithme représentent 90% de l'énergie totale de la RI simulée, comme il est montré dans la Figure 64. Les 10% restants correspondent au bruit lié au résidu. Ainsi, la totalité de la composante déterministe a bien été estimée par la méthode. Les caractéristiques des trajets simulés et estimés sont répertoriées dans le Tableau 8.

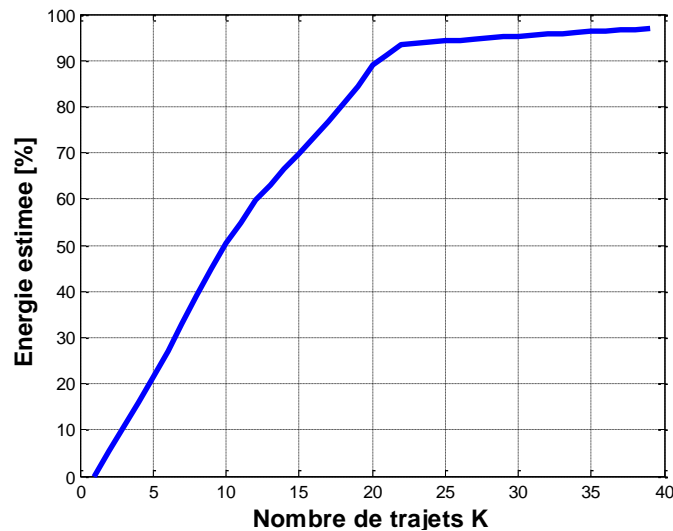


FIGURE 64 : ÉNERGIE DES RAYONS IDENTIFIES PAR RAPPORT A L'ENERGIE TOTALE EN POURCENTAGE

Pour avoir une vue globale de cette estimation, la Figure 65 compare les données simulées et leurs estimées dans le domaine temporel et la Figure 66 dans le domaine angulaire. Les ronds bleus correspondent aux données simulées et les croix rouges à celles estimées. Ces figures montrent bien que les temps de retards, amplitudes, ainsi que les DoA ont bien été identifiés pour tous les trajets. Cette méthode permet d'obtenir des estimations parfaites même pour les trajets avec les mêmes retards et provenant des directions voisines comme les rayons 18 et 19.

Des simulations réalisées avec 5 trajets, tous arrivant avec un même temps de retards ou de la même direction conduisent à des résultats similaires.

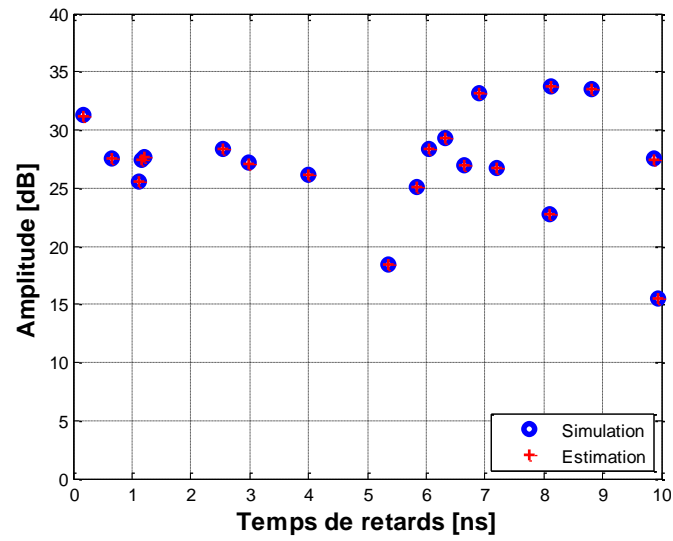


FIGURE 65 : COMPARAISON ENTRE TRAJETS SIMULÉS ET ESTIMÉS DANS LE DOMAINE TEMPOREL

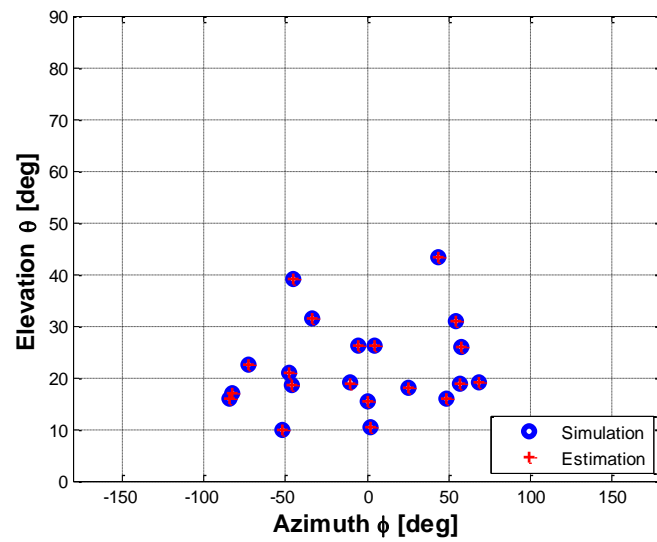


FIGURE 66 : COMPARAISON ENTRE TRAJETS SIMULÉS ET ESTIMÉS DANS LE DOMAINE ANGULAIRE

TABLEAU 8 : CARACTERISTIQUES DES TRAJETS SIMULÉS (NOIR) ET ESTIMÉS (ROUGE)

Indice rayon	Retard [ns]	DoA [deg]		Amplitude [dB]
		θ	ϕ	
1	0,18	18,76	56,97	31,24
	0,18	18,77	56,88	31,21
2	0,66	26,24	4,42	27,55
	0,66	26,21	4,43	27,52
3	1,12	30,84	54,30	25,58
	1,12	30,81	54,30	25,56
4	1,16	18,44	-45,78	27,42
	1,16	18,43	-45,75	27,41
5	1,20	43,36	43,52	27,65
	1,20	43,36	43,50	27,64
6	2,53	17,98	25,46	28,40
	2,53	17,96	25,51	28,37
7	2,97	15,97	-84,01	27,14
	2,97	15,95	-84,08	27,12
8	4,00	31,38	-33,27	26,09
	4,00	31,40	-33,30	26,08
9	5,34	25,79	57,70	18,39
	5,34	25,81	57,73	18,39
10	5,83	16,98	-82,55	25,05
	5,83	17,00	-82,51	25,03
11	6,05	26,12	-5,40	28,39
	6,05	26,13	-5,47	28,39
12	6,33	39,10	-45,00	29,31
	6,33	39,13	-45	29,30
13	6,65	15,43	0,10	26,94
	6,65	15,40	0,21	26,90
14	6,90	20,92	-47,50	33,13
	6,90	20,93	-47,54	33,13
15	7,21	10,44	2,20	26,69
	7,21	10,41	2,16	26,67
16	8,10	19,03	68,58	22,75
	8,10	19,04	68,58	22,75
17	8,12	18,95	-10,45	33,72
	8,12	18,94	-10,39	33,71
18	8,81	22,48	-72,70	33,55
	8,81	22,48	-72,76	33,53
19	8,81	22,61	-71,79	8,61
	8,81	22,61	-71,79	8,61
20	9,87	16,01	48,36	27,48
	9,87	16,02	48,29	27,46

4.4. Post-traitement des mesures

Afin de permettre la caractérisation du canal de propagation en temps et en espace au niveau de la MS, la réponse impulsionnelle spatio-temporelle mesurée $h(\tau, x, y)$ est représentée sous forme compacte en identifiant les rayons qu'elle contient et leurs caractéristiques. Cette représentation permet l'identification et l'analyse des phénomènes de propagation et par conséquent une bonne modélisation des multi-trajets.

La méthode retenue est celle décrite dans la section précédente. Cette dernière permet d'identifier le retard de propagation, l'amplitude et les 2D-DoA (azimut et élévation) de chaque rayon par une recherche de maximums locaux dans les trois dimensions contenues dans la réponse impulsionnelle spatio-temporelle. Pour optimiser le temps de calcul et extraire les rayons pertinents, nous avons choisi de nous limiter aux 20 premiers rayons détectés ce qui représente entre 65% et 90% de l'énergie totale.

Les directions d'arrivées estimées sont définies par la Figure 67. L'origine des azimuts correspond à l'orientation du véhicule qui coïncide généralement avec l'axe de la rue dans laquelle il se trouve. Les élévations varient de 0° à 90° à cause de la configuration de l'antenne MS, 0° correspond aux rayons qui arrivent du même niveau que la MS et 90° aux rayons qui arrivent perpendiculairement à l'antenne.

Les résultats de mesures sont analysés grâce aux profils de puissance en temps (PDP) et en espace PAP (Power Azimuth Profile) et PEP (Power Elevation Profile) qui permettent de quantifier la répartition de la puissance reçue en temps et en espace. Pour simplifier l'interprétation des multi-trajets, les puissances ont été normalisées et le PDP est tracé en fonction de la longueur des trajets en mètres. Les paramètres d'étalement DS, AAS et EAS sont ensuite calculés à 20 dB de dynamique pour évaluer la sélectivité temporelle et spatiale du canal.

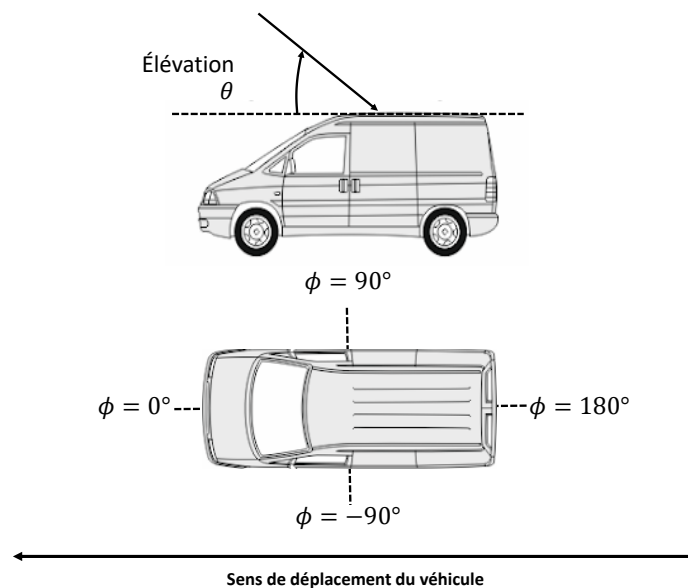


FIGURE 67 : REFERENTIEL ANGULAIRE EN AZIMUT ϕ ET EN ELEVATION θ

4.5. Analyse des mesures et caractérisation du canal de propagation

Dans cette section sont présentés les résultats de caractérisation issus des campagnes de mesure réalisée dans des environnements extérieurs. L'objectif principal est d'apporter une caractérisation complète du canal de propagation au niveau du mobile en étudiant les paramètres d'étalement DS, AAS et EAS.

La première partie est consacrée à l'étude de deux exemples de lien BS-MS dans un environnement de propagation urbain typique en LoS et NLoS pour chaque hauteur de la BS. Ceci a pour but d'illustrer certaines propriétés spatio-temporelles du canal de propagation et mettre en évidence l'impact de la hauteur de la BS sur les profils de puissance. Ensuite, une deuxième partie est dédiée à l'analyse statistique des paramètres spatio-temporels pour chaque environnement de propagation afin d'en tirer les principales tendances.

4.5.1. Étude d'un lien BS-MS

4.5.1.1. En visibilité

Dans un premier temps, un exemple de lien BS-MS où la station de base et le mobile sont en situation de visibilité est étudié pour les deux configurations BS1 et BS2, où la BS est respectivement à 5 et 10 mètres. La Figure 68 représente le lien BS-MS étudié dans son environnement de propagation.



FIGURE 68 : LIEN BS-MS EN VISIBILITE DANS L'ENVIRONNEMENT SC

Les résultats de mesures, à savoir les PDPs, les 2D-DoAs, PAPs et les PEPs pour les configurations BS1 et BS2, sont données respectivement par les Figure 69 et Figure 70. Pour la configuration BS1, la PDP montre l'existence d'un trajet dominant qui représente 60% de l'énergie totale. Ce dernier correspond au trajet direct entre la BS et la MS et arrive de la direction ($\theta = 5^\circ, \phi = 33^\circ$) qui correspond à peu près à la position de la BS. De plus, un deuxième trajet avec une amplitude relative de -15 dB est observé sur la même figure. Cependant, afin de bien identifier l'origine de ce trajet il

faut examiner les 2D-DoA au niveau du mobile. Trois rayons ont été identifiés, y compris le trajet direct, dont les azimuts correspondent à l'angle entre l'origine des azimuts et les bâtiments qui bordent la rue et dont les élévations varient de 5° à 30° . L'ensemble des trajets identifiés permettent de modéliser 77% de l'énergie totale. Le 1^{er} multi-trajet arrive avec un faible retard par rapport au trajet direct, une amplitude relative de -9 dB et une élévation de 15° . Ce trajet semble subir une diffraction avant d'arriver au mobile. Le 2^{ème} multi-trajet est observable sur la PDP à 95m , il est affaibli de 15 dB par rapport au trajet direct et provient presque du même azimut que le 1^{er} mais avec une élévation plus élevée de 30° . La propagation dans ce type d'environnement peut être guidée par des réflexions successives sur les bâtiments le long de la rue, ce qui rend l'identification du phénomène de propagation compliquée pour certains rayons.

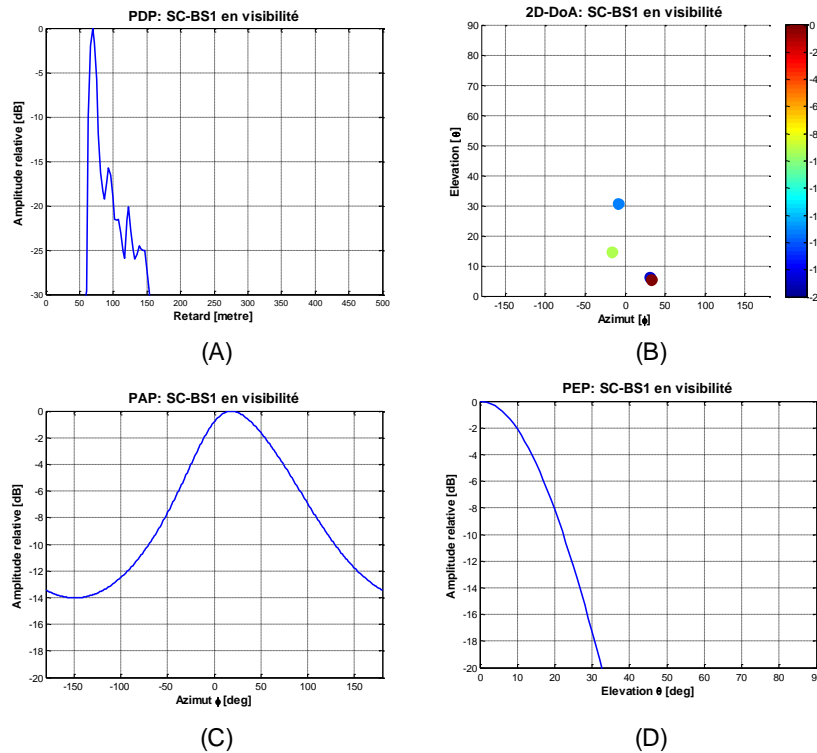


FIGURE 69 : RESULTAT D'ANALYSE POUR UN EXEMPLE DE SC-BS1 : (A)- PDP, (B)- 2D-DOA, (C)- PAP, (D)- PEP

En ce qui concerne la configuration BS2, la PDP permet de distinguer le trajet direct qui est le plus puissant et représente 80% de l'énergie totale. Contrairement à la configuration BS1, il est difficile d'identifier la présence des multi-trajets à partir de la PDP dans une dynamique de 20 dB. La méthode d'identification des rayons a permis de détecter trois trajets modélisant ainsi 84% de l'énergie totale. Comme la BS1, les azimuts calculés correspondent à l'angle entre l'origine des azimuts et les bâtiments qui bordent la rue. Néanmoins, les élévations sont moins dispersées et varient de 10° à 23° . Le trajet direct arrive de la direction $(\theta = 10^\circ, \phi = 32^\circ)$ qui correspond à la position de la BS. Le 1^{er} multi-trajet est le même que celui identifié pour la configuration BS1. En effet, ce dernier arrive avec quasiment le même temps de retard, même amplitude

relative et le même azimut mais avec une élévation plus élevée. Le 2^{ème} multi-trajet est affaibli de 19 dB par rapport au trajet direct et arrive du même azimut que le 1^{er} multi-trajet et avec une élévation de 23°. Comme indiqué, il n'est pas évident d'identifier la trajectoire de ce trajet.

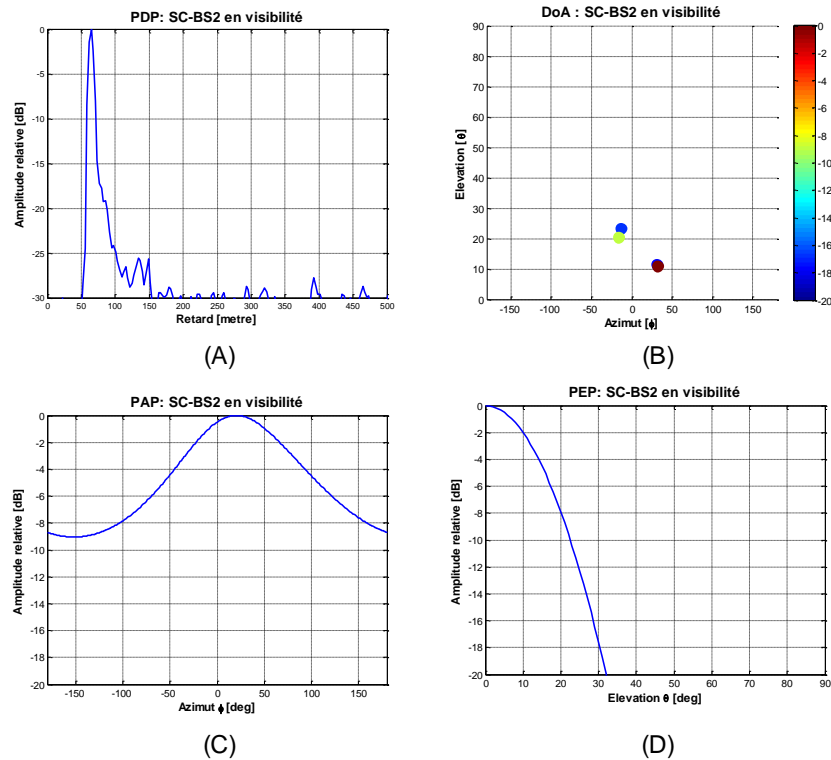


FIGURE 70 : RESULTAT D'ANALYSE POUR UN EXEMPLE DE SC-BS2 : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP

Les profils de puissance en élévation PEP pour les deux configurations BS1 et BS2 sont identiques et présentent une forme en double exponentielle centrée en 0. Les profils de puissance en azimut PAP donnent une répartition normale asymétrique centrée autour de 20°. Ceci s'explique par le mécanisme de propagation d'ondes guidées par les phénomènes de réflexions successives. En termes de paramètres d'étalement, ce dernier est plus élevé en temps et en élévation pour BS1 mais reste le même en azimut :

- DS est de 18 ns pour BS1 contre 12 ns pour BS2.
- AS est 20° pour les deux configurations.
- ES est de 6° pour BS1 et 4° pour BS2..

4.5.1.2. En non visibilité

Le deuxième exemple de mesures est situé dans le même environnement SC urbain mais en situation de non visibilité. La BS et le mobile se trouvent dans deux rues différentes et sont distants de 110 m. La Figure 71 représente ce lien BS-MS étudié dans son environnement de propagation.



FIGURE 71 : LIEN BS-MS EN NON VISIBILITE DANS L'ENVIRONNEMENT SC

Les résultats de caractérisation pour la configuration BS1 sont présentés dans la Figure 72. L'algorithme d'identification des rayons a permis de retrouver 65% de l'énergie totale. Les azimuts des rayons identifiés varient de -50° à 80° et les élévations correspondantes varient légèrement autour de 8° . Le profil moyen de puissance montre que le 1^{er} trajet arrivant ne correspond pas au trajet le plus puissant. En effet, le 1^{er} trajet (90 m) arrivant de la direction ($\theta = 9^\circ$, $\phi = -40^\circ$) correspond à un rayon ayant subi une diffraction sur l'arête du bâtiment qui se situe dans le coin de rue et qui est en double visibilité entre la BS et le MS. Le 2^{ème} trajet (107 m) qui comporte le maximum d'énergie provient de la direction ($\theta = 8^\circ$, $\phi = -43^\circ$) et semble avoir subi une réflexion sur le bâtiment en vis-à-vis de la BS. L'observation des résultats permet de détecter un 3^{ème} trajet qui arrive de l'autre côté de la rue avec une amplitude relative de -10 dB. De plus, plusieurs trajets détectés se situent dans des directions de ($\theta = 8^\circ$, $\phi = -42^\circ$), ($\theta = 7^\circ$, $\phi = 50^\circ$) et ($\theta = 5^\circ$, $\phi = 80^\circ$). La faible élévation de ces trajets montre que la propagation est guidée par des réflexions et diffractions multiples.

Les résultats concernant la configuration BS2 en non visibilité sont donnés dans la Figure 73. L'ensemble des trajets identifiés permet de modéliser 68% de l'énergie totale. Les azimuts des rayons identifiés varient de -53° à 70° . Cependant, les élévations pour cette configuration sont plus dispersées que dans le cas BS1. Le PDP montre l'existence de deux trajets principaux : un premier qui arrive avec un faible retard et un deuxième qui arrive avec le maximum d'énergie. Ces deux trajets sont les mêmes que ceux trouvés pour la configuration BS1, mais avec plus d'élévation car la BS dans ce cas est à 10 m de hauteur. La visualisation de la répartition des 2D-DoA des rayons permet d'identifier une direction principale ($\theta = 12^\circ$, $\phi = -40^\circ$), ainsi qu'une secondaire ($\theta = 10^\circ$, $\phi = 70^\circ$). Aussi, deux trajets de longueur 145 m et 166 m arrivent respectivement avec une amplitude relative de -14 dB et -18 dB, et des directions ($\theta = 17^\circ$, $\phi = -25^\circ$) et ($\theta = 28^\circ$, $\phi = -13^\circ$). Ces deux rayons correspondent à des rayons ayant subi des réflexions multiples puis atteignant le mobile par une dernière diffraction sur l'arête supérieure du bâtiment vis-à-vis de la rue où se situe le mobile.

L'analyse des PAP montre que l'énergie est concentrée dans les directions des bâtiments encaissant les rues. Ceci est une caractéristique des SC. Le maximum d'énergie est dans la direction d'azimut $\phi = -40^\circ$

L'étude des liens BS-MS en visibilité et non visibilité dans un environnement de type SC urbain a montré que le mécanisme de propagation rencontré est celui de la propagation guidée. Ce mécanisme correspond à la propagation par réflexions successives sur les bâtiments situés le long des deux côtés de la rue. Ce mécanisme (*Street guided propagation*) est très répandu en environnement urbain et a été identifié dans [68] et [69]. Ces deux articles ont permis d'identifier un autre mécanisme le *Diffraction over rooftop*, où l'onde se propage par diffractions multiples au-dessus des toits avant d'arriver au récepteur. Ce mécanisme n'intervient pas dans ces mesures à cause du BS qui était au-dessous du niveau des toits dans les deux cas BS1 et BS2.

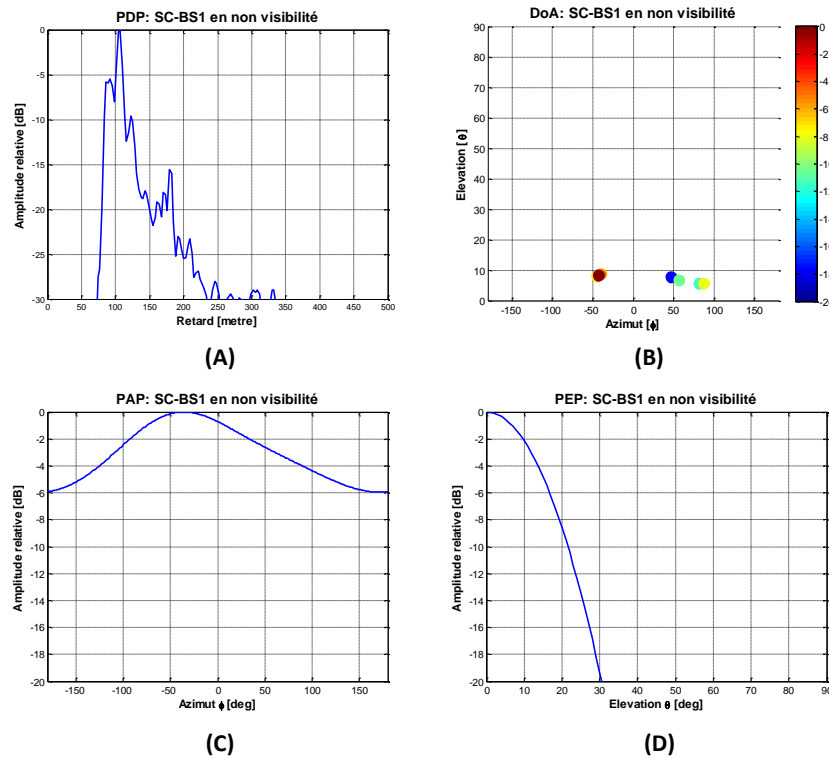


FIGURE 72 : RESULTAT D'ANALYSE POUR UN EXEMPLE DE SC-BS1 EN NON VISIBILITE : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP

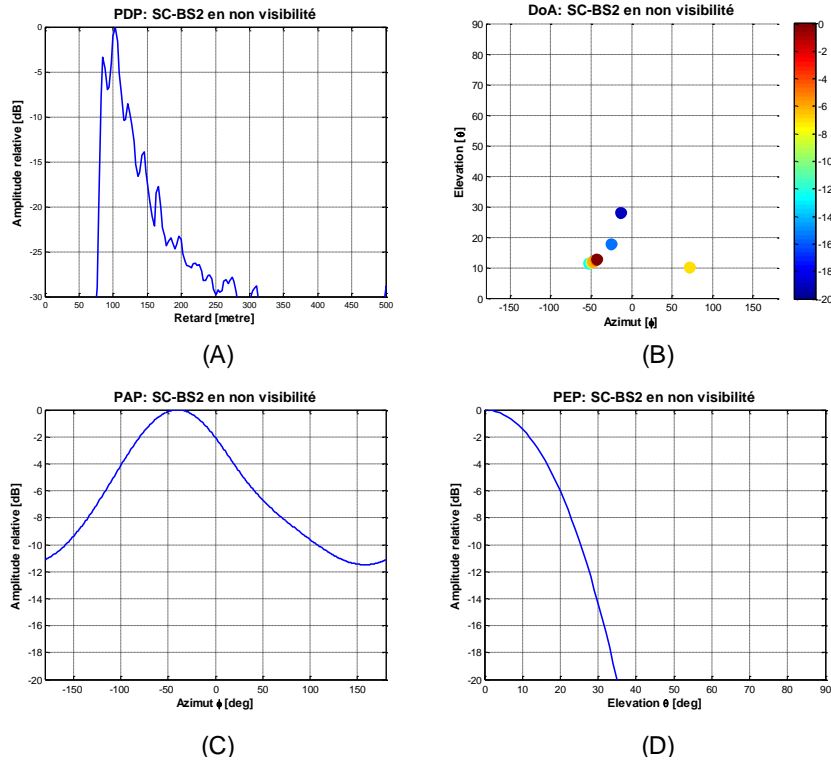


FIGURE 73 : RESULTAT D'ANALYSE POUR UN EXEMPLE DE SC-BS2 EN NON VISIBILITE : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP

4.5.2. Analyse statistique des paramètres de propagation

L'objectif de cette partie est d'apporter une analyse statistique des paramètres spatio-temporels afin de caractériser le canal de propagation d'une manière fiable. Pour chaque environnement, les paramètres synthétiques de propagation tels que l'étalement des retards, des azimuts et des élévations ont été étudiés. L'impact de la hauteur de la BS et la distance BS-MS ont été investigués pour différents types d'environnement.

4.5.2.1. Mesures en *Street Canyon* urbain

La campagne de mesures SC a permis de mesurer 3 trajets pour les deux configurations BS1 et BS2, où BS est placé respectivement, à 5 et 10 mètres de hauteur. Le premier trajet SC1 correspond à la configuration où la station de base et le mobile sont en visibilité l'un de l'autre, tandis que les trajets SC2 et SC3 ont été réalisés dans des rues en situation de non visibilité entre la BS et le mobile. Comme les trajets SC2 et SC3 ont été réalisés dans les mêmes conditions et donnent les mêmes performances, les trajets étudiés dans cette section sont SC1 en Los et SC2 en NLoS.

Tout d'abord, les paramètres de propagation DS, AAS et EAS ont été calculés pour 90 liens BS-MS différents avec une valeur de seuil de 20 dB. Les courbes de distribution cumulées (CDF) correspondantes (voir Figure 74) ont été tracées pour chaque hauteur de BS. Le Tableau 9 regroupe les valeurs moyennes des paramètres pour chaque configuration de mesures.

