



HAL
open science

Modélisation et simulation des réseaux sans fil hétérogènes et non-stationnaires. Application aux topologies de petites cellules

Laurent Maviel

► **To cite this version:**

Laurent Maviel. Modélisation et simulation des réseaux sans fil hétérogènes et non-stationnaires. Application aux topologies de petites cellules. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT : . tel-00942972

HAL Id: tel-00942972

<https://theses.hal.science/tel-00942972v1>

Submitted on 6 Feb 2014

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.

Thèse

Modélisation et simulation des réseaux sans fil hétérogènes et non-stationnaires. Application aux topologies de petites cellules

Présentée devant
L'institut national des sciences appliquées de Lyon

Pour l'obtention du
Grade de Docteur

École doctorale : Électronique, Électrotechnique et Automatique
Spécialité : STIC Santé

Par
Laurent MAVIEL
(Ingénieur de l'INSA de Rennes)

Soutenue le 27 mai 2013 devant la Commission d'examen

Jury

Président	Ghaïs EL ZEIN	Professeur (INSA de Rennes – IETR)
Examineur	Claude OESTGES	Professeur associé (UCL)
Rapporteurs	Marion BERBINEAU	Directrice de recherche (IFSTTAR – LEOST)
	Rodolphe VAUZELLE	Professeur (Université de Poitiers – XLIM-SIC)
Directeur	Jean-Marie GORCE	Professeur (INSA de Lyon – CITI)
Co-encadrant	Yves LOSTANLEN	Directeur Technique Wireless (SIRADEL)

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés à SIRADEL et au Laboratoire CITI, sous la direction du Pr. Jean-Marie Gorce. Cette thèse a été financée par la convention CIFRE n°0188/2009, établissant la collaboration entre SIRADEL et le CITI.

Laboratoire CITI, Université de Lyon, INSA Lyon, INRIA,
Domaine Scientifique de la Doua, Batiment Claude Chappe,
6 avenue des Arts, 69621 Villeurbanne

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 65 55 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 e2m2@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE http://www.ediss-lyon.fr Sec : Samia VUILLERMOZ Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04 72 68 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr	M. Johannes KELLENDONK Université Claude Bernard Lyon 1 INFOMATHS Bâtiment Braconnier 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44.82.94 Fax 04 72 43 16 87 infomaths@univ-lyon1.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://mega.ec-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/ Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Remerciements

*P*lus on s'approche de la fin, plus il y a de choses à dire. La fin n'est qu'imaginaire, c'est une destination qu'on s'invente pour continuer à avancer, mais il arrive un moment où on se rend compte qu'on n'y parviendra jamais. Il se peut qu'on soit obligé de s'arrêter, mais ce sera uniquement parce qu'on sera à court de temps. On s'arrête, mais ça ne veut pas dire qu'on soit arrivé au bout.

Paul Auster, « Le voyage d'Anna Blume », traduction de Patrick Ferragut

Mon voyage a heureusement été un peu moins mouvementé et oppressant que celui d'Anna Blume, mais j'en partage pleinement la conclusion. Je remercie ici toutes celles et ceux qui m'ont permis d'embarquer à bord de ce bateau et qui ont rendu la croisière paisible.

Tout d'abord je tiens à remercier Yves Lostanlen, ainsi que SIRADEL et son président Laurent Bouillot, de m'avoir proposé cette thèse CIFRE, qui correspondait parfaitement avec mon souhait de côtoyer à la fois les milieux de la recherche et de l'entreprise. Cette thèse n'aurait pas pu avoir lieu non plus sans la coopération du laboratoire CITI et en particulier de Jean-Marie Gorce, directeur du laboratoire et qui a accepté d'être mon directeur de thèse. Jean-Marie et Yves ont su prendre de leur temps pour évaluer les travaux scientifiques, les mettre en avant et me donner des pistes de réflexion pertinentes.

Ensuite, je remercie chaleureusement Rodolphe Vauzelle (XLIM – SIC) et Marion Berbineau (IFSTTAR – LEOST) pour avoir accepté de rapporter le manuscrit de thèse. Mes remerciements vont de surcroît à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en y participant, en particulier à Ghaïb El Zein (INSA de Rennes) pour avoir présidé la soutenance de thèse et à Claude Oestges (UCL) pour être venu entre deux déplacements.

Je tiens à souligner l'ambiance dans laquelle j'ai pu travailler au quotidien à SIRADEL. D'une part, le professionnalisme et la qualité de l'équipe Recherche et Technologies (R&T) à laquelle j'ai été intégré m'ont beaucoup apporté. Je remercie à ce sujet Antoine, pour sa participation plus qu'active aux mesures et à leur analyse, Mathieu et Thierry pour leur relecture de certaines parties de ce manuscrit ainsi que Julien, Yoann, Gregory, Florian et Romain pour les discussions intéressantes. D'autre part, l'atmosphère conviviale au sein des départements de SIRADEL, pendant et en dehors des horaires de travail, a bien sûr contribué au bon déroulement de cette thèse.

Je suis en outre très reconnaissant envers mes amis qui ont été là tout au long de ces 4 ans. Je n'aurais pas pu avoir ces moments essentiels de détente sans Claire, Vincent, Julien, Jérôme, Karine, François, ainsi que tous ceux qui n'ont pas la place d'être là mais qui ont eux aussi

compté. Merci aussi à Mélanie et Lucas, qui ont rendu mes séjours à Lyon encore plus sympathiques qu'ils ne l'étaient.

Enfin un grand merci à ma famille, notamment mes parents pour leur soutien matériel et moral tout au long de mes études, ainsi qu'à mon frère et mes grands parents pour leur amour et leur présence.

Résumé / Abstract

Les nouveaux services de télécommunication accessibles en mobilité entraînent une demande croissante de débit et amènent aux limites de capacités des réseaux actuels. Pour répondre à cette demande, les opérateurs cellulaires déploient de nouvelles technologies et densifient leurs réseaux en ajoutant des petites cellules, où les stations de base sont plus proches des utilisateurs. Compte tenu de la visibilité directe et de la faible hauteur des antennes, le canal de propagation des petites cellules est différent de celui des macro-cellules et les modèles stochastiques de canal existants ne sont plus adaptés. C'est dans ce contexte que se situe cette thèse, qui explore les problématiques de dynamique dans le canal de propagation et dans l'utilisation des ressources radio.

Nous proposons dans une première partie de caractériser les dynamiques dans le canal de propagation de petite cellule en milieu extérieur. Cette caractérisation se base sur des prédictions déterministes, où une partie de l'environnement est généré de manière aléatoire afin de procéder à des études statistiques. Pour cela, nous mettons en place une plateforme de simulation, capable de générer des objets statiques, de les déplacer et de les prendre en compte dans des outils de prédiction de propagation adaptés aux petites cellules. Une phase de mesures de l'impact du trafic de véhicules sur la puissance du signal permet de valider les outils de propagation développés dans la plateforme.

L'objectif de la deuxième partie de la thèse est d'évaluer l'impact de ces nouvelles topologies sur les performances des réseaux hétérogènes. Nous présentons un modèle hybride de propagation qui prend en compte les variations de signal dues au trafic de véhicules en combinant les approches déterministes et statistiques, pour avoir les avantages de résultats précis et d'un temps de calcul rapide. Ce modèle hybride est utilisé par la suite dans un processus de simulation de réseau cellulaire 3G LTE au niveau système, où nous évaluons l'impact du trafic de véhicules sur le débit maximal, la consommation d'énergie et le respect de la qualité de service.

Mots-Clés : réseaux cellulaires hétérogènes ; petites cellules ; propagation ; mobilité de l'environnement ; modèles de mobilité réalistes ; modélisation hybride

Modeling and simulation of heterogeneous and non-stationary wireless networks.

Application to small cells topologies

New services available with modern mobile telecommunication networks lead to a growing demand for better bit rates up to reach the capacity limits of current networks. To face this demand, cellular network operators deploy new technologies and densify their radio access by adding small cells, where the distance between the mobile users and the base stations is decreased. Given the Line of Sight conditions and the low height of base station antennas, the small-cell propagation channel is different from the classical macro-cellular channel and existing stochastic channel models are not suited anymore. In this context, this Ph.D. work proposes to explore challenges on the dynamics of the channel and of radio resource usage.

In a first part, we propose to characterize the dynamics of the propagation channel in small-cell outdoor environments. This characterization is based on deterministic predictions, where part of the environment is randomly generated in order to proceed to statistical analysis. We describe a simulation framework able to generate static objects, to move them and to take them into account in propagation prediction tools targeted for small-cell environments. Measurements of the impact of vehicular traffic on received power enable the validation of propagation tools developed in the framework.

In the second part of this work, we propose to evaluate the impact of those new topologies on the performance of heterogeneous networks. We present a hybrid propagation model taking into account signal variations due to vehicular traffic by combining deterministic and statistic approaches in order to benefit from both advantages: accurate results and quick simulations. This hybrid model is finally used in a cellular 3G LTE network simulation process where we evaluate the impact of vehicular traffic on maximal throughputs, energy consumption and quality of service.

Keywords: heterogeneous mobile networks; small-cells, propagation; environment mobility; realistic mobility models; hybrid modeling

Table des matières

Liste des abréviations	13
Liste des figures	15
Liste des tableaux	18
Introduction	19
1. Problématiques spatio-temporelles dans les réseaux de petites cellules	25
1.A. Les variations spatio-temporelles dans les réseaux sans fil.....	27
1.A.1. Phénomènes dynamiques	27
1.A.2. Caractérisation des évanouissements	30
1.A.3. Génération des évanouissements.....	36
1.A.4. Impact sur les performances du réseau.....	39
1.B. Les défis dans les petites cellules	43
1.B.1. Introduction au concept de « petites cellules »	43
1.B.2. Adapter les modèles de canal existants ?	43
1.B.3. Evaluation des performances	44
1.C. Influence de l'environnement dans les petites cellules	46
1.C.1. Note sur l'environnement statique	46
1.C.2. La mobilité de l'environnement en intérieur.....	47
1.C.3. La mobilité de l'environnement en extérieur	51
1.D. Conclusion du chapitre	56
Bibliographie.....	58
2. Scène de propagation enrichie.....	65
2.A. Plateforme de génération et de simulation	67
2.A.1. Processus de fonctionnement	67
2.A.2. Structure	67
2.A.1. Caractérisation structurelle des objets.....	68
2.A.2. Description de la base de données libre OpenStreetMap	68

2.B.	Génération et prise en compte de détails statiques	70
2.B.1.	Génération de détails statiques	70
2.B.2.	Prédiction de la propagation.....	73
2.B.3.	Propagation sur des détails dynamiques.....	80
2.C.	Simulation de la mobilité.....	81
2.C.1.	Introduction	81
2.C.2.	Etat de l'art : des modèles aléatoires aux modèles réalistes.....	82
2.C.3.	Propositions de modèles de mobilité réalistes.....	87
2.D.	Illustrations de l'utilisation de la plateforme de simulation	97
2.D.1.	Réalisme du canal de propagation.....	97
2.D.2.	Contraintes d'utilisation	100
2.E.	Conclusion du chapitre	102
	Bibliographie	104
3.	Impact de l'environnement proche sur le canal de propagation.....	107
3.A.	Impact de la mobilité du récepteur	110
3.A.1.	Introduction	110
3.A.2.	Etude de l'impact des lampadaires.....	110
3.A.3.	Etude des évanouissements à grande échelle	113
3.B.	Impact du trafic de véhicules.....	125
3.B.1.	Introduction	125
3.B.2.	Mesures	125
3.B.3.	Validation et ajustements	138
3.B.4.	Campagne de simulation sur l'impact de la hauteur de l'antenne d'émission	146
3.C.	Conclusions du chapitre.....	151
	Bibliographie	154
4.	Modèles de propagation hybrides.....	155
4.A.	Vers une modélisation plus statistique dans les outils déterministes	157
4.A.1.	Introduction	157
4.A.2.	Données d'entrée.....	157

4.A.3.	Paramètres du processus.....	159
4.A.4.	Génération des motifs de fluctuation	163
4.A.5.	Résumé des étapes du processus	168
4.A.6.	Evaluation du modèle.....	169
4.B.	Vers une modélisation plus réaliste dans les outils stochastiques	177
4.B.1.	Introduction	177
4.B.2.	Activité humaine dans WINNER II	178
4.B.3.	Trafic véhiculaire dans WINNER II	179
4.C.	Conclusions du chapitre.....	181
	Bibliographie	183
5.	Application: Impact de la mobilité de l'environnement proche sur le réseau en contexte LTE hétérogène	185
5.A.	Simulation de réseaux LTE hétérogènes	187
5.A.1.	Introduction	187
5.A.2.	Simulateur LTE de l'université de Vienne.....	189
5.B.	Etude n°1 : Simulations de réseau à charge maximale.....	195
5.B.1.	Scénarios et méthodologie	195
5.B.2.	Résultats	196
5.B.3.	Analyse et interprétation	199
5.C.	Etude n°2 : Simulations de réseau à charge réaliste	201
5.C.1.	Introduction	201
5.C.2.	Scénarios et méthodologie	202
5.C.3.	Résultats	204
5.C.4.	Analyse et interprétation	207
5.D.	Conclusions du chapitre.....	209
	Bibliographie	211
	Conclusion.....	213
	Liste des contributions	219

Liste des abréviations

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> : Groupe de standardisation pour les réseaux mobiles.
ACM	<i>Adaptive Coding & Modulation</i> : Technique de transmission proposant une adaptation du codage et de la modulation en fonction de la qualité du signal.
BBAG	Bruit Blanc Additif Gaussien
ERC	Expansion de Rayon de Cellule : Technique d'association utilisée dans les réseaux hétérogènes.
IDM	<i>Intelligent Driver Model</i> : Modèle de mobilité microscopique basé sur la relation au véhicule précédent.
IDM-IM	<i>Intelligent Driver Model-Intersection Management</i> : Extension de IDM proposant la gestion des intersections.
ITT	Intervalle de Temps de Transmission, dans un réseau de communication.
LoS	<i>Line of Sight</i> : Visibilité directe de l'émetteur au récepteur.
LTE, LTE-A	<i>Long-Term Evolution, Long-Term Evolution – Advanced</i> : Norme 3GPP pour les réseaux de 4 ^{ème} génération.
MAC	<i>Media Access Control</i> : Contrôle d'accès au support, sous-couche de la liaison de données du modèle standard OSI.
MBS	<i>Macro Base Station</i> : Station de base d'un réseau macro-cellule.
MIMO	<i>Multiple Input – Multiple Output</i> : Système avec plusieurs antennes à l'émission et à la réception.
MSCG	Modèle Stochastiques de Canal basés sur la Géométrie
NLoS	<i>Non-Line of Sight</i> : Non visibilité directe.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> : Technique de modulation utilisant des sous-porteuses orthogonales.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> : Méthode d'accès partagé, basée sur l'OFDM.
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> : Modèle standard pour la communication entre différentes entités.
OSM	<i>OpenStreetMap</i> , base de données cartographique libre et collaborative.
PC	Petite Cellule : Station de base d'un réseau comprenant des petites cellules.
PF	<i>Proportional-Fair</i> : Algorithme d'allocation équitable des données.
PHY	Couche Physique du modèle standard OSI.

QoS	Qualité de Service, d'un utilisateur d'un réseau de communication.
RR	<i>Round-Robin</i> : Algorithme d'allocation uniforme des données.
RSB	Rapport Signal à Bruit
RSIB	Rapport Signal à Interférences plus Bruit
SER	Surface Equivalente Radar
SISO	<i>Single Input, Single Output</i> : Système avec une seule antenne à l'émission et à la réception.
TD	Trajet Direct
TUD	Théorie Uniforme de la Diffraction
UE	<i>User Equipment</i> : Utilisateur d'un réseau de communication
UHF	Ultra Hautes Fréquences
ULB	Ultra Large Bande
WiFi	Réseau local sans-fil standardisé IEEE 802.11
WiMAX	Réseau cellulaire standardisé IEEE 802.16

Liste des figures

Figure 1.1 : Variations temporelles du signal	28
Figure 1.2 : Distinction des évanouissements	29
Figure 1.3 : Relation entre les fonctions de densité de puissance et les fonctions de corrélation du canal	30
Figure 1.4 : Modèle multiplicatif d'évanouissements à grande échelle	31
Figure 1.5 : Concept d'amas de rayons et de géométrie dans 3GPP SCM [22].....	38
Figure 1.6 : Représentation dans l'espace des signaux d'une modulation QPSK (code de Gray).40	
Figure 1.7 : Modèle stochastique à 2 états [58].....	49
Figure 1.8 : Modèle physique de propagation autour du corps humain [60]	50
Figure 1.9 : Passage d'un véhicule et son effet sur le canal [78]	53
Figure 2.1 : Processus de fonctionnement de la plateforme de génération et de simulation	67
Figure 2.2 : Structure de la plateforme de génération et de simulation	68
Figure 2.3 : Illustration des données OSM visualisées dans l'éditeur JOSM	69
Figure 2.4 : Exemple de scène de propagation enrichie.....	72
Figure 2.5 : Ellipsoïde de Fresnel et arête unique en lame de couteau	73
Figure 2.6 : Modèle à deux rayons	76
Figure 2.7 : Structure et carrosserie d'une voiture	78
Figure 2.8 : Familles de modèles de mobilité dans les réseaux mobiles ad-hoc [21]	81
Figure 2.9 : Exemples de motifs de chemins avec des modèles de marche aléatoire	82
Figure 2.10 : Etapes de simulation de mobilité.....	84
Figure 2.11 : Principes du modèle piéton semi-continu.....	86
Figure 2.12 : Exemple de superposition de linéaires de rues et de vecteurs 3D de bâtiments.....	88
Figure 2.13 : Structure d'un objet intersection.....	90
Figure 2.14 : Problème du « véhicule aveugle »	91
Figure 2.15 : Exemple d'évolution de la vitesse en fonction de la densité	93
Figure 2.16 : Exemple de statistiques de macro-mobilité	93
Figure 2.17 : Exemple de densité spatiale.....	94
Figure 2.18 : Exemple de génération de trottoirs en milieu urbain.....	95
Figure 2.19 : Distribution du piéton sur la zone d'arrivée	96
Figure 2.20 : Vue du scénario d'illustration (© Google 2012)	97
Figure 2.21 : Scène enrichie par le mobilier urbain et trajectoire du récepteur mobile	98
Figure 2.22 : Illustration de la variation de puissance avec un récepteur mobile	98
Figure 2.23 : Détails de variation de puissance avec un récepteur mobile	99
Figure 2.24 : Scène enrichie par des véhicules mobiles.....	100
Figure 2.25 : Illustration de la variation de puissance avec un environnement mobile	100