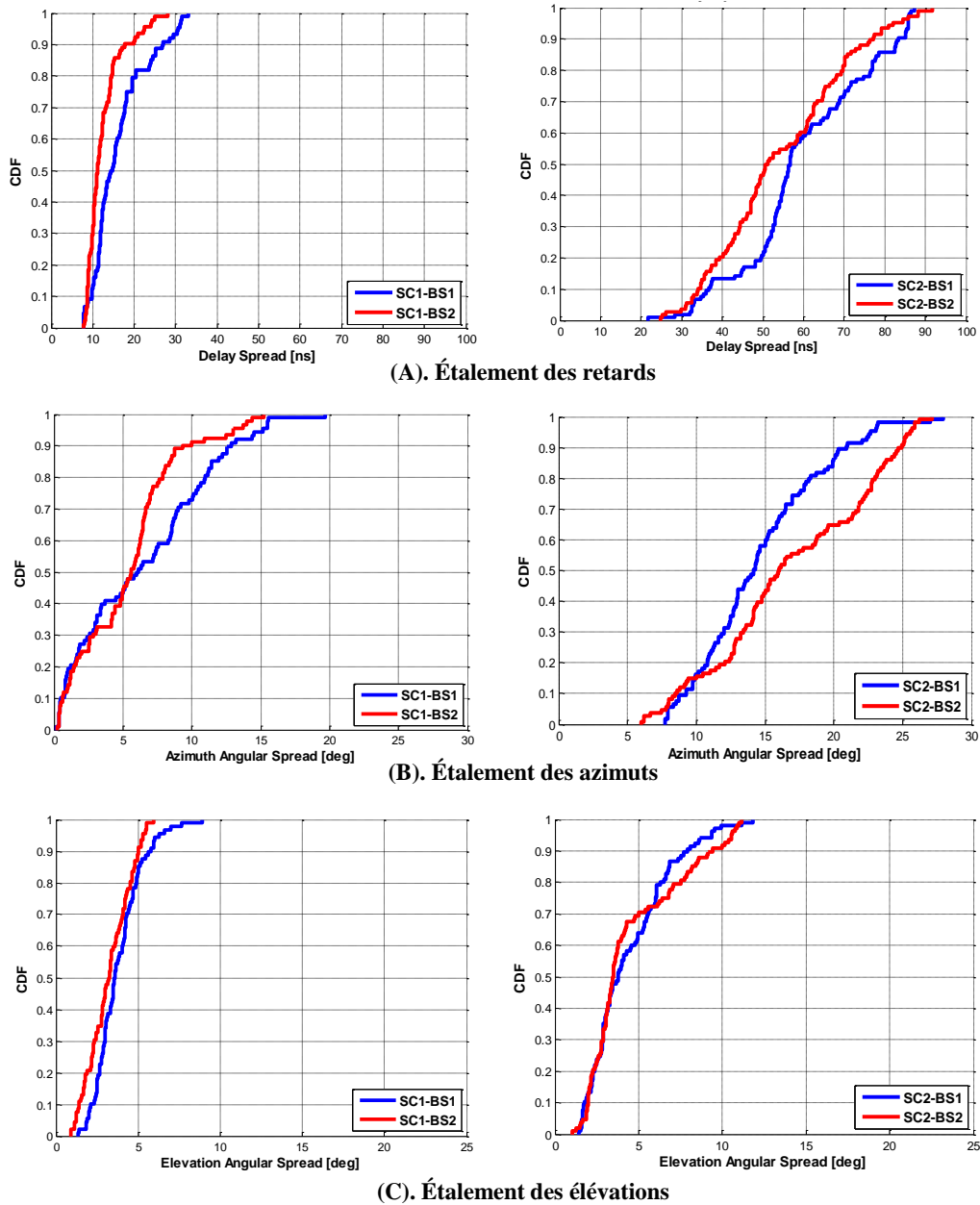


FIGURE 74 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LES DEUX TRAJET SC1 (A GAUCHE) ET SC2 (A DROITE)

Les résultats montrent que les fonctions de répartition cumulées sont plus étalées pour le trajet SC2 en NLoS que pour le SC1 en LoS. A 95% de probabilité cumulative, la valeur du DS est comprise entre 22 et 30 ns dans les conditions LoS alors qu'elle est de 82 ns dans les conditions NLoS. La même chose est observée à 50%, avec environ 13 ns d'étalement en LoS et 50 ns en NLoS. Ces valeurs sont plus petites que celles présentées dans l'ITU-R à 3.7 GHz pour un environnement urbain élevé [70]. Ceci peut être expliqué par la différence des configurations de mesures : hauteur de BS faible (1,9m) et distance BS-MS allant jusqu'à 250 m. La même tendance est observée pour

les étalements en azimut et en élévation. Les valeurs de l'AAS et de l'EAS sont plus dispersées en conditions NLoS. En effet, à 95% le AAS et le EAS sont respectivement de 15° et 6° en LoS, ainsi que de 26° et 11° en NLoS. Comme pour le DS, les valeurs de l'AAS obtenues sont plus faibles que celles données par l'ITU-R. Les valeurs moyennes des étalements sont inférieures à celles trouvées dans la littérature, notamment celle du 3GPP, [71][56][59]. Cependant, les résultats sont semblables à ceux reportés dans [72] où les mesures ont été réalisées dans les mêmes environnements que la ville de Belfort.

Les fonctions CDF de DS tracées pour chaque hauteur de BS permettent de noter que les valeurs du DS sont plus étalées quand la BS est à 5m et les moyennes du DS sont plus grandes (voir Tableau 9). Ceci est en accord avec les résultats de [72] et [73] qui étudient l'effet de la hauteur d'antenne sur l'étalement de retard respectivement à 2,5 GHz et à 915 MHz, tandis que dans [74] et [75] le comportement contraire est observé pour des fréquences plus élevées à 5,3 GHz. Cette dispersion de résultats peut être due à la fréquence utilisée. Les étalements angulaires en azimut et en élévation sont moins impactés par la hauteur du BS. En effet, les valeurs du AAS et du EAS à 95% et 50% pour le BS1 sont à peu près identiques à ceux du BS2 en conditions LoS et NLoS. La moyenne des AAS pour BS1 est de 5° et de 6° pour BS2 en LoS, et de 14° pour BS1 et 17° pour BS2 en NLoS. L'étalement en azimut est légèrement supérieur pour BS2, mais l'écart entre les deux est négligeable. Les moyennes pour EAS sont parfaitement identiques. Peu de références étudient l'effet de la hauteur de la station de base sur les étalements angulaires. Toutefois, dans [77] les étalements en azimut restent quasi-identiques pour différentes hauteurs de BS, tandis que les étalements en élévations sont plus importantes si la hauteur du BS est supérieure [76][77].

Cela peut s'expliquer par le fait que plus l'antenne est haute plus le trajet direct (en LoS et le multi-trajet le plus puissant en NLOS) contient plus d'énergie par rapport aux multi-trajets et par conséquent l'étalement de retard est réduit.

TABLEAU 9 : MOYENNES DES PARAMETRES DS, AAS ET EAS POUR LES MESURES SC

Mesures	Scénario	Distance [m]	DS [ns]	AAS [deg]	EAS [deg]
SC1-BS1	LoS	10-130	16	6	4
SC1-BS2			12	5	4
SC2-BS1	NLoS	30-170	60	14	5
SC2-BS2			54	17	5

- **Analyse de la dépendance entre les paramètres et la distances BS-MS**

La connaissance de la dépendance des paramètres de propagation de mieux comprendre le comportement du canal de propagation. Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer si le DS, AAS et EAS et la distance BS-MS sont corrélés. Dans [60], les auteurs montrent que le DS en environnement urbain augmente progressivement en fonction de la distance BS-MS. Cette tendance a été aussi reportée dans [73] et [78].

Dans [79] et [80] les auteurs montrent que le DS et la distance sont inversement proportionnels. De plus, certains articles montrent que le DS est indépendant de la distance [81][82]. On peut conclure que la dépendance entre DS et la distance n'est pas clairement établie dans la littérature.

De la même manière, les publications [77][83][84] indiquent que l'AAS et la distance BS-MS sont dépendants alors que les références [60][85] montrent le contraire. Peu de références étudient le comportement de l'EAS en fonction de la distance. Néanmoins, les publications [77] et [86] montrent que l'étalement en élévation a tendance à diminuer quand la distance BS-MS augmente.

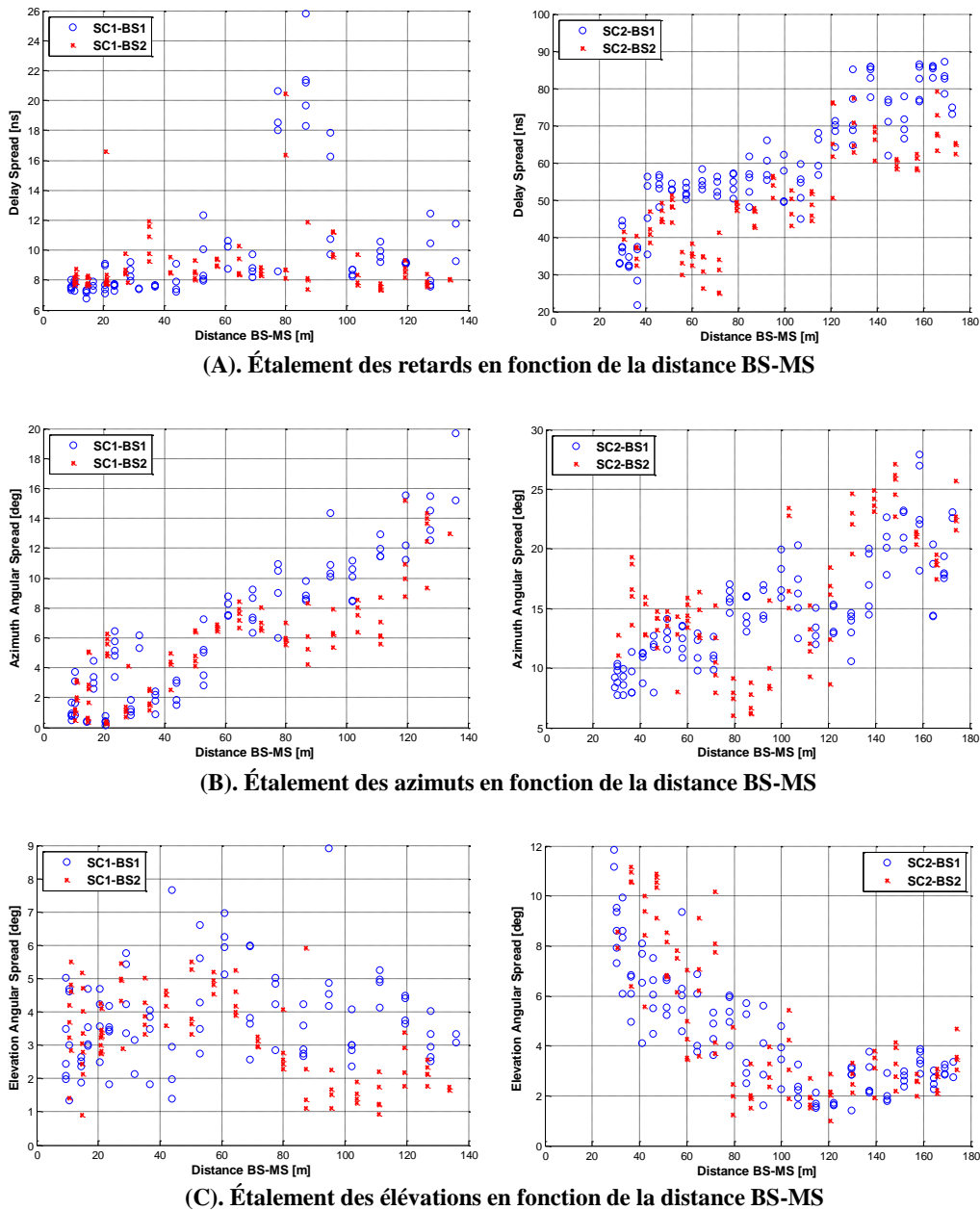


FIGURE 75 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LES DEUX TRAJET SC1 (A GAUCHE) ET SC2 (A DROITE)

Dans notre cas d'étude les paramètres DS, AAS et EAS sont tracés en fonction de la distance BS-MS dans la Figure 75 et les coefficients de corrélation sont calculés pour chaque configuration. Tout d'abord, la visualisation des graphiques relatifs au trajet SC1 en LoS permet d'identifier une forte corrélation à 90% entre le AAS et la distance BS-MS pour les deux hauteurs BS1 et BS2. En condition NLoS, une forte corrélation est observée entre tous les paramètres d'étalement et la distance BS-MS. Le DS semble dépendre linéairement de la distance BS-MS. Les droites de régression linéaire entre DS et la distance ont été calculées pour les deux hauteurs et sont données par l'équation avec d la distance séparant le mobile à la BS :

$$\begin{cases} DS_{SC2,BS1} = 0,3 d + 30 \\ DS_{SC2,BS2} = 0,3 d + 25 \end{cases} \quad (44)$$

- **Interdépendance des paramètres spatio-temporels**

L'interdépendance des paramètres (DS, AAS et EAS) a aussi été étudiée. La Figure 76 (A) représente l'étalement des azimuts en fonction de l'étalement des retards, respectivement en LoS et en NLoS. La visualisation du graphique permet d'identifier une corrélation de 70 % entre le AS et le DS en NLoS. Cette observation permet de confirmer les résultats obtenus dans [77][84]. De la même façon, la Figure 76 (B) qui représente l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des retards permet d'observer une corrélation modérée (entre 60% et 70%) entre les deux paramètres en NLoS. La visualisation de la représentation graphique de l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des azimuts (voir Figure 76 (C)) ne semble montrer aucune corrélation entre ces deux paramètres en LoS et NLoS. Tous les coefficients de corrélation calculés sont répertoriés dans le Tableau 10, ci-dessous.

TABLEAU 10 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE PARAMETRES ET DISTANCE POUR MESURES SC

	DS vs. Dist	AAS vs. Dist	EAS vs. Dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
SC1-BS1	0,42	0,92	0,15	0,49	0,14	0,27
SC1-BS2	0,20	0,85	0,50	0,10	0,10	0,25
SC2-BS1	0,89	0,80	-0,77	0,70	-0,70	0,42
SC2-BS2	0,90	0,75	-0,7	0,69	-0,6	0,15

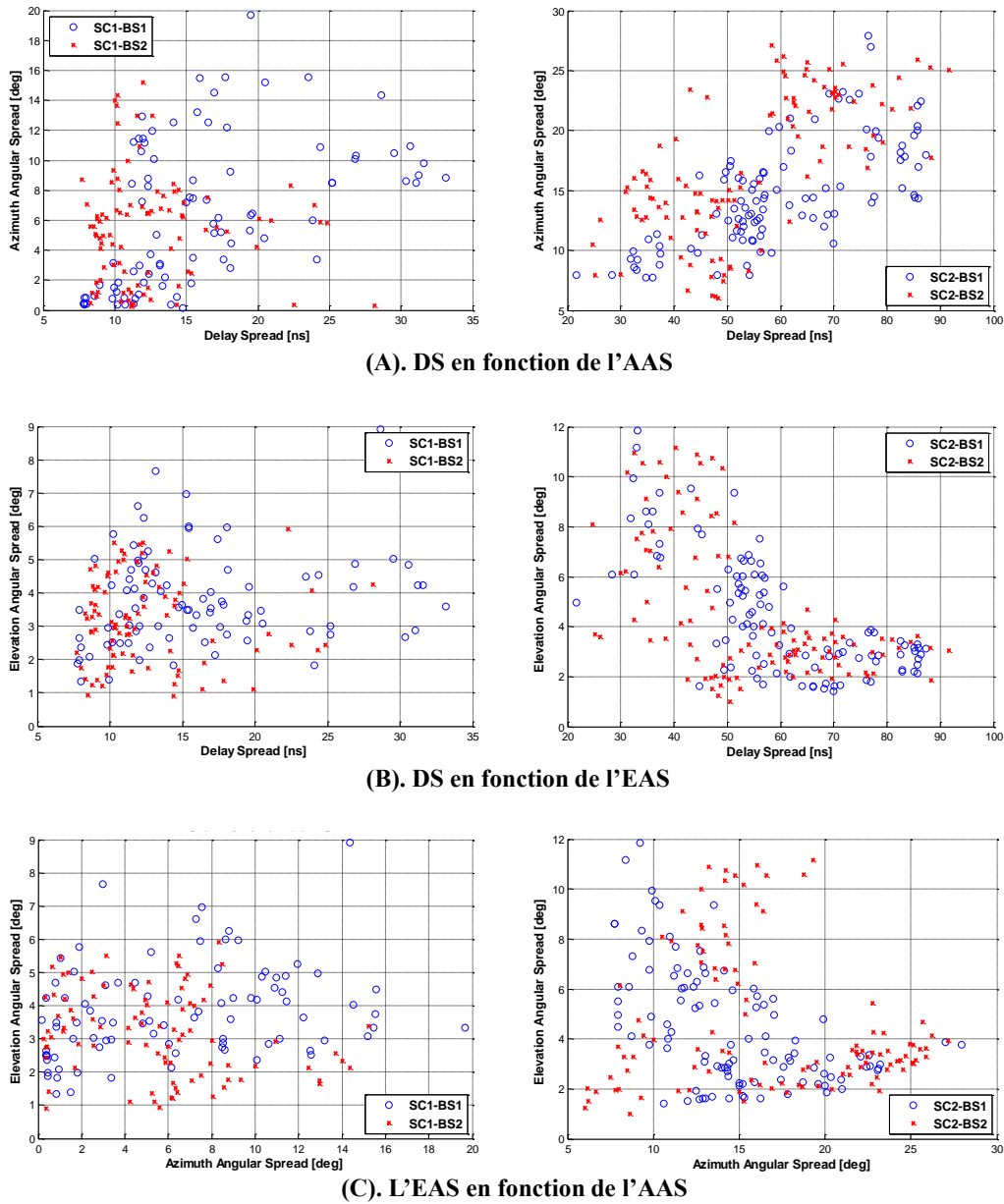


FIGURE 76 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES DEUX TRAJET SC1 (A GAUCHE) ET SC2 (A DROITE)

4.5.2.2. Mesures en environnement urbain

La campagne de mesures « URB », réalisée dans la vieille ville de Belfort, a permis d'étudier le comportement du canal pour différentes configurations. La station de base a été placée à 3 hauteurs différentes (BS1 : 5m, BS2 : 10m et BS3 : 12m), et 6 trajets ont été effectués par le mobile en visibilité et non visibilité. Comme indiqué dans le paragraphe 4.2.2.3, trois types de parcours MS sont étudiés (Rep, Transversal, Parallèle). Dans cette section, les résultats sont présentés pour un trajet par type de parcours Rep en LoS, T2 pour Transversal et P2 pour Parallèle. Les mesures Rep correspondent aux

mesures en LoS dans une place ouverte entourée de bâtiments, le T2 aux mesures *street canyon* en LoS et P2 aux *street canyon* en NLoS.

Les paramètres synthétiques de propagation tels que l'étalement des retards, des azimuts et des élévations ont été analysés pour 200 liens BS-MS pour le parcours Rep et 100 liens BS-MS les parcours T2 et P2. Les courbes CDF de chaque paramètre ont été tracées pour chacun des scénarios Rep, T2, P2 et représentées respectivement dans les Figure 77, Figure 78 et Figure 79.

Les résultats montrent que les fonctions de répartition cumulées sont plus étalées en LoS pour le trajet Rep que pour le T2. De plus, en comparant les deux courbes en configuration *street canyon*, plus de dispersion est remarquée pour en NLoS. A 95% de probabilité cumulative, la valeur du DS est comprise entre 95 et 108 ns pour le Rep, de 80 ns à 95 ns pour T2 et de 85 ns à 103 ns pour le P2. La même chose est observée en moyenne (voir Tableau 11) et, par conséquent, le canal de propagation est plus dispersif en temps en scénario Rep qu'en *street canyon*. En termes d'étalements angulaire, ceux en azimut et en élévation sont sensiblement identiques pour les trajets T2 et P2. L'étalement des azimuts en moyenne est autour de 10° pour le T2, 12° pour P2 et 5° pour Rep. En élévation, les moyennes sont de 4° et 6° pour T2 et P2 respectivement, et de 12° pour le Rep. Les valeurs moyennes des AAS et EAS pour les configurations en *street canyon* correspondent à celles trouvées dans le paragraphe 4.5.2.1 alors que plus d'étalement est remarquée en DS. Ceci peut être expliqué par la différence des distances BS-MS considérées dans les deux configurations. Les DS et EAS obtenus pour ces mesures semblent correspondre à ceux du modèle 3GPP [71], mais les valeurs de l'AAS restent inférieures au modèle.

Pour évaluer l'effet de la hauteur de la station de base sur les paramètres de canal, trois hauteurs ont été étudiées. Tout d'abord, les Figure 77 (A), Figure 78 (A) et Figure 79 (A) représentent les fonctions CDF de DS à chaque hauteur de BS pour les configurations Rep, T2 et P2. La visualisation des graphiques permet d'observer que plus la BS est haute moins l'étalement des retards est dispersé. Ceci est remarqué aussi sur les valeurs moyennes. En termes d'étalement des azimuts, aucune différence significative n'est remarquée entre les 3 hauteurs en moyenne sur les visibilitées. Cependant, en non visibilité les CDF montrent plus d'étalement pour BS1 tandis que les AAS sont identiques pour BS2 et BS3. Néanmoins, en termes de moyenne, 12° est calculée pour BS1 et 8° pour BS2 et BS3 Par conséquent, la différence est négligeable. Les CDF de EAS (figures Figure 77 (C), Figure 78 (C) et Figure 79 (C)) montrent que ces derniers ne sont pas très impactés par l'effet de la hauteur. La même tendance a été observée dans le paragraphe précédent, ce qui confirme les résultats de [72][73] [77].

TABEAU 11 : MOYENNES DES PARAMETRES DS, AAS ET EAS POUR LES MESURES URB

Mesures	Scénario	Distance [m]	DS [ns]	AAS [deg]	EAS [deg]
Rep-BS1	LoS	10-85	70	5	11
Rep-BS2			54	5	11
Rep-BS3			43	6	10
T2-BS1	SC LoS	75-200	65	10	4
T2-BS2			33	10	3
T2-BS3			26	9	4
P2-BS1	SC NLoS	40-95	75	12	9
P2-BS2			35	8	8
P2-BS3			23	8	8

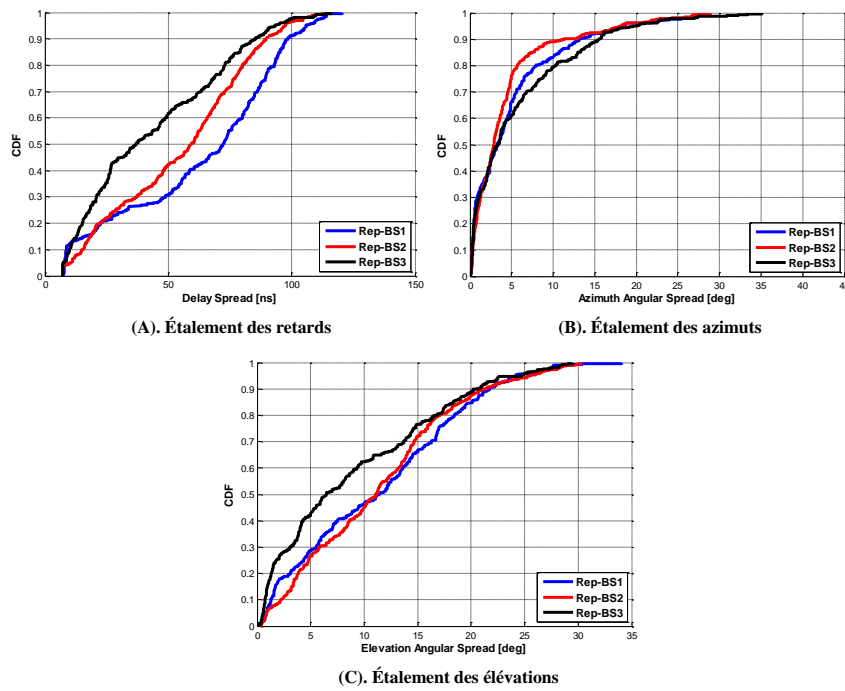


FIGURE 77 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LE TRAJET REP EN ENVIRONNEMENT URBAIN

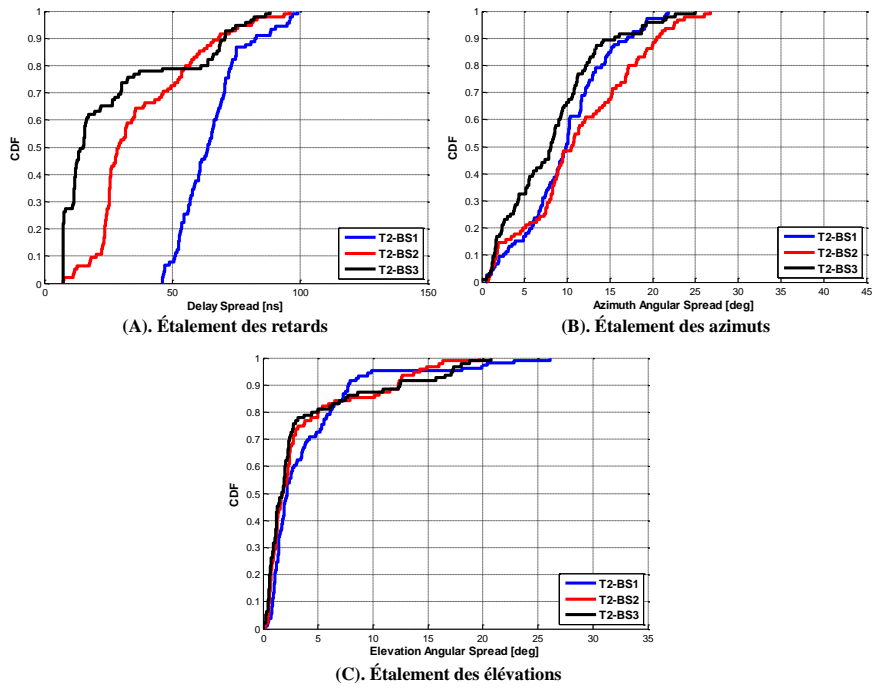


FIGURE 78 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LE TRAJET T2 EN ENVIRONNEMENT URBAIN

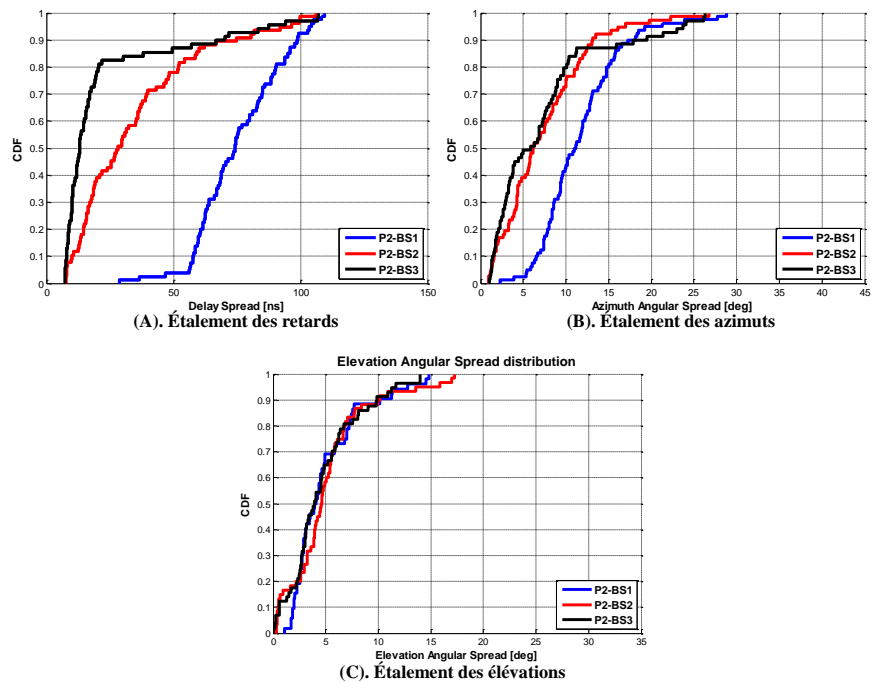


FIGURE 79 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LE TRAJET P2 EN ENVIRONNEMENT URBAIN

- Analyse de la dépendance entre les paramètres et la distances BS-MS

Pour examiner la dépendance entre les paramètres DS, AAS et EAS et la distance BS-MS, les paramètres d'étalement sont tracés en fonction de la distance dans les figures Figure 80, Figure 81 et Figure 82 respectivement pour les trajets Rep, T2 et P2.

La Figure 80 montre que la corrélation entre les paramètres d'étalement des retards et la distance BS-MS est difficilement identifiable. Cependant, les DS ont tendance à augmenter pour les faibles distances de 10 m à 40 m, puis diminuent à partir de 40 m. Cela signifie qu'à faible distance, le canal est fortement dominé par le trajet direct, tandis qu'à partir de 50 m la propagation se fait par multi-trajets causés par la présence de la végétation autour de la place. L'étalement des azimuts et des élévations ne semblent pas dépendre de la distance entre la station de base et le mobile et leurs coefficients de corrélation sont faibles.

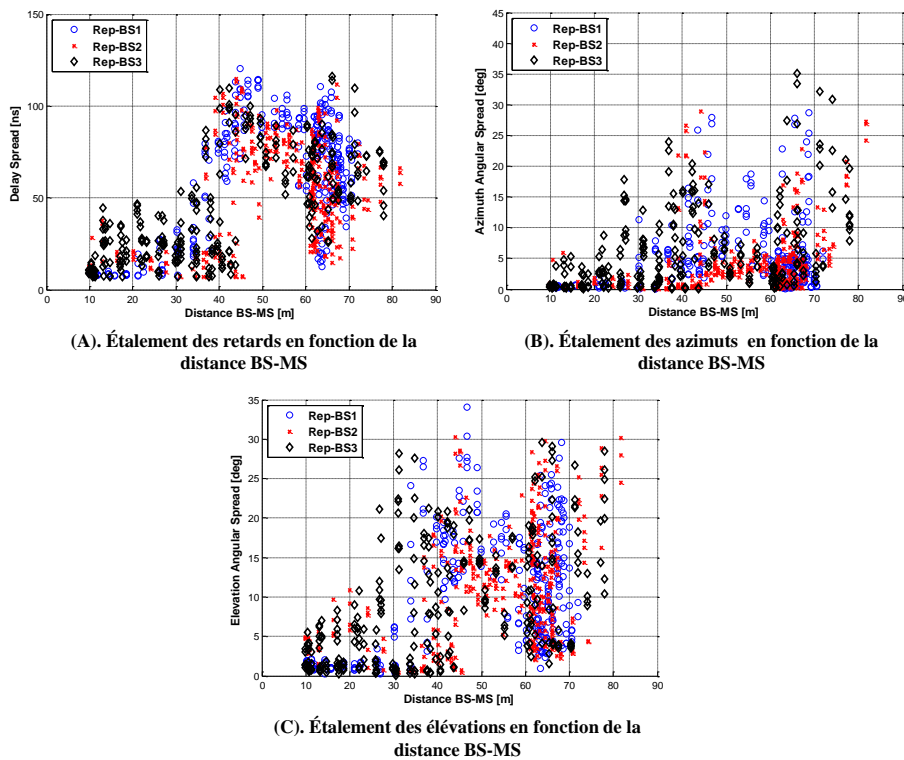


FIGURE 80 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LE TRAJET REP

La Figure 81 montre que le paramètre DS a tendance à diminuer en fonction de la distance BS-MS pour les 3 hauteurs BS1, BS2 et BS3. Ceci est en accord avec les résultats du [80]. La corrélation entre DS et la distance BS-MS est plus forte pour les grandes hauteurs BS2 et BS3. Les sous-figures Figure 81 (B) et 81 (C) montrent que les étalements angulaires en azimut et en élévation sont inversement proportionnels à la distance BS-MS. La même tendance a été retrouvée dans [77] et [83]. Dans [83], les auteurs montrent que les étalements angulaires présentent des corrélations négatives pour les rues étroites comme la T2. C'est-à-dire que les valeurs de l'EAS ont tendance à diminuer quand le mobile s'éloigne de la BS.

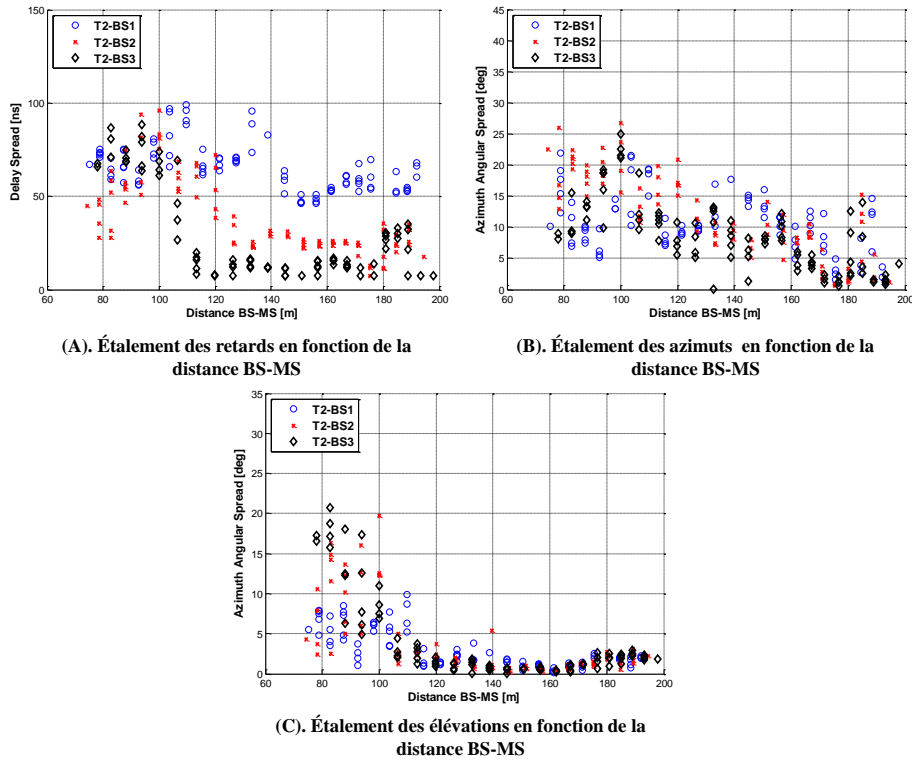


FIGURE 81 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LES DEUX TRAJET T2

D'après la Figure 82, la corrélation entre les paramètres DS et la distance BS-MS est difficilement identifiable. La corrélation entre DS et la distance BS-MS est positive pour les grandes hauteurs BS2 et BS3, et négative pour BS1. Les étalements montrent que les étalements angulaires en azimut sont corrélés à la distance BS-MS. Plus la distance augmente, plus les AAS sont étalés. Selon la Figure 82 (C), il est difficile d'établir une quelconque corrélation entre les étalements des élévations et la distance BS-MS. En effet, l'EAS diminue pour des distances variant de 40 à 60 m et augmente pour les distances supérieures à 60 m.

TABEAU 12 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE PARAMETRES ET DISTANCE POUR MESURES URB

	DS vs. Dist	AAS vs. dist	EAS vs. dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
Rep-BS1	0,6	0,19	0,4	0,45	0,77	0,58
Rep-BS2	0,63	0,25	0,4	0,50	0,75	0,62
Rep-BS3	0,67	0,41	0,5	0,58	0,71	0,7
T2-BS1	-0,6	-0,5	-0,61	0,45	0,5	0,62
T2-BS2	-0,65	-0,85	-0,64	0,49	0,7	0,58
T2-BS3	-0,7	-0,75	-0,63	0,56	0,87	0,41
P2-BS1	-0,53	0,7	-0,54	0,55	0,24	0,27
P2-BS2	0,65	0,7	0,6	0,65	0,65	0,43
P2-BS3	0,6	0,7	0,63	0,75	0,65	0,68

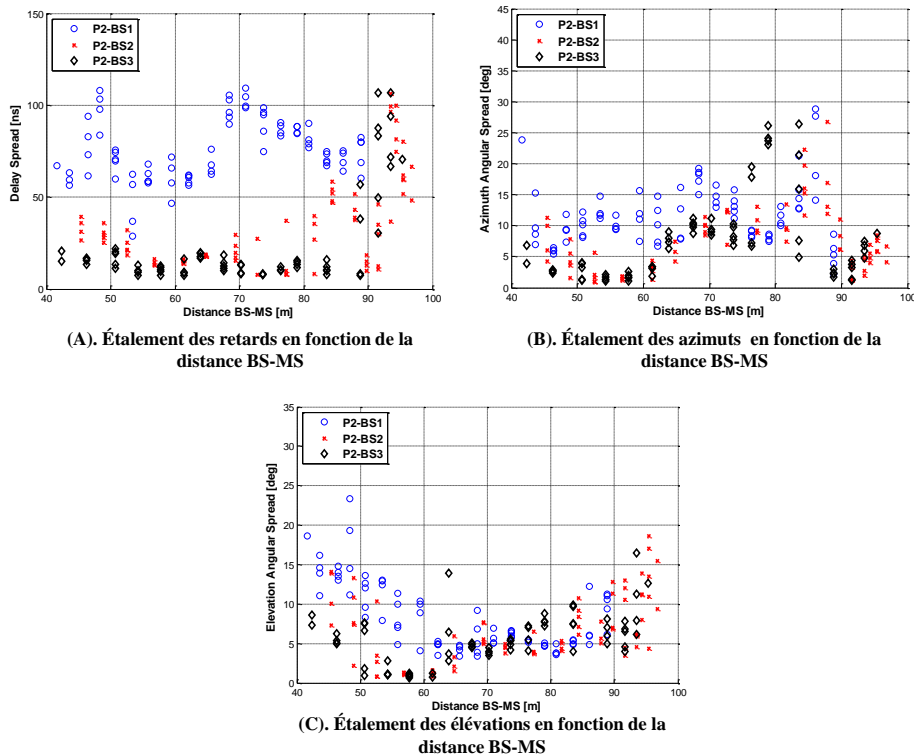


FIGURE 82 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LES DEUX TRAJET P2

- **Interdépendance des paramètres spatio-temporels**

L'interdépendance des paramètres (DS, AAS et EAS) a aussi été étudiée pour cette campagne de mesures. Tout d'abord la Figure 83, qui représente l'intercorrélation entre les paramètres pour le trajet Rep en LoS, permet d'identifier une corrélation linéaire entre DS et EAS. Les droites de régression linéaire entre EAS et DS sont données par (45). La corrélation entre l'EAS et l'AAS est modérée (65%) et la visualisation du graphique correspondant montre que les deux paramètres sont proportionnels.

$$\begin{cases} EAS_{Rep-BS1} = 0,2 DS_{Rep-BS1} - 0,4 \\ EAS_{Rep-BS2} = 0,2 DS_{Rep-BS2} + 0,6 \\ EAS_{Rep-BS3} = 0,2 DS_{Rep-BS3} + 0,5 \end{cases} \quad (45)$$

De la même manière, la Figure 84 montre une corrélation linéaire entre l'EAS et le DS pour les hauteurs BS2 et BS3. Les droites de régression linéaire entre EAS et DS sont données par (46). Une corrélation modérée entre l'EAS et l'AAS est aussi identifiée.

$$\begin{cases} EAS_{T2-BS2} = 0,2 DS_{T2-BS2} - 2,3 \\ EAS_{T2-BS3} = 0,2 DS_{T2-BS3} - 1,5 \end{cases} \quad (46)$$

Pour le trajet P2 en NLoS, la Figure 85 montre que la corrélation entre l'AAS et le DS est forte pour les hauteurs BS2 et BS3 et faible pour BS1. La même tendance est observée pour les corrélations entre EAS et DS, ainsi que pour celle entre AAS et EAS. Les coefficients de corrélations correspondantes sont regroupés dans le Tableau 12.

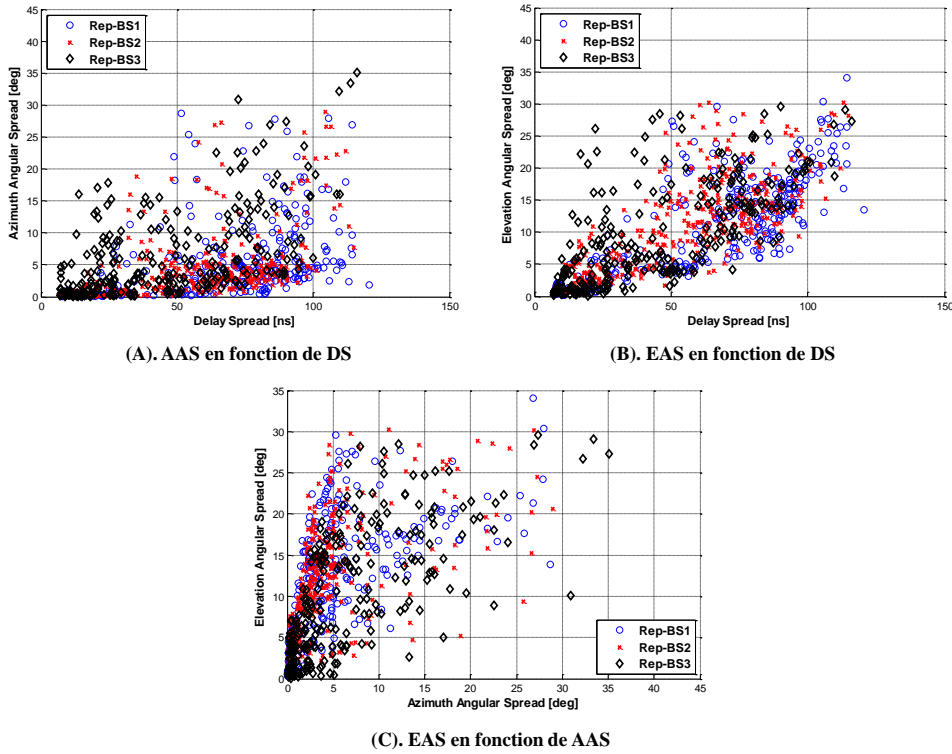


FIGURE 83 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES DEUX TRAJET REP

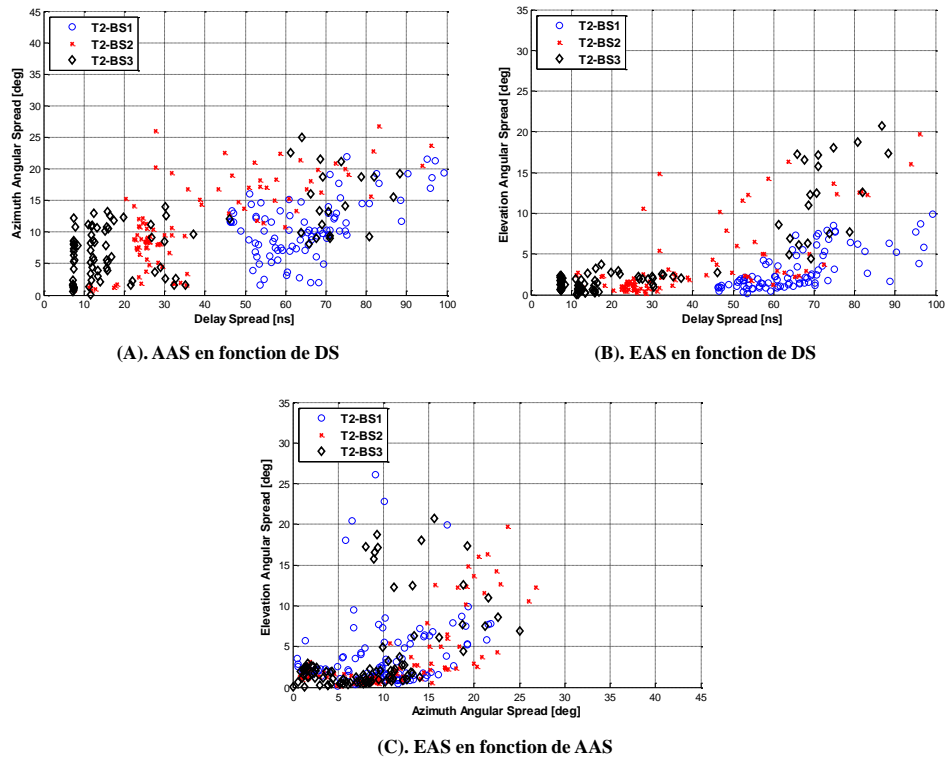


FIGURE 84 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES DEUX TRAJET T2

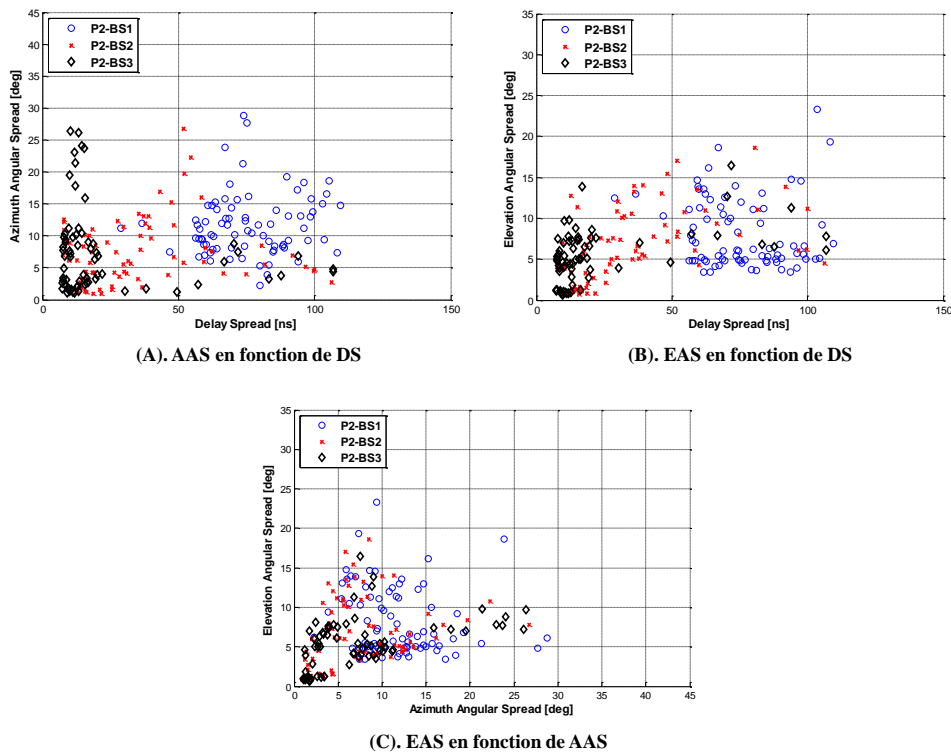


FIGURE 85 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES DEUX TRAJET P2

4.5.2.3. Mesures en environnement suburbain

Dans cette section, le canal de propagation en environnement résidentiel suburbain est étudié. Le comportement du canal en conditions de LoS et NLoS sont étudiées. La station de base ici a été placée à une seule hauteur de 10 m. Les calculs statistiques des paramètres d'étalement ont été réalisés sur un échantillon de 200 liens BS-MS pour le parcours R1 en visibilité, et sur un échantillon de 120 liens BS-MS pour les parcours de mesures en non visibilité optique R2, R3 et R4.

Dans un premier temps, les paramètres de propagation spatio-temporels ont été analysés. Pour chacun des paramètres, les courbes de distribution cumulées (voir Figure 86) ont été tracées pour chaque configuration de mesures. Les valeurs moyennes calculées pour chaque paramètre sont données dans le Tableau 13.

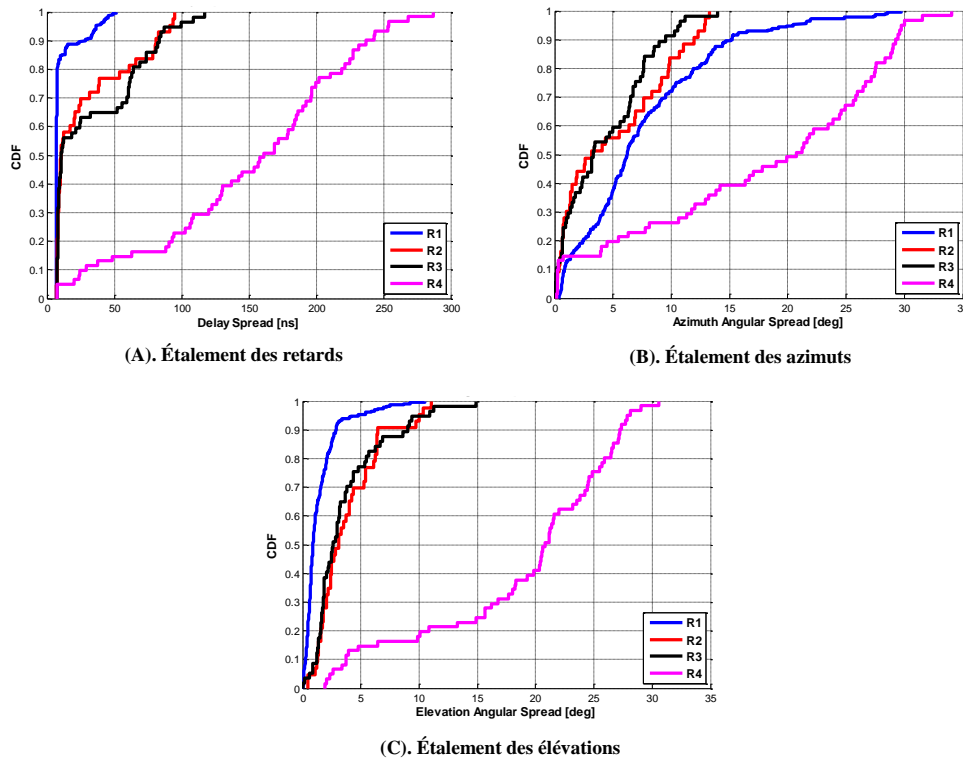


FIGURE 86 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LES TRAJETS EN ENVIRONNEMENT SUBURBAIN

La visualisation de la Figure 86 permet d'identifier trois comportements du canal spatio-temporel dans l'environnement suburbain :

- LoS : C'est le cas du trajet R1. Il est caractérisé par un faible étalement des retards, où 80% des valeurs est inférieur à 10 ns. Ce qui signifie que les multi-trajets les plus forts arrivent au voisinage du trajet direct en domaine temporel. En domaine angulaire, le trajet R1 se distingue par des EAS inférieurs à 3° et un AAS inférieur à 15° pour la majorité des liens BS-MS. Les multi-trajets en

domaine angulaire sont concentrés autour du trajet direct. Ces résultats confirment ceux présentés dans [87].

- « Quasi-LoS » : C'est le cas des trajets R2 et R3 pour lesquels les étalements des retards sont plus dispersés par rapport au LoS, même si 50% des valeurs sont identiques. Ceci signifie que la propagation se fait au-dessus des toits. En effet, malgré que la station de base et le mobile soient en non visibilité optique, la hauteur du BS dépasse celle des bâtiments de cet environnement. Ceci fait apparaître des trajets « quasi-LoS » qui sont prépondérants pour 50% des cas. Ceci se traduit par des étalements en élévation sont plus dispersés et peuvent atteindre 15° par endroit. Les étalements des azimuts sont moins dispersés que pour le LoS car les rues R2 et R3 sont plus étroites que la R1. Dans la littérature, les trajets Quasi-LoS ont été identifiés dans des environnements macrocellulaires [84].
- NLoS : C'est le cas du trajet R3. Il se distingue par des étalements des retards, des azimuts et des élévations très dispersés. À 95%, les valeurs de DS, AAS et EAS sont respectivement de 253 ns, 30° et 29°. En effet, comme d'une part la rue R4 se trouve à 110 m de la station de base, aucun trajet LoS ou Quasi-LoS n'existe. D'autre part, le signal reçu par le mobile étant fortement atténué, les multi-trajets apportent des contributions plus importantes à l'énergie totale reçue. Les paramètres d'étalement identifiés pour cet environnement sont en accord avec ceux de l'ITU-R pour un environnement peu élevé [70].

TABLEAU 13 : MOYENNES DES PARAMETRES DS, AAS ET EAS POUR LES MESURES SU

Mesures	Scénario	Distance [m]	DS [ns]	AAS [deg]	EAS [deg]
R1	LoS	10-85	13	8	2
R2	Quasi-LoS	19-110	28	5	4
R3			31	5	4
R4	NLoS	110-160	150	17	20

- **Analyse de la dépendance entre les paramètres et la distances BS-MS**

La connaissance des corrélations entre les paramètres de propagation et la distance entre la station de base et le mobile permet de mieux comprendre le comportement du canal en configuration LoS, Quasi-LoS et NLoS. Pour ce faire, les paramètres DS, AAS et EAS sont tracés en fonction de la distance BS-MS sur la Figure 87 et les coefficients de corrélation correspondants sont donnés par le Tableau 14.

La visualisation des courbes du DS en fonction de la distance BS-MS montre que les DS ont tendance à augmenter quand le mobile s'éloigne de la BS. Cependant, les coefficients de corrélation indiquent des valeurs autour de 0,55 pour tous les trajets, ce qui signifie que la corrélation est modérée entre DS et la distance BS-MS. Les étalements des azimuts sont fortement corrélés à la distance pour les configurations LoS et Quasi-LoS. Plus la distance BS-MS augmente plus les azimuts sont dispersés. Ceci

signifie que la contribution des multi-trajets augmente si la distance BS-MS est grande. En effet, la puissance du trajet direct diminue en fonction de la distance, ce qui fait augmenter la contribution des multi-trajets et diminuer celle du trajet direct. En ce qui concerne les étalements des élévations, la Figure 87 (C) ne montre aucune corrélation entre EAS et la distance pour toutes les configurations.

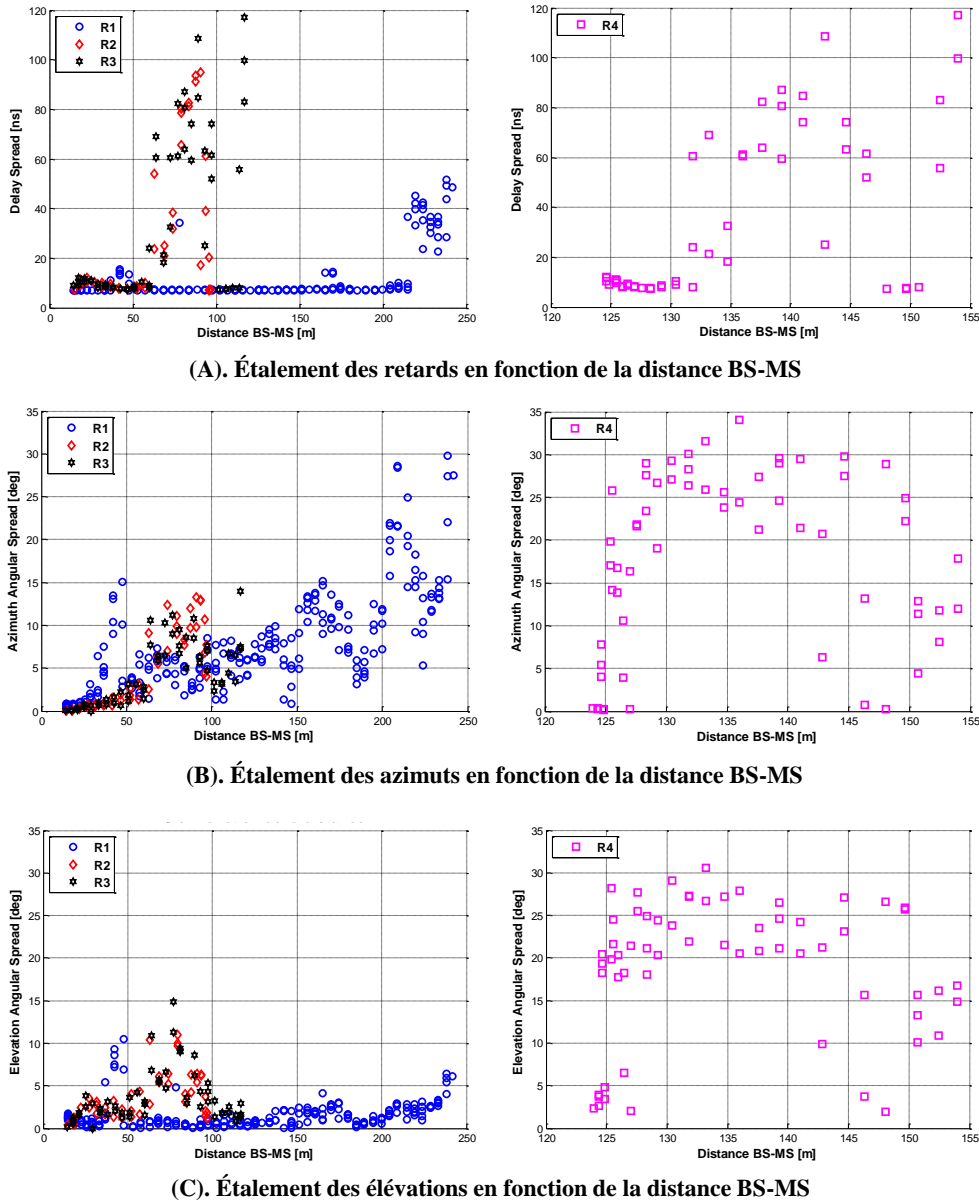


FIGURE 87 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LES TRAJETS EN ENVIRONNEMENT SU

TABLEAU 14 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE PARAMETRES ET DISTANCE POUR MESURES SU

	DS vs. Dist	AAS vs. Dist	EAS vs. Dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
R1	0,52	0,74	0,22	0,53	0,5	0,6

R2	0,54	0,84	0,46	0,76	0,7	0,7
R3	0,55	0,70	0,22	0,83	0,6	0,7
R4	0,52	0,12	0,02	0,16	0,03	0,9

• **Interdépendance des paramètres spatio-temporels**

La Figure 88 (A) représente l'étalement des azimuts en fonction de l'étalement des retards. La visualisation du graphique ne permet pas d'identifier une corrélation forte entre l'AAS et le DS pour R1 et R4. Par contre, en configuration de Quasi-LoS (R2, R3) les AAS et DS sont proportionnels. De la même façon, la Figure 88 (B) qui représente l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des retards, ne permet pas d'établir une quelconque corrélation entre les deux paramètres pour R1 en LoS et R4 en NLoS. Par contre pour les courbes relatifs aux parcours R2 et R3, elle semble montrer une corrélation positive entre les deux paramètres. La visualisation de la représentation graphique de l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des azimuts (voir Figure 88 (C)) semble montrer une corrélation linéaire entre ces deux paramètres pour tous les parcours. Les droites de régression linéaires entre l'EAS et l'AAS (47) ont été calculées pour chaque trajet. Dans [87], l'auteur montre qu'en configuration LoS tous les paramètres de dispersion DS, AAS et EAS sont corrélés. Ceci a été retrouvé dans notre cas pour les parcours R2 et R3 en Quasi-LoS.

$$\begin{cases} EAS_{R_1} = 0,2 AAS_{R_1} + 0,2 \\ EAS_{R_2} = 0,4 AAS_{R_2} + 1,7 \\ EAS_{R_3} = 0,6 AAS_{R_3} + 1,1 \\ EAS_{R_4} = 0,7 AAS_{R_4} + 6,4 \end{cases} \quad (47)$$

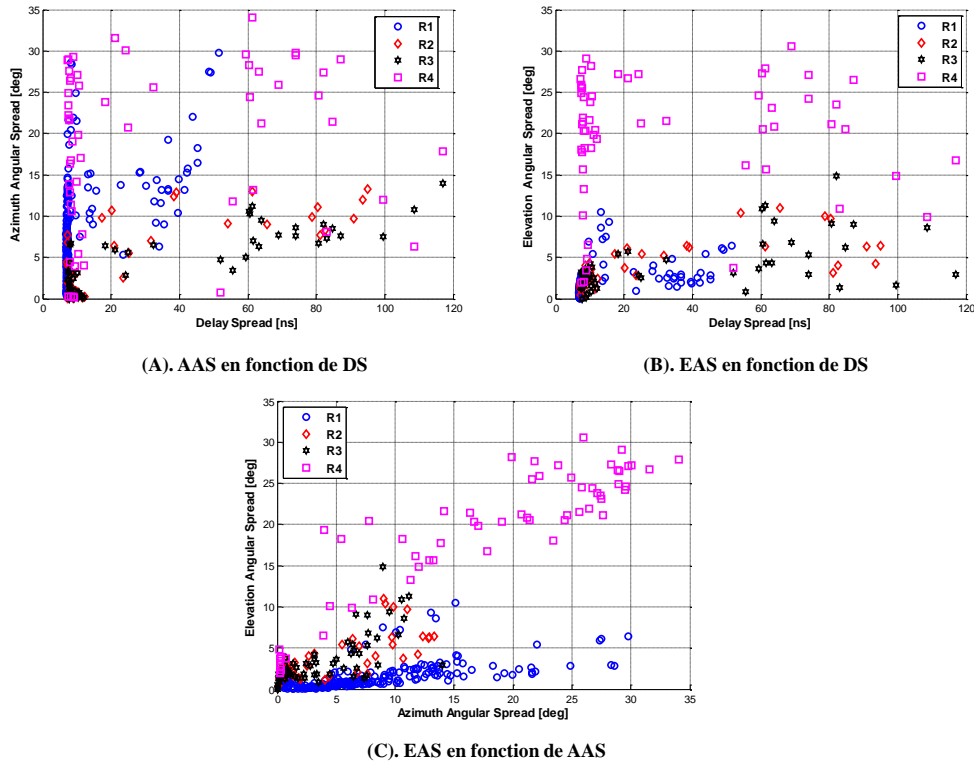


FIGURE 88 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES TRAJETS EN ENVIRONNEMENT SU

4.5.2.4. Mesures en environnement rural

Dans cette section, le canal de propagation en milieu rural à 3,7 GHz est étudié. La spécificité des zones rurales est l'irrégularité des terrains, présence d'une grande surface de végétation et présence de bâtiments résidentiels très peu élevés. Les mesures ont été réalisées en considérant deux hauteurs de la station de base pour en déduire l'effet sur les paramètres de dispersion du canal rural. Trois parcours ont été réalisés pour chaque hauteur de BS. Au total, 400 liens BS-MS ont été étudiés pour des distances BS-MS variant de 50 à 430 m pour chaque hauteur. Les fonctions de distribution cumulée pour chacun des paramètres d'étalement DS, AAS et EAS sont représentées dans la Figure 89. Les moyennes des différents étalements sont données dans le Tableau 15.