Figure 3.2 : Profil de puissance due au mobilier urbain le long de la route.....	111
Figure 3.3 : Profil d'angle d'émission horizontal le long de la route.....	112
Figure 3.4 : Profil puissance-retard et profil angulaire horizontal en émission pour le point 490	113
Figure 3.5 : Scénarios d'étude des évanouissements à grande échelle	114
Figure 3.6 : Distribution logarithmique de l'amplitude des évanouissements pour l'addition de deux champs complexes.....	115
Figure 3.7 : $P_{ev} - (0R0D+RS)$	116
Figure 3.8 : Modèle à deux rayons et distances de corrélation	117
Figure 3.9 : $P_{ev} - (1R0D)$	118
Figure 3.10 : Amplitude des évanouissements le long d'une route (1R0D, environnement 2) ...	119
Figure 3.11 : $P_{ev} - (2R0D+RS)$	120
Figure 3.12 : Routes de simulation pour l'étude de l'évanouissement dû au mobilier urbain et illustration de génération de voiture le long des rues.....	122
Figure 3.13 : Statistiques comparées de P_{ev} avec et sans véhicules stationnés (Env. 1).....	123
Figure 3.14 : Statistiques comparées de P_{ev} avec et sans véhicules stationnés (Env. 2).....	123
Figure 3.15 : Statistiques comparées de P_{ev} avec et sans véhicules stationnés (Env. 3).....	123
Figure 3.16 : Environnement de mesure statique	125
Figure 3.17 : Agencement des scénarios de mesure.....	126
Figure 3.18 : Environnement de mesure dynamique (B)	127
Figure 3.19 : Chaîne de mesure.....	128
Figure 3.20 : Mesure de la diversité spatiale locale	128
Figure 3.21 : Capture d'écran d'un passage de véhicule et variation du signal.....	129
Figure 3.22 : Processus d'identification par motif	130
Figure 3.23 : Résultat des mesures statiques.....	131
Figure 3.24 : Motifs moyennés pour les bus et utilitaires	133
Figure 3.25 : Bus, Configuration \perp	133
Figure 3.26 : Bus, Configuration α	133
Figure 3.27 : Utilitaires, Configuration \perp	133
Figure 3.28 : Motifs moyennés de voitures.....	134
Figure 3.29 : Configuration $A\perp L$	135
Figure 3.30 : Configuration $A\alpha L$	135
Figure 3.31 : Configuration $B\perp L$	135
Figure 3.32 : Configuration $B\alpha L$	135
Figure 3.33 : Atténuation due à la diffraction par arête unique en lame de couteau à une fréquence de 2,1 GHz, hauteurs d'émission à 3,6 m et réception à 1,5 m, distance de 14 m.....	137

Figure 3.34 : Comparaison de l'atténuation mesurée et calculée avec une diffraction par arête unique en lame de couteau pour un utilitaire	139
Figure 3.35 : Comparaison de l'atténuation mesurée et calculée avec une diffraction par arête unique en lame de couteau pour une voiture.....	140
Figure 3.36 : Comparaison des motifs dérivés des mesures et de la prédiction dynamique pour les bus	142
Figure 3.37 : Comparaison des motifs dérivés des mesures et de la prédiction dynamique pour les utilitaires.....	143
Figure 3.38 : Comparaison des motifs dérivés des mesures et de la prédiction dynamique pour les voitures.....	143
Figure 3.39 : Valeurs des différences d'amplitude entre trajet direct et réflexion sur le sol en fonction de la distance du lien.....	144
Figure 3.40 : Résultats du modèle ajusté dans la configuration $A\alpha L$	145
Figure 3.41 : Résultats du modèle ajusté dans la configuration $B\alpha L$	145
Figure 3.42 : Environnement A1	147
Figure 3.43 : Environnement A2.....	147
Figure 3.44 : Environnement A3.....	148
Figure 3.45 : Distribution de l'atténuation dans le cas scénario A1, récepteur proche de l'émetteur	149
Figure 3.46 : Résultats de probabilité de coupure à un niveau de 6 dB	150
Figure 4.1 : Exemples d'un réseau de mobilité et des statistiques de trafic.....	158
Figure 4.2 : Exemple d'une base de données vectorielle et des rayons des trajectoires	159
Figure 4.3 : Processus à deux états.....	160
Figure 4.4 : Scénario de petites cellules et intersections lien / route.....	161
Figure 4.5 : Chaînes de processus corrélés.....	163
Figure 4.6 : Motifs de fluctuation.....	164
Figure 4.7 : Trajet direct, réflexion et diffractions sur les arêtes d'un véhicule dans un scénario de petites cellules	165
Figure 4.8 : Exemple de corrélation de multi-trajets.....	166
Figure 4.9 : Paramètres du calcul TUD en 2D	167
Figure 4.10 : Distribution des durées inter-obstruction, comparaison avec les mesures	171
Figure 4.11 : Probabilités de coupure, comparaison avec les mesures	172
Figure 4.12 : Scénario de validation : déploiement LTE hétérogène	173
Figure 4.13 : Probabilités de coupure, comparaison avec un outil déterministe.....	174
Figure 4.14 : Matrice de corrélation des obstructions pour 3 utilisateurs	175
Figure 4.15 : Comparaison des gains de temps de simulation et des durées des processus.....	176
Figure 4.16 : Diffractions horizontales et verticales sur une personne	179

Figure 5.1 : Allocation en bloc temps/fréquence en LTE [3].....	188
Figure 5.2 : Canal LTE temps/fréquence pour deux utilisateurs [3].....	188
Figure 5.3 : Principales étapes de processus du simulateur LTE de l'université de Vienne.....	189
Figure 5.5 : Scénarios de déploiement pour l'étude n°1	195
Figure 5.6 : Résultats de simulation – UE ₁	198
Figure 5.7 : Résultats de simulation – UE ₁₁	198
Figure 5.8 : Résultats de simulation – UE ₂ (Scenario B).....	199
Figure 5.9 : Résultats de simulation – Réseau (Scenario D).....	199
Figure 5.10 : Scénario de déploiement pour l'étude n°2.....	204
Figure 5.11 : Résultats de simulation – UE ₁	205
Figure 5.12 : Résultats de simulation – UE ₁₂	205
Figure 5.13 : Résultats de simulation – UE ₉	206
Figure 5.14 : Résultats de simulation – UE ₁₆	206
Figure 5.15 : Résultats de simulation – Réseau	207

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Liste non exhaustive d'information de mobilier urbain dans les fichiers .osm.....	71
Tableau 3.1 : Scénarios de mesure et notations	127
Tableau 3.2 : Valeurs des distributions pour les paramètres des véhicules	136
Tableau 3.3 : Rapports de distance et métriques de mobilité pour la campagne de simulation...	148
Tableau 4.1 : Distribution des véhicules	170
Tableau 5.1 : Paramètres de simulation pour l'étude n°1	197
Tableau 5.2 : Paramètres de simulation pour l'étude n°2	203

Introduction

Depuis le début des années 1980, les communications sans fil en situation de mobilité connaissent un succès toujours grandissant. La démocratisation de la transmission de la voix par le GSM a ouvert le champ à des technologies, telles que l'UMTS, proposant des débits plus rapides et donc des services de plus en plus nombreux. Aujourd'hui, le réseau de téléphonie mobile ne sert plus seulement à avoir une conversation à distance, mais à envoyer des photos, faire de la visiophonie, naviguer sur le Web, jouer en ligne, lire des flux vidéo... L'élargissement de la gamme des applications et des services entraîne une augmentation croissante de l'utilisation de données, jusqu'à atteindre les limites de capacité des réseaux actuels. Les réseaux à venir devront donc mettre à disposition des débits plus importants, mais également servir plus d'utilisateurs. Des solutions doivent être trouvées pour utiliser au mieux le spectre des fréquences disponibles, qui est limité, et le canal de propagation. D'une part, de nouveaux systèmes, dits de 4^{ème} génération (WiMAX, LTE-A) sont conçus par des organismes de standardisation pour répondre aux besoins des nouveaux réseaux mobiles. D'autre part, les opérateurs cellulaires mettent en place une densification de leurs réseaux, dans des situations où celui-ci arrive à une charge maximale. En effet, la densification du réseau, c'est-à-dire l'ajout de nouvelles antennes, permet d'augmenter sa capacité, mais a un coût en termes de matériel et d'interférences entre cellules. Des nouvelles topologies de réseaux ont été imaginées comme solution à cette densification. Ces topologies, appelées *petites cellules*, sont confinées à des environnements restreints : à l'échelle d'une rue en environnement extérieur (pico-cellule) ou à l'échelle d'une pièce ou d'une habitation en environnement intérieur (femto-cellule).

Au-delà de la densification des réseaux cellulaires, l'utilisation de topologies proches et denses représente le futur des communications sans fil avec les concepts de réseaux de prochaines générations : les réseaux à base de relais, les réseaux maillés et enfin les réseaux ad-hoc, qui présentent des communications directes entre objets, humains ou machines, dans un monde ultra-connecté.

Ce doctorat se déroule dans le cadre CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche), qui permet pour le doctorant un travail de collaboration entre le milieu industriel, ici la société SIRADEL, et le milieu académique, ici le laboratoire CITI (Centre d'Innovation en Télécommunications et en Intégration de services). SIRADEL est une entreprise de haute technologie rennaise, également implantée en Asie et en Amérique, qui fournit en France et à l'international des solutions pour la planification radio des réseaux de télécommunication et de télédiffusion, et édite en particulier des produits logiciels de calcul de zone de couverture radio. Par ailleurs SIRADEL spécifie, produit et commercialise des bases de données géographiques haute résolution pour différentes applications. Enfin SIRADEL réalise pour des opérateurs et des équipementiers des campagnes de mesure radio sur le terrain ainsi que des prestations d'expertise. Les travaux ont eu lieu au sein du département Radio R&T, qui bénéficie d'une équipe de recherche reconnue qui participe à de nombreux projets collaboratifs sur les thèmes de la propagation radio et des méthodologies de déploiement, de planification et d'optimisation des réseaux. Le laboratoire CITI, basé à Lyon et associé à l'INSA de Lyon et l'INRIA, développe son activité de recherche sur les enjeux associés au développement de l'Internet à travers 5 domaines d'expertise : intergiciel, vie privée, réseau, systèmes embarqués et systèmes radio. Les collaborations mises en œuvre avec le CITI concernent en particulier les potentialités d'optimisation des systèmes et des réseaux grâce à une meilleure caractérisation du canal de propagation dynamique.

La connaissance du canal de propagation est la brique de base dans l'évaluation des performances des diverses couches des réseaux de communication. La topologie dense des petites cellules affecte le canal de propagation des signaux. Nous nous interrogeons dans ce manuscrit sur la pertinence des modèles de propagation, développés pour la plupart dans des contextes de macro-cellules, et en particulier de la modélisation des différentes dynamiques en petites cellules. Au delà de l'impact sur la propagation, notre démarche cherche à établir une évaluation de l'impact de cette dynamique sur les mécanismes des systèmes et des réseaux.

Deux composantes essentielles sont en particulier identifiées dans le premier chapitre comme sujets d'étude privilégiés. Premièrement, les modélisations stochastiques des évanouissements à grande échelle dus au déplacement de l'utilisateur nous paraissent inadaptées aux petites cellules. En effet, la justification physique d'un modèle log-normal requiert des phénomènes de masquage souvent absents en petite cellule. De plus, la modélisation des corrélations dans l'espace et le temps de ces évanouissements à grande échelle est discutable sur plusieurs points, notamment le caractère isotrope du modèle majoritairement utilisé dans la littérature. Secondement, les évanouissements dus à l'environnement nous semblent négligés de manière inadéquate. En effet,

la densification des cellules rend les caractéristiques du canal sensibles aux changements dans l'environnement de propagation.

De nombreuses mesures ont été réalisées par la communauté scientifique dans le contexte d'environnement intérieur. L'impact du corps humain sur le masquage des trajets de propagation a été démontré en particulier à 60 GHz, mais également dans des systèmes WiFi ou ULB et plusieurs modélisations permettent de prendre cet aspect en compte lors de l'évaluation des systèmes. Cette problématique est cependant peu traitée en environnement extérieur, même si des mesures ont mis en avant des liens entre variations du canal et mobilité de l'environnement, notamment des véhicules. C'est pourquoi nous avons choisi de privilégier l'étude des environnements de petites cellules extérieures. Par ailleurs, SIRADEL et le laboratoire CITI participent dans un cadre de programme ANR au projet ECOSCells¹, qui vise à établir un cadre commun de travail pour le déploiement de futures stations de base de type petite cellule. Ces stations de base ont pour objectif de pouvoir subir des charges importantes de trafic ainsi que d'optimiser leurs besoins en consommation énergétique. Différents algorithmes (adaptation dynamique, gestion optimale des interférences, gestion de réseaux hétérogènes) ont donc été développés par plusieurs partenaires et testés dans des plateformes communes de simulation et de démonstration. La définition de scénarios communs permet de fournir des scénarios applicatifs pour cette thèse. Par exemple, une possibilité de déploiement envisagée est de placer une station de base tous les 100 m le long des rues sur des lampadaires, à une hauteur de 4 m. La station de base serait munie d'une antenne omnidirectionnelle et émettant à quelques Watts. La norme de communication envisagée est le LTE. Plusieurs scénarios de déploiement sont considérés : réseau indépendant de petites cellules, couverture de zones « blanches », couverture de zones à forte demande de débit...

Nous considérons cependant les études en scénarios d'environnement intérieur comme une source importante de métriques de mesure et d'exemples de modélisations. De plus, des études et des modèles en environnement intérieur ont été réalisés par l'équipe R&T de SIRADEL dans divers projets, tels que FREEDOM², WHERE II³ ou POSEIDON⁴.

Le travail exposé dans ce manuscrit se situant dans un cadre industriel, la méthodologie choisie pour répondre aux problématiques évoquées se base sur les connaissances et algorithmes existants dans l'entreprise. De manière spécifique, SIRADEL édite un outil de prédiction de propagation déterministe, basé sur le lancer de rayons. Les modèles déterministes de propagation utilisent une approche physique basée sur la connaissance de la géographie, au contraire de

¹ Projet ECOSCells – ANR – <http://www.systematic-paris-region.org/fr/projets/ecoscells>

² Projet FREEDOM – EU 7th Framework Program – <http://www.ict-freedom.eu/>

³ Projet WHERE2 – EU 7th Framework Program – <http://www.kn-s.dlr.de/where2/>

⁴ Projet POSEIDON – EU 7th Framework Program – <http://www.poseidon-ip.eu/>

modèles stochastiques qui décrivent les variations du signal suivant ses statistiques, généralement obtenues à l'aide de données empiriques.

La première approche que nous avons est donc d'observer l'impact sur la prédiction de propagation déterministe des détails de l'environnement jusqu'à présent négligés. L'intérêt de cette approche déterministe est de pouvoir générer un grand nombre de données et de les traiter de manière statistique sans avoir à faire de longues campagnes de mesure. Cependant, les détails de l'environnement ne sont pas forcément présents dans les bases de données géographiques, et les modèles de propagation ne sont pas forcément adaptés pour calculer les contributions issues de ces détails. Le chapitre 2 décrit l'ensemble des processus mis en place dans les différents environnements étudiés, rassemblés à l'intérieur d'une plateforme générique de simulation qui permet la génération de détails et son couplage avec la prédiction de propagation. Nous présentons en particulier une démarche novatrice de génération pseudo-aléatoire d'objets statiques permettant de faire des traitements statistiques sur plusieurs versions d'une même scène de propagation enrichie. Cette démarche repose sur l'utilisation des bases de données de topologies de rues OpenStreetMap (OSM) libres et collaboratives. Le déplacement des objets dans la scène de propagation est également étudié au travers de l'amélioration de modèles existants de macro et de micro-mobilité grâce aux nombreuses informations des données d'OSM. Finalement, des modèles de propagation spécifiques aux objets générés sont détaillés, en veillant à respecter les conditions particulières des topologies de petites cellules, notamment l'application des formules en champ proche. Le choix des modèles se base sur une reconstitution plus qualitative que quantitative des propriétés des canaux de propagation radio considérés, avec un intérêt particulier pour les aspects de corrélation dans l'espace et dans le temps. La génération pseudo-aléatoire et les modèles de propagation spécifiques aux petites cellules ont été présentés lors d'un séminaire (1) et publiés dans une conférence européenne (2).

- (1) L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "On the use of statistic in deterministic channel models," in *International Workshop on Propagation and Channel Modeling for Next-Generation Wireless Networks (IWPCM)*, Lyon, 2011.
- (2) G. Gougeon, Y. Lostanlen and L. Maviel, "Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, pp. 3448-3452, 2011.

Une fois la plateforme de simulation mise en place, nous l'utilisons pour caractériser l'impact de l'environnement dans le chapitre 3. Son utilisation est cependant conditionnée à la validation des hypothèses et des mécanismes de propagation adoptés, voire à des ajustements des paramètres des modèles si nécessaire. Nous choisissons pour cela de confronter les résultats de simulation à des valeurs de référence par des approches quantitatives et qualitatives. Nous

comparons en particulier la puissance hors trajet direct venant du mobilier urbain avec des résultats de mesures de caractérisation présentes dans la littérature (2). Lorsque ces valeurs de référence ne sont pas disponibles, comme c'est le cas pour le scénario d'évanouissements à grande échelle dus au trafic de véhicules, nous procédons à des mesures, publiées dans (3). Le recours aux mesures est cependant préliminaire et des études de caractérisation spécifiques sont conçues dans un nombre important d'environnements avec la plateforme de simulation validée et ajustée. Nous étudions notamment l'impact de la hauteur de l'antenne de la station de base, qui est un des paramètres essentiels du déploiement de réseau par les opérateurs cellulaires.

- (3) L. Maviel, A. Cordonnier, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, "Measurements of large-scale variations caused by vehicular traffic in small-cells," in *Proc. of the 19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Jounieh, Lebanon, 2012.

Les conclusions des études nous amènent ensuite à orienter nos recherches vers la problématique spécifique de l'impact des véhicules sur un réseau de petites cellules, qui est une motivation principale de nos travaux. La simulation de réseaux nécessite cependant d'importantes ressources de calcul et rend inadéquate l'utilisation d'un modèle purement déterministe pour la prédiction de propagation dynamique. Dans le but de générer rapidement des évanouissements dus aux véhicules, nous proposons dans le chapitre 4 des modèles de propagation hybrides, où nous combinons les avantages de précision du calcul déterministe et de rapidité des modèles stochastiques. Le modèle publié dans (4) propose en particulier de reproduire les obstructions des véhicules grâce aux statistiques de mobilité et d'abstraire l'impact d'un véhicule sur la propagation par un motif d'atténuation.

- (4) L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "A hybrid propagation model for large-scale variations caused by vehicular traffic in small cells," in *Proc. of the 2012 Global Communication Conference (Globecom)*, Anaheim, CA, USA, 2012.

Finalement, l'utilisation du modèle développé fait l'objet d'une étude applicative dans un contexte de réseau LTE hétérogène. Nous proposons dans le chapitre 5 un processus de simulation novateur où les résultats de génération d'évanouissement dus aux véhicules sont intégrés dans un simulateur système à lien descendant existant. Les études réalisées permettent d'observer l'impact de la mobilité des véhicules à la fois sur des métriques concernant l'utilisateur et le réseau global : variations de débit maximal, dont les résultats ont été publiés dans (5), ou variations conjointes de débit utile et de consommation d'énergie...