La Figure 89 montre que les fonctions de répartition cumulée pour tous les paramètres sont sensiblement identiques pour les hauteurs BS1 et BS2. La moyenne des étalements des retards est de 41 ns pour BS1 et 40 ns pour BS2. Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées dans la littérature. En effet, dans [88][89][90] l'étalement moyen du DS dans une zone rurale à 910 MHz et 3,5 GHz est entre 0,2 μ s et 0,37 μ s. Cependant, les environnements de propagation sont assez différents et les distances BS-MS étudiées dans ces publications vont de 200 à 1600 m. Les moyennes des étalements des azimuts est des élévations sont respectivement autour 5° et 4° pour BS1 et BS2. Malheureusement, aucune publication qui étudie les étalements d'AAS et EAS n'existe

dans la littérature. De plus, la comparaison des CDF des deux hauteurs montre que l'effet de la hauteur de la station de base sur les paramètres d'étalement est négligeable.

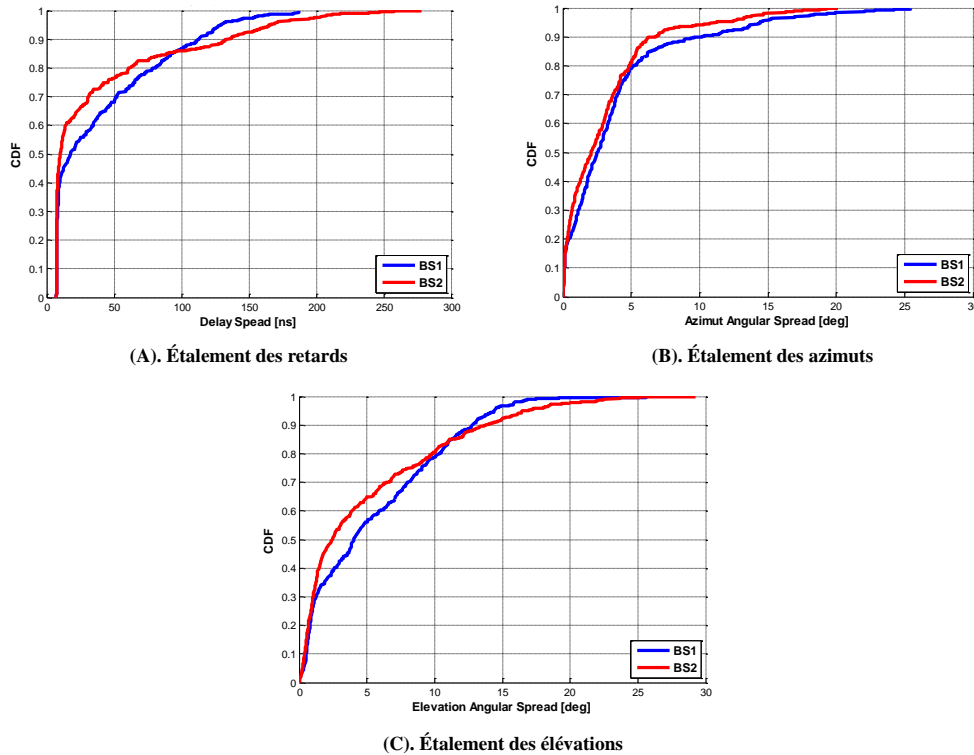


FIGURE 89 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LES TRAJETS EN ENVIRONNEMENT RURAL

TABLEAU 15 : MOYENNES DES PARAMETRES DS, AAS ET EAS POUR LES MESURES RL

Mesures	Distance [m]	DS [ns]	AAS [deg]	EAS [deg]
BS1	50-430	41	6	5
BS2		40	4	5

- **Analyse de la dépendance entre les paramètres et la distances BS-MS**

La Figure 90 montre que la corrélation entre les paramètres d'étalement des retards et de la distance BS-MS est difficilement identifiable. Les coefficients de corrélation entre DS et la distance BS-MS est de 0,62 pour BS1 et 0,5 pour BS2. Les étalements des azimuts ne semblent pas dépendre de la distance entre la station de base et le mobile. Les coefficients de corrélation correspondants sont très faibles (de l'ordre de 0,1). La même tendance est observée pour les étalements des élévations. Par conséquent, pour l'environnement rural aucun paramètre ne dépend de la distance BS-MS.

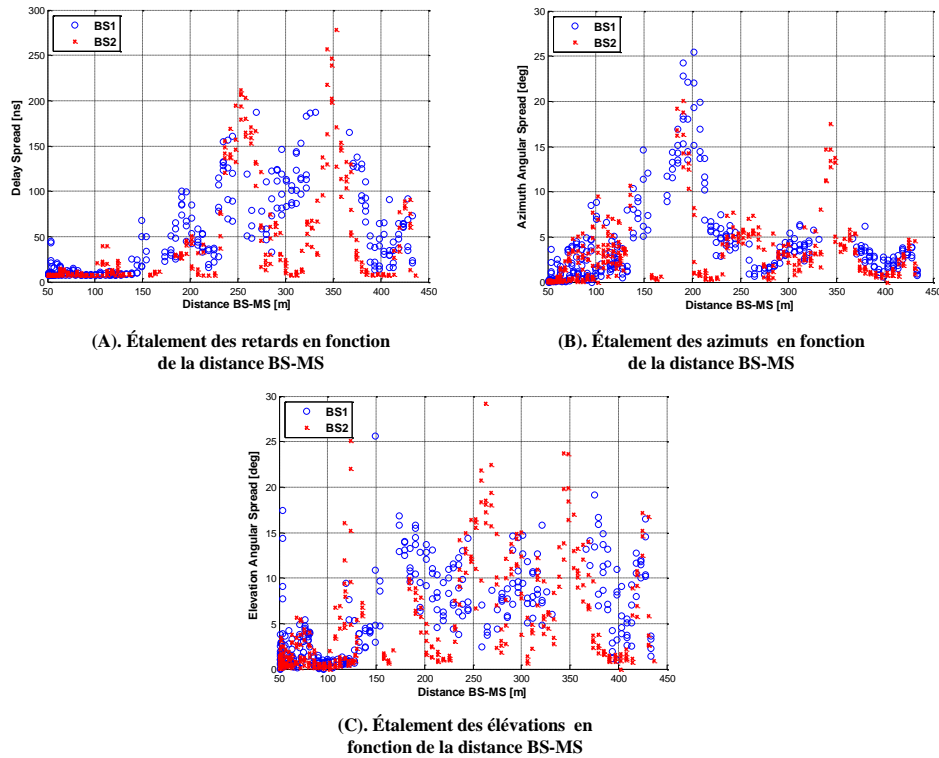


FIGURE 90 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LES TRAJETS EN ENVIRONNEMENT RL

TABLEAU 16 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE PARAMETRES ET DISTANCE POUR MESURES RL

	DS vs. Dist	AAS vs. dist	EAS vs. dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
BS1	0,62	0,06	0,58	0,26	0,76	0,63
BS2	0,50	0,09	0,50	0,4	0,80	0,70

- **Interdépendance des paramètres spatio-temporels**

La Figure 91 (A) représente l'étalement des azimuts en fonction de l'étalement des retards. La visualisation du graphique ne permet pas d'identifier une forte corrélation entre l'AAS et le DS. Les coefficients de corrélations entre les deux paramètres ne dépassent pas 0,6. De la même façon la Figure 91 (B), qui représente l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des retards, permet d'observer que les EAS ont tendance à augmenter avec le DS. Les coefficients de corrélation (Tableau 16) permettent de confirmer la forte corrélation. Par contre, la visualisation de la représentation graphique de l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des azimuts montre que les grandes valeurs de EAS coïncident avec celles grandes de l'AAS, mais la corrélation entre les deux paramètres ne dépasse pas les 70%.

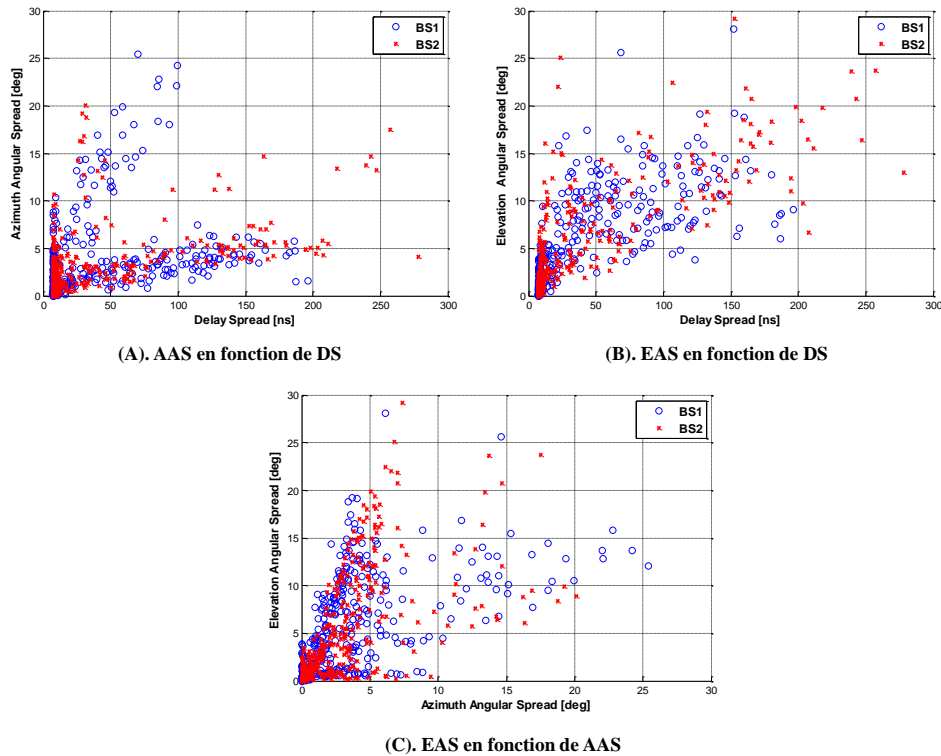


FIGURE 91 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES TRAJETS EN ENVIRONNEMENT RL

4.5.2.5. Mesures en espace ouvert (Parking)

Dans cette partie, le canal de propagation dans un environnement de type ouvert est étudié. Les mesures obtenues ici, sont issues de deux campagnes distinctes. La première PARK (4.2.2.1) a été réalisée sur le parking d'une zone industrielle La deuxième BES (4.2.2.6) a été réalisée sur le parking d'une zone commerciale. La station de base a été placée à deux hauteurs pour les deux campagnes de mesures. Les statistiques pour chaque configuration ont été réalisées sur un échantillon de 100 liens BS-MS avec des distances BS-MS de 30 à 120 m.

La Figure 92 représente les fonctions de répartition cumulées pour les paramètres DS, AAS, EAS pour les deux configurations PARK et BES. Les moyennes des paramètres des étalements sont données dans le Tableau 17.

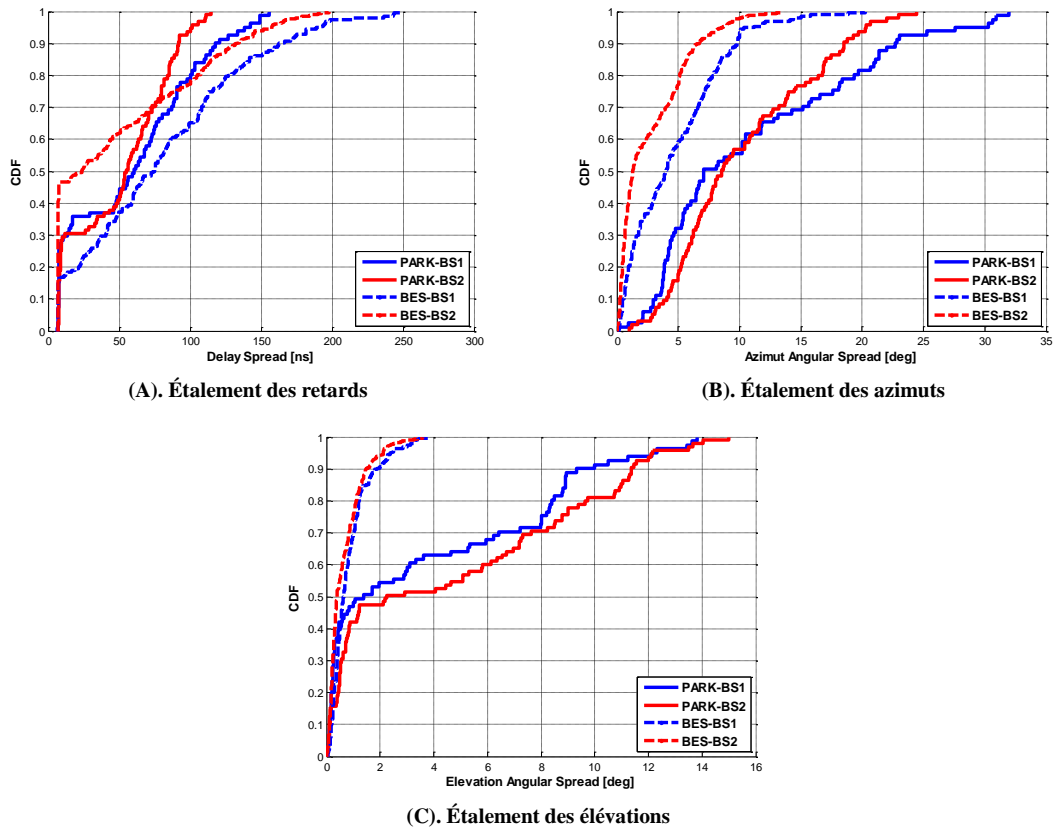


FIGURE 92 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULEE DES DIFFERENTS PARAMETRES D'ETALEMENT POUR LES MESURES EN ESPACES OUVERTS (PARKING)

Tout d'abord, la comparaison des étalements des retards entre les deux environnements PARK et BES montre plus de dispersion pour BES. En effet, les valeurs à 95% varient entre 101 et 139 ns pour PARK et entre 157 et 191 pour BES. De même, les moyennes des DS sont égales à 50 ns, 45 ns, 80 ns et 50 ns pour respectivement PARK-BS1, PARK-BS2, BES-BS1 et BES-BS2. Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées dans [91], qui étudie le DS dans les espaces ouverts et parkings à 2,9 GHz. En domaine angulaire, les étalements des azimuts et des élévations sont moins dispersés pour le BES. Les multi-trajets arrivent depuis des directions voisines au trajet direct pour les mesures BES, alors qu'en PARK les multi-trajets sont assez étalés dans l'espace. Ceci est très probablement lié à l'environnement de mesures. En effet, en zone industriel on note une forte présence de la végétation autour du parking, tandis qu'en zone commerciale plusieurs bâtiments peu élevé bordent le parking.

Enfin, la visualisation des CDF pour les trois paramètres d'étalement permet d'identifier que l'effet de la hauteur de la station de base est plus visible sur les étalements des retards et des azimuts. Les valeurs du DS et de l'AAS à 95% sont plus grandes pour BS1. Cependant, en moyenne les étalements des azimuts sont pratiquement identiques.

TABLEAU 17 : MOYENNES DES PARAMETRES DS, AAS ET EAS POUR LES MESURES EN ESPACES OUVERTS (PARKING)

Mesures	Distance [m]	DS [ns]	AAS [deg]	EAS [deg]
PARK-BS1	30-120	50	11	3
PARK-BS2		45	10	4
BES-BS1		80	4	0,8
BES-BS1		50	3	0,7

- **Analyse de la dépendance entre les paramètres et la distances BS-MS**

La Figure 93 montre que la corrélation entre les paramètres d'étalement des retards et de distance BS-MS est difficilement identifiable pour les mesures BES et qu'elle est forte pour PARK. Les coefficients de corrélation entre DS et la distance BS-MS est de 0,83 pour PARK et 0,5 pour BES. Les étalements des retards augmentent quand le mobile s'éloigne de la BS. De la même manière, les étalements des azimuts et des élévations ne semblent pas dépendre de la distance entre la station de base et le mobile pour BES. Toutefois pour PARK, les AAS et les EAS sont proportionnels à la distance BS-MS. Par conséquent, pour le parking en zone industriel les paramètres DS, AAS et EAS sont proportionnels à la distance BS-MS. Ceci est en accord avec [84], où les auteurs montrent que dans les larges rues où les bâtiments sont éloignés, du mobile plus la distance BS-MS augmente plus les paramètres AAS et EAS sont importants.

TABLEAU 18 : COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE PARAMETRES ET DISTANCE POUR LES MESURES EN ESPACES OUVERTS (PARKING)

	DS vs. Dist	AAS vs. dist	EAS vs. dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
PARK-BS1	0,83	0,77	0,79	0,88	0,87	0,96
PARK-BS2	0,82	0,76	0,79	0,82	0,8	0,95
BES-BS1	0,47	0,16	0,21	0,40	0,51	0,82
BES-BS2	0,56	0,31	0,43	0,63	0,66	0,85

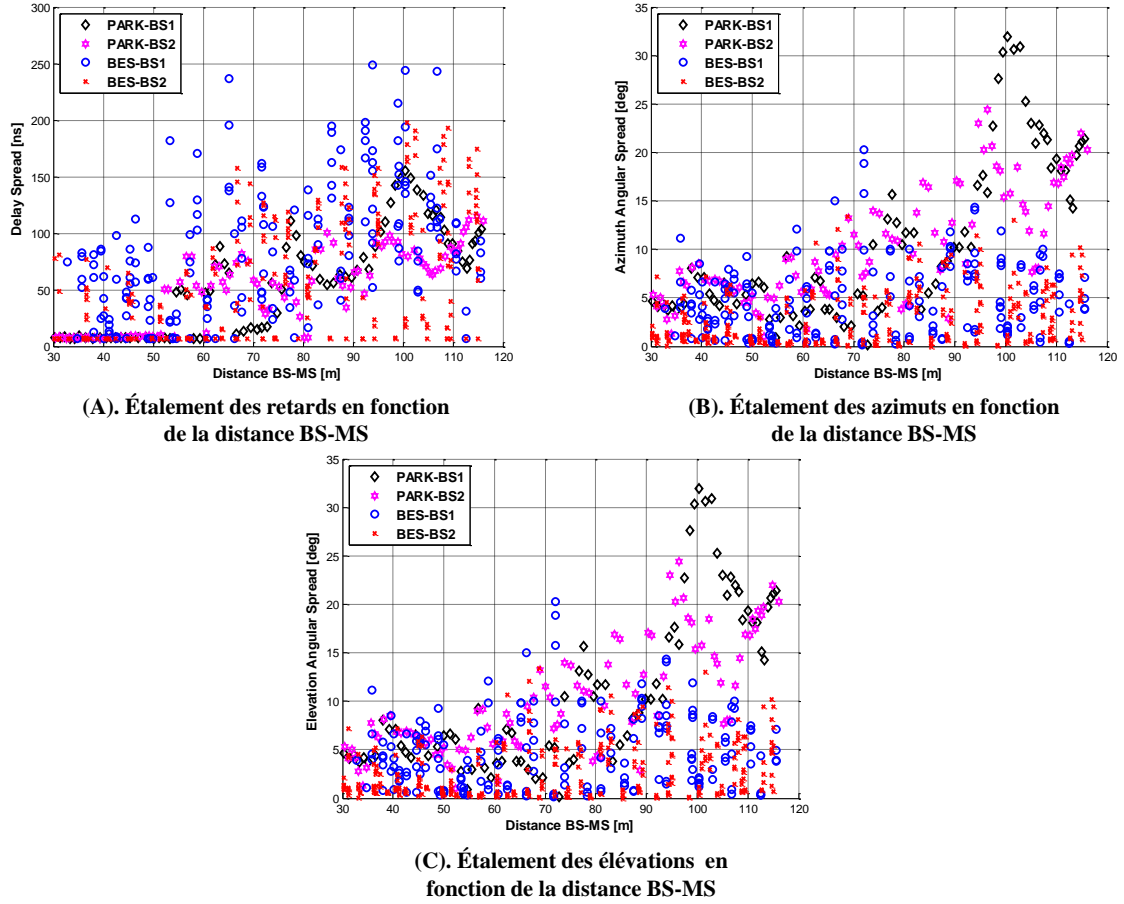


FIGURE 93 : CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS ET LA DISTANCE BS-MS POUR LES MESURES EN ESPACES OUVERTS (PARKING)

- **Interdépendance des paramètres spatio-temporels**

La Figure 94 représente les courbes d'intercorrélation entre les paramètres d'étalement. Les coefficients d'intercorrélation sont donnés dans le Tableau 18. Les -figures (A) et (B) montrent que les étalements des azimuts et des élévations sont fortement corrélés au DS. Cependant, ces derniers ne présentent aucune corrélation pour les mesures BES. Par contre, la visualisation de l'étalement des élévations en fonction de l'étalement des azimuts (Figure 94 (C)), montre une corrélation linéaire entre ces deux paramètres pour les deux mesures PARK et BES. Les droites de régression linéaires entre l'EAS et l'AAS ont été calculées et données par les équations (48) et (49).

$$\begin{cases} EAS_{PARK-BS1} = 0,5 AAS_{PARK-BS1} - 1,6 \\ EAS_{PARK-BS2} = 0,8 AAS_{PARK-BS2} - 3,2 \end{cases} \quad (48)$$

$$\begin{cases} EAS_{BES-BS1} = 0,2 AAS_{BES-BS1} + 0,1 \\ EAS_{BES-BS2} = 0,1 AAS_{BES-BS2} + 0,1 \end{cases} \quad (49)$$

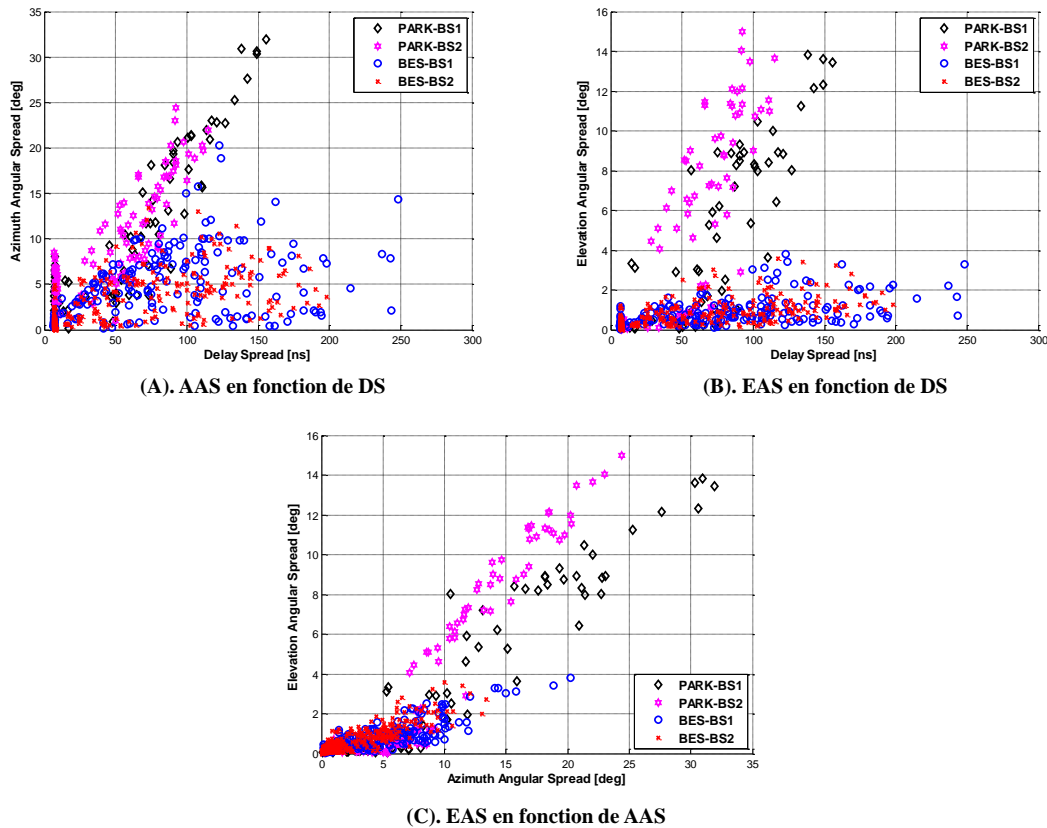


FIGURE 94 : INTERCORRELATION ENTRE LES PARAMETRES SPATIO-TEMPORELS DS, AAS ET EAS POUR LES MESURES EN ESPACES OUVERTS (PARKING)

4.5.3. Synthèse

Dans la partie 4.5 une analyse statistique des paramètres d'étalement spatio-temporels a été réalisée sur plusieurs échantillons issus de différents environnements de propagation : urbain, *street canyon*, suburbain, rural, et espaces ouverts (parking). Pour chaque environnement les effets de la configuration LoS/NLoS, hauteur de la BS et des distances BS-MS ont été étudiés.

- **Environnement urbain :**

Deux campagnes de mesures ont été étudiées en environnement urbain mais dans deux configurations différentes. La première (SC) s'est intéressée au comportement du canal de propagation dans un véritable *street canyon* urbain, tandis que la deuxième (URB) permet d'étudier le canal dans un environnement urbain plus diversifié en réalisant 3 types de parcours (espace ouvert, LoS, NLoS). L'analyse des résultats en urbain a conduit aux conclusions suivantes :

- Les paramètres d'étalement en temps et en espace sont plus importants en conditions NLoS à cause de la richesse en multi-trajets.

- La hauteur de la station de base a un effet sur les DS. Les valeurs du DS sont quand la BS est placée à une grande hauteur.
- En LoS :
 - Les corrélations entre DS et la distance BS-MS sont difficilement identifiables pour les mesures SC et Rep de URB. De même l'étalement du EAS ne dépend pas de la distances pour ces deux mesures.
 - L'AAS est proportionnel à la distance BS-MS pour les mesures SC en visibilité.
 - Le DS, l'AAS et l'EAS sont inversement proportionnels à la distance BS-MS pour le parcours T2 de URB.
 - Le comportement de l'AAS en fonction de la distance BS-MS en LoS dépend de l'environnement des mesures : ils sont proportionnels dans le cas d'une rue large (par exemple SC) et inversement proportionnels dans le cas d'une rue étroite (URB). Ceci confirme les résultats publiés dans [84].
 - Aucune corrélation n'est identifiée pour le SC.
 - Une corrélation positive entre EAS et DS pour les mesures URB.
- En NLoS :
 - Les étalements DS et AAS ont tendance à augmenter quand le mobile s'éloigne de la BS.
 - Les EAS sont inversement proportionnels à la distance BS-MS pour les mesures SC.
 - Aucune corrélation identifiée entre EAS et la distance BS-MS pour les mesures URB.
 - Les étalements des azimuts et des élévations sont corrélés à DS. Ceci confirme les résultats dans [77].
- La hauteur de la BS, la structure de la rue (ouverte, étroite,..) et les conditions LoS/NLoS impactent le canal de propagation urbain à 3,7 GHz.

• Environnement suburbain

Dans cet environnement la campagne a été réalisée dans un environnement résidentiel suburbain avec BS placée à 10m. Quatre parcours du mobile ont été étudiés dont 1 en visibilité accrue et 3 en non visibilité optique. L'analyse des résultats permet d'établir conclusions suivantes :

- En plus des configurations LoS et NLoS, l'identification d'un 3ème type de configurations: « Quasi-LoS » est proposée pour les liens BS-MS qui ne sont pas en visibilité optique mais pour qui la propagation se fait à travers des diffractions au-dessus des toits.
- Les paramètres d'étalement en temps et en espace sont plus importants en conditions NLoS.

- Les coefficients de corrélation entre DS et la distance BS-MS sont autour de 0,5.
- En configuration LoS et Quasi-LoS, AAS est corrélé à la distance BS-MS. Les deux paramètres sont proportionnels.
- En Quasi-LoS, les paramètres d'éléments AAS et EAS sont tous les deux proportionnels au DS.
- Les étalements des azimuts et des élévations sont corrélés entre eux pour toutes les configurations.

- **Environnement rural**

L'analyse des mesures en rural a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'impact de la hauteur du BS sur les paramètres DS, AAS et EAS est faible.
- Les valeurs du DS trouvées sont faibles par rapport à celles de la littérature, car les analyses ont été réalisées sur de plus grands échantillons de mesures.
- Aucune corrélation n'a été identifiée entre les paramètres et la distance BS-MS.
- Le paramètre EAS est proportionnel au DS.
- La corrélation entre EAS et AAS est autour de 65%.

- **Espace ouverts type Parking**

Pour caractériser le canal en espace ouvert, des mesures ont été réalisées sur deux parkings différents. Le premier est un parking PARK dans une zone industriel et le deuxième est un parking BES en zone commercial. L'étude des deux mesures a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'impact de la hauteur du BS est plus fort sur les étalements des retards. Les valeurs du DS sont plus importantes quand la hauteur du BS est faible.
- Il y a plus d'étalement en DS pour le parking BES, mais le contraire est observé en étalements angulaires.
- Pour les mesures PARK, le DS, AAS et EAS sont fortement corrélés à la distance BS-MS, tandis qu'aucune corrélation n'a été identifiée entre les paramètres et la distance BS-MS pour BES. Ceci indique que pour PARK, le trajet direct est le prépondérant et la contribution des multi-trajets (végétations) à la puissance totale est minime. Cependant, le parking BES est entouré de plusieurs bâtiments peu élevés qui créent des multi-trajets assez forts et qui contribuent à la puissance totale.
- Tous les paramètres sont corrélés entre eux pour les mesures PARK.
- Les paramètres EAS et AAS sont corrélés linéairement pour les deux environnements.