- (5) L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, “The impact of neglecting vehicular scattering in LTE heterogeneous networks,” in *Proc. of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC 2013-Fall)*, Las Vegas, NV, USA, 2013.

Les conclusions de ces études nous amènent à présenter des recommandations et des perspectives concernant la modélisation des dynamiques dans les canaux de propagation de petites cellules et leur prise en compte dans la simulation et l’optimisation des techniques utilisées dans les couches basses du modèle OSI. L’aspect de corrélation dans l’espace et dans le temps, particulièrement important pour le développement d’algorithmes permettant les relais par un mobile ou une station de base voisine lors de mauvaises conditions du canal, est notamment développé dans deux extensions du modèle de propagation hybride, publiées dans (6).

- (6) L. Maviel, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, “Fast generation of correlated large-scale variations caused by vehicular scattering in small cells,” in *Proc. of the 7th European Conference on Antennas and Propagation*, Gothenburg, Sweden, 2013.

1

Problématiques spatio-temporelles dans les réseaux de petites cellules

Résumé

Ce chapitre introduit la problématique de cette thèse et les notions fondamentales utilisées par la suite dans ce manuscrit. L'axe de recherche principal concerne les phénomènes non-stationnaires affectant la propagation dans un canal radio sans fil en mouvement. Nous proposons une étude bibliographique de l'analyse et de la modélisation de ces phénomènes, ainsi que de leur impact sur les performances des systèmes radio.

Nous présenterons dans une première partie les mécanismes physiques à la source des variations du signal dans le temps et dans l'espace, ainsi que les modèles statistiques classiquement utilisés pour abstraire et analyser ces variations. Nous introduirons également les différentes méthodes pour simuler ces variations, ainsi que les différentes métriques et outils pour évaluer leur impact sur la qualité d'un lien, et sur la qualité globale du réseau.

La demande croissante de débit amène les opérateurs de réseaux cellulaires à s'orienter vers une densification des déploiements, en introduisant des antennes au plus près des utilisateurs, par exemple au niveau de la rue. Les topologies résultantes présentent un environnement de propagation plus restreint et sont appelées petites cellules. Les modèles caractérisant les variations spatio-temporelles ont été développés dans le cadre des précédentes générations de systèmes cellulaires, c'est-à-dire dans des topologies de type macro-cellules. Nous verrons dans la deuxième partie que l'utilisation des modèles existants n'est pas toujours pertinente en petites cellules. D'une part, la modélisation classique des évanouissements à grande échelle dus au mouvement du récepteur n'est pas adaptée aux petites cellules. La justification physique utilisée en topologies macro-cellules de masquage de l'ensemble des rayons n'est plus valable en visibilité directe et le caractère isotrope du modèle de corrélation utilisé dans la littérature est

discutable. D'autre part, l'omission de l'impact de l'environnement, notamment de sa mobilité, dans des topologies denses est une source d'erreur lors de la simulation du canal de propagation.

La richesse de l'environnement est en effet souvent ignorée dans la caractérisation des phénomènes non-stationnaires. D'une part, les détails statiques de l'environnement sont rarement pris en compte lors de la prédiction de propagation. D'autre part, l'impact de la mobilité de l'environnement est négligé par rapport à l'impact de la mobilité du récepteur. Ce choix, pertinent en macro-cellules, est remis en question pour des environnements denses. La troisième partie dressera un état de l'art des études portant sur l'impact de l'environnement intérieur et extérieur, en particulier sur les éléments mobiles dans l'environnement. Différentes mesures et modélisations portant sur des gammes de fréquences différentes seront répertoriées et analysées et mettront en évidence l'insuffisance des caractérisations dans le cadre d'environnement extérieur, notamment l'impact des véhicules dans un milieu urbain dense.

Nous terminerons ce chapitre par une synthèse énonçant les problématiques principales associées à ces phénomènes de propagation. Nous en déduisons une méthodologie précise pour intégrer ces phénomènes dans les outils de simulation de SIRADEL, à deux niveaux différents. Nous proposerons tout d'abord une intégration fine et quasi déterministe de ces phénomènes, afin de les étudier par simulation. Puis nous proposerons une approche de modélisation statistique, permettant de développer des méthodes plus efficaces en temps de calcul. Nous nous appuyerons sur des scénarios ciblés, dérivés de projets collaboratifs auxquels SIRADEL et le laboratoire CITI participent.

1.A. Les variations spatio-temporelles dans les réseaux sans fil

1.A.1. Phénomènes dynamiques

1.A.1.1. Éléments de la propagation

Une des façons de représenter la propagation des ondes radio dans l'espace est d'imaginer des rayons allant de l'émetteur au récepteur en suivant des trajectoires différentes. L'ensemble des rayons (appelés multi-trajets) est le résultat de divers phénomènes de propagation, qui sont regroupés en trois catégories principales :

- La diffusion, qui est le résultat d'une onde rencontrant une surface irrégulière. Dû aux irrégularités de la surface, le rayon incident se diffuse dans plusieurs directions.
- La réflexion, qui est un cas particulier de la diffusion lorsque les irrégularités de surface de l'objet diffuseur sont très petites par rapport à la longueur d'onde du rayon incident. Le rayon réfléchi ne se diffuse que dans une direction
- La diffraction, qui est la courbure de rayons autour d'obstacles de petite taille comparé à la longueur d'onde, ou par équivalence la dissémination de rayons à travers de petites ouvertures.

Un ensemble de multi-trajets provenant d'un même diffuseur est regroupé dans ce que nous appelons un amas de rayons. Les multi-trajets à l'intérieur d'un même amas ont des propriétés similaires de retard (souvent pris en relatif par rapport au trajet direct), d'angle et de puissance.

1.A.1.2. Variations temporelles du signal

Les variations temporelles du signal ont lieu lorsqu'il y a du mouvement dans le canal, venant de l'émetteur, du récepteur ou des diffuseurs. Les évanouissements sont classiquement séparés en deux catégories. Lorsque les variations ont lieu sur de petites valeurs par rapport à l'échelle d'espace ou de temps, les évanouissements sont dits à petite échelle, par opposition aux évanouissements à grande échelle. La distinction entre évanouissements à petite ou à grande échelle dépend des paramètres de fréquence du système. La figure 1.1 illustre des variations du signal à différentes échelles de distance pour un récepteur mobile.

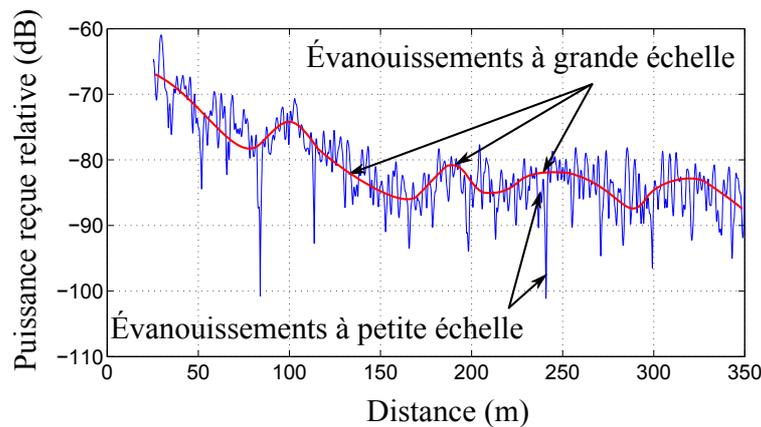


Figure 1.1 : Variations temporelles du signal

1.A.1.3. Dynamiques de la propagation

Chaque rayon est représenté par un champ complexe. Dans le cas d'un signal à bande étroite, les rayons sont considérés comme arrivant en un même temps t au récepteur, et les puissances des multi-trajets reçus se combinent en fonction de leurs phases respectives. La phase du champ est cyclique et varie très vite, même avec une petite variation de la distance du trajet. La recombinaison des champs (également appelée recombinaison des multi-trajets ou recombinaison des rayons) aboutit donc généralement à une alternance entre recombinaisons constructives et destructives. Considérons un ensemble constant de multi-trajets (sans apparition, ni disparition d'amas de rayons) sur une distance d , sur laquelle le récepteur se déplace. Comme les phases des rayons varient de manière différente dans l'espace, le signal va subir des variations rapides, qui sont les évanouissements à petite échelle. Les variations à grande échelle sont quant à elles communément associées à l'apparition, la disparition ou l'atténuation d'un amas de rayons de forte puissance. Ce phénomène de masquage se rencontre dans des environnements ruraux (colline) mais aussi dans des environnements urbains (bâtiments larges). Cependant, nous verrons dans la section 1.B.2.1 que des évanouissements à grande échelle apparaissent également dans des environnements où il n'y a pas de phénomènes de masquage. Un des défis de la caractérisation des évanouissements est de proposer des modèles tenant compte des propriétés de corrélation temporelle, voire des propriétés de corrélation spatiale, des phénomènes physiques de propagation.

1.A.1.4. Distinction des évanouissements

La distinction des évanouissements se fait à deux niveaux en fonction de la fréquence de l'onde propagée et des propriétés du système (cf. figure 1.2).

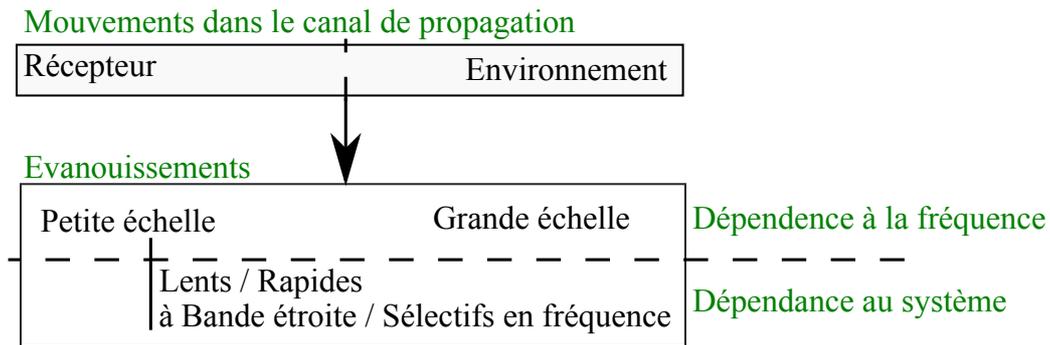


Figure 1.2 : Distinction des évanouissements

Comme évoqué auparavant, les évanouissements à petite et grande échelle sont distingués selon les valeurs en temps ou en espace sur lesquelles se produit l'évanouissement. La définition d'une distance de séparation, dépendante de la fréquence d'émission, n'est cependant pas universelle et des distances de 10 à 90λ ont été proposées dans divers environnements ([1], [2]). Les évanouissements à petite échelle sont distingués selon deux critères qui sont fonctions des propriétés du système. La figure 1.3 illustre ces distinctions et les relations duales en temps et en fréquence introduites par Bello [3].

Les différents multi-trajets d'un même signal originel arrivent avec différents retards notés τ , et sont donc étalés dans le temps comme représenté sur une Réponse Impulsionnelle Complexe (RIC, figure 1.3a, [4]). L'application d'une transformée de Fourier de la RIC permet d'obtenir la Fonction d'Auto-Corrélation en Fréquence (F-ACF). Cette fonction permet de comparer la bande du signal effectif à une métrique appelée la bande de cohérence du canal, qui décrit la plage de fréquence sur laquelle toutes les composantes spectrales du signal ont environ le même gain et une phase linéaire. La bande de cohérence (f_0) est proportionnelle à l'inverse de l'étalement des retards (τ_{rms}). Si la bande de fréquence du système est en deçà de la bande de cohérence, le signal est dit à bande étroite, sinon, le canal est appelé sélectif en fréquence.

Les différents multi-trajets d'un même signal originel arrivent de différentes directions et sont diffusés par des objets se déplaçant à des vitesses différentes. La fréquence Doppler est donc différente pour chaque trajet n et se calcule en utilisant la vitesse du mobile v et la direction d'arrivée α : $f_n = f_d \cos \alpha_n$, où f_d est le décalage maximum et est égal à v/λ . Un exemple d'étalement Doppler typique, dû au mouvement du récepteur est illustré sur la figure 1.3d. La fonction représentée est appelée un Spectre de Puissance Doppler (SPD). L'application de la transformée de Fourier inverse sur le SPD permet d'obtenir la Fonction d'Auto-Corrélation en temps (T-ACF). Cette fonction permet de comparer la durée d'un symbole du système à une métrique appelée le temps de cohérence, qui décrit la rapidité des évanouissements du canal. Le temps de cohérence T_0 est proportionnel à l'inverse de l'étalement des fréquences Doppler ($2 f_d$). Par comparaison avec les contraintes de délai au niveau système ou réseau, le canal est dit à

évanouissements lents ou à évanouissements rapides. Ces contraintes de délais peuvent être la durée d'un symbole système, mais aussi la durée d'une trame, d'un paquet ou une contrainte de délai au niveau applicatif.

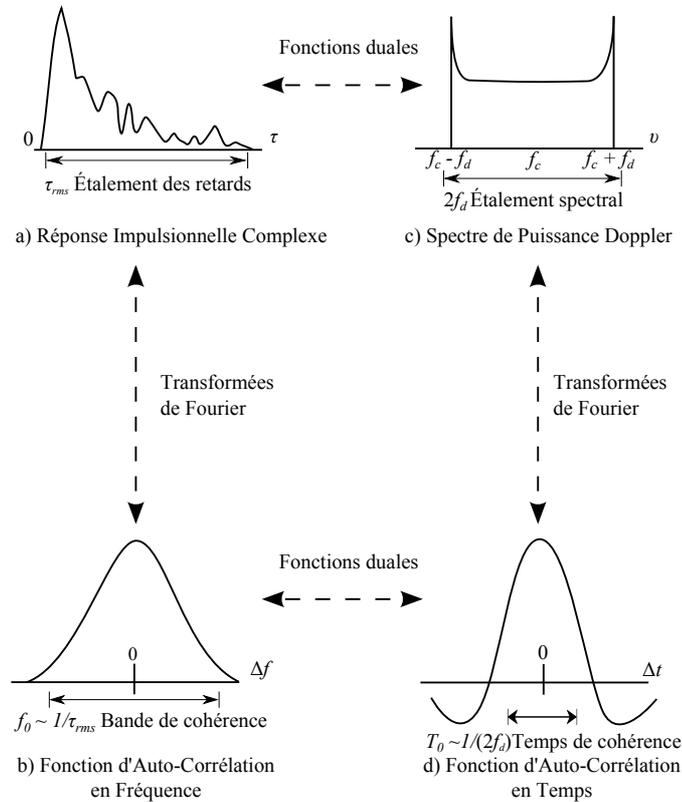


Figure 1.3 : Relation entre les fonctions de densité de puissance et les fonctions de corrélation du canal

1.A.2. Caractérisation des évanouissements

La séparation des variations du signal en différentes échelles est floue et diffère en fonction de l'environnement étudié. Comme évoqué auparavant, la définition d'une distance de séparation est sujette à discussion. De plus l'origine physique des évanouissements à grande échelle par des phénomènes de masquage est discutable. Le scénario le plus explicite remettant en cause cette hypothèse est le cas d'un récepteur dans une rue en visibilité directe (ou Line of Sight, LoS) de l'émetteur, où il n'y a aucun masquage et où des variations à grande échelle sont observées ([2], [5]). La réponse à ces questions passe par une spécification rigoureuse des données modélisées. Définissons $y(t)$ comme le signal réel reçu en bande étroite radio-fréquence (1.1) et $r(t)$ sa représentation complexe en bande de base (ou enveloppe complexe) (1.2) :

$$y(t) = \Re\left(r(t)e^{j2\pi f_c t}\right) \quad (1.1)$$

$$r(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (1.2)$$

Nous définissons l'amplitude de l'enveloppe complexe du signal comme $u(t) = |a(t)|$. La puissance du signal réel reçu est définie comme $P(t) = |y(t)|^2 = \frac{1}{2} \times u(t)^2$ et est exprimée par la suite en mW ou en dBm. Nous décrivons par la suite les modélisations statistiques classiques des évanouissements, leurs justifications physiques et leurs propriétés spatio-temporelles. Ces modèles sont également appelés modèles stochastiques car ils décrivent l'évolution dans le temps d'une variable aléatoire.

1.A.2.1. Evanouissements à grande échelle

De nombreuses mesures effectuées dans divers environnements ont révélé une distribution normale des évanouissements à grande échelle en base logarithmique. Après la description de ces théories, nous évoquerons la remise en cause de la justification physique de cette proposition initiale. Plusieurs chercheurs contestent le modèle multiplicatif sans remettre en cause la distribution log-normale. Finalement, nous étudierons les modèles de corrélation dans l'espace de ces évanouissements à grande échelle, qui ont été le sujet de plusieurs études.

A partir de riches données expérimentales, Suzuki a développé dans [6] un modèle de canal radio terrestre mobile, qui fait l'hypothèse que la moyenne du processus des évanouissements à petite échelle suit une loi statistique de distribution log-normale, résultant d'effets de masquage. En effet, en faisant l'hypothèse que chaque trajet allant de l'émetteur au dernier diffuseur subit un effet d'atténuation multiplicatif, l'évanouissement moyen a une distribution de puissance log-normale, alors que la distribution locale est de type Rayleigh à cause de l'effet additif des multi-trajets. Dans ce modèle multiplicatif, tous les signaux transmis T_s subissent le même processus d'atténuation en cascade, jusqu'à ce qu'ils arrivent dans la zone locale de réception, comme illustré sur la figure 1.4.

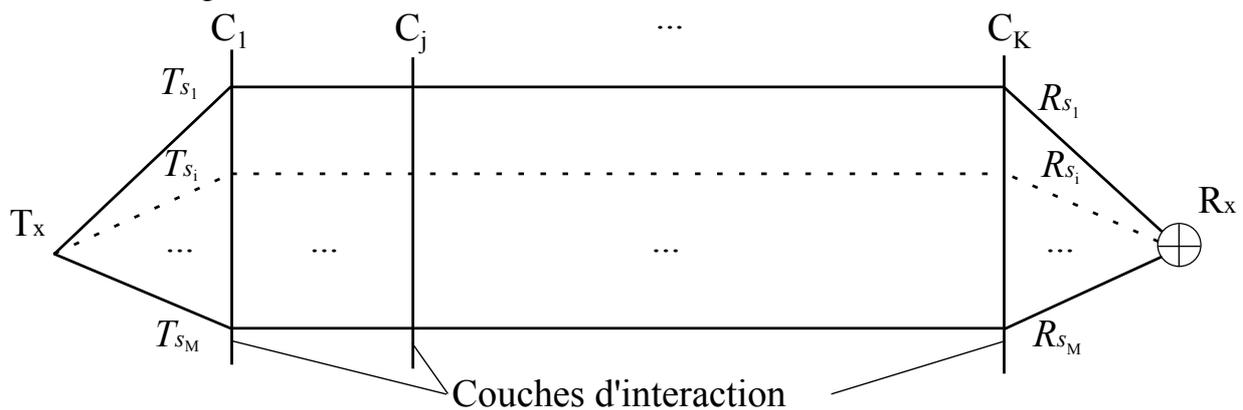


Figure 1.4 : Modèle multiplicatif d'évanouissements à grande échelle

La distribution log-normale des évanouissements à grande échelle (Ω , aussi appelés masquages) est justifiée mathématiquement comme le produit de K facteurs aléatoires, dont la

distribution converge de manière bien connue vers une distribution log-normale pour de larges K (Théorème de la Limite Centrale). La distribution de la puissance p est donc définie comme :

$$p_{\Omega_{P(dBm)}}(p) = \frac{1}{\sigma_{\Omega} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(p - \mu_{\Omega_{P(dBm)}})^2}{2\sigma_{\Omega}^2}\right) \quad (1.3)$$

où $\mu_{\Omega_{P(dBm)}} = 30 + 10 \log E[\Omega_p]$ est la valeur moyenne du processus d'évanouissement du lien et σ_{Ω} est la valeur de l'écart type. Pour des macro-cellules, les valeurs de σ_{Ω} varient suivant les environnements entre 5 et 12 dB ([7], [8]) avec une valeur typique à 10 dB en macro-cellules [9].

La base physique du modèle multiplicatif du modèle de Suzuki a été remise en cause dans [2], les auteurs proposant à la place un modèle additif des rayons aboutissant à la fois aux évanouissements à petite et à grande échelle. Leur principal argument est l'absence de phénomènes de masquage en visibilité directe. De même, Salo souligne dans [10] que trois faits remettent en question ce modèle multiplicatif. Premièrement, les besoins numériques ne reflètent pas la réalité. En effet, suivant le théorème de la limite centrale, il faut une cascade d'environ 30 processus indépendants d'atténuation de type Rayleigh pour arriver à une distribution log-normale, alors que le nombre d'interactions pour les trajets dominants se limite typiquement à 5 dans des macro-cellules en environnement urbain-dense. Deuxièmement, l'hypothèse du modèle multiplicatif introduit des effets contradictoires pour d'autres composantes de la propagation. En effet, le modèle d'affaiblissement devrait augmenter de manière exponentielle avec la distance et l'écart-type devrait être proportionnel à la distance. Cependant, ces conclusions sont invalidées par les mesures empiriques. Finalement, certains résultats de mesure publiés divergent de ce modèle. Il a été montré que la corrélation du processus de masquage entre deux antennes avec des diagrammes de rayonnement différents n'était pas de 1 pour une même route parcourue.

Des modèles alternatifs d'évanouissements à grande échelle sont définis dans [11], où Andersen définit un modèle multi-Rayleigh ou dans [10], où Salo définit des régions globales et locales, en développant un modèle mélangeant des opérations de multiplication et d'addition des multi-trajets. Ce modèle a l'avantage d'être plus plausible du point de vue physique que le modèle purement multiplicatif, mais également d'être applicable sur de plus larges régions géographiques que le modèle purement additif.

Nous nous intéressons maintenant à la corrélation des évanouissements à grande échelle. Comme nous le verrons dans la section 1.A.4.4, la modélisation correcte de la corrélation est nécessaire, à la fois pour avoir une modélisation réaliste du canal (et éviter ainsi les erreurs de prédiction de performance) et pour définir des métriques permettant l'exploitation optimale du canal dans les algorithmes des couches plus hautes. Deux sortes de corrélation ont été considérées dans la littérature : la corrélation entre deux mobiles (dans l'espace ou dans le temps), à travers la Fonction d'Auto-Corrélation (FAC) et la corrélation de signaux venus de deux stations de base

différentes vers un même mobile, à travers la Fonction de Corrélation Croisée (FCC). La FAC est la comparaison de l'évanouissement d'un lien avec un lien identique décalé dans le temps (même lien) ou dans l'espace (lien voisin). Le premier modèle de corrélation a été défini par Gudmundson dans [12] et est très largement utilisé dans les différents domaines de la communauté des communications sans fil. Ce modèle établit que la corrélation de l'évanouissement à grande échelle entre deux positions d'un même mobile tend de manière exponentielle vers 0 avec la distance, suivant (1.4).

$$\rho(d) = e^{\frac{-\ln(2)d}{d_{corr}}} \quad (1.4)$$

Une valeur typique de la distance de corrélation d_{corr} est de 50 m pour des environnements urbains macro-cellules ([13], [14]). D'autres modèles de FAC et FCC peuvent être trouvés dans [15]. Les principales différences entre les différents modèles de la littérature sont les métriques considérées pour établir la corrélation. Certains modèles proposent notamment de considérer l'angle relatif de déplacement du récepteur par rapport à la source, soit en plus de la distance absolue, soit en paramètre unique.

1.A.2.2. Evanouissements à petite échelle

Dans cette partie, U est la Variable Aléatoire (VA) décrivant la distribution de l'amplitude de l'enveloppe complexe $u(t)$. En bande étroite, le signal reçu est la somme des multi-trajets. En considérant un nombre important de diffuseurs, le Théorème de la Limite Centrale indique que les composants du signal en bande de base, en phase $u_I(t)$ et en quadrature $u_Q(t)$ sont des processus aléatoires Gaussiens centrés sur zéro et de variance σ^2 . Pour deux VA Gaussiennes X et Y centrées sur 0 et de variance égale à σ^2 , on peut montrer que $U = \sqrt{X^2 + Y^2}$ suit une distribution de Rayleigh (1.5) et U^2 une distribution exponentielle.

$$p_U(u, \sigma) = \left(\frac{u}{\sigma^2}\right) e^{\left(\frac{-u^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1.5)$$

Dans le cas d'une composante principale forte, les évanouissements à petite échelle peuvent être modélisés par une distribution de Rice, qui a la densité de probabilité suivante :

$$p_U(u, v, \sigma) = \left(\frac{u}{\sigma^2}\right) e^{\left(\frac{-(u^2+v^2)}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{uv}{\sigma^2}\right) \quad (1.6)$$

où I_0 est la fonction de Bessel de premier espèce d'ordre zéro.

La distribution de Rice peut être réécrite en fonction d'un paramètre appelé facteur K , ou facteur de Rice. Le facteur de Rice définit la part de puissance constante v sur la part de puissance aléatoire :

$$K = \frac{v^2}{2\sigma^2} \quad (1.7)$$

La densité de probabilité en fonction du facteur K est définie par :

$$p_U(u, K, \sigma) = \left(\frac{u}{\sigma^2}\right) e^{\left(\frac{-u^2}{2\sigma^2}\right)} e^{-K} I_0\left(\frac{u\sqrt{2K}}{\sigma}\right) \quad (1.8)$$

Pour $K = 0$, les évanouissements suivent une loi de Rayleigh, c'est-à-dire sans composante constante. Pour $K \gg 1$, la distribution de Rice est approximativement Gaussienne autour de la moyenne, qui est égale à la constante v .

Pendant, les distributions ci-dessus ne sont pas adaptées à certaines données expérimentales. Des distributions générales d'évanouissement ont été définies, avec des paramètres permettant de s'ajuster à une plus grande gamme de données empiriques. Les plus utilisées sont les distributions de Weibull et de Nakagami- m . La distribution de Weibull permet plus de liberté dans le paramétrage de la distribution, à travers un paramètre de puissance β . L'enveloppe du signal u peut être transformée à partir d'une VA distribuée en Rayleigh en une VA distribuée en Weibull en utilisant $W = U^{2\beta}$. La densité de probabilité résultante est :

$$p_W(u, \beta, \sigma) = \frac{\beta}{2\sigma^2} u^{\beta-1} \exp\left(-\frac{u^\beta}{2\sigma^2}\right) \quad (1.9)$$

La distribution de Nakagami- m est dérivée de la distribution gamma. Elle est définie suivant l'équation (1.10). Lorsque $m = 1$, la densité de probabilité est équivalente à une distribution de Rayleigh. La distribution de Rice peut être approchée en utilisant la relation suivante pour m :

$m = \frac{(K+1)^2}{(2K+1)}$. Lorsque $m = 1/2$, la densité de probabilité est équivalente à une distribution

Gaussienne tronquée et lorsque $m \rightarrow \infty$, la distribution devient une impulsion.

$$p_N(u, m, \sigma) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{2\sigma^2}\right)^m u^{2m-1} \exp\left(-\frac{mu^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.10)$$

où $\Gamma(m)$ est la fonction Gamma fonction, $\Gamma(n) = (n-1)!$

Lorsqu'un mouvement relatif est introduit dans le canal statique, soit sur l'émetteur, le récepteur ou les diffuseurs, le canal varie dans le temps, de manière corrélée avec le mouvement induit. De manière générale, les modèles statistiques considèrent surtout la vitesse de la station mobile, qui affecte l'ensemble des rayons. Plusieurs métriques permettent de caractériser cette corrélation. La Fonction d'Auto-Corrélation en Temps, déjà évoquée, est lié à la vitesse des éléments dans le canal : le temps de cohérence du canal est inversement proportionnel à l'étalement Doppler.

Le Level Crossing Rate (LCR) mesure la rapidité de l'évanouissement. Il quantifie la fréquence à laquelle l'évanouissement croise un seuil Z , généralement dans la direction positive.

Comme l'AFD, évoquée ci-dessous, le LCR permet d'obtenir simplement des informations statistiques sur les évanouissements à partir de mesures de puissance. La forme analytique du LCR_Z requiert de connaître la distribution jointe $p(Z, \dot{u})$ de l'enveloppe du signal u et de sa dérivée par rapport au temps \dot{u} , cf. (1.11).

$$LCR_Z = \int_{-\infty}^0 \dot{u} p(Z, \dot{u}) d\dot{u} \quad (1.11)$$

L'Average Fade Duration Durée (AFD) quantifie la durée pendant laquelle le signal est en dessous d'un seuil Z . Le niveau cible est souvent défini par les conditions d'une métrique de performance, tel que le taux d'erreur binaire. Considérons t_i la durée du $i^{\text{ème}}$ évanouissement en dessous de Z sur l'intervalle de temps $[0, T]$. Pour $u(t)$ stationnaire et ergodique, et pour T suffisamment large, l'AFD $_Z$ est définie comme :

$$AFD_Z \approx \frac{p(u(t) < Z)}{LCR_Z} \quad (1.12)$$

1.A.2.3. Modèles composites

Pour obtenir un modèle qui comprend à la fois des évanouissements à petite et à grande échelle, des modèles composites sont utilisés. Ces derniers peuvent être définis soit en utilisant des probabilités conditionnelles pour mélanger les densités de probabilité (1.13) ou exprimer le signal reçu comme une combinaison de deux processus en faisant l'hypothèse que ces processus sont indépendants (1.14).

$$p_{\alpha_c}(x) = \int_0^{\infty} p_{\alpha|\Omega_V}(x|w) \cdot p_{\Omega_V}(w) dw \quad (1.13)$$

$$\hat{\alpha}_c(t) = \hat{\alpha}(t) \cdot \Omega_V(t) \quad (1.14)$$

Le modèle de Suzuki ([6]) fait l'hypothèse que la moyenne locale du processus de Rayleigh $\xi(t)$ suit un processus log-normal $\zeta(t)$ indépendant.

$$\eta(t) = \xi(t) \cdot \zeta(t) \quad (1.15)$$

La densité de probabilité associée est (1.16), où $\chi = \ln(10)/10$.

$$p_r(x) = \int_0^{\infty} \frac{\pi x}{2w^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4w^2}\right) \cdot \frac{2}{w\sigma_{\Omega}\chi\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\left(10\log_{10} w^2 - \mu_{\Omega_V(dBm)}\right)^2}{2\sigma_{\Omega}^2}\right) dw \quad (1.16)$$

1.A.3. Génération des évanouissements

Au-delà de la caractérisation statistique des variations du signal, les chercheurs se sont également intéressés aux évanouissements à des fins de simulation. Nous présentons ci-dessous différentes méthodes pour générer des évanouissements.

1.A.3.1. Génération basée sur les modèles stochastiques

Différentes méthodes existent pour générer des évanouissements à petite et grande échelle, en utilisant les propriétés des modèles stochastiques présentés ci-dessus, notamment la distribution des évanouissements et leur corrélation spatiale. La façon la plus simple est de convoluer un bruit blanc Gaussien, avec un filtre dont la réponse en fréquence est égale à la racine carré du spectre Doppler à appliquer [16]. Une autre méthode, appelée Somme des Sinusoïdes (SoS) [17], crée le processus d'évanouissement en superposant des champs, chaque champ étant caractérisé par une amplitude, une phase et un angle d'arrivée. Le processus résultant tend vers une distribution normale d'après le Théorème de la Limite Centrale. La distribution obtenue notée $g_i(t)$ peut être utilisée pour produire un évanouissement à grande échelle (1.17) ou de type Rayleigh (1.18).

$$\Omega_{dBm}(t) = g_{1,(m,\sigma_Q)}(t) \quad (1.17)$$

$$\alpha(t) = \left| g_{2,(0,\sqrt{\mu_P})}^2(t) + j g_{3,(0,\sqrt{\mu_P})}^2(t) \right| \quad (1.18)$$

La version approchée de $\tilde{g}(t)$ du processus Gaussien $g(t)$ est calculée suivant :

$$\tilde{g}(t) = \sum_{n=1}^N c_n \cdot \cos(2\pi f_n t + \Phi_n) \quad (1.19)$$

où N désigne le nombre de sinusoïdes du processus, c_n est le coefficient Doppler, qui représente le facteur de poids de la $n^{\text{ème}}$ sinusoïde, f_n est la fréquence Doppler discrète et Φ_n désigne une VA uniformément distribuée dans l'intervalle $[0, 2\pi[$ appelée phase Doppler. Le principal mécanisme du processus est d'utiliser le Spectre de Puissance Doppler pour fixer les variables c_n et f_n .

Chaque méthode de génération possède ses propres avantages : la méthode de filtrage ne permet de générer des échantillons que par bloc, introduisant un délai, mais la méthode SoS demande plus de ressources de calcul [18]. La génération d'évanouissements à grande échelle corrélés dans l'espace requiert une coordination entre la génération de chaque lien radio d'un système. Pour aboutir à ce résultat, deux méthodes existent, comme décrit dans [19]. La première méthode établit une équation matricielle qui pose la corrélation entre chaque paire de lien. Une factorisation de Cholesky permet de résoudre efficacement cette équation. La deuxième méthode consiste à représenter l'espace par un champ aléatoire (processus aléatoire en deux dimensions). Ce champ est un processus Gaussien, qui respecte une fonction d'auto-corrélation donnée (par

exemple le modèle de Gudmundson). Le placement de récepteurs à des positions données dans le champ corrèle de manière implicite le masquage pour ces récepteurs.

1.A.3.2. Génération basée sur des modèles physiques déterministes

Les modèles physiques déterministes, que nous introduirons en détail dans le chapitre 2, se basent sur la connaissance des composants du canal de propagation (bâtiments, matériaux...). Ils permettent de calculer le champ reçu pour chaque position du récepteur.

Dans le cas particulier de modèles à base de rayons, les évanouissements sont générés de manière implicite. En effet, la recombinaison en phase de l'ensemble des rayons aboutit à des configurations destructives ou constructives suivant la position du récepteur. Par conséquent, l'utilisation de logiciels à lancer de rayon ou de tracé de rayon est une bonne approche dans l'étude des causes physiques des évanouissements. Il faut cependant noter que les résultats obtenus sont à manier avec précaution. En effet, il existe de nombreuses sources d'approximation dans ce type de modèles. Premièrement, l'application de l'optique géométrique est en soi une approximation, qui nécessite de respecter certaines conditions. Ensuite, la discrétisation de l'espace apportée par les outils à lancer de rayons introduit des discontinuités si les paramètres de simulation sont mal choisis. Des méthodes de lancer de rayons permettent cependant de s'approcher de la précision obtenue avec le tracé de rayons. Finalement, la précision sur l'emplacement exact des diffuseurs (bâtiments) peut introduire des incertitudes, sur la puissance mais surtout sur la phase d'un trajet qui est très sensible à la longueur du trajet. Même si la phase de chaque rayon à une position p n'est pas certaine, l'évolution de la phase le long d'une route est pertinente.

1.A.3.3. Modèles Stochastiques de Canal basés sur la Géométrie

Les Modèles de Canal Stochastiques basés sur la Géométrie (MCSG) ont émergé lorsque le développement de nouveaux systèmes de communication sans fil a nécessité des informations de direction d'arrivée et des canaux plus riches en multi-trajets, comme les micro- et pico-cellules. Le principe de base du modèle directionnel original développé dans le cadre du programme européen COST 259 [20], est d'avoir un environnement composé de plusieurs sources de diffusion disposées géométriquement dans l'espace de telle manière que les propriétés stochastiques du signal soient reproduites en recombinaison des différents amas de rayons. Plusieurs modèles similaires ont ensuite été publiés, tels que le COST 273 et 2100 [21], 3GPP SCM [22], ou WINNER II [7], proposant chacun des paramétrages différents des diffuseurs ainsi que des extensions (canaux double-directionnels, corrélation entre paramètres, corrélation dans l'espace, MIMO, canaux spécifiques, bandes de fréquences étendues, polarisation...). Ces modèles permettent de générer des instances différentes de canal de manière rapide mais possédant les propriétés de radio-propagation les plus réalistes et détaillées possibles.