4.6. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats issus des campagnes de mesure SIMO réalisées avec un sondeur mobile et un large réseau antennaire virtuel. Pour commencer, les différentes campagnes de mesures ont été décrites en détail (équipements, environnements, prétraitement des mesures). Ensuite, la section 4.3 expose la méthode d'estimation des 2D-DoA développée pour la détection des directions d'arrivée à partir des RI données collectées et puis l'identification des rayons pertinents. Cette méthode a été appliquée à chaque RI mesurée pour obtenir une représentation compacte sous forme de rayons. Cette représentation permet de mieux cerner le comportement du canal en analysant les paramètres. Enfin, les résultats de caractérisation du canal sont donnés dans la partie 4.5.

L'analyse des mesures s'intéresse à l'étude des paramètres spatio-temporels du canal de propagation. Dans un premier temps, une analyse statistique sur plusieurs échantillons de mesures a été réalisée pour quantifier le caractère dispersif du canal pour chaque environnement de propagation. Ensuite, une analyse sur la corrélation entre les paramètres DS, AAS et EAS et la distance entre le mobile et la station de base, puis sur la corrélation entre les paramètres ont été effectuées. Ceci permet de bien modéliser le comportement du canal. L'effet de la hauteur de la BS sur les paramètres synthétiques du canal a été aussi investigué.

Les résultats montrent que la hauteur de la BS a un fort impact sur l'étalement temporel du canal. Plus la hauteur de la BS est faible, plus les valeurs du DS sont étalées. En effet, plus la BS est haute plus la puissance du trajet principal est renforcée et plus la contribution des multi-trajets dans la puissance totale diminue. En plus, le canal de propagation est fortement impacté par l'environnement de propagation. Différentes tendances ont été révélées selon les différents scénarios de mesures étudiés. Par exemple, en environnement urbain en non visibilité, les paramètres DS, AAS ont tendance à augmenter quand le mobile s'éloigne de la BS. Cependant, en visibilité deux comportements ont été identifiés selon le type de la rue où sont réalisées les mesures : le DS et l'AAS sont proportionnels si la rue est large et inversement proportionnels si la rue est étroite. En environnement suburbain, quand la BS dépasse la hauteur des bâtiments, des trajets en Quasi-LoS ont été identifiés. Dans cet environnement, les étalements AAS et EAS sont corrélés entre eux. Les mesures en rural, montrent que les paramètres spatio-temporels sont indépendants de la distance BS-MS.

Chapitre 5 Caractérisation du canal de propagation par approche déterministe

Sommaire

5.1. Introduction.....	141
5.2. Simulation déterministe du canal de propagation.....	141
5.2.1. Identification des phénomènes de propagation pertinents.....	142
5.2.2. Comparaison du canal mesuré et simulé au niveau de la	144
5.2.2.1.Étude du lien BS-MS3 en visibilité.....	145
5.2.2.2.Étude du lien BS-MS4 en visibilité.....	146
5.2.3. Comparaison du canal mesuré et simulé au niveau du MS.....	148
5.2.3.1.Étude du lien BS-MS1 en visibilité.....	148
5.2.3.2.Étude du lien BS-MS2 en non visibilité.....	152
5.3. Analyse statistique du canal simulé.....	154
5.3.1. Environnement 1 : Urbain.....	155
5.3.1.1. <i>Street canyon</i> : Campagne de mesures SC.....	155
5.3.1.2.Place ouverte : Campagne URB.....	157
5.3.2. Environnement 2 : Suburbain.....	160
5.3.3. Environnement 3 : Parking ouvert.....	162
5.3.4. Synthèse.....	164
5.4. Conclusion.....	165

5.1. Introduction

Les campagnes de mesures présentées dans les chapitres 3 et 4, ont permis la caractérisation du canal de propagation dans un contexte *massive MIMO* au niveau de la station de base, ainsi qu'au niveau du mobile. En outre, ces mesures de canal ont été aussi réalisées pour servir à la calibration de notre propre modèle à rayons *Starlight* et améliorer ses performances. Pour ce faire, il faut d'abord évaluer la capacité du modèle à fournir une reproduction fidèle du canal de propagation mesuré. Des simulations ont été réalisées avec le modèle *Starlight* dans les mêmes conditions des mesures, puis les résultats simulés et mesurés ont été comparés pour déterminer si les deux sont corrélés et identifier les améliorations à introduire au modèle afin que les versions ultérieures soient plus précises et fiables.

Dans ce chapitre, la première partie est dédiée à l'étude des simulations déterministes du canal de propagation par *Starlight*. Ensuite, dans la deuxième, partie les paramètres spatio-temporels des canaux simulés et mesurés sont comparés.

5.2. Simulation déterministe du canal de propagation

Le modèle *Starlight* est utilisé pour générer les simulations du canal de propagation. Ce modèle à rayons a été introduit dans le chapitre 2. Une description complète du modèle et la modélisation des environnements extérieurs par l'outil ont été présentées. La Figure 95 illustre en 3D le résultat d'une simulation avec *Starlight*. La visualisation des résultats de simulations en 3D est effectuée grâce au logiciel *Mesh Lab*. Les bâtiments sont représentés en blanc, le sol en marron et les rayons identifiés en bleu.

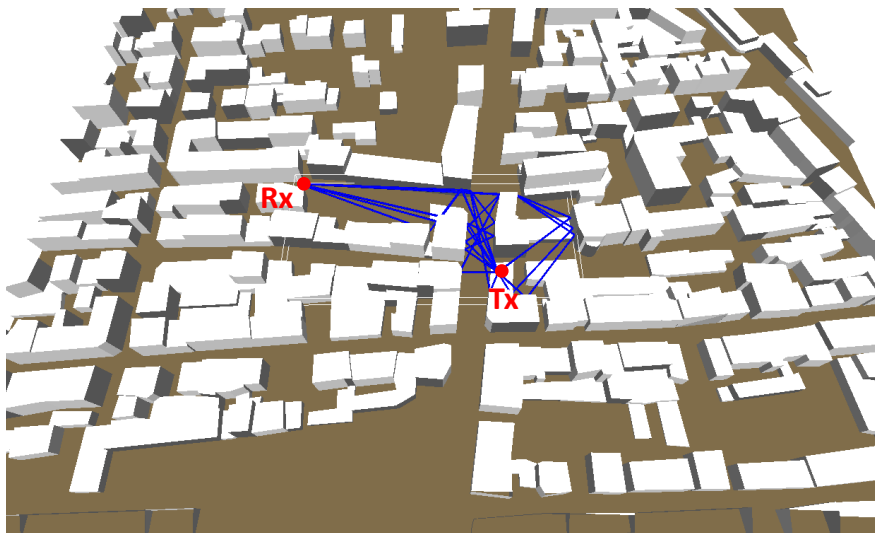


FIGURE 95 : ILLUSTRATION EN 3D D'UN RÉSULTAT DE SIMULATION AVEC *STARLIGHT*

Les modèles à rayons permettent de prédire avec précision les différents paramètres spatio-temporels du canal. Cependant, comme mentionné dans le chapitre 1, ces modèles souffrent d'un coût calculatoire très élevé qui dépend du nombre de phénomènes

physiques considérés dans les simulations. C'est pourquoi, il est indispensable de définir le nombre et la nature des phénomènes physiques pertinents pour une modélisation fiable du canal dans des environnements extérieurs.

5.2.1. Identification des phénomènes de propagation pertinents

Afin de garantir le compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats simulés, l'influence des phénomènes de propagation sur le canal doit être étudiée. Ceci permettra de définir les rayons ayant une contribution significative aux performances du canal de propagation. Pour ce faire, l'évolution des étalements des retards, des azimuts et des élévations du canal en fonction du nombre de phénomènes simulés a été étudiée. Les mesures étudiées précédemment ont été réalisées dans différents environnements et ont montré que les performances du canal sont fortement liées à l'environnement de propagation. C'est pourquoi l'identification des phénomènes pertinents doit inclure tous les environnements et toutes les configurations de mesures.

Dans un premier temps, les simulations du canal ont été réalisées dans les mêmes conditions que celles pour les mesures : type d'environnement, liens BS-MS, hauteur de la BS. Pour chaque lien BS-MS, les trajets contenant au moins 1R1D (une réflexion et une diffraction) sont simulés puis les trajets contenant des réflexions et des diffractions sont rajoutés. Un maximum de 5R1D a été autorisé pour chaque trajet en non visibilité et de 4R1D en visibilité. Les paramètres de dispersion DS, AAS et EAS sont calculés pour une dynamique de 20 dB.

Dans un second temps, une analyse statistique des paramètres de dispersion est réalisée pour chaque combinaison de phénomènes de propagation. Les courbes CDF ont été tracées pour chaque simulation afin de définir la nature et le nombre de phénomènes suffisants pour une convergence du simulateur. Les simulations ont été réalisées pour les deux hauteurs de BS (BS1 et BS2) afin d'en évaluer l'effet sur le nombre de phénomènes simulés.

La Figure 96 présente les courbes CDF des paramètres d'étalement simulés pour chaque combinaison de phénomènes de propagation en environnement urbain et en visibilité. Tout d'abord, on remarque que les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS sont plus dispersés pour une BS à 10m. Cependant, le simulateur converge à 3R1D pour les deux hauteurs BS1 et BS2. La figure montre aussi que les courbes correspondantes à 1R1D et 1R2D sont superposées. La même chose est observée pour 2R1D et 2R2D. Ceci dit que dans cet environnement, l'ajout des trajets avec des diffractions n'a aucun effet sur les performances du canal. Ainsi, pour des faibles distances BS-MS, une diffraction suffit pour modéliser le canal. Une combinaison de 3R1D est alors suffisante pour modéliser le canal de propagation en visibilité.

De la même manière, la Figure 97 présente les courbes CDF des paramètres d'étalement simulés pour chaque combinaison de phénomènes de propagation en environnement urbain en en non visibilité. Comme mentionné précédemment en non visibilité, les

phénomènes de propagation étudiés vont jusqu'à 5R1D. Tout d'abord, on remarque que les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS sont plus dispersés pour une BS à 5m. Le contraire est observé en visibilité. Cependant, le simulateur converge à 4R1D pour les deux hauteurs BS1 et BS2. Une combinaison de 4R1D est suffisante pour caractériser le canal en non visibilité.

Cette étude a été réalisée pour les différents environnements en visibilité et en non visibilité et a montré que 4 réflexions et 1 diffraction suffisent pour modéliser les canaux de propagation en extérieur. Dans la suite, toutes les simulations du canal seront réalisées avec 4R1D. On note que le temps de calcul moyen nécessaire pour simuler un parcours (environ 200 liens BS-MS) pour 4R1D est de 4100 minutes.

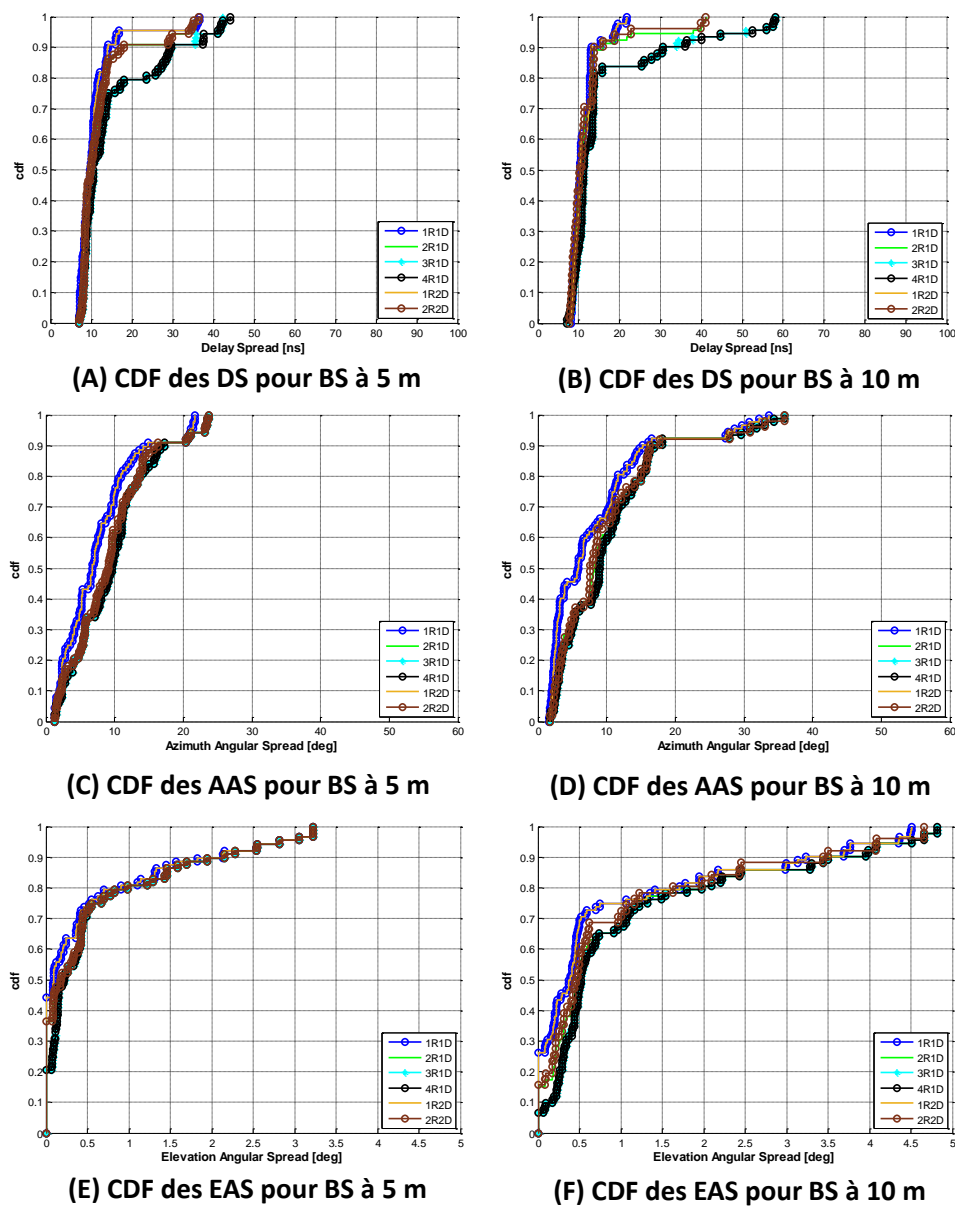


FIGURE 96 : COURBES CDF POUR CHAQUE COMBINAISON DE PHÉNOMÈNE DE PROPAGATION EN ENVIRONNEMENT *OUTDOOR* EN VISIBILITÉ

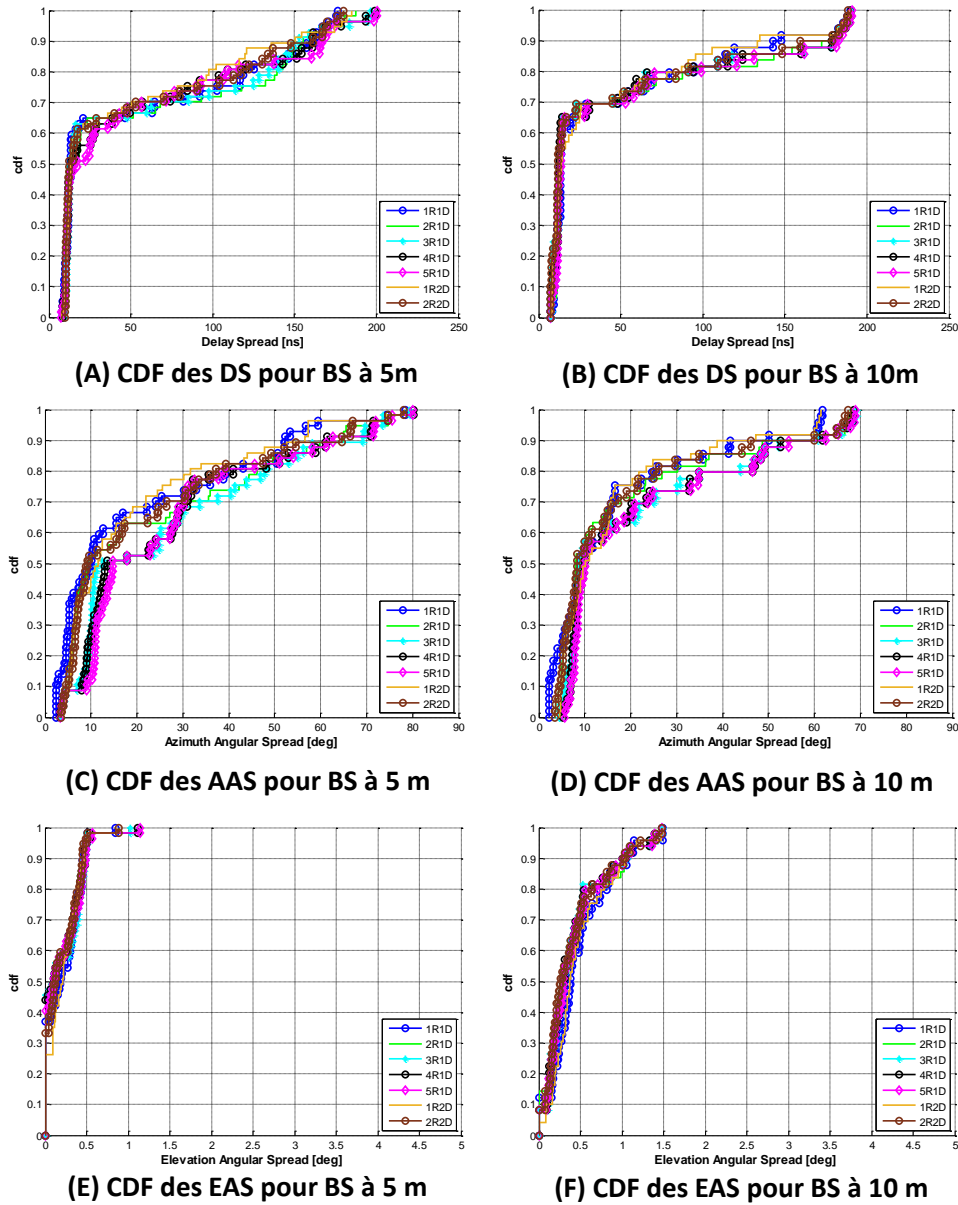


FIGURE 97 : COURBES CDF POUR CHAQUE COMBINAISON DE PHÉNOMÈNE DE PROPAGATION EN ENVIRONNEMENT *OUTDOOR* EN NON VISIBILITÉ

5.2.2. Comparaison du canal mesuré et simulé au niveau de la BS

Pour permettre une comparaison équitable entre les mesures et les simulations, ces dernières doivent tenir compte des effets des antennes ainsi que la configuration des mesures (MIMO, SIMO,..). Pour ce faire, les fonctions de transfert du canal de propagation simulé ont été générées à partir des rayons calculés par *Starlight*, en appliquant à chaque rayon les diagrammes de rayonnement des antennes utilisées en

émission et en réception. Les mesures du chapitre 3 ont été réalisées dans une configuration MIMO afin d'analyser le canal de propagation au niveau de la station de base. Deux liens BS-MS sont étudiés dans cette partie pour comparer le comportement du canal mesuré et simulé en conditions LoS et NLoS.

5.2.2.1. Étude du lien BS-MS3 en visibilité

Pour le premier scénario en LoS, on considère le mobile à la position MS3 à 17 m de la BS. Les antennes BS et MS sont peu élevées (7,5 m pour BS et 1 m pour MS). La Figure 98 représente un aperçu de l'environnement de propagation avec les positions respectives de la BS et la MS à gauche, et à droite l'environnement simulé avec les rayons identifiés par *Starlight* pour cette configuration. Les positions de la BS et du MS sont représentées respectivement par un cercle rouge et jaune. *Starlight* a pu identifier 100 rayons différents pour cette configuration. La comparaison des canaux se fait en comparant leurs paramètres caractéristiques PDP, PAP et PEP.

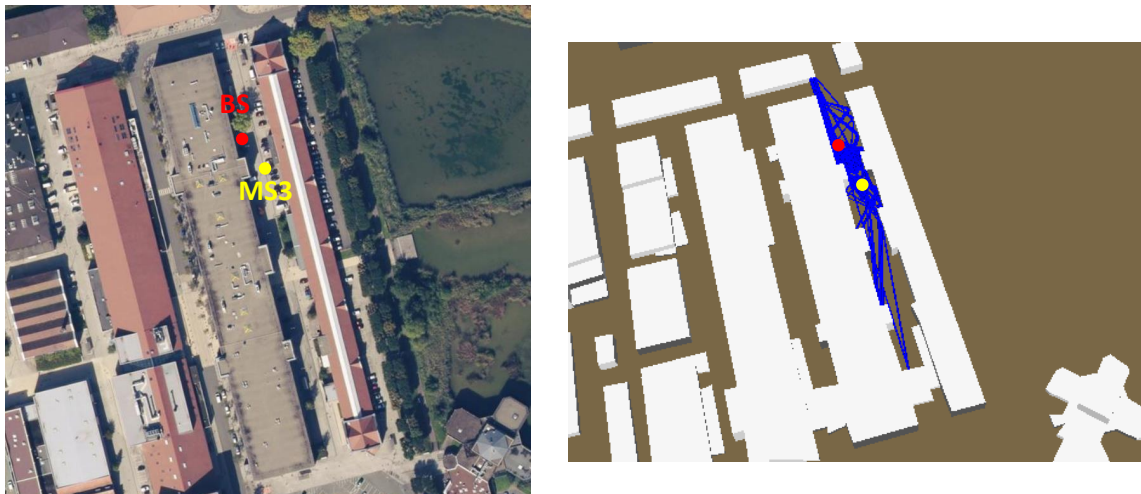


FIGURE 98 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT RÉEL DE PROPAGATION (À GAUCHE) ET DES RAYONS SIMULÉS PAR *STARLIGHT* POUR LE LIEN BS-MS3

La Figure 99 montre une similitude entre le PDP mesuré et simulé. En effet, les trajets principaux sont bien identifiés par le modèle. Cependant, certains trajets simulés sont sous-estimés comme les trajets à 48, 66 m et 93 m qui sont généralement une combinaison de réflexions. En conséquence, le PDP mesuré contient plus d'énergie que le simulé et ceci peut se traduire par une sous-estimation des paramètres d'étalement des retards. Dans ce cas le DS simulé et mesuré à 20 dB sont similaires et valent 12 ns.

Les profils angulaires de puissance en azimut PAP et en élévation PEP sont calculés à partir d'une analyse directionnelle du canal pour identifier les directions d'arrivée. La Figure 100 illustre les PAP et PEP simulés et mesurés. Comme pour les PDP, une similitude est observée entre mesures et simulations. Les directions principales en azimut et en élévations sont en corrélées. Cependant, les profils angulaires mesurés contiennent plus d'énergie. Cette comparaison en visibilité montre une sous-estimation du canal de propagation par le modèle.

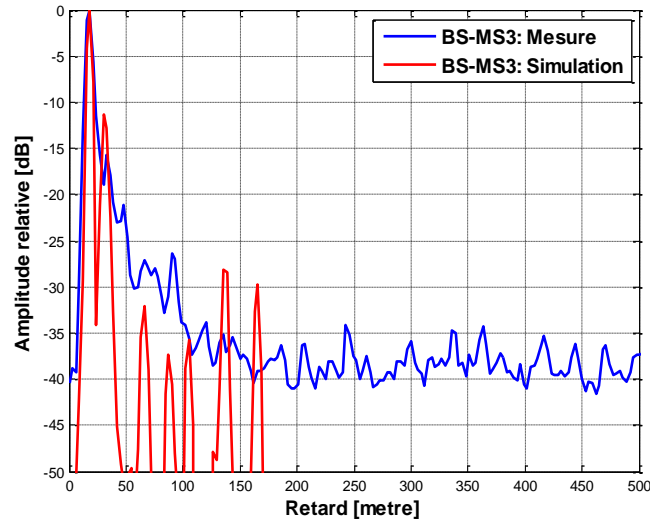


FIGURE 99 : LE PDP SIMULÉ ET MESURÉ POUR LE LIEN BS1-MS3

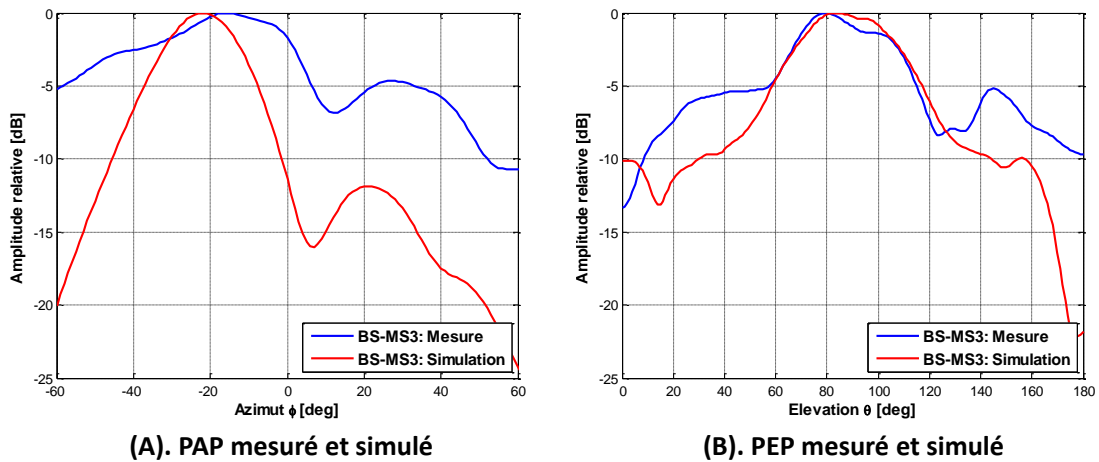


FIGURE 100 : PAP ET PEP SIMULÉS ET MESURÉS POUR LE LIEN BS1-MS3

5.2.2.2. Étude du lien BS-MS4 en visibilité

Le deuxième exemple étudié est en configuration NLoS, le mobile est placé à une position MS4 à 27 m de la BS (Figure 101). Les simulations ont conduit à identifier 120 rayons. Comme pour l'exemple précédent, les profils de puissance PDP, PAP et PEP sont comparés entre mesures et simulations.

Le PDP mesuré et simulé correspondant au lien BS-MS4 en NLoS sont présentés dans la Figure 102. La majorité des rayons principaux ont été identifié par le simulateur mais pas avec la même puissance relative. En effet, le PDP mesuré montre l'existence de deux trajets principaux avec presque la même énergie : le premier (27 m) ayant subi une diffraction et le deuxième (37 m) arrivant avec 2 réflexions. Le premier trajet diffracté est sous-estimé par le modèle. De plus, deux trajets (147 m et 174 m) ont été calculé par le modèle mais n'existe pas dans les mesures. Ces trajets effectuent chacun une réflexion

lointaine. L'utilisation d'une base de données peu précise dans nos simulations peut être à l'origine de la sous-estimation et la surestimation de quelques rayons.



FIGURE 101 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT RÉEL DE PROPAGATION (À GAUCHE) ET DES RAYONS SIMULÉS PAR *STARLIGHT* POUR LE LIEN BS-MS4

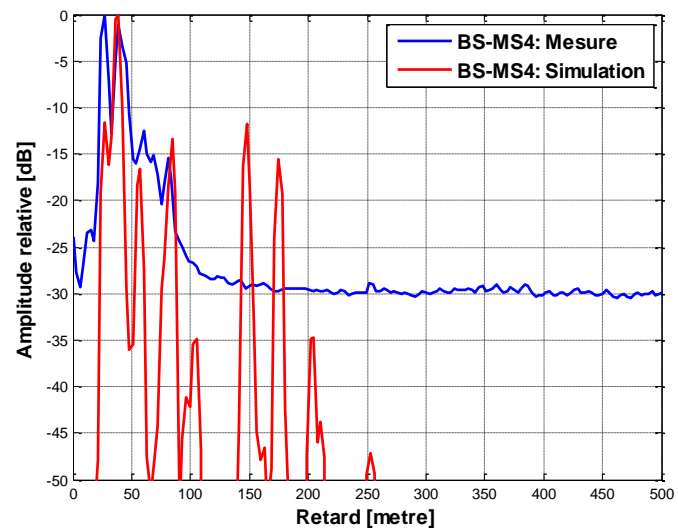


FIGURE 102 : LE PDP SIMULÉ ET MESURÉ POUR LE LIEN BS-MS4

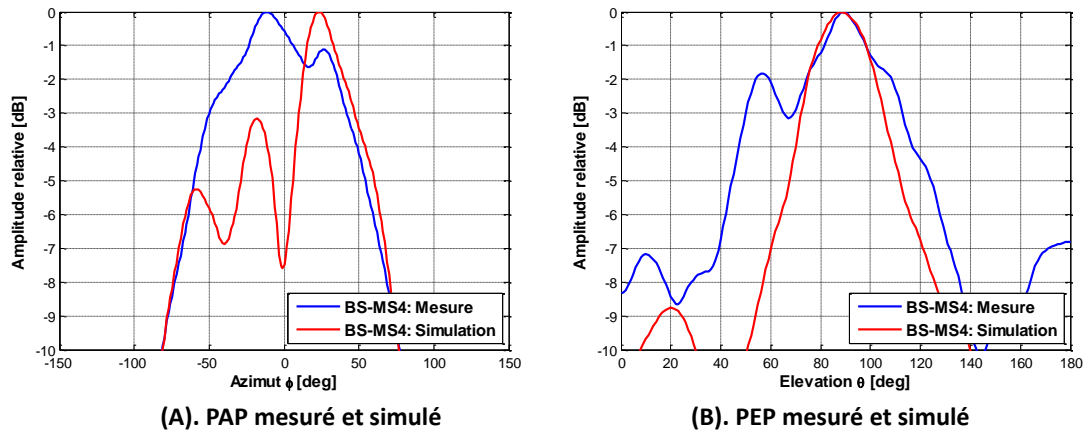


FIGURE 103 : PAP ET PEP SIMULÉS ET MESURÉS POUR LE LIEN BS1-MS3

5.2.3. Comparaison du canal mesuré et simulé au niveau du MS

Dans cette partie, les comparaisons rayon par rayon entre le modèle et les mesures ont été réalisées pour les mêmes liens BS-MS étudiés dans le chapitre 4, en configuration LoS et NLoS. Ceci est pour mieux comprendre et analyser les différences entre les mesures et le modèle, avant de passer à une analyse statistique et synthétique des performances. Pour chaque lien BS-MS les PDP, PAP, PEP et les DoA mesurés et simulés sont analysés.