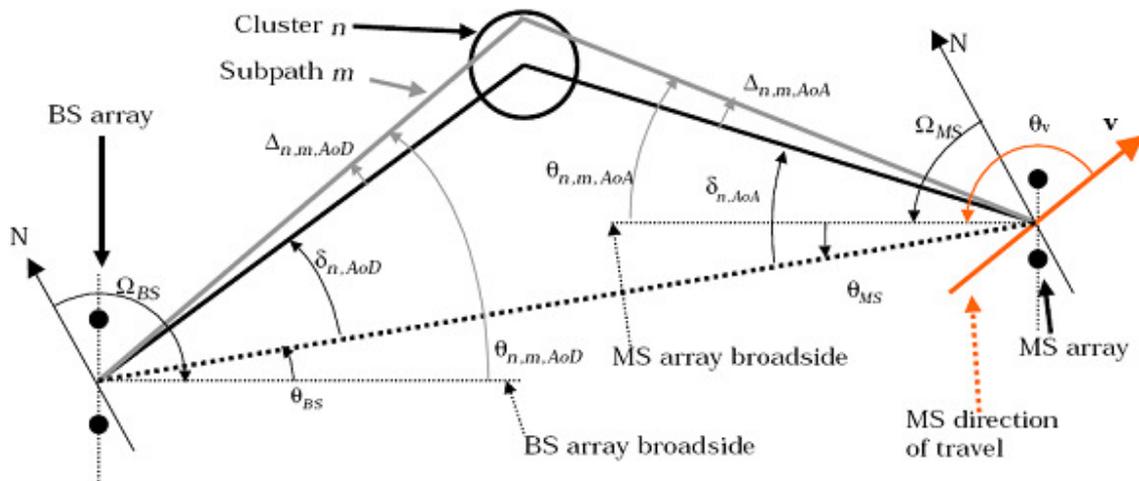


Figure 1.5 : Concept d'amas de rayons et de géométrie dans 3GPP SCM [22]

Nous allons aborder brièvement les différents mécanismes utilisés pour générer des évanouissements à petite et grande échelle dans WINNER II. La notion de *segment* considère que sur une certaine distance, les paramètres de grande échelle sont constants : évanouissement à grande échelle, étalement des retards, étalement des angles d'arrivée et de départ, facteur K . Lorsqu'un utilisateur change de segment, les paramètres de grande échelle sont recalculés. Ils sont cependant corrélés dans l'espace, grâce à un champ aléatoire unique. Les auteurs du modèle ont choisi d'utiliser le modèle de Gudmundson pour les corrélations entre stations mobiles (espace ou temps). Les résultats de mesures ne montrant pas de corrélation claire entre différentes stations de base vers une même station mobile, l'inter-corrélation est fixée à 0. Une matrice de corrélation permet également de corrélérer les paramètres de grande échelle entre eux. Un segment sur lequel le canal est stationnaire est appelé un *drop*. Les paramètres de petite échelle sont générés pour un drop : puissance, délais, angles d'arrivées et de départ des différents amas de rayons. Une phase initiale est déterminée pour chaque rayon. En considérant un mouvement virtuel du récepteur, le seul changement dans la phase des rayons, accompagné des fréquences Doppler calculées à l'aide de la vitesse et des angles d'arrivée, permet de générer des évanouissements à petite échelle.

De plus, des efforts sont faits pour améliorer la cohérence des amas de rayon suivant l'évolution temporelle du mobile. Dans l'approche basique, les propriétés de grande échelle du lien sont corrélées entre deux segments, mais les propriétés des amas de rayons (puissance, délai, angles) sont régénérées. La description du modèle spécifie des méthodes avancées basées sur le principe d'apparition/disparition, soit de manière linéairement croissante/décroissante, soit par des processus de Markov. Cependant, ces méthodes ne sont pas présentes dans l'implémentation proposée. Pour les liens stationnaires (point à point), WINNER II présente le concept d'amas de rayons en mouvement, pour modéliser la mobilité de l'environnement.

1.A.4. Impact sur les performances du réseau

Le lien radio sans fil génère de nombreuses variations par rapport à des liens physiques, tels que les câbles coaxiaux ou la fibre optique. Par conséquent, il est important d'avoir une bonne représentation physique du lien pour pouvoir analyser ces variations, établir des contraintes sur les systèmes de transmission et enfin optimiser la transmission en exploitant les diversités du canal. Le taux d'erreur est une métrique qui décrit la probabilité que l'information transmise sur une interface radio ne soit pas reçue. C'est la plus utilisée des métriques présentées par la suite. Le taux d'erreur dépend du Rapport Signal à Bruit (RSB), mais aussi de la modulation utilisée et des paramètres du système, tel que le codage. Les performances du réseau peuvent être étudiées de trois manières, respectivement par l'analyse théorique, l'expérimentation et la simulation. Nous décrirons dans les paragraphes suivants ces méthodes. Nous ferons ensuite un bref état des lieux des solutions qui existent pour mitiger l'effet des évanouissements et exploiter leurs caractéristiques statistiques.

1.A.4.1. Métriques de performance

Les métriques de performance du lien radio ont plusieurs finalités. Elles peuvent être utilisées pour évaluer des algorithmes améliorant les performances aussi bien que servir de paramètre dans des mécanismes de système cellulaire, tel que le transfert intercellulaire. La métrique de RSB décrivant la proportion de signal utile par rapport au bruit du canal est sûrement la plus connue. Nous distinguons ici le RSB instantané $\text{RSB}(\gamma)$ du RSB moyen ($\bar{\gamma}$), où le terme moyen indique la moyenne statistique sur la distribution de densité de probabilité des évanouissements. Avec des termes mathématiques simples, l'effet des évanouissements peut être représenté sous la forme d'une VA dont $p_\gamma(\gamma)$ représente la densité de probabilité :

$$\bar{\gamma} \triangleq \int_0^{\infty} \gamma p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (1.20)$$

La probabilité de coupure, notée P_{out} est définie comme la probabilité que l'erreur instantanée dépasse un niveau donné ou de manière équivalente, la probabilité que le RSB instantané soit en dessous d'un certain seuil, γ_{th} :

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (1.21)$$

Dans un système idéal, le bruit est un Bruit Blanc Additif Gaussien (BBAG) et il n'y a pas de transmission voisine dans la même gamme de fréquence. Cependant, dans des situations réalistes, l'effet des systèmes interférents (par exemple cellule voisine dans un réseau cellulaire) doit être pris en compte dans le calcul du RSB. Pour cela, la métrique de Rapport Signal à Interférence plus Bruit (RSIB) est introduite dans (1.22) :

$$RSIB_j = \frac{P_{r,j}}{N_j + \sum_{i \neq j} P_{r,i}} \quad (1.22)$$

Au-delà du RSB ou du RSIB instantané, la métrique recherchée pour évaluer la performance d'un système est la bonne transmission de l'information. L'information étant transmise numériquement sous forme de bits, les performances d'un système se mesurent en Probabilité d'Erreur Binaire (PEB), qui est la probabilité qu'il y ait une erreur sur un bit. La PEB est en général une fonction non-linéaire du RSB instantané, la nature de la non-linéarité dépendant de la modulation employée dans le système. Lorsqu'on veut décrire le taux d'erreur pour des métriques de plus haut niveau, on définit de manière similaire la Probabilité d'Erreur Symbole, notée $P_s(E)$, puis la Probabilité d'Erreur Paquet. Le Taux d'Erreur {Bit/Symbole/Paquet} est une métrique de mesure de l'erreur. Pour un large échantillon d'éléments, le taux d'erreur (observé) est équivalent à la probabilité d'erreur (théorique).

1.A.4.2. Analyse théorique

L'analyse théorique de l'impact des évanouissements sur les métriques de performance se base sur les probabilités et les représentations mathématiques du canal. Le but est d'obtenir des expressions simples sous forme analytique, mais incluent souvent des calculs intégraux plus complexes. Les formules décrivant les performances dans des conditions de canal variant dans le temps sont dérivées des expressions sur des canaux à Bruit Blanc Additif Gaussien (BBAG). En représentant la modulation sur l'espace des signaux (cf. figure 1.6) et un récepteur à maximum de vraisemblance, les formules d'erreur peuvent être dérivées en projetant la forme mathématique du BBAG sur la représentation dans l'espace. Nous ne rentrerons pas ici ni dans les détails, ni dans les expressions issues de l'analyse théorique, que le lecteur pourra trouver par exemple dans [23].

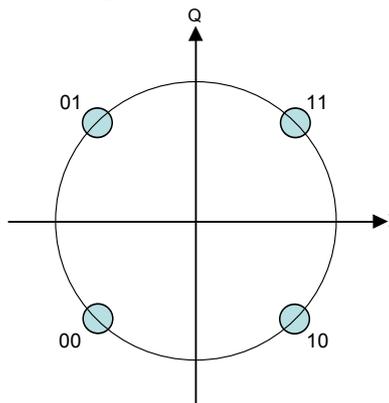


Figure 1.6 : Représentation dans l'espace des signaux d'une modulation QPSK (code de Gray)

1.A.4.3. Expérimentation

Au contraire de l'analyse théorique, la réalisation de mesures permet d'avoir des résultats réalistes. En effet, il n'y a plus d'hypothèse de simplification à faire. Cependant, la pertinence des conclusions effectuées à partir de mesures nécessite une réalisation d'un nombre important d'échantillons pour arriver à s'abstraire des spécificités d'un environnement ou de conditions de mesures données, notamment la fréquence d'opération.

1.A.4.4. Simulation

La dernière méthode pour étudier les performances d'un réseau est de le simuler. De manière idéale, le fonctionnement entier du système est modélisé. Pour chaque lien, l'information à envoyer serait codée, modulée, transmise sur le canal physique, puis démodulée, corrigée et décodée. Les capacités de calcul ne sont cependant pas assez importantes pour simuler de manière rapide tout un système, voire tout un réseau, ce qui pousse à en modéliser et abstraire le plus possible certaines couches. Il existe plusieurs outils de simulation de réseau dans la littérature, comme le très utilisé ns-2 [24], son successeur ns-3 [25], OPNET [26], OMNeT++ [27] ou openWNS [28]. Nous ne ferons pas dans ce paragraphe de rapport exhaustif des simulateurs réseaux, mais de nombreux rapports de ce type sont disponibles dans la littérature, par exemple dans [29]. Quelques articles soulignent l'importance de la modélisation correcte du modèle de canal et de la couche physique dans les simulateurs réseaux ([30]-[31]) et plus particulièrement l'importance des propriétés spatio-temporelles des évanouissements à petite échelle et grande échelle. Pour une évaluation correcte de la qualité d'un lien radio, un simulateur doit pouvoir combiner les informations sur l'état du canal avec les informations du modèle physique qui décrit les composants air-interface du système (couche physique). Un exemple de cette dépendance est la comparaison de la durée d'un symbole par rapport au temps de cohérence introduit dans la section 1.A.1.4. Cependant, le rajout de réalisme dans la modélisation implique une complexification du système et un coût en capacité de calcul. Tout simulateur se définit donc comme un compromis entre précision et simplicité.

1.A.4.5. Réduction et exploitation des évanouissements

La connaissance des caractéristiques du canal de propagation permet d'optimiser la transmission de l'information. Sklar détaille dans [32] plusieurs méthodes pour réduire les pertes sur le RSB apportées par les différents types d'évanouissement. Parmi ces méthodes, l'exploitation de la diversité peut s'appliquer à la fois dans l'espace (MIMO et les différentes techniques de combinaison), en fréquence (OFDM), ou en polarisation. Plusieurs auteurs exploitent également la diversité offerte par l'évanouissement pour avoir des canaux décorrélés,

par exemple pour la sélection de lien dans les réseaux ad-hoc ([33]) à travers l'envoi d'un message à un ensemble limité de sauts au lieu d'un seul (appelé *anycasting*).

De plus, des techniques adaptatives ont émergé, où les couches d'un réseau peuvent échanger des informations pour améliorer ses performances. Cette approche appelée cross-layer est un sujet d'intérêt dans le monde des communications sans fils régi par le modèle OSI. Un exemple développé dans [34] est l'utilisation de l'information de la couche MAC, qui décrit la bonne transmission d'un paquet (ACK) comme paramètre du taux de modulation de la couche PHY. Dans [35], les auteurs se posent des questions sur le type d'information à envoyer pour que l'émetteur sélectionne le taux de transmission idéal et surtout sur quelle échelle mesurer cette information, en fonction de la fréquence des évanouissements.

Finalement, le concept de Coordination de Multi-Points (CoMP) introduit des mécanismes de coopération entre les différentes stations de base qui permettent d'échanger des informations sur le canal, afin d'améliorer la capacité globale du réseau, en particulier la gestion des interférences inter-cellules et les performances en bords de cellule [36].

1.B. Les défis dans les petites cellules

1.B.1. Introduction au concept de « petites cellules »

Une des solutions à l'augmentation de la demande en capacité est une densification du réseau. Ce concept n'est pas nouveau et a déjà été appliqué par les opérateurs de réseaux cellulaires pour densifier leur réseau urbain en ajoutant des micro-cellules aux macro-cellules existantes. Dû à une demande toujours croissante, du fait de l'explosion du trafic de donnée sur mobiles, cette densification est encore utilisée via le concept de petites cellules. Les petites cellules sont destinées à couvrir de petites zones, tel qu'un ensemble de pièces en intérieur (femto-cellules) ou une portion de rue en extérieur (pico-cellules). Les réseaux de petites cellules peuvent être déployés de manière dense de façon à former un réseau autonome, être associés au réseau macro pour former un réseau hétérogène [37], ou insérés sur des zones précises de manière à adresser un besoin local en capacité (trou de couverture ou pic de demande). Dans des environnements extérieurs, les stations de base sont à des hauteurs basses (3 à 10 m) et les récepteurs mobiles à hauteur humaine ($\approx 1,5$ m). Dans des environnements intérieurs, la configuration est similaire à celle du WiFi. Les petites cellules ont un canal spécifique où les multi-trajets vont avoir un rôle important. La transmission est dépendante des conditions de visibilité directe (LoS). Dans le cas contraire, la propagation passe par des diffractions, réflexions ou transmissions à travers les murs. Finalement, les nouveaux standards de communication sans fil, utilisés dans les petites cellules, incluent des objectifs de capacité nécessitant une meilleure allocation des ressources en temps, en fréquence et dans l'espace.

Il faut donc pouvoir bien caractériser les canaux de propagation des petites cellules pour les exploiter au mieux. Pour cela, nous nous posons la question : « *Est-ce que les modèles de canaux macro-cellules existants peuvent être adaptés en petites cellules ?* ».

1.B.2. Adapter les modèles de canal existants ?

1.B.2.1. Justification du modèle multiplicatif pour les évanouissements à grande échelle

Comme nous l'avons vu dans la section 1.A.2.1, la justification physique de la distribution log-normale du modèle d'évanouissements à grande échelle est remise en cause par différents auteurs, notamment dans des conditions de visibilité directe. Ce modèle se base sur une différenciation des sources des évanouissements à petite et grande échelle. Alors que dans le cas de macro-cellules, les variations à grande échelle peuvent être causées par un phénomène de masquage par les bâtiments, ce phénomène est peu présent en micro-cellules, voire absent en condition de visibilité directe. Dans ce cas, il a été montré par la simulation que ces variations étaient causées par les multi-trajets [38], [5]. Des modèles alternatifs basés sur l'addition des rayons ou mixtes ont émergé [10], mais ont peu été utilisés en simulation. Cette nouvelle

approche remet en cause les principes sous jacents du modèle mais pas l'existence en tant que telle d'une distribution log-normale des évanouissements. Cependant, un tel modèle laisse supposer que l'écart-type de la distribution peut être relié aux propriétés des amas de rayons composant le canal de propagation et donc peut évoluer spatialement.

1.B.2.2. Réalisme des corrélations des évanouissements à grande échelle

Plusieurs points sont questionnables dans la caractérisation des corrélations des évanouissements à grande échelle. Le modèle imaginé par Gudmundson a été établi en 1991 dans des conditions de mesures spécifiques. Le modèle a depuis été largement réutilisé par la communauté scientifique parce qu'il est par nature très simple et intuitif (décroissance exponentielle avec la distance) et paramétrable par une seule variable représentant la distance de corrélation. Cependant, son utilisation dans le contexte de petites cellules peut être soumise à des objections. Premièrement, Gudmundson indique lui-même que dans des environnements micro-cellules le signal filtré contient à la fois des composantes à petite et à grande échelle. En effet, le signal mesuré est moyenné sur des distances très courtes (1,5 m). Cette constatation est reliée à la différenciation difficile entre les évanouissements à petite et grande échelle en petites cellules. Gudmundson montre ainsi que pour un récepteur en non visibilité directe, à une distance de 100 à 600 m de la station de base de type micro-cellule, la distance de corrélation est d'environ 5 m, à une fréquence de 900 MHz. Deuxièmement, le seul paramètre pris en compte dans ce modèle est la distance absolue entre deux points. Le modèle est donc isotrope, ce qui viole les propriétés physiques des évanouissements à grande échelle [15]. Les investigations menées dans [5] en non-visibilité directe ont notamment démontré des distances de corrélation différentes lorsque l'utilisateur longe une route (35 m) ou traverse la même route (12 m).

1.B.2.3. Evanouissements dus à l'environnement

Finalement, nous nous posons la question du poids relatif des évanouissements dus au mouvement du récepteur par rapport aux évanouissements dus à la mobilité de l'environnement dans un contexte de petites cellules. La plupart des études utilisent un modèle d'évanouissement unique, sans différencier ces deux sources, et en utilisant la plupart du temps des modèles dérivant de la mobilité du récepteur. Pourtant, l'environnement peut contenir des objets mobiles obstruant et/ou diffuseurs.

1.B.3. Evaluation des performances

Chaque méthodologie d'évaluation des performances a ses propres avantages et inconvénients. Une analyse théorique est un outil utile pour avoir une idée générale mais est souvent basée sur des hypothèses peu réalistes et un modèle approximatif de la couche physique. Les mesures ont l'avantage d'être réalistes, mais demandent un coût important en matériel et en

temps. De plus, pour que les résultats ne soient pas dépendants de l'environnement expérimental, elles doivent être pratiquées de manière extensive. L'utilisation de la simulation permet plus de flexibilité et facilite des études exhaustives, mais requiert, comme pour l'analyse théorique, une part de modélisation et d'abstraction qui peuvent avoir un impact sur le réalisme des résultats. Il faut faire des compromis entre la précision et les capacités de calcul. L'importance de la couche physique et de celle du canal ont été cependant démontrées à la fois en analyse théorique et en simulation. Un modèle trop approximatif (souvent pour des raisons de simplicité de calcul) peut conduire à des résultats faux, voire opposés aux résultats réels [31].

Nous avons noté que l'environnement a une forte influence dans la performance du lien radio, en particulier dans les petites cellules. Par exemple, l'hypothèse souvent utilisée d'un temps de cohérence plus large qu'un paquet peut être fautive, même dans des conditions de lien statique lorsque les conditions de circulation proches sont denses, comme l'ont montré les auteurs de [39]. Ainsi, la section suivante s'intéresse au sujet particulier de l'environnement et de sa mobilité, dans des environnements intérieurs et extérieurs. Nous montrerons que, malgré plusieurs études sur le sujet, majoritairement en environnement intérieur, la mobilité de l'environnement est rarement prise en compte lors de la représentation des évanouissements et de l'analyse des performances.

1.C. Influence de l'environnement dans les petites cellules

1.C.1. Note sur l'environnement statique

Les obstacles de grande taille comparée à la longueur d'onde, tels que les bâtiments, sont pris en compte lors de la prédiction de propagation radio pour les réseaux cellulaires, c'est-à-dire pour des systèmes opérant dans des Ultra Hautes Fréquences (UHF). De manière conventionnelle, le mobilier intérieur (armoires, bureaux) et urbain (abribus, lampadaires) n'est pas pris en compte car l'incertitude des résultats et le faible impact sur la propagation ne justifient pas le coût de calcul déployé. En effet, les principes physiques de la propagation dépendant de la taille relative du diffuseur par rapport à la longueur d'onde, certains obstacles peuvent être invisibles dans les fréquences UHF, où la longueur d'onde s'étale de 0.1 à 1 m. Cependant, la puissance des rayons diffusés peut être importante pour la bande supérieure UHF ou pour de plus hautes fréquences, telle que la bande millimétrique.

Bien que considérées comme mineures, les contributions venant du mobilier ont été étudiées à des fins de quantification, voire de modélisation, notamment par Fujimoto dans [40] qui conclut que l'influence du mobilier et des mouvements des personnes peut avoir un effet important (et variant dans le temps) sur la couverture. Ces études ont eu lieu majoritairement en environnement intérieur en premier lieu. Les contributeurs dans des environnements statiques intérieurs sont le mobilier : chaises, bureaux, tables, étagères, ordinateurs, lits, frigidaires... Le mobilier est rarement inclus dans les données 3D de bâtiments car il peut être facilement et fréquemment déplacé. Pour des fréquences UHF, les études ne sont ni nombreuses ni très référencées. Dans [41], les auteurs ont observé une erreur moyenne de 6 à 7 dB entre les mesures radio à l'intérieur d'une pièce sans et avec les personnes et le mobilier. Quelques modèles de propagation incluent le mobilier, tel que [42], qui propose une modélisation statistique du mobilier assisté par des techniques de lancer de rayon. Les études et les modèles sont plus présents pour des fréquences plus élevées, par exemple dans les travaux de [43] à 60 GHz, où il est conclu que les rayons principaux sont atténués et que de nouveaux trajets sont rajoutés, ce qui donne naissance à un spectre angulaire plus large, mais avec des contributions plus faibles, certaines étant en dessous du seuil de détection. Dans [44], une étude montre que la distribution des Angles d'Arrivée et les paramètres des multi-trajets sont différents des paramètres classiques de la littérature, en raison d'un environnement lourdement encombré.

Dans des environnements extérieurs, les obstacles principaux font déjà partie de la prédiction (collines, bâtiments...). Cependant, certains détails locaux peuvent modifier la propagation du signal, par exemple la végétation, les véhicules stationnés ou le mobilier urbain. L'impact de la végétation est un sujet abondamment traité dans la littérature et plusieurs formules empiriques de pénétration à travers la végétation ont été formulées, par exemple dans [45]. L'effet du vent sur les arbres et notamment sur les feuilles génère des variations temporelles du signal reçu qui sera

décrit dans le chapitre 1.C.3. De même que le mobilier en environnement intérieur, l'influence du mobilier urbain n'a pas été un sujet d'étude extensif car de telles données ne sont pas présentes dans les bases de données. Avec l'intérêt récent pour la propagation en petites cellules et l'importance d'une caractérisation plus riche du canal, des mesures et des modèles émergent pour caractériser la diffusion sur les objets métalliques, tels que les lampadaires, panneaux de circulation et feux de signalisation. Les premières études ont été réalisées dans le cadre du COST 259 [46], où Rizk & al. ont étudié par des mesures et des simulations les effets des panneaux et des lampadaires, concluant que pour une faible densité de bâtiments, les diffuseurs isolés pouvaient avoir un impact similaire à la réflexion et à la diffraction sur un coin de rue. Dans [47], Ghoraishi & al. ont mesuré des Angles d'Arrivées dans divers environnements urbains au Japon, sans trafic routier et ont réussi à séparer les sources de diffusion en différents amas (réflexion, diffraction...). Les auteurs ont montré que la puissance provenant de la diffusion sur le mobilier urbain représentait entre 25 et 35 % de la puissance totale du signal hors trajet direct. Ils font la conclusion que l'analyse des performances du lien radio est biaisée en ne prenant pas en compte ces contributions. Plusieurs modèles ont été publiés en se basant sur cette conclusion, tel que [48], où une expression approximée de la Surface Equivalente Radar (SER) est adoptée pour modéliser les lampadaires. Les autres diffuseurs possibles de l'environnement, tels que les véhicules stationnés ou les arrêts de bus ne sont inclus ni dans les mesures ni dans les modèles, de même que les véhicules se déplaçant.

Dans les prochaines sections, nous allons voir que l'impact des diffuseurs généralement ignorés est d'autant plus important lorsque ces diffuseurs sont mobiles et qu'ils peuvent donc potentiellement obstruer le trajet direct.

1.C.2. La mobilité de l'environnement en intérieur

Dans les environnements intérieurs, les diffuseurs mobiles les plus courants sont les personnes (par exemple les employés dans un bureau). Leur influence est, pour les mêmes raisons que pour le mobilier, conditionnée par la fréquence du système. Nous étudierons dans les prochains paragraphes l'impact de l'activité humaine sur les variations dans le temps pour diverses bandes de fréquences.

1.C.2.1. Mesures

Comme pour le mobilier, la présence et les mouvements des personnes sont traditionnellement négligés pour les prédictions de propagation, que ça soit pour les systèmes Ultra Large Bande (ULB) ou dans la bande UHF. Une des premières études à associer des fortes variations de signal dues à l'activité humaine est [49], où des mesures à bande étroite de liens fixes à 910 MHz ont montré une gamme dynamique d'évanouissement de 17 à 30 dB. Une analyse statistique de ces mesures a montré que le facteur K des distributions d'évanouissement

variait entre -6 et 12 dB. En suivant cette approche, plusieurs études statistiques ont été menées, dont [50], où les auteurs ont fait des mesures en liens statiques en configuration co-polarisée et à polarisation croisée à 2,45 GHz et ont conclu que la distribution statistique du signal s'éloignait de manière importante d'une distribution de Rayleigh lorsqu'un objet se déplaçait à proximité de l'une des extrémités du lien. Dans [51], les auteurs ont procédé à des mesures à bande étroite avec des antennes basses à une fréquence de 5,2 GHz dans un hall d'université en faisant varier la densité de piétons. Les auteurs ont confirmé l'importance de l'effet du corps humain sur la propagation. Ils ont montré entre autres que le minimum et le maximum de puissance reçue ne changeaient pas avec le nombre de personnes, mais que les statistiques de premier et de second ordre subissaient des variations importantes lorsque le nombre de piétons augmentait. Les mêmes conclusions ont été trouvées dans un canal ULB, Pajusco et Pagani ont montré dans [52] que la variabilité du signal reçu dans un environnement intérieur augmente avec le nombre de personnes dans la pièce.

Plusieurs mesures font une étude au delà de l'analyse statistique et proposent des interprétations physiques. Herdin a étudié par exemple l'influence du corps humain sur la propagation dans des canaux MIMO à des fréquences de 2,45 et 5,2 GHz dans sa thèse [53], où 4 personnes croisent le trajet direct d'un lien MIMO. Ses conclusions ont été que les personnes agissent comme des masques, en bloquant certaines directions de propagation. Comme pour les précédentes études, les antennes d'émission et de réception ont été placées à hauteur humaine. Dans sa présentation des canaux de propagation ULB [54], Molisch s'est intéressé au cas théorique où une personne agit comme diffuseur dans une configuration quasi-LoS. La nature du canal ULB fait que l'onde ne se propage pas de la même manière sur toute la bande de fréquence. L'auteur conjecture que, comme l'impact des personnes est plus fort à des fréquences élevées, l'activité humaine dans le canal favorise les composantes à basses fréquences.

Comme établi pour le mobilier, les personnes et le mouvement des personnes sont des paramètres importants pour la propagation à 60 GHz. Les travaux de thèse de Sylvain Collonge dans [43], dont nous avons précédemment parlé pour le mobilier, s'intéressent aussi aux mouvements des personnes, en particulier dans [55]. En effet, des mesures à long-terme ont été faites dans un contexte d'activité humaine quotidienne. Les résultats ont montré que le corps humain atténuait fortement les ondes à 60 GHz, risquant une interruption temporaire de l'échange de données. Par conséquent, il conclut que les études de performance à 60 GHz doivent inclure l'influence de l'activité humaine de manière prioritaire. Ces conclusions ont été partagées par plusieurs autres publications, par exemple [56].

1.C.2.2. Modèles de propagation dynamiques

Plusieurs modèles ont émergé du besoin de simuler les variations dues aux mouvements des personnes dans les prédictions de propagation d'environnements intérieurs. Nous différencions ici les modèles basés sur des mesures et les modèles basés sur une approche physique.

Les modèles basés sur la mesure utilisent les résultats de mesure de canal avec une certaine mobilité. Un exemple simple est le paramétrage d'amas de rayons variant dans le temps d'un Modèle de Canal Stochastique basé sur la Géométrie dans [57]. Roberts propose dans [58] de séparer les distributions de type Rice d'évanouissement d'un lien fixe en deux états à facteur K différents. Les deux états représentent respectivement le fait que le trajet direct soit obstrué ou non par un individu (cf. figure 1.7). Ce modèle est incomplet, car la durée d'obstruction ainsi que la probabilité de transition d'un état à un autre ne sont pas dérivés de mesure ni reliés au nombre de personnes. Dans [51], les auteurs dérivent des formules empiriques de la fonction de répartition du signal reçu à partir de mesures et fonction du nombre de personnes dans la zone. Dans [59], les auteurs ont montré que les variations dues au mouvement des personnes avaient un impact significatif sur le canal et étaient concentrées sur quelques éléments de la réponse impulsionnelle. Ils modélisent ensuite les variations temporelles des éléments les plus perturbés avec des modèles autorégressifs, intégrés et de moyenne mobile (ARIMA). Les modèles ARIMA peuvent générer des séries temporelles stationnaires ou non suivant leur paramétrage, permettant ainsi de les utiliser dans un large spectre de conditions de mobilité.

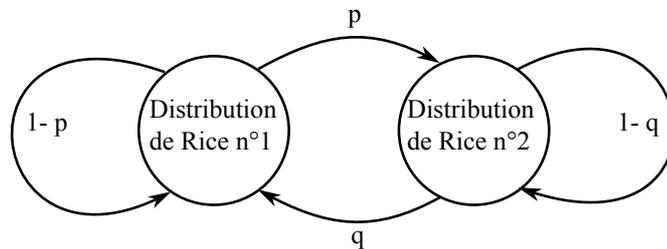


Figure 1.7 : Modèle stochastique à 2 états [58]

D'un autre côté, les modèles basés sur une approche physique utilisent un modèle de corps humain et des modèles de propagation. Un modèle physique d'obstruction a été développé par Künisch et al. dans [60], en se basant sur des diffractions dans le plan vertical. Dans ce modèle, le corps humain est représenté par une bande infinie en longueur et de largeur fixe S (cf. figure 1.8). Le champ diffracté est la somme des deux champs résultant d'une diffraction par arête unique : sur le devant et le derrière de la personne. Les simulations ont montré des résultats plus proches des mesures lorsque la bande était alignée avec l'axe principal du corps humain. Le modèle a été validé dans la plupart des cas, et permet de reproduire le motif d'atténuation du masquage, ainsi que les oscillations avant et après le masquage. D'autres modèles physiques ont été introduits, par exemple dans [61] où Khafaji & al. ont modélisé le corps humain comme un cylindre contenant de l'eau salée, circonscrit par un parallélépipède. Leurs résultats confirment l'impact de masquage

du corps humain sur la propagation et montrent une corrélation forte entre les caractéristiques du canal et le nombre de personnes dans l'environnement : en augmentant le nombre de personnes, les métriques d'évanouissements, telles que les gammes dynamiques de puissance, le τ_{rms} , et le LCR ont affiché de plus grandes variabilités.

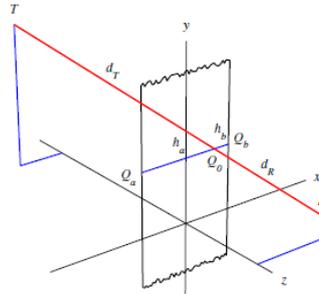


Figure 1.8 : Modèle physique de propagation autour du corps humain [60]

Finalement, plusieurs modèles ont opté pour une hybridation entre les méthodes empiriques et les méthodes physiques. Dans [62], Varshney & al. proposent un modèle à deux états similaire à [58] où le taux de transition dépend du nombre de personnes et de leur vitesse. Les évanouissements pour l'état de *canal correct* sont modélisés par une distribution de Rice alors que dans l'état de mauvais canal, les évanouissements sont modélisés par une distribution de Rice dégradée, dont la moyenne est déterminée par le résultat d'une diffraction à trois rayons sur les côtés d'une personne. Le modèle de masquage présenté dans [63] est souvent cité comme une référence. Il représente l'obstruction des personnes à l'aide de probabilités de masquage en fonction des trajets les plus couramment empruntés par les personnes dans la pièce. Un ensemble de multi-trajets est calculé pour un lien fixe en utilisant un outil de lancer de rayon. Pour chaque rayon, la probabilité d'obstruction est appliquée pour établir si le rayon est obstrué ou non. Plus récemment, les auteurs de [64] ont défini un modèle analytique de la probabilité d'obstruction d'un trajet en fonction de sa longueur. Pour chaque trajet, un modèle à deux états permet de définir l'état d'obstruction. Les paramètres de transition de l'état obstrué à l'état visible sont dérivés de la probabilité d'obstruction, grâce à un polynôme de degré 3, établi à l'aide de différents scénarios de simulation utilisant la technique du tracé de rayons. De la même manière, les auteurs de [65] utilisent le modèle à arête unique développé dans [62] et étendu à la diffraction horizontale (sur la tête d'une personne). Après avoir démontré la validité du modèle à l'aide de mesures, les auteurs font des simulations déterministes dans un scénario typique d'utilisation de 802.11ad. Ces simulations permettent de déterminer les probabilités de blocage et les distributions des atténuations pour chaque amas de rayons, qui sont utilisées par la suite dans un modèle statistique permettant de générer des séries temporelles.

1.C.2.3. Impact sur les performances du système

Un des objectifs de caractériser l'impact du corps humain sur la propagation en environnement intérieur est de permettre l'analyse de performance sur les couches du réseau et de proposer des algorithmes capables de s'adapter aux variations temporelles. Ce genre d'étude a été proposé, par exemple dans [66], où il a été montré que la capacité MIMO diminue localement lorsque le trajet direct est bloqué mais que la capacité moyenne sur l'ensemble des liens augmente avec le nombre de piétons. Dans [62], les auteurs utilisent un modèle du canal à deux états pour établir et évaluer une optimisation inter-couche qui identifie les instants où le canal est dans un état correct et y maximise la transmission de données, par exemple en restaurant la taille optimale de la fenêtre de congestion du protocole TCP.

1.C.3. La mobilité de l'environnement en extérieur

1.C.3.1. Mesures

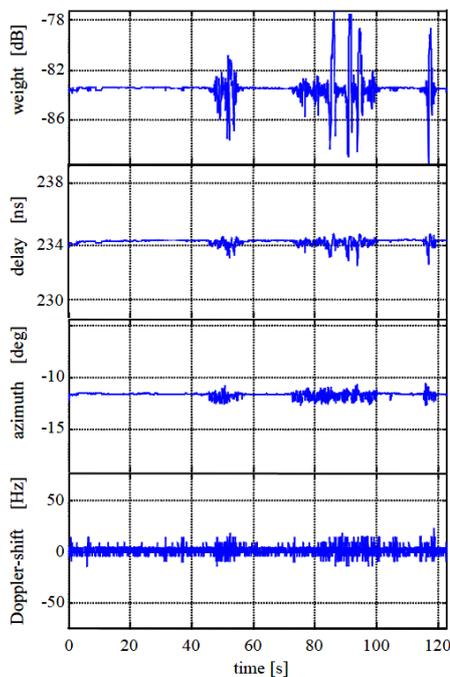
Dans des environnements extérieurs, les premières études à s'intéresser aux variations temporelles induites par l'environnement ont concerné les liens fixes sans fil, où des transmissions point à point sont considérées sur des distances de 100 m à 17 km. Suivant la configuration et la fréquence utilisée, l'impact du vent sur la végétation et du trafic de véhicules peut être important. De nombreuses études ont été réalisées pour prouver la corrélation entre l'atténuation due à la végétation et la vitesse du vent. Ces études sont basées sur plusieurs paramètres, comme dans [67], où les auteurs ont montré une forte dépendance entre les évanouissements et la vitesse du vent pour différentes fréquences, ainsi qu'une dépendance entre l'amplitude des évanouissements et le rapport entre la longueur d'onde étudiée et les dimensions physiques de la végétation. Dans [68], il a été observé que le facteur K décroissait lorsque la vitesse du vent augmentait et que les variations à court-terme (rafales) du vent apportaient une contribution au taux d'évanouissement (LCR) du lien radio. De plus, deux fonctions empiriques reliant le facteur K et la vitesse du vent ont été dérivées à une fréquence de 1,8 GHz pour un lien co-polarisé et en polarisation croisée. Les auteurs de [69] montrent que la saison à laquelle les mesures sont réalisées est un paramètre important, avec un facteur K observé en hiver 3,2 fois plus important qu'en été. Dans cet article, les auteurs proposent également une expression empirique reliant le facteur K moyen à l'excès de perte moyen, la vitesse du vent et la saison. Un modèle statistique présentant le facteur K comme suivant une loi log-normale a été introduit dans [70]. La moyenne de la loi log-normale est une fonction de la saison, de l'ouverture de l'antenne, de la distance et de la hauteur de l'antenne. La hauteur de l'antenne est également un paramètre dans [71], où les auteurs analysent les variations temporelles d'un signal large bande iBurst à 1,9 GHz et d'un signal de télévision numérique à 570 MHz dans différentes configurations urbaines et suburbaines. Ils concluent que la corrélation observée entre les variations du signal et la vitesse

du vent dans le milieu suburbain ne se retrouve pas dans le milieu urbain, probablement car la liaison radio se situe bien au dessus de la hauteur des arbres (5^{ème} étage).

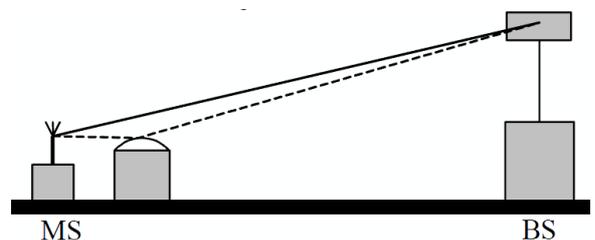
Des études plus générales de liens fixes ont montré cependant que dans certaines situations, la végétation n'était pas le facteur dominant dans les variations du signal. Dans [72], les auteurs présentent des mesures de facteur K et de la fonction d'auto-covariance temporelle de la puissance reçue pour des liens fixes à bande étroite dans des environnements résidentiels urbains. L'environnement étudié est le suivant : « La plupart des arbres sont alignés le long des rues, et petits en général, de telle manière que l'obstruction par la végétation n'est pas un facteur important. La vitesse du vent est typiquement de 5 m/s ou moins. Le trafic véhiculaire va de moyen à élevé, mais sans congestion due à des feux routiers. Les mesures ont été conduites de jour, durant les périodes de trafic plus importantes, de telle manière que les résultats reflètent les pires conditions de propagation. Le trafic piéton à proximité de l'antenne de réception est rare ». Cet article minimise l'influence de l'excès de perte de signal, de longueur du trajet ou du modèle d'affaiblissement sur le paramètre d'évanouissement (facteur K). En revanche, ils concluent que trois facteurs sont prédominants : la position et la directivité du récepteur par rapport aux diffuseurs mobiles, et la vitesse des diffuseurs (trafic de véhicule, vitesse du vent sur la végétation). Les auteurs ont également fait des mesures de nuit avec des conditions de trafic quasi nulles et noté que les fluctuations observées durant la journée avaient complètement disparu. De plus, le passage de véhicules individuels produit des évanouissements isolés clairement discernables. Dans une analyse plus complète [73], des signaux à bande étroite ont été mesurés à 29,5 GHz. En plus de confirmer les conclusions établies précédemment, ils ont mis en avant une corrélation entre le taux d'évanouissement (LCR) et la vitesse du trafic et identifié des évanouissements plus profonds dus à des véhicules plus larges, tels que des bus et des camions. Des mesures plus récentes suivent une approche plus globale et relient les statistiques du second ordre des évanouissements, comme dans [74], où le coefficient d'auto-corrélation est étudié dans des configurations NLoS à une fréquence de 3,35 GHz ou dans [75], où la densité de probabilité de la mobilité des diffuseurs est reliée à la fonction d'auto-corrélation normalisée du canal, mesurée à une fréquence de 3,5 GHz.