5.2.3.1. Étude du lien BS-MS1 en visibilité

Le premier scénario étudie la liaison BS1-MS1, avec la BS à 5 mètres de hauteur et le mobile à la position MS1 à 64 m de la BS. La Figure 104 représente à gauche, une vue aérienne de l'environnement de propagation réel et à droite l'environnement simulé avec les rayons identifiés par *Starlight* pour cette configuration. Les positions de la BS et du MS sont représenté respectivement par un cercle rouge et jaune. Comme l'antenne au niveau du mobile permet de mesurer les élévations entre 0° et 90° , seuls les rayons provenant des élévations positives sont considérés. On note que 170 rayons de trajectoires différentes ont été identifiés par *Starlight*. La longueur des trajets simulés varie de 64 m (trajet direct) à 580 m.



FIGURE 104 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT RÉEL DE PROPAGATION (À GAUCHE) ET DES RAYONS SIMULÉS PAR *STARLIGHT* POUR LE LIEN BS-MS1

La Figure 105 représente le PDP mesuré et simulé normalisés pour le lien BS1-MS1. La figure montre une similitude entre les deux PDP. Le trajet principal est le même mais le PDP simulé contient moins d'énergie que celui mesuré. En effet, le PDP simulé présente une décroissance plus importante de la puissance en fonction du retard que celle du PDP mesuré. En effet, trois trajets sont identifiés pour les mesures avec une puissance relative supérieure à -20 dB, tandis que pour le simulateur ces 3 rayons sont bien identifiés mais très affaiblis. Par exemple, à 90 m le PDP mesuré montre l'existence d'un trajet assez fort de -16 dB de puissance, tandis que dans les simulations ce trajet est retrouvé à -40 dB. Ce trajet en simulations correspond à une combinaison de 5 rayons provenant de la même direction et ayant effectué au moins 2 réflexions et une diffraction, ce qui explique sa faible puissance. De plus, un trajet a été identifié à 180 m, plus affaibli pour les mesures mais assez fort pour les simulations. Il correspond à une réflexion sur un bâtiment. Cette sous-estimation de l'énergie simulée peut être due au manque de détails dans l'environnement simulé ou aux coefficients des matériaux considérés qui ne traduisent pas la réalité.

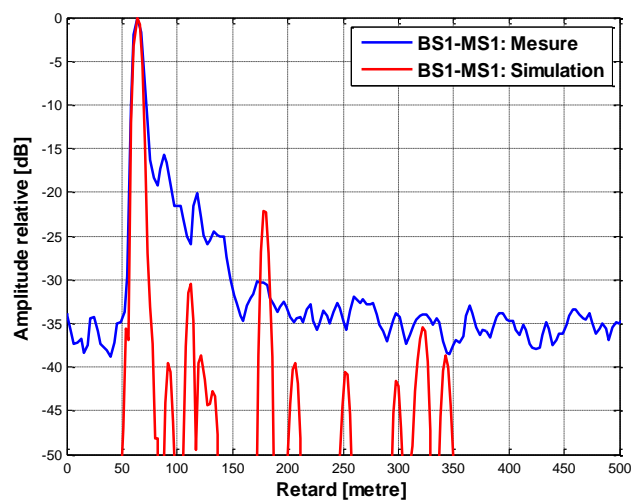


FIGURE 105 : LE PDP SIMULÉ ET MESURÉ POUR LE LIEN BS1-MS1

La visualisation de la Figure 106 qui illustre les directions d'arrivée calculées pour une dynamique de 20 dB, permet de remarquer que les DoA du trajet principal sont bien identifiées par les simulations. De plus, 2 autres directions sont observées dans les mesures avec différents azimuts et élévations. Cependant, le simulateur identifie 4 rayons qui arrivent 1 à 2 ns après le trajet direct avec une puissance relative entre -2 et -4 dB. Ces rayons réalisent chacun une réflexion sur le bâtiment qui se trouve à proximité de la BS. Les DoA sont donc moins dispersées pour les simulations. Ceci peut aussi être observé sur la Figure 107 qui représente les PAP et PEP. Cette dernière montre d'abord que les PAP et PEP simulés contiennent moins d'énergie par rapport à ceux mesurés et que l'énergie est plus répartie dans l'espace pour les mesures. La non prise en considération des éléments de l'environnement à caractère diffus peut expliquer ceci. En effet, comme les mesures ont eu lieu dans un environnement urbain avec un trafic automobile dense, l'intégration de certains éléments (véhicules) pourrait apporter au mobile une énergie plus répartie dans l'espace.

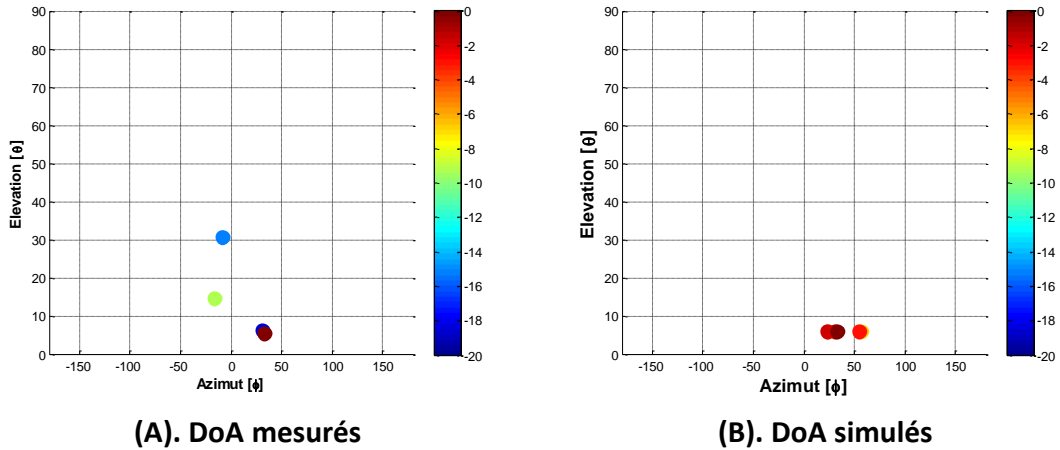


FIGURE 106 : LES 2D-DOA MESURÉS ET SIMULÉS POUR LE LIEN BS1-MS1

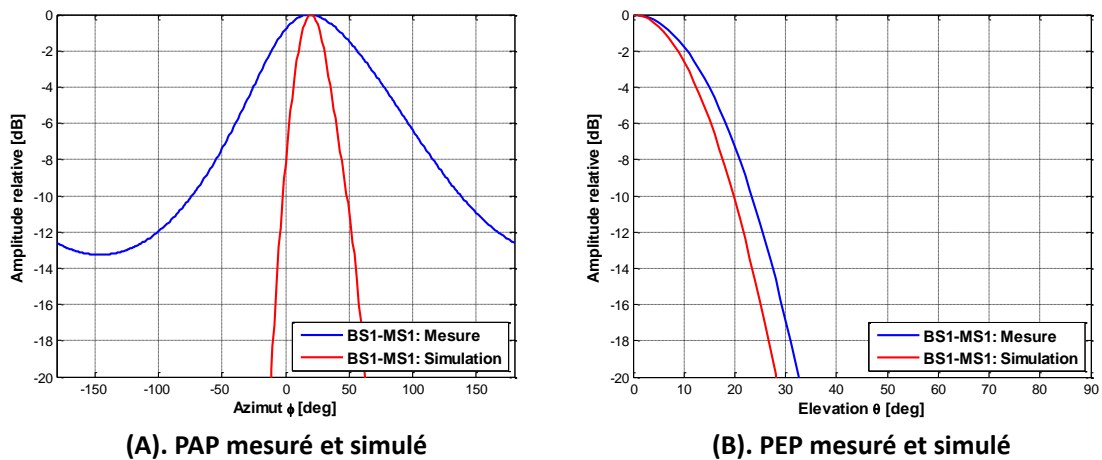


FIGURE 107 : PAP ET PEP SIMULÉS ET MESURÉS POUR LE LIEN BS1-MS1

La comparaison des simulations et mesures est maintenant réalisée toujours pour le mobile à la position MS1, mais cette fois-ci la station de base est placée à 10 m. L’outil *Starlight* a identifié 143 trajets, dont la longueur varie de 64 à 548 m pour le lien MS1-BS2. C’est-à-dire, le nombre de rayons est plus grand pour BS à 5 mètres. Les Figure 108, Figure 109 et Figure 110 représentent respectivement les PDP, DoA, PAP et PEP mesurés et simulés pour le lien BS2-MS1.

Les résultats de comparaison entre les simulations et les mesures pour le lien BS2-MS1 sont les mêmes que ceux du lien BS1-MS2. Le modèle a tendance à sous-estimer le canal en temps comme en espace.

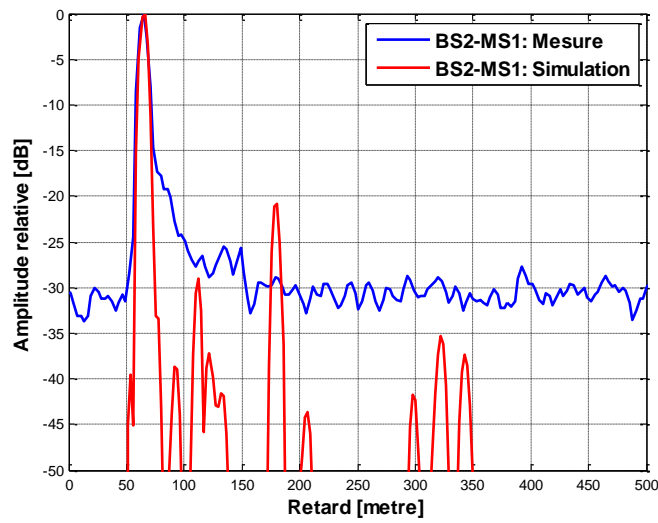


FIGURE 108 : LE PDP SIMULÉ ET MESURÉ POUR LE LIEN BS2-MS1

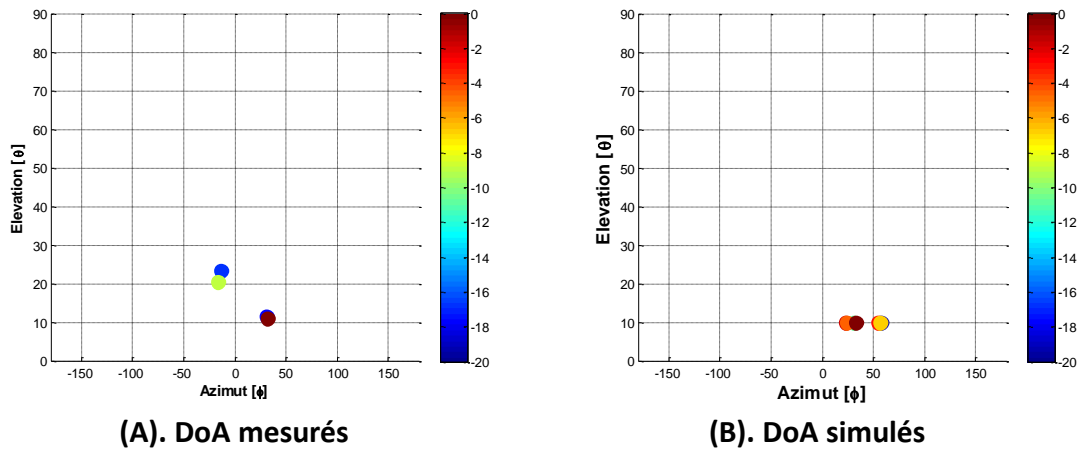


FIGURE 109 : LES 2D-DOA MESURÉS ET SIMULÉS POUR LE LIEN BS2-MS1

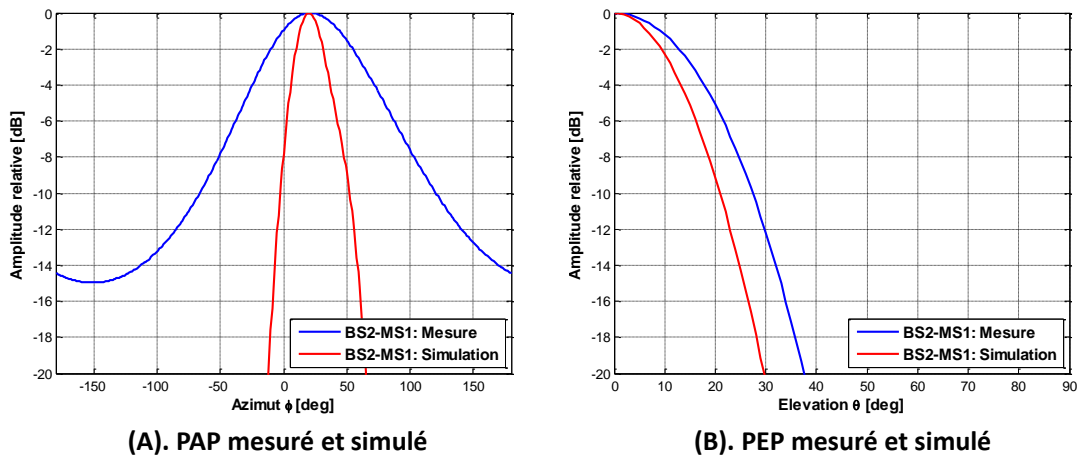


FIGURE 110 : PAP ET PEP SIMULÉE ET MESURÉE POUR LE LIEN BS2-MS1

5.2.3.2. Étude du lien BS-MS2 en non visibilité

Dans cette partie, un lien en non visibilité BS-MS2 est étudié afin d'évaluer les performances du modèle *Starlight* en condition de non visibilité. La Figure 111 représente à gauche, un aperçu de l'environnement de propagation réel et à droite l'environnement simulé avec les rayons identifiés par *Starlight* pour cette configuration. Comme pour le cas précédent, seuls les rayons provenant des élévations positives sont considérés pour garantir une comparaison équitable entre les mesures et les simulations. Le nombre total de rayons identifiés pour cette configuration est de 43 rayons dont la longueur varie de 103 à 415 m.



FIGURE 111 : APERÇU DE L'ENVIRONNEMENT RÉEL DE PROPAGATION (À GAUCHE) ET DES RAYONS SIMULÉS PAR *STARLIGHT* POUR LE LIEN BS-MS1

Tout d'abord, le PDP simulé et mesuré calculés pour ce lien sont représentés dans la Figure 112. La comparaison entre les deux PDP montre une similitude entre les mesures et les simulations. Les principaux trajets ont été identifiés par le modèle. Le premier trajet identifié a une longueur, à peu près égale à la distance BS1-MS2 (103 m) Ce trajet

est le résultat de la diffraction de l'onde sur le coin d'un bâtiment. Ce trajet est retrouvé en simulation mais est sous-estimé par rapport aux mesures. Le deuxième trajet (115 m) identifié par les mesures et les simulations effectue deux réflexions successives sur les bâtiments avant d'arriver au mobile. La puissance relative du trajet est bien estimée par le modèle. De même, le 3^{ème} trajet (124 m) a bien été identifié par le simulateur. Ce trajet est issu d'une réflexion sur le bâtiment vis-à-vis de la BS et est celui qui contient le maximum d'énergie. Par contre, certains trajets ne sont pas identifiés par le modèle à cause des différences entre l'environnement réel et modélisé.

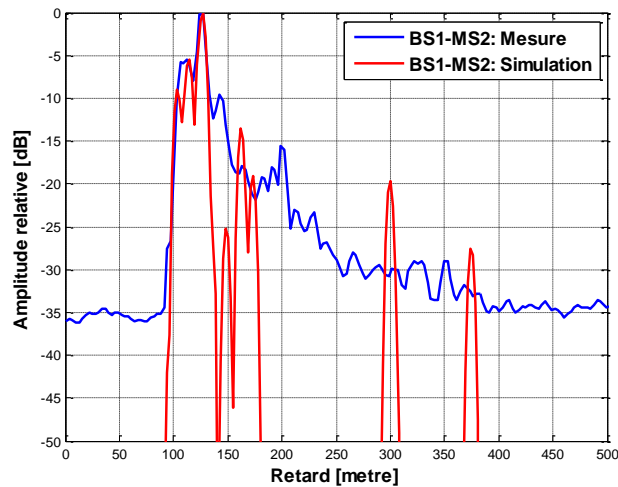


FIGURE 112 : LE PDP SIMULÉ ET MESURÉ POUR LE LIEN BS1-MS2

Les directions d'arrivée des rayons simulés et mesurés sont représentées dans la Figure 113. La visualisation de la répartition des 2D-DoA des rayons permet d'identifier pour le lien BS1-MS2 une direction principale ($\theta = 12^\circ$, $\phi = -40^\circ$) pour les mesures et les simulations. Les 3 premiers trajets identifiés précédemment proviennent de cette direction. Cependant, d'avantages de directions ont été identifiées pour les mesures. Les profils angulaires de puissance PAP et PEP (Figure 114) montrent que la direction principale d'énergie est la même pour les simulations et les mesures. Cependant, les profils angulaires de puissance mesurés présentent plus d'énergie que ceux simulés.

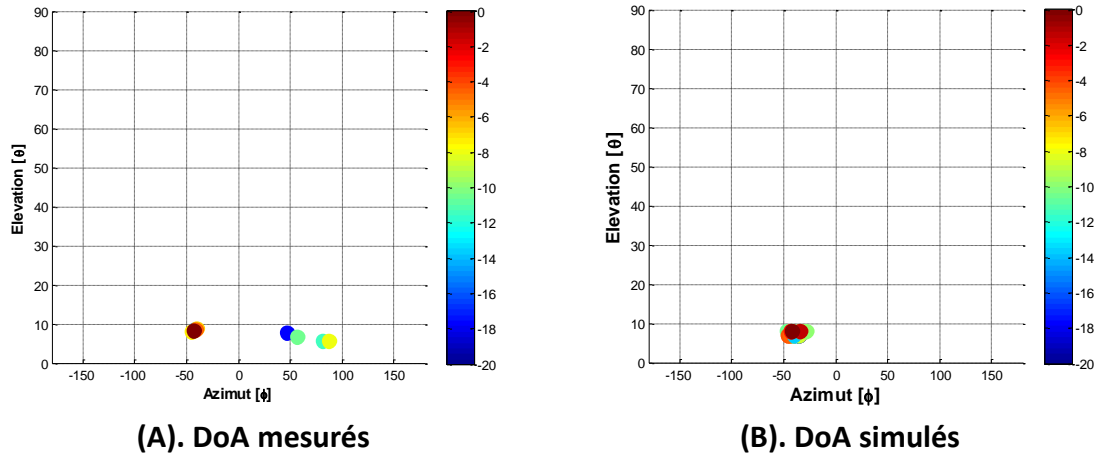


FIGURE 113 : LES 2D-DOA MESURÉS ET SIMULÉS POUR LE LIEN BS1-MS2

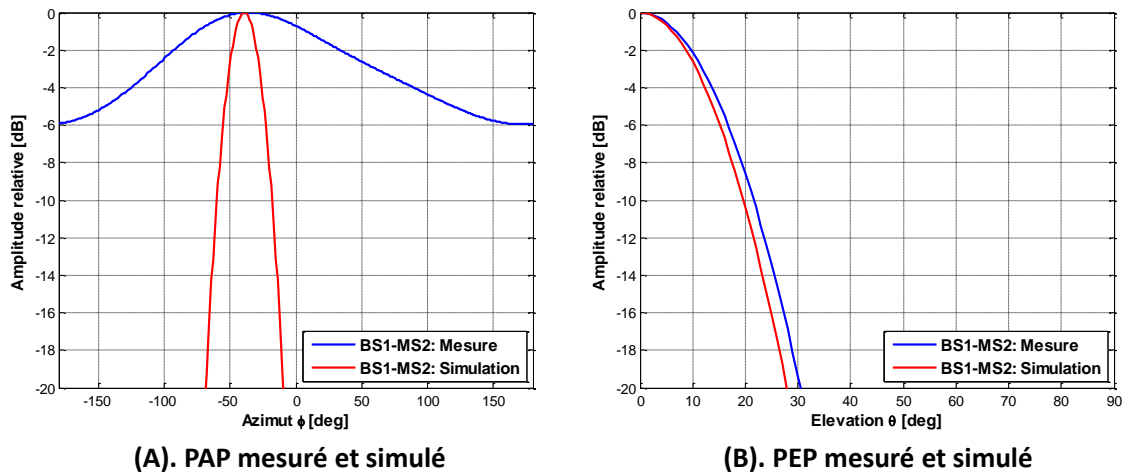


FIGURE 114 : PAP ET PEP SIMULÉS ET MESURÉS POUR LE LIEN BS1-MS2

5.3. Analyse statistique du canal simulé

Les exemples étudiés dans la section précédente ont permis une comparaison rayon par rayon entre les simulations et les mesures. Les résultats indiquent généralement une sous-estimation de certains rayons par le modèle. Cependant, une étude statistique sur un grand nombre d'échantillons permettra de mieux évaluer les performances du modèle. De ce fait, les résultats présentés dans cette partie sont issus des campagnes de mesures du chapitre 4. Les simulations ont été réalisées pour chaque environnement de mesures en considérant un maximum de 4 réflexions et une diffraction. La comparaison des canaux mesurés et simulés est réalisée via leurs paramètres d'étalements DS, AAS et EAS respectifs. Un seuil de 20 dB de dynamique a été considéré pour le calcul de ces derniers.

5.3.1. Environnement 1 : Urbain

5.3.1.1. *Street canyon* : Campagne de mesures SC

Pour évaluer les performances du modèle, le premier environnement étudié est celui d'un *street canyon* urbain de la campagne SC. La Figure 115 montre l'environnement réel des mesures SC et sa modélisation par *Starlight*.

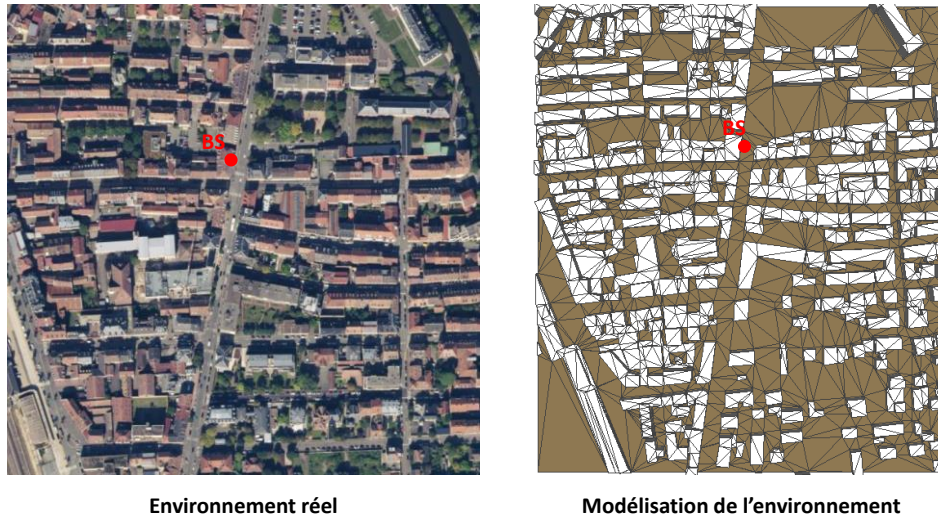


FIGURE 115 : ENVIRONNEMENT RÉEL ET SA MODÉLISATION PAR *STARLIGHT* POUR SC

Les CDF des étalements DS, AAS et EAS simulés et mesurés pour les parcours SC1 (LoS) et SC2 (NLoS) sont données à la Figure 116. La visualisation de la figure permet d'observer plus de dispersion en NLoS pour les simulations et les mesures. En LoS, les valeurs des DS, AAS et EAS à 90% ne dépassent pas 30 ns, 18° et 5° respectivement. Par contre en NLoS, les valeurs à 90% des paramètres simulés et mesurés ne sont pas similaires. En effet à 90% des DS correspond à 85 ns pour les mesures et 158 ns pour les simulations. De même, à 90% les AAS et EAS mesurés sont respectivement à 25° et 9°, tandis que celles simulées sont de 34° et 0,7°. Ceci signifie qu'en non visibilité le modèle surestime les paramètres du canal.

De la même manière que les mesures, l'effet de la hauteur de la base sur le canal simulé est évalué. Les courbes CDF des paramètres tracées à chaque hauteur permettent de montrer qu'en condition LoS, les paramètres de dispersion à 90% sont identiques pour les deux hauteurs. L'effet de la hauteur de l'antenne sur les paramètres spatio-temporels du canal est négligeable en LoS. Cependant, en NLoS la courbe CDF du DS montre que à 70%, les dispersions temporelles du canal pour les deux hauteurs sont similaires. Par contre, plus d'étalement est observé pour la hauteur inférieure BS1. Les moyennes des étalements des retards sont 92 ns pour BS1 et 73 ns pour BS2. Les AAS du canal simulé présentent plus de dispersion pour BS2. Les moyennes des étalements des azimuts sont 10° pour BS1 et 19° pour BS2. En NLoS, le DS est donc plus grand pour une hauteur inférieure alors que le contraire est observé pour l'AAS. Les dispersions

temporelles du canal mesuré sont plus importantes quand la BS est à une hauteur inférieure, tandis que les dispersions angulaires sont peu impactées par ce paramètre. Néanmoins, un léger étalement des AAS pour BS2 est remarqué en NLoS. Les simulations et les mesures sont alors en accord.

Les corrélations entre les paramètres DS, AAS et EAS et la distance BS-MS, ainsi que les intercorrélations ont été étudiées. Le Tableau 19 résume les coefficients de corrélation calculés. Aucune corrélation significative entre les paramètres et la distance BS-MS n'a été identifiée en visibilité, tandis que les mesures ont montré une dépendance entre l'AAS et la distance parcourue par le mobile. En non visibilité, une forte corrélation a été identifiée entre la distance BS-MS et les paramètres DS et AAS. Ceci a été aussi retrouvé en mesures. D'après les résultats, les paramètres ne semblent pas dépendre entre eux. Toutefois, les coefficients d'intercorrélation entre l'AAS et le DS sont relativement forts en NLoS. Les paramètres AAS et DS semblent proportionnels. La même tendance a été observée pour les mesures en LoS.

TABLEAU 19 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE PARAMÈTRES ET DISTANCE POUR LES SIMULATIONS SC

	DS vs. Dist	AAS vs. Dist	EAS vs. Dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
SC1-BS1	0,68	0,33	0,25	0,3	0,14	0,27
SC1-BS2	0,62	0,34	0,27	0,15	0,10	0,25
SC2-BS1	0,85	0,80	0,32	0,72	0,4	0,42
SC2-BS2	0,9	0,85	0,4	0,73	0,4	0,50

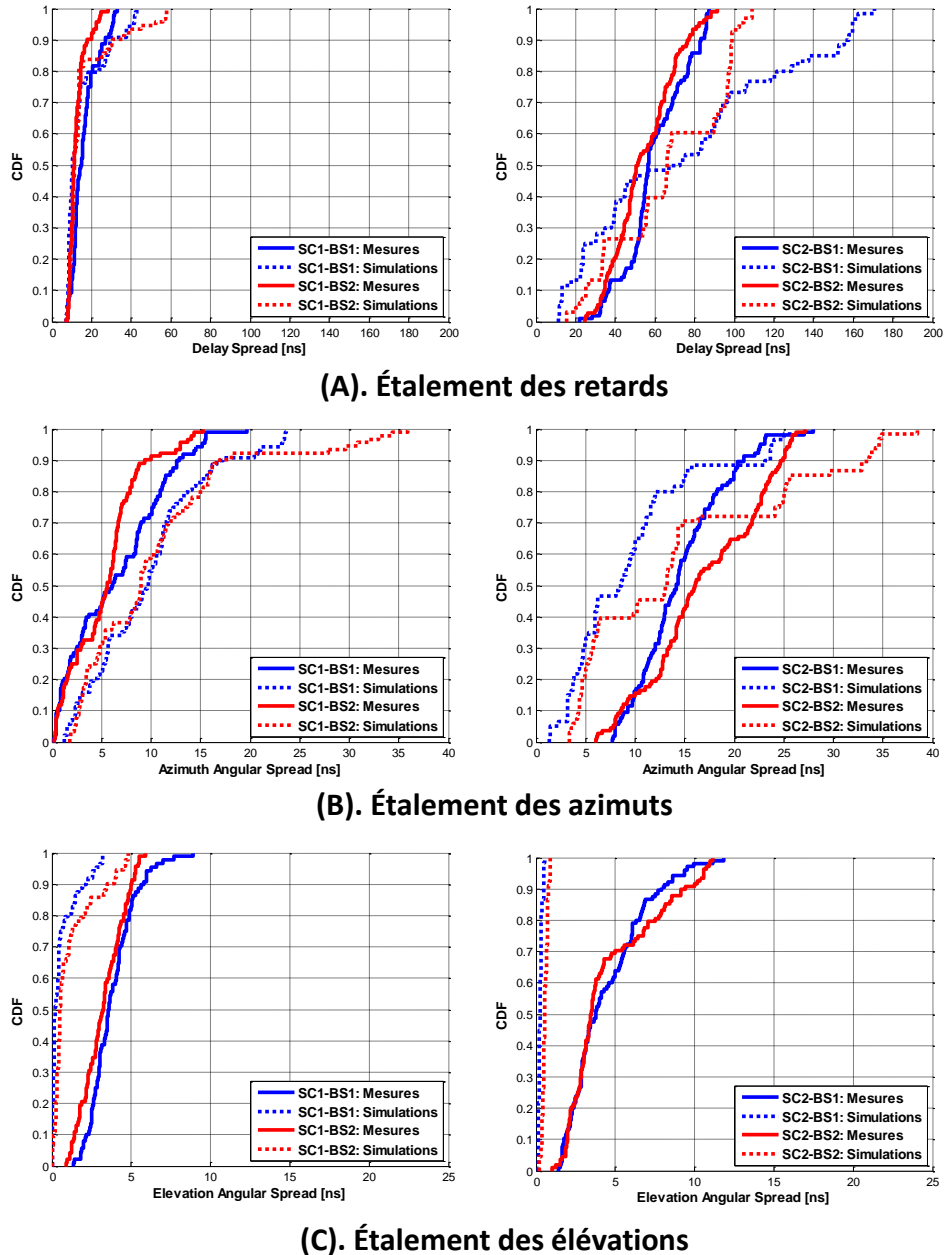


FIGURE 116 : FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULÉE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'ÉTALEMENT MESURÉS ET SIMULÉS POUR LES DEUX TRAJET SC1 (À GAUCHE) ET SC2 (À DROITE)

5.3.1.2. Place ouverte : Campagne URB

La deuxième configuration en environnement urbain étudiée est celle de la place « République » de la campagne de mesures URB. La Figure 117 montre l'environnement réel des mesures UR et sa modélisation par *Starlight*.