Bien que ces études en lien fixe aident à se faire une idée de l'impact du trafic et des métriques de mesure pertinentes, elles ne sont pas adaptées au contexte de petites cellules. Avec des cellules plus denses et des hauteurs d'antennes plus faibles, l'impact de l'environnement local et sa mobilité est plus important. L'impact d'une foule entourant le récepteur sur la variabilité du canal a été démontré dans [76] mais les pertes dues à un masquage du rayon direct, notamment par des véhicules larges, sont plus importantes, comme observé dans les études précédentes. Dans [77], les auteurs ont mesuré des pertes allant jusqu'à 40 dB dues à l'obstruction par un camion d'un lien statique à 11 GHz. Dans [78], les auteurs observent la propagation en multi-trajets dans une configuration urbaine en micro-cellule à 3,5 GHz en utilisant un sondeur de

canal. Les mesures montrent que le passage de véhicule provoque soit le masquage du trajet direct, soit des diffusions sur le véhicule. Les pertes allant jusqu'à 20 dB sont dues à des véhicules larges, alors que le passage de voitures provoque des événements appelés *indéterminés*, c'est-à-dire où l'algorithme de résolution ne peut pas distinguer le trajet provenant du véhicule et le trajet direct, car ils partagent des propriétés similaires de retard, de puissance et d'angle d'arrivée. Les spectres de délai et d'azimut observés sur la figure 1.9a, varient en effet très peu lors du passage d'un véhicule, alors que des variations de puissance du signal de l'ordre de ± 4 dB ont lieu. Les auteurs font l'hypothèse d'une propagation sur le toit, comme illustré sur la figure 1.9b, où le rayon diffus possède des propriétés similaires au trajet direct. L'ordre de grandeur des évanouissements est plus faible qu'avec un véhicule large, et la recombinaison des rayons peut être destructive ou constructive. De plus, les auteurs suggèrent une relation entre le temps de durée d'un feu rouge et les occurrences des fréquences Doppler.



a. Effet sur la réponse impulsionnelle du canal



b. Conjoncture des mécanismes physiques de l'événement indéterminé

Figure 1.9 : Passage d'un véhicule et son effet sur le canal [78]

1.C.3.2. Modèles de propagation prenant en compte l'environnement

Dans [79], les auteurs étudient l'impact du trafic véhiculaire sur le modèle d'affaiblissement dans des environnements urbains micro-cellulaires. Ils observent que le modèle classique à deux rayons [80] n'est pas optimal, car il ne considère pas le trafic véhiculaire, la végétation et les panneaux routiers, qui peuvent masquer ou rajouter des multi-trajets. A partir de cette

constatation, ils dérivent un modèle prenant en compte deux paramètres. Le premier paramètre est la *hauteur de la zone de réflexion* h_0 , qui modélise la hauteur de la réflexion sur le sol, qui n'est plus à 0 m, mais environ à la hauteur des toits des véhicules. Le second paramètre est la *probabilité de collision par unité de distance* s , qui modélise les obstacles de faible densité, tels que les panneaux de signalisation. Le modèle d'affaiblissement proposé est le suivant :

$$L_d(r) = e^{-s \cdot r} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \cdot \left| \frac{e^{-jkr_t}}{r_t} + R \cdot \frac{e^{-jkr_{rm}}}{r_{rm}} \right|^2 \quad (1.23)$$

où $e^{-s \cdot r}$ modélise la visibilité de l'obstacle à une distance r , c'est-à-dire la probabilité que le signal ne soit pas obstrué par des obstacles de faible densité. Le paramètre R est le coefficient de réflexion du modèle à deux rayons, k est le nombre d'onde, r_t est la distance du trajet direct de l'émetteur au récepteur, r_{rm} est la distance du rayon réfléchi à la hauteur h_0 , calculée en utilisant (1.24) :

$$r_{rm} = \sqrt{r^2 + \{(h_b - h_0) + (h_m - h_0)\}^2} \quad (1.24)$$

où h_b et h_m sont les hauteurs respectives de la station de base et du récepteur.

Les auteurs montrent une bonne correspondance entre les mesures et les résultats pour des conditions normales de trafic ($s = 0,002$; $h_0 = 1$ m). Cette validation est confirmée dans [81] ($s = 0,001$; $h_0 = 1,2$ m), où des limites basses et hautes du modèle d'évanouissement sont dérivées. Cependant, le modèle introduit n'est pas variant dans le temps, mais inclut seulement l'effet du trafic véhiculaire sur la puissance moyenne. Pour des liens point-à-point fixes, l'approche de paramétrage de statistiques de premier et second ordre (facteur K , fonction d'auto-corrélation), à partir de données empiriques est souvent utilisée, comme énoncé auparavant.

Peu de modèles physiques ont été proposés. Dans [77], les auteurs comparent des mesures évoquées précédemment à un modèle utilisant la TUD (Théorie Uniforme de la Diffraction) sur chacun des 8 côtés d'un rectangle représentant un camion. Ce modèle physique montre une bonne correspondance avec les mesures, et possède l'avantage de permettre une analyse multi-fréquentielle. Son utilisation dans un modèle à base de lancer de rayons est naturelle, mais le temps de calcul nécessaire rend son utilisation contraignante dans un environnement dynamique. De plus, ce modèle a été conçu et validé dans un environnement rural, avec peu de multi-trajets autres que ceux diffusés autour du véhicule. Nous proposons dans le chapitre suivant d'adapter ce modèle en complément du lancer de rayon dans un contexte d'environnement urbain, en limitant les contributions utilisées pour réduire le temps de calcul.

1.C.3.3. Impact sur les performances du système

Contrairement à l'impact de l'activité humaine, peu d'études vont jusqu'à faire une évaluation complète de l'impact de la mobilité de l'environnement en extérieur sur les performances de systèmes. Les auteurs de [82] ont étudié les dynamiques de la sortie d'un

combineur de diversité en réception, en Combinaison à Gain Egal (CGE) ou en Combinaison à Rapport Maximum (CRM). Suivant un modèle d'auto-covariance adapté aux liens fixes, les auteurs ont montré que, malgré des facteurs K différents sur chaque branche, l'auto-covariance de chaque branche variait peu et que la moyenne des auto-covariances était un bon indicateur de la dynamique des évanouissements à la sortie du combineur, quel que soit le nombre de branches.

Nous avons vu dans cette section que de nombreuses études traitaient de la mobilité de l'environnement en milieu intérieur. Du fait des faibles hauteurs des antennes, plusieurs mesures ont démontré que le milieu intérieur est sensible aux obstructions par le corps humain, que ce soit dans les bandes de fréquence de systèmes actuels (WiFi), et de manière plus importante encore dans les systèmes futurs de transmission (60 GHz). De nombreux modèles, statistiques et physiques ont été conçus pour caractériser et simuler les variations du canal à des fins d'évaluation des systèmes. Au contraire, les topologies denses d'environnement extérieur sont plus récentes et peu d'études s'intéressent aux obstructions des liens radios par les véhicules en dehors des liens fixes à longue portée. Quelques mesures ont cependant démontré l'impact du passage de véhicules sur la puissance du signal, dont l'importance dépend des dimensions du véhicule et de la configuration du lien, mais sans dégager de mécanismes précis. La synthèse de ces conclusions nous pousse à établir une approche de simulation pour caractériser l'impact de l'environnement proche et de sa mobilité sur le canal de propagation que nous décrivons dans la conclusion de ce chapitre.

1.D. Conclusion du chapitre

Nous avons introduit dans ce chapitre les thématiques de recherche abordées dans ce manuscrit. Nous avons d'abord décrit dans une première partie les mécanismes physiques et les modèles liés à la caractérisation des phénomènes non-stationnaires affectant la propagation dans un canal radio sans fil en mouvement. Au delà du canal de propagation, différentes méthodes permettent d'évaluer l'impact des variations dans le canal sur les systèmes et sur les réseaux cellulaires : par mesure, par simulation et par analyse. La plupart des modèles d'évanouissements suivent une approche statistique, afin de permettre une évaluation analytique des performances des systèmes.

Cependant les méthodes existantes ne présentent pas toutes les propriétés adéquates pour la simulation en topologies petites cellules qui se développent en réponse à la demande croissante de débit. La modélisation des différentes dynamiques du canal de propagation en petites cellules est en particulier confrontée à deux limites : la modélisation statistique des évanouissements à grande échelle et l'omission des dynamiques dues à l'environnement.

Premièrement, la modélisation des évanouissements à grande échelle dus au déplacement de l'utilisateur nous paraît inadaptée. En effet, la justification physique d'un modèle statistique log-normal en macro-cellule se base sur des phénomènes de masquage, qui sont souvent de différente nature en petite cellule. De plus, le caractère isotrope de la modélisation des corrélations dans l'espace et le temps adoptée par la communauté est contesté en raison des différentes géométries rencontrées suivant la direction du déplacement de l'utilisateur.

Secondement, les évanouissements dus à l'environnement nous semblent négligés sans justification. En effet, la densification des cellules rend les caractéristiques du canal plus sensibles aux propriétés de l'environnement de propagation. Le sujet de la mobilité de l'environnement a fait l'objet d'une recherche bibliographique approfondie décrite dans la troisième partie de ce chapitre. Cette recherche aboutit à la conclusion que la mobilité de l'environnement dans des environnements intérieurs est l'objet d'une littérature abondante, notamment pour les liens à très haut débit à 60 GHz. En plus de mesures permettant de caractériser l'impact de l'activité humaine sur le canal de propagation, des modèles de propagation statistiques et déterministes ont été conçus afin de prendre en compte cet impact lors de l'évaluation des systèmes et des réseaux. Du fait de l'émergence récente des topologies à petites cellules en environnement extérieur, la mobilité de l'environnement est assez peu traitée dans ces milieux. En effet, la plupart des études de l'impact du trafic de véhicules en environnement extérieur concernent la caractérisation des évanouissements à petite échelle sur des liens fixes à longue portée. Les rares mesures analysant l'impact des véhicules ont souligné de fortes atténuations lors du passage de larges véhicules et mis en avant des phénomènes de

variation de signal associés à des passages de voitures, dont les mécanismes de propagation n'ont pas été clairement identifiés.

A partir de cette étude bibliographique nous pouvons préciser l'approche méthodologique de cette thèse. La méthodologie proposée consiste donc dans un premier temps à caractériser par simulation les phénomènes physiques liés à l'environnement proche et à sa mobilité aboutissant aux variations du canal de propagation. Notre approche s'appuie fortement sur les outils de simulation développés par SIRADEL, société qui héberge cette thèse CIFRE et édite notamment des outils de prédiction de propagation et de calcul de couverture radio pour la planification et l'optimisation des réseaux cellulaires. Pour cela, nous étendons les outils de simulation en adaptant les modèles de propagation aux conditions spécifiques de petites cellules et en les complétant par la génération et le déplacement d'objets statiques dans la scène. La plateforme de simulation de propagation décrite dans le prochain chapitre permet d'obtenir un outil riche d'évaluation et d'analyse exhaustive de l'impact de l'environnement proche sur le canal.

Grâce à cette analyse nous proposerons ensuite le développement de méthodes statistiques pour la mise en œuvre d'un simulateur plus efficace en temps de calcul, tout en préservant les principales caractéristiques de ce modèle réaliste.

Bibliographie

- [1] W. Lee, *Mobile communications engineering*. New-York: McGraw-Hill, 1982.
- [2] S. Aun Abbas and A. Sheikh, "On understanding the nature of slow fading in LOS microcellular channels," in *Proc. of the 47th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 662–666, 1997.
- [3] P. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Transactions on Communications Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 360–393, 1963.
- [4] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 90–100, 1997.
- [5] Z. Li, R. Wang, and A. Molisch, "Shadowing in urban environments with microcellular or peer-to-peer links," in *Proc. of the 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 44–48, 2012.
- [6] H. Suzuki, "A statistical model for urban radio propagation," *IEEE Transactions on Communications [legacy, pre-1988]*, vol. 25, no. 7, pp. 673–680, 1977.
- [7] P. Kyosti, J. Meinila, L. Hentila, X. Zhao, T. Jamsa, C. Schneider, M. Narandzic, M. Milojevic, A. Hong, J. Ylitalo, *et al.*, "Winner II channel models," *IST-WINNER Deliverable*, vol. 1, no. 2, 2007.
- [8] T. Sorensen, "Correlation model for slow fading in a small urban macro cell," in *Proc. of the 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 3, 1998.
- [9] ETSI, "TR 101 112, Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS (UMTS 30.03)," tech. rep., European Telecommunications Standards Institute, April 1998.
- [10] J. Salo, "A Sum-Product Model as a Physical Basis for Shadow Fading," 2007.
- [11] J. Andersen, "Statistical distributions in mobile communications using multiple scattering," in *Proc. of the 27th URSI General Assembly*, (Maastricht, The Netherlands), 2002.
- [12] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *IEEE Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145–2146, 1991.
- [13] D. Baum, J. Salo, G. Del Galdo, M. Milojevic, P. Kyoesti, and J. Hansen, "An interim channel model for beyond-3G systems," in *Proc. of the 61st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring 2005)*, vol. 5, 2005.
- [14] S. Max, L. Stibor, G. Hiertz, and D. Denteneer, "IEEE 802.11 s mesh network deployment concepts (Invited Paper)," in *Proc. of the 13th European Wireless Conference*, p. 7, 2007.

- [15] S. Szyszkowicz, H. Yanikomeroglu, and J. Thompson, "On the feasibility of wireless shadowing correlation models," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, issue 9, pp. 4222 – 4236, 2010.
- [16] D. Young and N. Beaulieu, "The generation of correlated rayleigh random variates by inverse discrete fourier transform," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 7, pp. 1114–1127, 2000.
- [17] Y. Li and X. Huang, "The simulation of independent Rayleigh faders," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 9, pp. 1503–1514, 2002.
- [18] C. Iskander, "A MATLAB-based Object-Oriented Approach to Multipath Fading Channel Simulation," tech. rep., 2008.
- [19] S. Szyszkowicz, F. Alaca, H. Yanikomeroglu, and J. Thompson, "Efficient simulation using shadowing fields of many wireless interferers with correlated shadowing," in *Proc. of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, pp. 1–5, 2010.
- [20] A. Molisch, H. Asplund, R. Heddergott, M. Steinbauer, and T. Zwick, "The COST259 directional channel model-part i: Overview and methodology," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 12, p. 3421, 2006.
- [21] L. Liu, C. Oestges, J. Poutanen, K. Haneda, P. Vainikainen, F. Quitin, F. Tufvesson, and P. Doncker, "The COST 2100 MIMO channel model," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 6, pp. 92–99, 2012.
- [22] 3GPP, "3GPP TR25.996 V9.0.0. Spatial channel model for MIMO simulations," tech. rep., Third Generation Partnership Project (3GPP), 2010.
- [23] M. Simon and M. Alouini, *Digital communication over fading channels*. Wiley-IEEE Press, 2005.
- [24] S. McCanne, S. Floyd, K. Fall, K. Varadhan, *et al.*, "Network simulator ns-2," 1997.
- [25] T. Henderson, M. Lacage, G. Riley, C. Dowell, and J. Kopena, "Network simulations with the ns-3 simulator," *SIGCOMM demonstration*, 2008.
- [26] X. Chang, "Network simulations with OPNET," in *Proc. of Simulation Conference (Winter '99)*, vol. 1, pp. 307–314, 1999.
- [27] A. Varga *et al.*, "The OMNeT++ discrete event simulation system," in *Proc. of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, pp. 319–324, 2001.
- [28] D. Bültmann, M. Mühleisen, K. Klagges, and M. Schinnenburg, "openWNS-open Wireless Network Simulator," *European Wireless Conference*, 2009.
- [29] K. Wehrle and J. Gross, *Modeling and tools for network simulation*. Springer Verlag, 2010.
- [30] M. Takai, J. Martin, and R. Bagrodia, "Effects of wireless physical layer modeling in mobile ad hoc networks," in *Proc. of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, p. 94, 2001.

- [31] D. Kotz, C. Newport, R. Gray, J. Liu, Y. Yuan, and C. Elliott, "Experimental evaluation of wireless simulation assumptions," in *Proc. of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 78–82, 2004.
- [32] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. II. Mitigation," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 102–109, 1997.
- [33] B. Hamida, G. Chelius, and J. Gorce, "Impact of the physical layer modeling on the accuracy and scalability of wireless network simulation," *Simulation*, vol. 85, no. 9, pp. 574–588, 2009.
- [34] R. Aggarwal, P. Schniter, and C. Koksall, "Rate adaptation via link-layer feedback for goodput maximization over a time-varying channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 4276–4285, 2009.
- [35] M. Vutukuru, H. Balakrishnan, and K. Jamieson, "Cross-layer wireless bit rate adaptation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 39, no. 4, pp. 3–14, 2009.
- [36] C. Wang, X. Hong, X. Ge, X. Cheng, G. Zhang, and J. Thompson, "Cooperative MIMO channel models: A survey," *IEEE Communication Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 80–87, 2010.
- [37] S. Landström, A. Furuskär, K. Johansson, L. Falconetti, and F. Kronstedt, "Heterogeneous networks—increasing cellular capacity," *The data boom: opportunities and challenges*, p. 4, 2011.
- [38] A. Rustako Jr, N. Amitay, G. Owens, and R. Roman, "Radio propagation at microwave frequencies for line-of-sight microcellular mobile and personal communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 203–210, 2002.
- [39] J. Camp and E. Knightly, "Modulation rate adaptation in urban and vehicular environments: cross-layer implementation and experimental evaluation," in *Proc. of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking*, pp. 315–326, 2008.
- [40] K. Fujimoto and J. James, *Mobile antenna systems handbook*. Artech House Publishers, 2001.
- [41] J. Rodrigues, J. Valim, B. de Tarso, S. Fraiha, H. Gomes, A. Neves, and G. Cavalcante, "People and Furniture Effects on the Transmitter Coverage Area," in *Proc. of the 9th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, pp. 391–395, 2006.
- [42] M. Klepal and P. Pechac, "Prediction of Wide-Band Parameters of Mobile Propagation Channel," *Proc. of the 27th URSI General Assembly*.
- [43] S. Collonge, "Caractérisation et modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques à 60 GHz à l'intérieur des bâtiments," 2003.
- [44] N. Moraitis, D. Vouyioukas, and P. Constantinou, "Indoor angular profile measurements and channel characterization at the millimeter-wave band," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 155–159, IEEE, 2011.