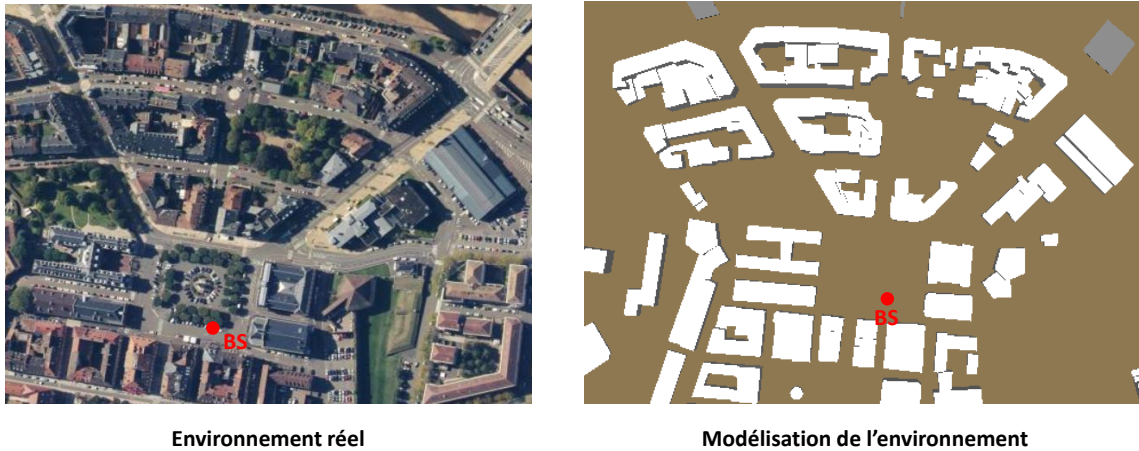


FIGURE 117 : ENVIRONNEMENT RÉEL ET SA MODÉLISATION PAR *STARLIGHT* POUR URB

Les courbes CDF des paramètres DS, AAS et EAS sont présentées à la Figure 118. La visualisation des courbes montre que la dispersion temporelle est plus importante pour les mesures. Les valeurs du DS à 90% varient de 84 à 99 ns pour les mesures et de 67 ns à 74 ns pour les simulations. Toutefois, la dispersion en azimut est étalée pour les simulations (30° à 50% et 41° à 90%). En effet, 80% des AAS sont inférieurs à 10 ns ce qui indique que l'énergie est bien localisée dans l'espace, alors que le modèle détecte de l'énergie dans plusieurs directions de l'espace. Ceci peut être expliqué par le manque d'information dans la base de données. L'environnement simulé (Figure 117) donne une modélisation grossière de l'environnement réel. D'un côté, un feuillage dense entourant la place peut introduire une atténuation de l'énergie dans quelques directions. D'un autre côté, au milieu de la place se trouve une statue non considérée par les simulations pourrait être à l'origine des rayons fort provenant de DoA localisés.

Les simulations ont été réalisées, comme les mesures, pour 3 hauteurs de la BS. Les courbes CDF des étalements des retards simulés montrent une similitude les deux courbes correspondant aux hauteurs de la BS. L'effet de la hauteur n'a donc pas d'effet significatif sur la dispersion temporelle du canal simulé pour BS1 et BS2, alors que moins de dispersion est notée pour BS3. Les moyennes des DS simulés dans les cas BS1, BS2 et BS3 sont respectivement 55, 53 et 47 ns. Les étalements des azimuts et des élévations simulés sont peu impactés par la hauteur de la BS. En simulation, les moyennes des AAS sont identiques pour les 3 hauteurs et vaut 25°, tandis que celle des EAS varie de 1° pour BS1 à 3° pour BS3. Ce résultat est retrouvé aussi dans les mesures, où l'effet de la hauteur est plus visuel sur les DS, qui ont tendance à augmenter pour les hauteurs du BS inférieures, alors qu'elles ont peu d'impact sur les dispersions angulaires.

Les corrélations entre les paramètres DS, AAS et EAS et la distance BS-MS, ainsi que les intercorrélations ont été étudiées. Le Tableau 20 résume les coefficients de corrélation calculés. Les résultats montrent que les paramètres DS et EAS sont fortement liés à la distance BS-MS. Néanmoins, le DS a tendance à augmenter quand la distance

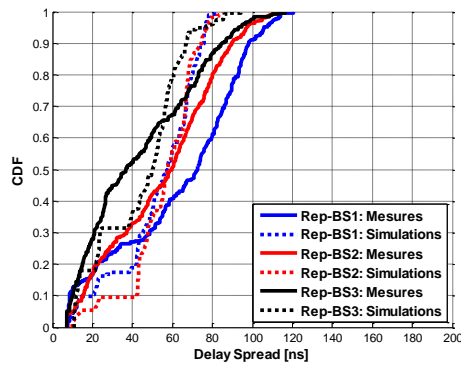
BS-MS augmente, alors que le EAS a tendance à diminuer. Cette tendance, n'a pas été retrouvée dans les mesures.

Aucune corrélation significative entre les paramètres et la distance BS-MS n'a été identifiée pour les simulations. Toutefois, l'EAS et les DS sont proportionnels pour les mesures.

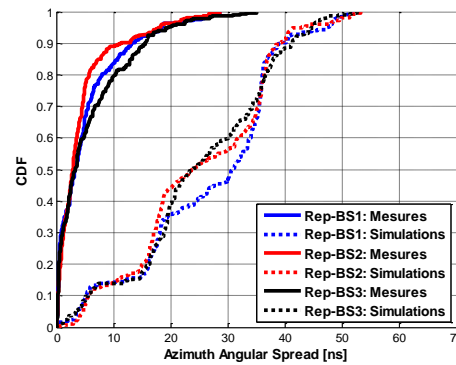
La comparaison des canaux mesurés et simulés dans cet environnement montre une surestimation des étalements des azimuts et une sous-estimation des étalements des retards par le modèle. Ceci est dû aux grandes différences entre l'environnement réel et celui modélisé.

TABLEAU 20 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE PARAMÈTRES ET DISTANCE POUR LES SIMULATIONS REP DE URB

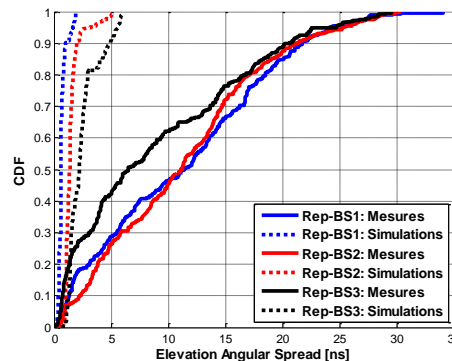
	DS vs. Dist	AAS vs. Dist	EAS vs. Dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
Rep-BS1	0,9	0,39	-0,76	0,5	-0,62	-0,25
Rep-BS2	0,82	0,19	-0,82	0,27	-0,67	-0,20
Rep-BS3	0,88	0,33	-0,88	0,5	-0,67	-0,4



(A). Étalement des retards



(B). Étalement des azimuts



(C). Étalement des élévations

FIGURE 118 : FONCTIONS DE DISTRIBUTION CUMULÉE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'ÉTALEMENT MESURÉ ET SIMULÉ POUR LE TRAJET REP DE LA CAMPAGNE DE MESURES URB

5.3.2. Environnement 2 : Suburbain

Le deuxième environnement étudié est un microcellulaire urbain. Les configurations LoS et NLoS sont étudiés. La Figure 119 montre une modélisation de l'environnement par *Starlight*.

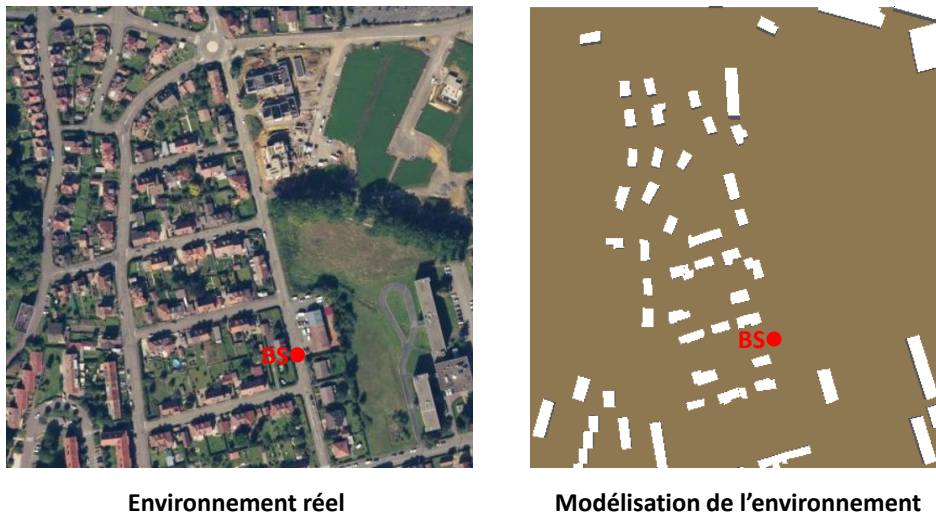


FIGURE 119 : ENVIRONNEMENT RÉEL ET SA MODÉLISATION PAR *STARLIGHT* POUR SU

Les courbes CDF des étalements temporels et angulaires de chaque trajet sont présentées dans la Figure 120. Comme pour les mesures, la visualisation des résultats permet d'identifier 3 différents comportement du canal : LoS pour le trajet R1, Quasi-LoS pour R2 et R3 et enfin NLoS pour R4. L'étalement des retards simulé est plus grand que celui mesuré pour toutes les mesures SU. Les valeurs moyennes du DS en mesures et en simulations sont respectivement 13 et 33 ns en LoS, 30 et 57 ns en Quasi-LoS et 151 et 202 ns en NLoS. L'observation des courbes des étalements angulaires en azimut et en élévation, montre que le AAS simulé est supérieur à la mesure, tandis que celui le EAS est plus petit. Ceci veut dire que le modèle prédit plus de dispersion temporelle et angulaire que les mesures pour cet environnement, probablement à cause de la modélisation grossière de l'environnement de propagation (Figure 119). La comparaison entre les mesures et simulations a montré que le modèle surestime le canal en environnement suburbain.

La dépendance des paramètres DS, AAS et EAS de la distance BS-MS a été étudié. Les coefficients de corrélation correspondants sont donnés dans le tableau 3. Les résultats ne montrent pas de corrélation entre les paramètres de dispersion et la distance BS-MS en LoS et en NLoS, tandis que les DS ont tendance à augmenter avec la distance BS-MS en Quasi-LoS. Les mesures ne montrent pas une forte corrélation entre ces deux paramètres.

L'étude de l'intercorrélation entre les paramètres DS, AAS et EAS montre une corrélation moyenne entre l'AAS et DS pour tous les liens BS-MS, ainsi qu'une forte corrélation entre l'EAS et le DS, et l'EAS et l'AAS.

TABLEAU 21 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE PARAMÈTRES ET DISTANCE POUR LES SIMULATIONS REP DE SU

	DS vs. Dist	AAS vs. Dist	EAS vs. Dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
R1	0,49	0,14	0,18	0,50	-0,04	0,55
R2	0,94	0,42	0,46	0,53	-0,07	0,5
R3	0,95	0,23	0,47	0,52	-0,1,	0,47
R4	0,16	0,08	0,02	0,57	0,75	0,8

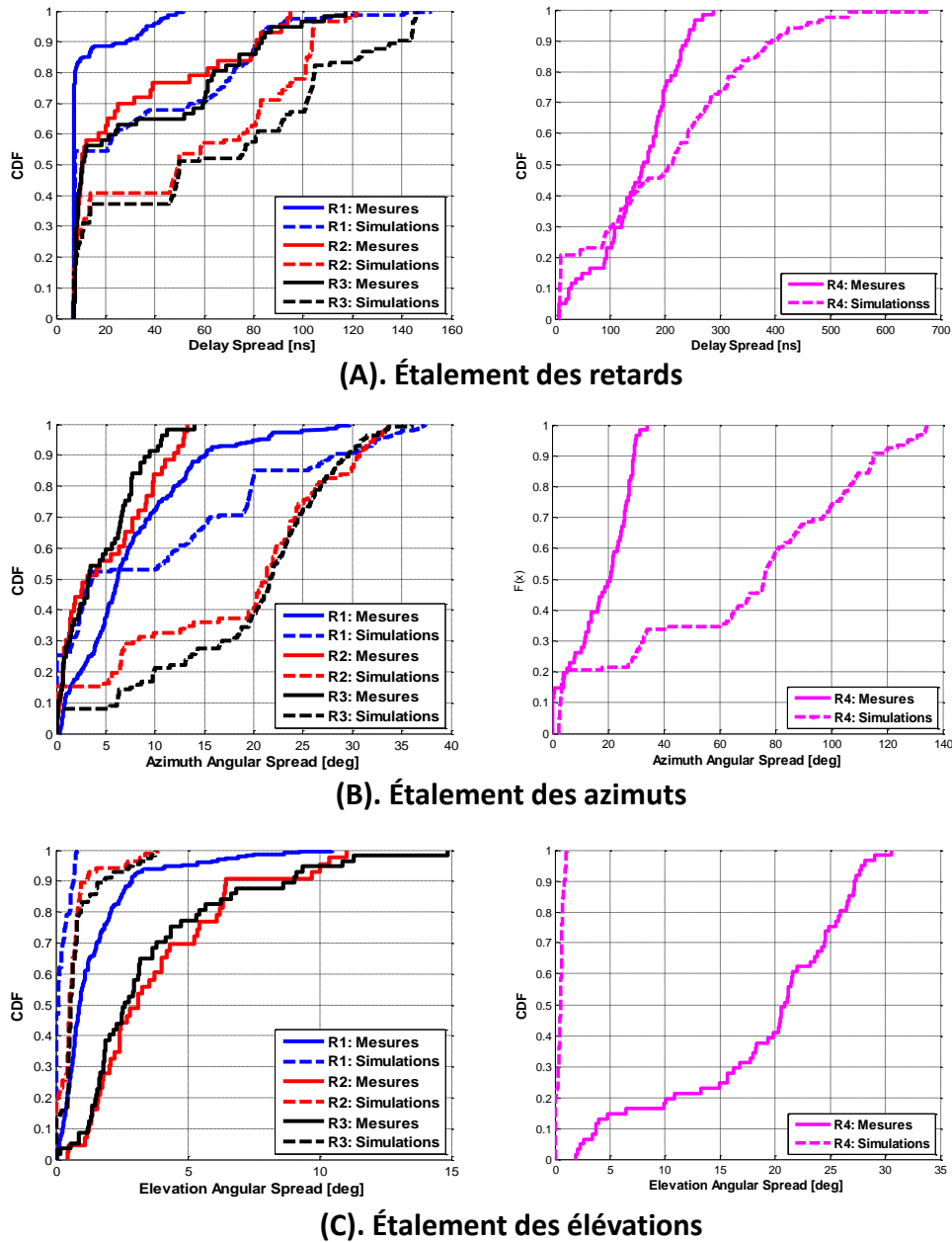


FIGURE 120 : FONCTIONS DE DISTRIBUTION CUMULÉE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'ÉTALEMENT MESURÉS ET SIMULÉS POUR LE TRAJET REP DE LA CAMPAGNE DE MESURES SU

5.3.3. Environnement 3 : Parking ouvert

Le troisième environnement étudié est un environnement ouvert urbain type *Parking*. La Figure 121 montre une modélisation de l'environnement par *Starlight*.



Environnement réel

Modélisation de l'environnement

FIGURE 121 : ENVIRONNEMENT RÉEL ET SA MODÉLISATION PAR *STARLIGHT* POUR PARK

Les courbes CDF des étalements des retards, des azimuts et des élévations sont représentées à la Figure 122. Les résultats montrent que les CDF des paramètres simulés sont sensiblement identiques pour les deux hauteurs BS1 et BS2. La hauteur de la BS a peu d'impact sur les dispersions du canal simulé. Les mesures montrent à peu près le même résultat en faisant abstraction du léger étalement noté pour BS1.

Les moyennes des étalements des retards varient de 45 et 50 ns pour les mesures, et de 54 à 57 ns pour les simulations. Cela signifie que le modèle prédit plus de dispersion temporelle par rapport aux mesures. Cet effet est observé aussi pour les dispersions en azimut, où les moyennes d'AAS sont autour de 15° pour les simulations contre 10° pour les mesures. Cependant, les étalements des élévations simulés sont inférieurs à ceux mesurés. Les mesures et simulations sont plutôt en accord pour cet environnement.

Contrairement aux mesures, les coefficients de corrélation entre les paramètres DS, AAS et EAS et la distance BS-MS (Tableau 22) ne montrent pas de dépendance entre ces derniers. Cependant, l'analyse des coefficients d'intercorrélation montre que les paramètres de dispersion du canal simulé sont tous liés entre eux et sont proportionnels. Ceci est en accord avec les résultats des mesures.

TABLEAU 22 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE PARAMÈTRES ET DISTANCE POUR LES SIMULATIONS PARK

	DS vs. Dist	AAS vs. dist	EAS vs. dist	AAS vs. DS	EAS vs. DS	EAS vs. AAS
PARK-BS1	0,22	0,58	0,1	0,86	0,80	0,77
PARK-BS2	0,3	0,59	0,1	0,90	0,84	0,80

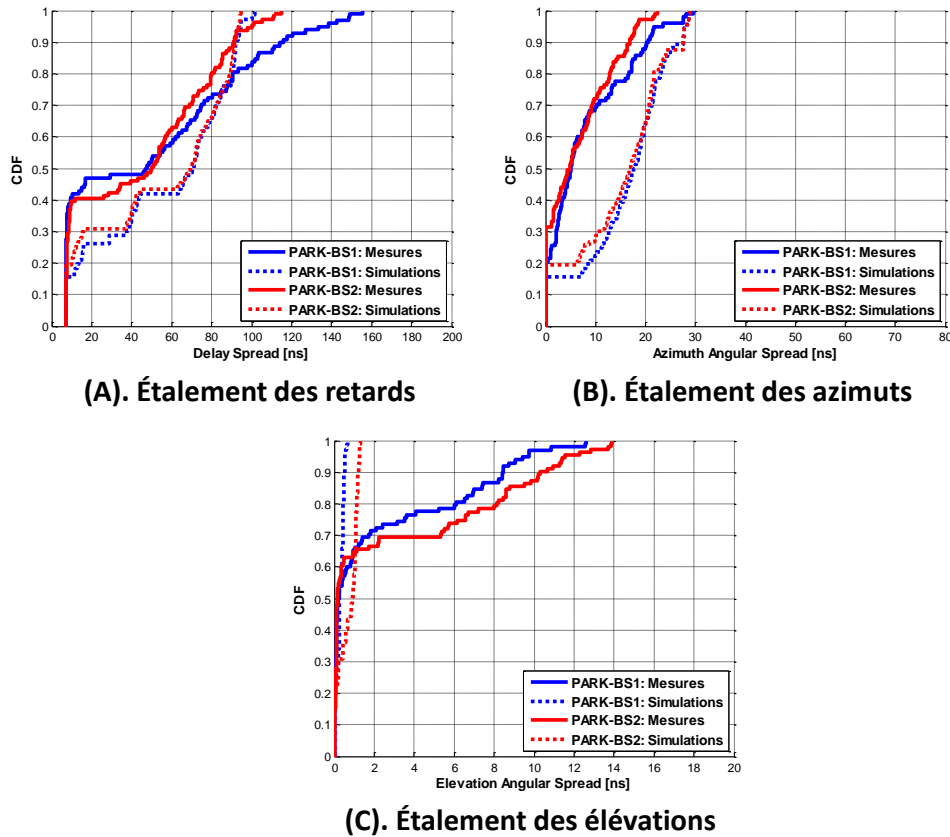


FIGURE 122 : FONCTIONS DE DISTRIBUTION CUMULÉE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'ÉTALEMENT MESURÉS ET SIMULÉS POUR LE TRAJET REP DE LA CAMPAGNE DE MESURES PARK

5.3.4. Synthèse

Un récapitulatif de l'analyse statistique des paramètres de dispersion est donné par le Tableau 23. Il résume les moyennes des paramètres DS, AAS, EAS mesurés et prédits par le modèle. En général, les résultats montrent un agrément acceptable entre les mesures et le modèle. Cependant, une surestimation des AAS et une sous-estimation des EAS par *Starlight* sont observées. Cette tendance est plus observée en environnement suburbain et sur les mesures de la place "République", où la modélisation de l'environnement par le modèle était très grossière.

TABLEAU 23 : RÉCAPITULATIF DE LA COMPARAISON ENTRE MESURES ET SIMULATIONS

	Condition	Environnement	DS [ns]		AAS [deg]		EAS [deg]	
			Mes	Sim	Mes	Sim	Mes	Sim
SC1-BS1	LoS	<i>Street Canyon</i> urbain SC	16	13	6	14	4	4
SC1-BS2			12	9	5	16	4	1
SC2-BS1	NLoS		60	92	14	10	5	2
SC2-BS2			52	73	17	19	5	3
Rep-BS1	LoS	Urbain (place ouverte) URB	70	55	5	25	11	1
Rep-BS2			54	53	5	25	11	2
Rep-BS3			43	47	6	25	10	3
R1	LoS	Suburbain SU	13	33	8	11	2	0,3
R2	Quasi-		28	51	5	18	4	1
R3	LoS		31	63	5	19	4	1
R4	NLoS		150	202	17	66	20	0,5
PARK-BS1	LoS	Parking (espace ouvert)	50	57	11	16	3	0,3
PARK-BS2			45	54	10	15	4	0,7

5.4. Conclusion

Ce chapitre était principalement dédié à la l'étude de l'outil *Starlight* et à son évaluation à travers les données mesurées collectées des campagnes de mesures présentées dans le chapitre 3 et 4. Dans un premier temps, la convergence de l'outil a été étudiée afin de déterminer le nombre de phénomènes pertinents suffisant à caractériser la propagation en environnements extérieurs. Ensuite, une comparaison entre les mesures et les simulations pour quatre cas d'étude a été réalisée. Le PDP, le PAP et le PEP ont été choisis comme métriques de comparaison et un accord raisonnable a été constaté. Une sous-estimation du niveau de certains trajets a été observé, probablement dû aux coefficients des matériaux utilisés. De plus, une analyse statistique des paramètres large bande DS, AAS et EAS simulés a été menée pour comparaison entre la mesure et la prédiction. Un accord satisfaisant a été observé.

Conclusion générale et perspectives

La technologie *massive MIMO* est l'une des technologies clés de la nouvelle génération des réseaux mobiles 5G. En augmentant le nombre d'antennes en émission et en réception et en tirant parti de la propagation multi-trajets, les systèmes MIMO massifs permettent d'améliorer considérablement la qualité de la transmission grâce à l'exploitation de la dimension spatiale du canal. Le déploiement de tels réseaux nécessite de mettre en place un modèle de canal. Pour cela, une caractérisation précise du canal de propagation est indispensable. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse. L'objectif principal des travaux réalisés est d'apporter une caractérisation spatio-temporelle complète du canal de propagation *massive MIMO* dans un contexte 5G à 3,7 GHz en environnements extérieurs. En outre, le but de cette étude est de faire avancer le développement et l'optimisation du modèle de propagation *Starlight*, développé par Orange Labs, d'abord en fournissant une base de données complète de mesures dans plusieurs contextes, puis en validant le modèle à partir d'une comparaison aux mesures.

Ce travail est une nouvelle contribution à une meilleure connaissance du canal radio MIMO massif. L'étude bibliographique réalisée a montré la nécessité d'effectuer des mesures *massive MIMO* dans la « bande-cœur 5G », dans différents types d'environnement extérieurs et s'intéressent à la caractérisation spatio-temporelle 3D du canal. Ainsi, les étalements des retards DS (*Delay spread*) et angulaires en azimut AAS (*Azimuth Angular Spread*) et en élévation EAS (*Elevation Angular Spread*) sont étudiés. À cet effet, plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées à 3,7 GHz dans deux configurations. La première utilise un réseau d'antennes planaire (UPA) de 64 éléments en guise de station de base (BS), et un réseau d'antennes patch à 8 éléments en station mobile (MS). Le but de cette première campagne est d'analyser les paramètres spatio-temporels à la BS. La deuxième a été réalisée avec un sondeur mobile et un réseau d'antennes UPA virtuel du côté du mobile afin d'analyser le canal de propagation au niveau du MS.

Concernant la première campagne de mesures 8Tx×64Rx, elle a été réalisée dans un environnement urbain comportant des structures peu élevées assimilable à une couverture microcellulaire. Une totalité de 11 liens BS-MS ont été mesurés en LoS et NLoS. Dans un premier temps, une analyse spatio-temporelle 3D détaillée sur deux exemples de liens BS-MS a été faite afin d'identifier les différents multi-trajets pertinents et les phénomènes de propagation contribuant au canal. Dans ces configurations de mesures, la BS et le mobile se trouvent tous les deux dans la même rue, en-dessous du niveau moyen des toits. La propagation des ondes est alors guidée par les bâtiments qui bordent la rue. Dans un second temps, une étude statistique sur les 11 liens BS-MS sur les paramètres spatio-temporels du canal a été réalisée. Les paramètres DS, AAS et EAS sont en moyennes semblables à ceux trouvés dans la

littérature. De plus, les résultats montrent la non-dépendance de la distance BS-MS avec les paramètres DS, AAS et EAS. Cependant, les paramètres spatio-temporels semblent être bien corrélés, surtout les deux paramètres de dispersion angulaire AAS et EAS où le coefficient de corrélation correspondant dépasse les 90%. Compte tenu du faible nombre de mesures et du peu de références qui caractérisent le canal dans ces configurations, d'autres mesures sont nécessaires pour confirmer les résultats obtenus.

Plusieurs campagnes de mesure SIMO ont été ensuite réalisées dans divers environnements (urbain, suburbain, rural, parking) à 3,7 GHz, avec un sondeur mobile et un large réseau antennaire virtuel UPA de 36×105 antennes en MS. La station de base a été placée à plusieurs hauteurs afin d'en déduire l'effet sur le canal de propagation. Une méthode d'estimation des directions d'arrivée en azimut et en élévation à partir des réponses impulsionnelles (RI) mesurées a été développée. Cette méthode a été appliquée à chaque RI afin d'identifier les rayons pertinents incidents au réseau d'antennes. L'analyse des résultats de caractérisation a été réalisée par une étude statistique des paramètres spatio-temporels de propagation. Les résultats montrent que la hauteur de la BS a un fort impact sur l'étalement temporel du canal, tandis que les étalements angulaires sont moins sensibles à ce paramètre. Les valeurs du DS sont plus grandes quand la hauteur de la BS est faible. En plus, le canal est fortement impacté par l'environnement de propagation. Différentes tendances ont été observées selon les différents scénarios de mesures étudiés. Les principaux phénomènes identifiés sont d'abord la propagation guidée par les bâtiments dans le cas où les mesures sont effectuées dans des rues avec la BS au-dessous du niveau des toits. Ensuite, la propagation par-dessus les toits quand la hauteur de la BS dépasse largement les toits des bâtiments de l'environnement.

Après la caractérisation du canal de propagation *massive MIMO* par approche expérimentale, la dernière partie des travaux de thèse a été consacrée à l'étude du modèle de propagation *Starlight* et son évaluation à travers une comparaison avec les données mesurées. Le modèle développée par Orange Labs à Belfort utilise la méthode du tracé de rayons pour fournir une caractérisation déterministe des canaux de propagation en environnements extérieurs. Dans un premier temps, la convergence de l'outil a été étudiée et a montré qu'une combinaison de 4 réflexions et 1 diffraction est suffisante pour modéliser la propagation en environnement *outdoor*. Ensuite, le simulateur *Starlight* a été comparé aux résultats des campagnes de mesures pour quelques exemples en visibilité et en non visibilité. Cette comparaison rayon par rayon a été effectuée en comparant les profils de puissance PDP, PAP et PEP, et a montré que le modèle retrouve la majorité des rayons principaux mais qu'il a tendance plutôt à sous-estimer l'énergie des rayons. En complément, le modèle a été comparé aux mesures SIMO du chapitre 4 dans différents environnements à travers une étude statistique sur un grand nombre d'échantillons afin de mieux évaluer les performances du modèle. En général, un accord satisfaisant entre le modèle *Starlight* et les mesures du canal a été observé, malgré que certains rayons aient été sous-estimés par le modèle à cause du manque d'informations dans l'environnement modélisé.

Le travail présenté dans cette thèse met en évidence toutes les informations utiles qui peuvent être extraites à partir des données mesurées et simulées afin d'aboutir à une caractérisation complète du canal de propagation dans un contexte *massive MIMO* à 3,7 GHz. Dans une perspective à moyen terme, l'analyse doit être poursuivie en se focalisant sur les points suivants :

- Étendre l'analyse rayon par rayon à plusieurs exemples de lien BS-MS mesurés dans divers types d'environnements.
- Caractériser le canal de propagation à 3,7 GHz dans un contexte *massive MIMO* en bande étroite à partir des mesures réalisées dans cette thèse.
- Évaluer les capacités des systèmes dans les différents environnements étudiés.
- Ajuster la base de données utilisée dans la modélisation de l'environnement de propagation par *Starlight*.

Dans une perspective à long terme, la campagne de mesure 8Tx×64Rx peut être complétée par des mesures dans d'autres types d'environnement ou dans des configurations différentes. En outre, une campagne de mesure *massive MIMO* avec le réseau Scan 64 en station de base et le réseau d'antenne UPA virtuel en mobile pourrait être pertinente.

Table des Figures

Figure 1 : Les usages attendus de la 5G.....	19
Figure 2 : Les antennes massive MIMO	21
Figure 3 : Bandes de fréquences millimétriques pour la 5G.....	21
Figure 4: Réseau hétérogène composé d'une macro cellule et de plusieurs small cells permettant de soulager le trafic de données de la macro cellule.....	22
Figure 5 : Système MIMO	23
Figure 6 : Illustration du rayonnement d'un système point à point et d'un système multi utilisateurs	24
Figure 7 : Exemple de réseaux d'antennes massive MIMO	26
Figure 8 : Concept du Beamforming	27
Figure 9: Modélisation de la propagation multi-trajets.....	33
Figure 10 : Principales interactions macroscopiques entre onde et obstacle	34
Figure 11 : Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance et effets des évanouissement	35
Figure 12 : Définition du canal de transmission et de propagation	36
Figure 13 : Illustration d'un exemple de PDP en outdoor avec retard moyen et dispersions de retard [47].....	38
Figure 14 : PDP avec illustration des fenêtres et intervalle des retards.....	39
Figure 15 : Illustration du concept de lancer de rayons	45
Figure 16 : Illustration du concept du tracé de rayons.....	46
Figure 17 : Illustration de la base orthonormée $(k, e_{\parallel}, e_{\perp})$	48
Figure 18 : Définition des lois de réflexion et de transmission	49
Figure 19 : Illustration de la diffraction suivant le cône de Keller	50
Figure 20 : Les 3 régions de l'espace définies par la théorie géométrique de diffraction.....	51
Figure 21: Illustration d'une scène de propagation 3D sur Starlight	53
Figure 22: Synoptique du simulateur <i>Starlight</i>	53
Figure 23 : Synoptique complet de la chaîne de mesure	62
Figure 24 : Réseau d'antenne Scan64	64
Figure 25 : Prototype du réseau Scan64	64
Figure 26 : Antenne PIFA-8	65
Figure 27 : Les diagrammes de rayonnement de chaque antenne du réseau PIFA-8	66
Figure 28 : Illustration de l'environnement de mesures	66
Figure 29 : Exemple d'un lien BS-MS	67
Figure 30 : Aperçu de l'environnement de mesures avec les positions de BS et MS.....	68
Figure 31 : Principe du <i>beamforming linéaire</i>	71
Figure 32 : Résolution angulaire en élévation et en azimut.....	71
Figure 33 : Exemple de calcul de DoA par <i>Beamforming</i> avec et sans fenêtrage	72
Figure 34 : Aperçu de l'environnement de propagation avec les position BS, MS3 et MS4.....	73
Figure 35 : PDP mesuré en LoS pour BS-MS3	74
Figure 36 : Répartition spatiale de l'énergie en LoS pour BS-MS3	74
Figure 38 : PDP mesuré en NLoS pour BS-MS4	75
Figure 39 : Répartition spatiale de l'énergie en NLoS pour BS-MS4	75
Figure 40 : PAP et PEP mesuré en LoS pour BS-MS4.....	76

Figure 41 : Fonction de distribution cumulée du DS	77
Figure 42 : Fonction de distribution cumulée DE L'AAS	77
Figure 43 : Fonction de distribution cumulée de l'EAS	78
Figure 44 : Chaîne de mesure	83
Figure 45 : Sondeur spatio-temporel mobile	84
Figure 46 : Réseau linéaire d'antennes monté sur le toit du véhicule de mesures.....	84
Figure 47 : Principe du réseau virtuel d'antennes.....	85
Figure 48 : Chaîne d'émission	86
Figure 49 : Illustration d'un lien BS-MS sur le parking pour BS à 5m	87
Figure 50 : Aperçu de l'environnement de propagation avec la position de la BS et les parcours de la MS	88
Figure 51 : Environnement de mesures avec MS et BS à 10 mètres	88
Figure 52 : Aperçu de l'environnement de propagation SC	89
Figure 53 : Environnement de mesures urbain avec BS À 12 mètres et MS	90
Figure 54 : Aperçu de l'environnement urbain de propagation avec la position de la BS et les parcours de la MS	91
Figure 55 : environnement de mesures avec MS et BS à 10 mètres	91
Figure 56 : Aperçu de l'environnement SU avec la position BS et les parcours du MS .	92
Figure 57 : Environnement de propagation rural pour BS à 10 mètres.....	92
Figure 58 : Aperçu de l'environnement rural avec la position BS et les parcours du MS	93
Figure 59 : Environnement de mesures zone commercial avec MS et BS À 5 mètres...	93
Figure 60 : Aperçu de l'environnement de propagation avec position du BS et parcours de la MS	94
Figure 61 : réseau d'Antennes UPA schématisé.....	96
Figure 62 : Description de l'algorithme d'estimation 2D-DoA.....	98
Figure 63 : Estimation d'un trajet unique avec des caractéristiques différentes.....	99
Figure 64 : Énergie des rayons identifiés par rapport à l'énergie totale en pourcentage	100
Figure 65 : Comparaison entre trajets simulés et estimés dans le domaine temporel ..	101
Figure 66 : Comparaison entre trajets simulés et estimés dans le domaine Angulaire	101
Figure 67 : Référentiel angulaire en azimut ϕ et en élévation θ	103
Figure 68 : Lien BS-MS en visibilité dans l'environnement SC	104
Figure 69 : Résultat d'analyse pour un exemple de SC-BS1 : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP.....	105
Figure 70 : Résultat d'analyse pour un exemple de SC-BS2 : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP.....	106
Figure 71 : Lien BS-MS en non visibilité dans l'environnement SC	107
Figure 72 : Résultat d'analyse pour un exemple de SC-BS1 en non visibilité : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP	108
Figure 73 : Résultat d'analyse pour un exemple de SC-BS2 en non visibilité : (A)- PDP, (B)- 2D-DoA, (C)- PAP, (D)- PEP	109

Figure 74 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour les deux trajet SC1 (à gauche) et SC2 (à droite)	110
Figure 75 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour les deux trajet SC1 (à gauche) et SC2 (à droite)	112
Figure 76 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les deux trajet SC1 (à gauche) et SC2 (à droite)	114
Figure 77 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour le trajet Rep en environnement urbain	116
Figure 78 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour le trajet T2 en environnement urbain	117
Figure 79 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour le trajet P2 en environnement urbain	117
Figure 80 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour le trajet REP	118
Figure 81 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour les deux trajet T2	119
Figure 82 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour les deux trajet P2	120
Figure 83 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les deux trajet Rep.....	121
Figure 84 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les deux trajet T2.....	122
Figure 85 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les deux trajet P2.....	122
Figure 86 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour les trajets en environnement suburbain.....	123
Figure 87 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour les trajets en environnement SU	125
Figure 88 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les trajets en environnement SU	127
Figure 89 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour les trajets en environnement Rural.....	128
Figure 90 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour les trajets en environnement RL	129
Figure 91 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les trajets en environnement RL	130
Figure 92 : Fonction de distribution cumulée des différents paramètres d'étalement pour les mesures en espaces ouverts (Parking)	131
Figure 93 : Corrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS et la distance BS-MS pour les mesures en espaces ouverts (Parking).....	133
Figure 94 : Intercorrélacion entre les paramètres spatio-temporels DS, AAS et EAS pour les mesures en espaces ouverts (Parking)	134
Figure 95 : Illustration en 3D d'un résultat de simulation avec <i>Starlight</i>	141

Figure 96 : Courbes CDF pour chaque combinaison de phÉnomÈne de propagation en environnement <i>outdoor</i> en visibilité	143
Figure 97 : Courbes CDF pour chaque combinaison de phÉnomÈne de propagation en environnement <i>outdoor</i> en non visibilité	144
Figure 98 : Aperçu de l'environnement réel de propagation (À gauche) et des rayons SimulÉS par <i>Starlight</i> pour le lien BS-MS3.....	145
Figure 99 : Le PDP simulÉ et mesurÉ pour le lien BS1-MS3.....	146
Figure 100 : PAP et PEP simulÉS et mesurÉS pour le lien BS1-MS3.....	146
Figure 101 : Aperçu de l'environnement réel de propagation (À gauche) et des rayons SimulÉS par <i>Starlight</i> pour le lien BS-MS4.....	147
Figure 102 : Le PDP simulÉ et mesurÉ pour le lien BS-MS4.....	147
Figure 103 : PAP et PEP simulÉS et mesurÉS pour le lien BS1-MS3.....	148
Figure 104 : Aperçu de l'environnement réel de propagation (À gauche) et des rayons simulÉS par <i>Starlight</i> pour le lien BS-MS1	149
Figure 105 : Le PDP simulÉ et mesurÉ pour le lien BS1-MS1.....	149
Figure 106 : Les 2D-DoA mesurÉS et simulÉS pour le lien BS1-MS1	150
Figure 107 : PAP et PEP simulÉS et mesurÉS pour le lien BS1-MS1	150
Figure 108 : Le PDP simulÉ et mesurÉ pour le lien BS2-MS1.....	151
Figure 109 : Les 2D-DoA mesurÉS et simulÉS pour le lien BS2-MS1	151
Figure 110 : PAP et PEP simulÉE et mesurÉE pour le lien BS2-MS1	152
Figure 111 : Aperçu de l'environnement réel de propagation (À gauche) et des rayons simulÉS par <i>Starlight</i> pour le lien BS-MS1	152
Figure 112 : Le PDP simulÉ et mesurÉ pour le lien BS1-MS2.....	153
Figure 113 : Les 2D-DoA mesurÉS et simulÉS pour le lien BS1-MS2	154
Figure 114 : PAP et PEP simulÉS et mesurÉS pour le lien BS1-MS2.....	154
Figure 115 : Environnement réel et sa modÉlisation par <i>Starlight</i> pour SC.....	155
Figure 116 : Fonction de distribution cumulÉE des diffÉrents paramÈtres d'Étalement mesurÉS et simulÉS pour les deux trajet SC1 (À gauche) et SC2 (À droite)	157
Figure 117 : Environnement réel et sa ModÉlisation par <i>Starlight</i> pour URB.....	158
Figure 118 : Fonctions de distribution cumulÉE des diffÉrents paramÈtres d'Étalement mesuré et simulÉ pour le trajet Rep de la campagne de mesures URB	159
Figure 119 : Environnement réel et sa ModÉlisation par <i>Starlight</i> pour SU	160
Figure 120 : Fonctions de distribution cumulÉE des diffÉrents paramÈtres d'Étalement mesurÉS et simulÉS pour le trajet Rep de la campagne de mesures SU.....	162
Figure 121 : Environnement réel et sa ModÉlisation par <i>Starlight</i> pour PARK.....	163
Figure 122 : Fonctions de distribution cumulÉE des diffÉrents paramÈtres d'Étalement mesurÉS et simulÉS pour le trajet Rep de la campagne de mesures PARK	164

Table des Tableaux

Tableau 1 : Les indicateurs de performance 5G – IMT 2020	19
Tableau 2 : Caractéristiques diélectriques des matériaux utilisés par Starlight en environnement extérieur	52
Tableau 3 : Récapitulatif des mesures <i>massive MIMO</i> proposées dans la littérature	56
Tableau 4 : Paramètres de la campagne de mesures 8 × 64	68
Tableau 5 : Paramètres d'étalement calculé pour chaque lien BS-MS	78
Tableau 6 : Coefficient d'intercorrélation Des paramètres spatio-temporels du canal....	79
Tableau 7 : Paramètres de mesures communs pour les campagnes de mesures SIMO ...	87
Tableau 8 : Caractéristiques des trajets simulés (noir) et estimés (rouge).....	102
Tableau 9 : Moyennes des paramètres DS, AAS et EAS pour les mesures SC.....	111
Tableau 10 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour mesures SC	113
Tableau 11 : Moyennes des paramètres DS, AAS et EAS pour les mesures URB	116
Tableau 12 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour mesures URB	120
Tableau 13 : Moyennes des paramètres DS, AAS et EAS pour les mesures SU.....	124
Tableau 14 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour mesures SU	125
Tableau 15 : Moyennes des paramètres DS, AAS et EAS pour les mesures RL	128
Tableau 16 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour mesures RL	129
Tableau 17 : Moyennes des paramètres DS, AAS et EAS pour les mesures en espaces ouverts (Parking).....	132
Tableau 18 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour les mesures en espaces ouverts (Parking)	132
Tableau 19 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour les simulations SC.....	156
Tableau 20 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour les simulations Rep de URB	159
Tableau 21 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour les simulations Rep de SU	161
Tableau 22 : Coefficients de corrélation entre paramètres et distance pour les simulations PARK.....	163
Tableau 23 : Récapitulatif de la comparaison entre mesures et simulations	165

Références

- [1] International Telecommunications Union (ITU), "*IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*," in Recommendation ITU-R M.2083, Sept. 2015.
- [2] Emil Björnson, Jakob Hoydis, and Luca Sanguinetti, "*Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency*," in *Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency*, 2017.
- [3] ITU-R, "*Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT*," December, 2013.
- [4] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "*Femtocell networks: a survey*," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, pp. 59-67, 2008.
- [5] ETSI, "*Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework*," October, 2013.
- [6] J. I. Choi, "*Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication*," in *MobiCom'10*, September, 2010.
- [7] N. H. Mahmood, M. G. Sarret, G. Berardinelli, and P. Mogensen, "*Full duplex communications in 5G small cells*," in 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017.
- [8] M. G. Sarret, M. Fleischer, G. Berardinelli, N. H. Mahmood, P. Mogensen, and H. Heinz, "*On the potential of full duplex performance in 5G ultra-dense small cell networks*," 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2016.
- [9] M. Jain, J. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "*Practical real-time full duplex wireless*," in *ACM MobiCom*, 2011.
- [10] E. Aryafar, M. Khojastepour, K. Sundaresan, and S. Rangarajan, "*MIDU: Enabling MIMO full duplex*," in *ACM MobiCom*, 2012.
- [11] Shekhar, A. Singhal, R. Sharma and P. Singh, "*Study of Analysis of Multiple Input and Multiple outputs (MIMO) Technology in Wireless Communication*," International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE), Ghaziabad, 2016.
- [12] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, "*3G Evolution, Second Edition: HSPA and LTE for Mobile Broadband*," 2nd ed. Academic Press, 2008.
- [13] J. Gong, C. Liu, M. R. Soleymani and J. F. Hayes, "*A rigorous proof of MIMO channel capacity's increase with antenna number*," Mosharaka International Conference on Communications, Computers and Applications, Amman, 2008.
- [14] E. Björnson, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, "*Massive MIMO: ten myths and one critical question*," *IEEE Commun. Mag.*, 2016.
- [15] T. Van Chien, E. Björnson, "*Massive MIMO Communications. In 5G Mobile Communications*," Springer: Cham, Switzerland, 2017.

-
- [16] A. Khan, W.F. Richard and S.A. Long, "*Impedance control of microstrip using reactive loading*," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1989.
- [17] B. D. V. Veen and K. M. Buckley, "*Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering*," IEEE ASSP Magazine, 1988.
- [18] Optimal array processing. New York: Wiley, 2002.
- [19] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, "*Massive MIMO Performance Evaluation Based on Measured Propagation Data*," IEEE Transactions on Wireless, 2015.
- [20] 5G white paper, "*5G Vision, Requirements, and Enabling Technologies*," Deliverable, vol. 2.0, 2016.
- [21] J. Flordelis, X. Gao, G. Dahman, F. Rusek, O. Edfors, and F. Tufvesson, "*Spatial separation of closely-spaced users in measured massive multi-user MIMO channels*," IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015.
- [22] S. Buzzi, C. I. T. E. Klein, H. V. Poor, C. Yang, and A. Zappone, "*A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead*," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016.
- [23] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "*Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays*," IEEE Signal Processing Magazine, Jan. 2013.
- [24] C. Suh, M. Ho, and D. N. C. Tse, "*Downlink interference alignment*," IEEE Transactions Communications, 2011.
- [25] S. Verdú, "*Multiuser Detection*," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [26] N. Jindal and A. Goldsmith, "*Dirty-paper coding vs. TDMA for MIMO broadcast channels*," IEEE Trans. Inf. Theory, 2005.
- [27] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, E. Li, T. L. Marzetta, R. Yang, and L. Zhong, "*Argos: Practical Many-Antenna Base Stations*," in Proc. ACM Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom), 2012.
- [28] P. Harris, S. Malkowsky, J. Vieira, E. Bengtsson, F. Tufvesson, W. Boukley, L. Liu, M. Beach, S. Armour, and O. Edfors, "*Performance Characterization of a Real-Time Massive MIMO System With LOS Mobile Channels*," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1244-1253, 2017.
- [29] R. Kouyoumjian, and P. Pathak, "*A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface*," Proceedings of the IEEE 62(11), 1448-1461, 1974.

- [30] R. Vaughan and J. B. Andersen. "*Channel propagation and antennas for mobile communications*," The IEE Electromagnetic waves series 50, 2003.
- [31] ITU. "*Multipath propagation and parametrization of its characteristics*," in Recommendation ITU-R P.1407: UIT-R, 2009.
- [32] J. P. BARBOT, "*Propagation radioélectrique avec les mobiles pour les communications personnelles à l'intérieur des bâtiments dans la bande 1-3 GHz*," Thèse de Doctorat, Université de Paris XI-Orsay, 1995.
- [33] W. Lee, "*Mobile Cellular Telecommunications Systems*," New York: McGraw Hill Publications, 1989.
- [34] N. I. Fisher, "*Statistical Analysis of Circular Data*," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993.
- [35] B. Fleury, "*First- and second-order characterization of direction dispersion and space selectivity in the radio channel*," IEEE Transactions on 46(6), 2027-2044, 2000.
- [36] 3GPP-3GPP2, "*Scm-135: Spatial channel model text description*," SCM AHG, 2003.
- [37] T. Okumura, E. Ohmor, and K. Fukada, "*Field Strength and its variability in VHF and UHF Land mobile Service*," Review Electrical Communication Laboratory, pp. 825-873, 1968.
- [38] M. Hata, "*Empirical Formula for propagation Loss in Land Mobile Radio Service*," IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp. 317-325, 1980.
- [39] COST Action, "*Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems: Final Report*," Directorate General Telecommunications, Information Society, Information Market, and Exploitation Research, 1999.
- [40] M. Lott and I. Forkel, "*A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation*," In IEEE 53rd Vehicular Technology Conference, 2001.
- [41] G. Turin, F. Clapp, T. Johnston, S. Fine, and D. Lavry, "*A statistical model of urban multipath propagation*," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 1972.
- [42] H. Suzuki, "*A statistical model for urban radio propagation*," Communications, IEEE Transactions, 1977.
- [43] H. Hashemi, "*Simulation of the urban radio propagation channel*," Vehicular Technology, IEEE Transactions, 1979.
- [44] A. Saleh, and R. Valenzuela, "*A statistical model for indoor multipath propagation*," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on 5(2), 128-137, 1987.

- [45] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 14(3), 302-307, 1966.
- [46] H. Ling, R.-C. Chou, and S.-W. Lee, "Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 37 (2), 194 –205, 1989.
- [47] E. Hadad, "Apport de la modélisation déterministe 3D indoor pour l'ingénierie des systèmes radios avancés," Thèse de Doctorat, Télécom Bretagne, 2011.
- [48] R. M. Luneberg, "Mathematical theory of optics," Brown Univ. Press, Providence, RI, 1944.
- [49] R. G. Kouyoumjian, "Asymptotic high-frequency methods," in *Proceeding IEEE*, Vol. 53, pp. 864-876, 1965.
- [50] ITU, "Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz," in *ITU-R-Meetings*, (TD 149), 2015.
- [51] A. Dunand and J.-M. Conrat, "Dual-polarized spatio-temporal characterization in urban macrocells at 2 GHz," in *Proceeding IEEE 66th Vehicule Technology, Conf.*, pp. 854-858, 2007.
- [52] S. Sangodoyin, V. Kristen, C. Umit Bas, M. Kaske, J. Lee, C. Schneider, G. Sommerkorn, C. J. Zhang, R. Thoma, and A. F. Molish, "Cluster Characterization of 3-D MIMO Propagation Channel in an Urban Macrocellular Environment," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 5076-5091, 2018.
- [53] C. Schneider, M. Narandzic, M. Käske, G. Sommerkorn and R. S. Thomä, "Large Scale Parameter for the WINNER II Channel Model at 2.53 GHz in Urban Macro Cell," in *IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, 2010.
- [54] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek and F. Tufvesson, "Massive MIMO Performance Evaluation Based on Measured Propagation Data," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3899-3911, 2015.
- [55] S. Payami and F. Tufvesson. "Channel measurements and analysis for very large array systems at 2.6 GHz," in *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2012.
- [56] Z. Zhong, X. Yin, X. Li and X. Li, "Extension of ITU IMT-Advanced Channel Models for Elevation Domains and Line-of-Sight Scenarios," in *IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2013.
- [57] D. Fei, R. He, B. Ai, B. Zhang, K. Guan and Z. Zhong, "Massive MIMO channel measurements and analysis at 3.33 GHz," in *10th International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCom)*, 2015.

- [58] L. Hao, J. Rodríguez-Piñeiro, X. Cai, X. Yin, J. Hong, G. F. Pedersen, and S. Schwarz, "Measurement-based Double-Directional Polarimetric Characterization of Outdoor Massive MIMO Propagation Channels at 3.5GHz," in IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2020.
- [59] Z. Zheng, J. Zhang, Y. Yu, L. Tian and Y. Wu, "Propagation characteristics of massive MIMO measurements in a UMa scenario at 3.5 & 6 GHz with 100 & 200 MHz bandwidth," in IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2017.
- [60] M. Kim, J. Lee, J. Liang and J. Kim, "Multipath channel characteristics for propagation between mobile terminals in urban street canyon environments," in 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2015.
- [61] A. Richter, "Estimation of radio channel parameters: Models and algorithms," Ph.D. dissertation, Technische Univ. Ilmenau, 2005.
- [62] X. Yin, B. H. Fleury, P. Jourdan, and A. Stucki. "Polarization estimation of individual propagation paths using the SAGE algorithm," in Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sep. 2003.
- [63] P. Pajusco, F. Gallée, N. Malhouroux and R. Burghelea, "Massive antenna array for space-time channel sounding," 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017.
- [64] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," in Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 34, pp. 276, 1986.
- [65] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," in Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 37, pp. 984, 1989.
- [66] B. H. Fleury, M. Tschudin, R. Heddergott, D. Dahlhaus, and K. Ingeman Pedersen, "Channel parameter estimation in mobile radio environments using the SAGE algorithm," in Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 17, pp. 434, 1999.
- [67] J. M. Cramer, R. A. Scholtz, and M. Z. Win, "On the analysis of UWB communication channels," in Military Communications Conference Proceedings, 1999, MILCOM 1999, IEEE, 1999.
- [68] K. Kalliola, H. Laitinen, P. Vainikainen, M. Toeltsch, J. Laurila, and E. Bonek, "3D double-directional radio channel characterization for urban macrocellular applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003.

- [69] A. Kuchar, J. P. Rossi, and E. Bonek, "*Directional macro-cell channel characterization from urban measurements*," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000.
- [70] ITU-RP.1411-10, "*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*," 2019.
- [71] 3GPP TR 38.901, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 2019.
- [72] C. Diakhate, "*Propagation channel modeling at centimeter and millimeter wave frequencies in 5G urban micro-cellular context*," Ph.D. dissertation, Telecom ParisTech, 2019.
- [73] A. Böttcher, C. Schneider, P. Vary and R. S. Thomä, "*Dependency of the power and delay domain parameters on antenna height and distance in urban macro cell*," in Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, 2011.
- [74] E. Benner and A. B. Sesay, "*Effects of Antenna Height Antenna Gain and Pattern Downtilting for Cellular Mobile Radio*", in IEEE Transactions on Vehicular Technology 1996.
- [75] X. Zhao, J. Kivinen, P. Vainikainen and K. Skog, "*Propagation Characteristics for Wideband Outdoor Mobile Communications at 5.3 GHz*", in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002.
- [76] A. Hong and R. S. Thomä, "*Experimental Study on the Impact of the Base Station Height on the Channel Parameters*", in. IEEE Workshop on Smart Antennas (WSA 2009), 2009.
- [77] H. M. El-Sallabi and P. Valnikainen, "*Impacts of environment and antenna height on angular spread of radiowave propagation in a city street microcell*," in IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2000.
- [78] P. Laspougeas and P. Pajusco, "*Propagation radioélectrique en environnement petite cellule urbaine à 2 GHz : étude expérimentale et modélisation large bande multi-capteurs*," Technical report, Livrable projet RNRT PAESTUM, 2000.
- [79] Greenstein, V. Erceg, Y. Yeh, and M. Clark, "*A new path-gain/delay-spread propagation model for digital cellular channels*," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1997.
- [80] J. H. Kim, Y. Yoon and Y. J. Chong, "*The distance characteristics of R.M.S. delay spread at urban low-rise environment*," presented in International

- Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, 2016.
- [81] Shuang-de Li, Yuan-jian Liu, Lin Leke, and Zhong Sheng, "*Channel Measurements and Modeling at 6 GHz in the Tunnel Environments for 5G Wireless Systems*," in International Journal of Antennas and Propagation. 2017.
- [82] M. Peter, W. Keusgen, T. Eichler, K. Yanagisawa, K. Kitao, T. Imai, M. Inomata, Y. Okumura and T. Nakamura, "*Analysis of Delay and AOD Spread at 67 GHz for an Urban Micro Street Canyon Scenario*," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 2018.
- [83] J. Wang, R. Zhang, W. Duan, S. X. Lu and L. Cai, "*Angular spread measurement and modeling for 3D MIMO in urban macrocellular radio channels*," in IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2014.
- [84] R. Zhang, X. Lu, J. Zhao, L. Cai and J. Wang, "*Measurement and Modeling of Angular Spreads of Three-Dimensional Urban Street Radio Channels*," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017.
- [85] N. Lebegue, P. Pajusco, and P. Laspougeas, "*Canaux de propagation pour l'ingénierie UMTS en environnement urbain, suburbain et rural*," Technical report, Livrable projet RNRT SIMPAA, 2000.
- [86] T. A. Thomas, F. W. Vook, E. Mellios, G. S. Hilton, A. R. Nix and E. Visotsky, "*3D Extension of the 3GPP/ITU Channel Model*," in IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Dresden, 2013.
- [87] L. Wang, B. Ai, K. Guan, D. He, Z. Zhong and J. Kim, "*Channel Characteristics in Rural Railway Environment at 28 GHz*," in 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST), Lisboa, 2018.
- [88] K. L. Chee, A. Anggraini and T. Kurner, "*Effects of Carrier Frequency, Antenna Height and Season on Broadband Wireless Access in Rural Areas*," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, July 2012.
- [89] D. C. Cox, "*Delay doppler characteristics of multipath delay spread and average excess delay for 910 MHz in a suburban mobile radio path*", IEEE Transactions Antennas Propagation, Sep, 1972.
- [90] E. S. Sousa, V. M. Jovanovic and C. Daigneault, "*Delay spread measurements for the digital cellular channel in Toronto*," IEEE Transaction Vehicular Technolgy, Nov, 1994.
- [91] V. Raghavan, A. Partyka, L. Akhoondzadeh-Asl, M. A. Tassoudji, O. H. Koymen and J. Sanelli, "*Millimeter Wave Channel Measurements and*

Implications for PHY Layer Design," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017.

Liste des publications

N. Bel-haj-maati, N. Malhouroux, P. Pajusco and M. Ney, "*Massive MIMO Channel Measurements and Simulations at 3.7 GHz in Outdoor Environment*," 23rd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM), Dubrovnik, Croatia, 2019.

N. Bel-Haj-Maati, N. Malhouroux, P. Pajusco and M. Ney, "*Mobile Measurements at 3.7 GHz using a Massive MIMO antenna array in Outdoor Environments*," 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020.

R. Fara, N. Bel-Haj-Maati, D-T. Phan-Huy, N. Malhouroux and M. Di Renzo, "*First experimental evaluation of ambient backscatter communications with massive MIMO reader*," 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, London, United Kingdom, 2020.

N. Bel-Haj-Maati, N. Malhouroux, P. Pajusco and M. Ney, "*Massive-MIMO Outdoor Propagation Channel: Measurements and 3D Ray-Tracing Simulations*". *En cours de soumission*.

Titre : Modélisation 3D du canal de propagation massive MIMO en environnement outdoor

Mots clés : Modèles de propagation, Massive MIMO, Tracé de rayons, Mesures RF, Paramètres spatio-temporels, Directions d'arrivée, 5G

Résumé : La nouvelle génération des technologies mobiles 5G doit répondre à une connectivité massive et à des services de plus en plus exigeants en termes de débit, latence, ou d'énergie. Les systèmes massive MIMO promettent d'apporter une grande amélioration des performances, tout en garantissant une excellente efficacité spectrale et énergétique. Pour ce faire, une parfaite connaissance de la propagation par multi-trajets en environnements extérieurs est nécessaire. C'est dans cette optique qu'Orange Labs a développé *Starlight*, un modèle de propagation à rayons, pour simuler les multi-trajets en environnement extérieur. Si des études du canal de propagation massive MIMO ont déjà été réalisées et étudiées pour validation, peu d'entre elles traitent des canaux dans un contexte 5G à 3,7 GHz (la « bande-cœur » de la 5G), dans différents environnements extérieurs et s'intéressent à la

caractérisation 3D du canal. Ainsi, les étalements des retards DS (*Delay spread*), des azimuts AAS (*Azimuth Angular Spread*) et des élévations EAS (*Elevation Angular Spread*) sont étudiés

L'objectif de cette thèse est d'apporter une caractérisation expérimentale 3D du canal de propagation massive MIMO en étudiant les paramètres spatio-temporels selon chaque environnement de propagation. Les simulations ont ensuite été comparées aux mesures afin de valider le modèle de propagation. Des algorithmes spécifiques ont été mis en place pour extraire les rayons à partir des mesures afin d'assurer une comparaison équitable avec les simulations. L'analyse statistique a permis de caractériser la propagation par multi-trajets selon le type d'environnement de propagation et apporter une amélioration des modèles existants.

Title : 3D massive MIMO propagation channel modelling and characterization in outdoor environment

Keywords: Propagation model, Massive MIMO, Ray Tracing, RF measurements, Space-time parameters, Direction of Arrival, 5G

Abstract: The novel 5G technology generation for mobile communication should meet new challenges in terms of massive connectivity, new services, higher bit rates, lower latency and energy consumption. MIMO systems are seen as the solution to bring some substantial improvement of performances while insuring high spectrum efficiency. To meet these objectives a good knowledge of the multipath propagation signal is required. This is why Orange Labs has developed "Starlight", a ray-model of propagation in outdoor and indoor environment. Investigations on massive MIMO channel propagation have been already carried out for validation. However, very few have treated channels in the 5G context at 3.7 GHz in different outdoor environments and focused on 3D space-time

characterization.

Hence, Delay Spread as well as Azimuth and Elevation Angular Spread are studied. The objective of the thesis is to provide a 3D massive MIMO channel propagation experimental characterization by studying the space-time parameters for every propagation environment. Simulations are then compared to measurements to validate the propagation model. Specific algorithms were implemented to extract rays from measurements to insure a fair comparison with the simulations. A statistical analysis allowed one to characterize the ray path propagation according to the type of environment and to bring some improvement to existing models.