- [45] T. Kürner and A. Meier, "Prediction of outdoor and outdoor-to-indoor coverage in urban areas at 1.8 GHz," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 496–506, 2002.
- [46] K. Rizk, J. Wagen, J. Li, and F. Gardiol, "Lamppost and panel scattering compared to building reflection and diffraction," in *COST 259*, pp. 158–167, 1996.
- [47] M. Ghorraishi, J. Takada, and T. Imai, "Identification of scattering objects in microcell urban mobile propagation channel," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11 Part 2, pp. 3473–3480, 2006.
- [48] M. Ghorraishi, J. Takada, and T. Imai, "Radio wave scattering from lampposts in microcell urban mobile propagation channel," *ECTI Transactions on Electrical Eng, Electronics and Communications*, vol. 7, no. 11 Part 2, 2009.
- [49] R. Bultitude, "Measurement, characterization and modeling of indoor 800/900 MHz radio channels for digital communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 5–12, 1987.
- [50] A. Kara and H. Bertoni, "Effect of people moving near short-range indoor propagation links at 2.45 GHz," *Journal of communication and networks*, vol. 8, no. 3, pp. 286–289, 2006.
- [51] K. Ziri-Castro, N. Evans, and W. Scanlon, "Propagation modelling and measurements in a populated indoor environment at 5.2 GHz," 2007.
- [52] P. Pagani and P. Pajusco, "Experimental assessment of the UWB channel variability in a dynamic indoor environment," in *Proc. of the 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 4, 2004.
- [53] M. Herdin, *Non-stationary indoor MIMO radio channels*. PhD thesis, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 2004.
- [54] A. Molisch, "Ultrawideband propagation channels-theory, measurement, and modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 5, pp. 1528–1545, 2005.
- [55] S. Collonge, G. Zaharia, and G. Zein, "Influence of the human activity on wide-band characteristics of the 60 GHz indoor radio channel," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp. 2396–2406, 2004.
- [56] M. Fakharzadeh, J. Ahmadi-Shokouh, B. Biglarbegian, M. Nezhad-Ahmadi, and S. Safavi-Naeini, "The effect of human body on indoor radio wave propagation at 57–64 GHz," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI'09)*, pp. 1–4, 2009.
- [57] N. Czink, T. Zemen, J. Nuutinen, J. Ylitalo, and E. Bonek, "A time-variant MIMO channel model directly parametrised from measurements," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, p. 4, 2009.

- [58] J. Roberts and J. Abeyasinghe, "A two-state Rician model for predicting indoor wireless communication performance," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC'95)*, vol. 201, (Seattle, Washington, USA), p. 95, 1995.
- [59] A. Kaya, L. Greenstein, and W. Trappe, "Modeling temporal channel variations in indoor wireless environments," in *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 1–7, 2008.
- [60] J. Kunisch and J. Pamp, "Ultra-wideband double vertical knife-edge model for obstruction of a ray by a person," in *IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB)*, vol. 2, 2008.
- [61] A. Khafaji, R. Saadane, J. El Abbadi, and M. Belkasmi, "Ray tracing technique based 60 ghz band propagation modelling and influence of people shadowing," *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, vol. 2, p. 2, 2008.
- [62] M. Varshney and R. Bagrodia, "Performance implication of environmental mobility in wireless networks," in *Proc. of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 767–775, 2007.
- [63] S. Obayashi and J. Zander, "A body-shadowing model for indoor radio communication environments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 6, pp. 920–927, 1998.
- [64] I. Kashiwagi, T. Taga, and T. Imai, "Time-varying path shadowing model for indoor populated environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 1, pp. 16–28, 2010.
- [65] M. Jacob, S. Priebe, A. Maltsev, A. Lomayev, V. Erceg, and T. Kurner, "A ray tracing based stochastic human blockage model for the IEEE 802.11ad 60 GHz channel model," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 3084–3088, IEEE, 2011.
- [66] J. Gupta, H. Suzuki, and K. Ziri-Castro, "Effect of pedestrian movement on MIMO-OFDM channel capacity in an indoor environment," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 682–685, 2009.
- [67] S. Perras and L. Bouchard, "Fading characteristics of RF signals due to foliage in frequency bands from 2 to 60 GHz," in *Wireless Personal Multimedia Communications*, vol. 1, pp. 267–271, 2002.
- [68] M. Hashim, D. Mavrikis, and S. Saunders, "Measurement and analysis of temporal fading due to moving vegetation," in *Proc. of the 20th International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003)*, vol. 2, 2003.
- [69] D. Crosby, V. Abhayawardhana, I. Wassell, M. Brown, and M. Sellars, "Time variability of the foliated fixed wireless access channel at 3.5 GHz," *Proc. of the 61st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2005-Spring)*, vol. 80, p. 75, 2005.

- [70] L. Greenstein, S. Ghassemzadeh, V. Erceg, and D. Michelson, "Rician K-factors in narrow-band fixed wireless channels: Theory, experiments, and statistical models," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, 2009.
- [71] H. Suzuki, C. Wilson, and K. Ziri-Castro, "Time variation characteristics of wireless broadband channel in urban area," in *Proc. of the 1st European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2006.
- [72] L. Ahumada, R. Feick, R. Valenzuela, and C. Morales, "Measurement and characterization of the temporal behavior of fixed wireless links," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 6, pp. 1913–1922, 2005.
- [73] N. Naz and D. Falconer, "Temporal variations characterization for fixed wireless at 29.5 GHz," in *Proc. of the 51st IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings (VTC 2000-Spring)*, vol. 3, (Tokyo), 2000.
- [74] Y. Ohta and T. Fujii, "Fading channel measurement for static mobile terminals in outdoor nlos environments," in *Proc. of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2009-Spring)*, pp. 1–5, IEEE, 2009.
- [75] P. Karadimas, E. Vagenas, and S. Kotsopoulos, "On the scatterers' mobility and second order statistics of narrowband fixed outdoor wireless channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 7, pp. 2119–2124, 2010.
- [76] V. Sridhara, H. Shin, and S. Bohacek, "Observations and models of time-varying channel gain in crowded areas," in *Proc. of the 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, pp. 1–6, 2006.
- [77] A. Rustako Jr, M. Gans, G. Owens, and R. Roman, "Attenuation and diffraction effects from truck blockage of an 11-GHz line-of-sight microcellular mobile radio path," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 1 Part 2, pp. 211–215, 1991.
- [78] A. Richter, R. Thomä, and T. Taga, "Directional measurement and analysis of propagation path variations in a street micro-cell scenario," in *Proc. of the 57th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring)*, vol. 1, pp. 246–250, 2003.
- [79] Y. Oda, K. Tsunekawa, and M. Hata, "Advanced LOS path-loss model in microcellular mobile communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2121–2125, 2000.
- [80] M. Feuerstein, K. Blackard, T. Rappaport, S. Seidel, and H. Xia, "Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3 Part 1, pp. 487–498, 1994.
- [81] H. Masui, T. Kobayashi, and M. Akaike, "Microwave path-loss modeling in urban line-of-sight environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 1151–1155, 2002.

[82] R. Feick, R. Valenzuela, L. Ahumada, and N. Aldunate, “A statistical model for the dynamics of the received signal envelope in narrowband urban fixed wireless links with applications to MRC diversity receivers,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 300–304, 2007.

2

Scène de propagation enrichie

Résumé

Comme abordé dans le chapitre précédent, les détails statiques (mobilier urbain) et dynamiques (véhicules) de la scène peuvent avoir un impact non négligeable dans les topologies émergentes de petites cellules. Notre méthodologie débute par une phase d'étude par simulation de l'impact de ces détails. Ceux-ci sont cependant sciemment négligés dans les outils de prédiction de propagation déterministes actuels, pour des raisons d'optimisation de temps de calcul. Nous proposons dans ce chapitre une plateforme logicielle de simulation qui permet de générer ces éléments statiques et dynamiques, et qui intègre des modèles de propagation spécifiques au canal de petites cellules.

La première partie introduira le principe de fonctionnement de la plateforme de simulation, ainsi que sa structure logicielle, basée sur une approche modulaire.

Dans une deuxième partie, nous développerons notre travail de prise en compte d'objets statiques dans les outils de prédiction existants. Nous proposerons d'abord différentes méthodes de génération aléatoire d'objets statiques. L'originalité de notre approche consiste à utiliser des bases de données libres et collaboratives de rues, permettant ainsi d'obtenir plusieurs versions réalistes d'un même environnement enrichi et de faire des études statistiques. Le choix des modèles de propagation sera ensuite décrit, en distinguant les deux effets causés par l'introduction d'objets dans la scène de propagation : les perturbations sur les contributions existantes, particulièrement sur le trajet direct, et les contributions supplémentaires. Les modèles proposés respectent les conditions de propagation spécifiques aux petites cellules, notamment les conditions de champ proche entre les objets diffuseurs et les éléments du lien radio (émetteur et récepteur).

Cette approche d'étude statistique d'environnements réalistes combinés à des modèles de propagation spécifiques aux petites cellules a été présentée lors d'un séminaire (1) et publiée dans une conférence européenne (2).

- (1) L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "On the use of statistic in deterministic channel models," in *International Workshop on Propagation and Channel Modeling for Next-Generation Wireless Networks (IWPCM)*, Lyon, 2011.
- (2) G. Gougeon, Y. Lostanlen and L. Maviel, "Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, pp. 3448-3452, 2011.

Dans une troisième partie, nous introduirons la simulation de mobilité, qui permet de déplacer certains objets de la scène de propagation. Cette mobilité peut concerner le récepteur, mais également l'environnement, auquel nous nous intéressons plus particulièrement dans le cadre de ce manuscrit. L'impact du trafic de véhicules sur un lien fixe en environnement urbain sera en particulier un sujet majeur de notre étude. Nous avons orienté nos recherches vers un réalisme fin des simulations de mobilité, notamment en proposant des extensions aux simulateurs existants. Nos propositions se basent sur l'utilisation de bases de données de réseaux de mobilité libres et riches en information. La diversité des informations des topologies des rues, permet en effet la définition de modèles plus réalistes pour les flux de circulation (macro-mobilité) et pour la gestion d'intersection.

Finalement, plusieurs exemples de mobilité, du récepteur et de l'environnement, dans un scénario comprenant des petites cellules en environnement extérieur seront présentés dans le dernier paragraphe. Ces exemples illustreront les améliorations apportées sur la prédiction du canal de propagation, notamment sur les évanouissements à petite et à grande échelle. Les contraintes d'utilisation de la plateforme, en termes de validation et de ressources de calcul seront également évoquées.

2.A. Plateforme de génération et de simulation

2.A.1. Processus de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la plateforme de simulation est illustré sur la figure 2.1. La *cartographie* contient toutes les données connues de la scène (position, géométrie et type de bâtiments, matériaux, ...). L'ensemble de ces données représente la base géographique pour une prédiction de propagation basée sur des mécanismes physiques. Notre premier objectif est d'enrichir les données de la scène de prédiction, suivant son *degré de précision* et de paramètres définis par l'utilisateur. Le degré de précision définit de manière générale le degré de détails présents dans la cartographie et les bases de données complémentaires. Les paramètres définis par l'utilisateur concernent à la fois la génération d'objets (forme et distribution dans l'espace) et la mobilité de ces objets, lorsque l'utilisateur choisit de simuler un environnement mobile. Notre second objectif est d'améliorer les modèles déterministes de prédiction de propagation pour prendre en compte les objets ajoutés à un instant t de la simulation dynamique.

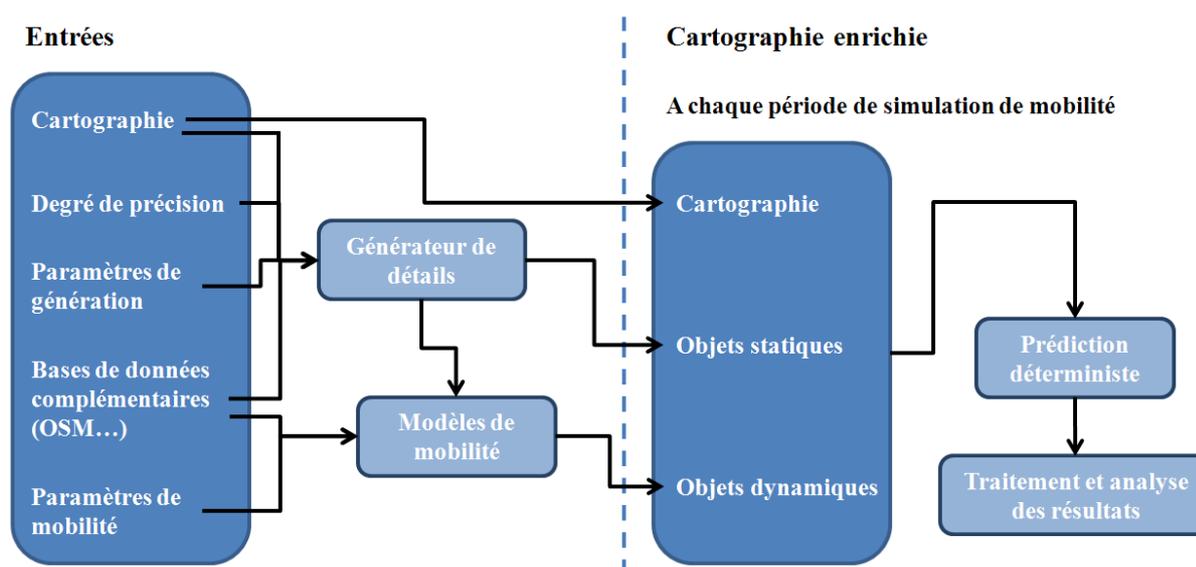


Figure 2.1 : Processus de fonctionnement de la plateforme de génération et de simulation

2.A.2. Structure

La plateforme est structurée de manière à être la plus générique possible (cf. figure 2.2). L'objectif de cette modularité est de conserver les mécanismes globaux de simulation pour des types d'environnement différents (intérieur, extérieur), qui font appel à des modèles de propagation et de mobilité spécifiques. Ce fonctionnement permet aussi d'implémenter pour un même environnement des modèles alternatifs. Un modèle simple à deux rayons peut par exemple

être implémenté comme modèle de propagation, permettant ainsi la comparaison avec un modèle à lancer de rayons dans le même scénario.

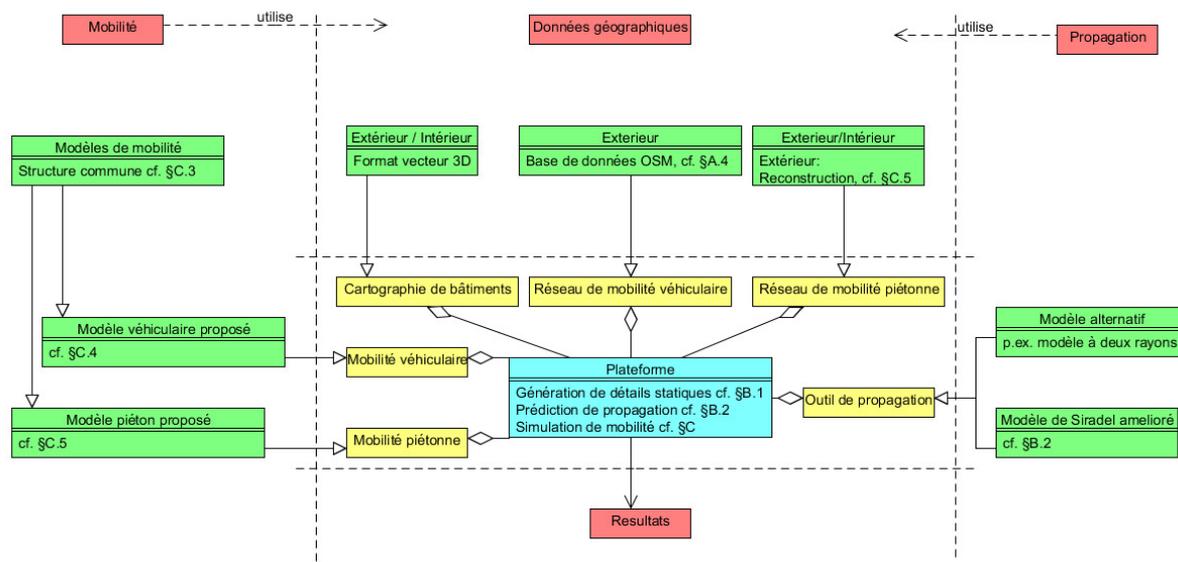


Figure 2.2 : Structure de la plateforme de génération et de simulation

2.A.1. Caractérisation structurelle des objets

Les objets qui enrichissent la scène de propagation sont de différentes natures géométriques. Nous distinguons deux grandes familles d'objets : les cylindres et les pavés droits. Afin de permettre une approche statistique, chaque dimension de l'objet est définie par une distribution normale décrite par sa moyenne et son écart type. Ces distributions sont dépendantes du type d'objet à générer, par exemple :

- Les lampadaires d'une zone locale (quartier) sont généralement identiques. Ils sont modélisés dans leur ensemble par un cylindre de référence, dont la hauteur et le rayon sont chacun déterminés par un tirage aléatoire.
- Chaque véhicule circulant ou stationné dans une rue possède des dimensions spécifiques. Dans une première étape, les grandes catégories de véhicules sont distinguées : voitures personnelles, utilitaires, camions. À la création d'un véhicule, les dimensions de hauteur, largeur et longueur sont déterminées suivant une loi normale dont les paramètres permettent englober l'ensemble des véhicules d'une catégorie.

2.A.2. Description de la base de données libre OpenStreetMap

Nous verrons par la suite que la base de données OpenStreetMap [1] est essentielle au développement de cette plateforme, notamment pour la simulation de la mobilité. OpenStreetMap

(OSM) est une base de données collaborative contenant à l'origine des réseaux de mobilité (rues, pistes cyclables, ...). Son aspect collaboratif la rend hétérogène quant au niveau de détails : certaines zones peuvent être très riches en information mais cela n'est pas garanti en tout lieu. Cependant, pour la plupart des villes moyennes ou grandes, les données vont au-delà des simples linéaires de rues et proposent des informations utiles à la mobilité telles que le type d'intersection, le nombre de voies, la vitesse maximale autorisée sur la route... De plus, ces bases de données sont continuellement mises à jour. Depuis peu, OSM contient également des données de bâtiments (vecteurs 2D).

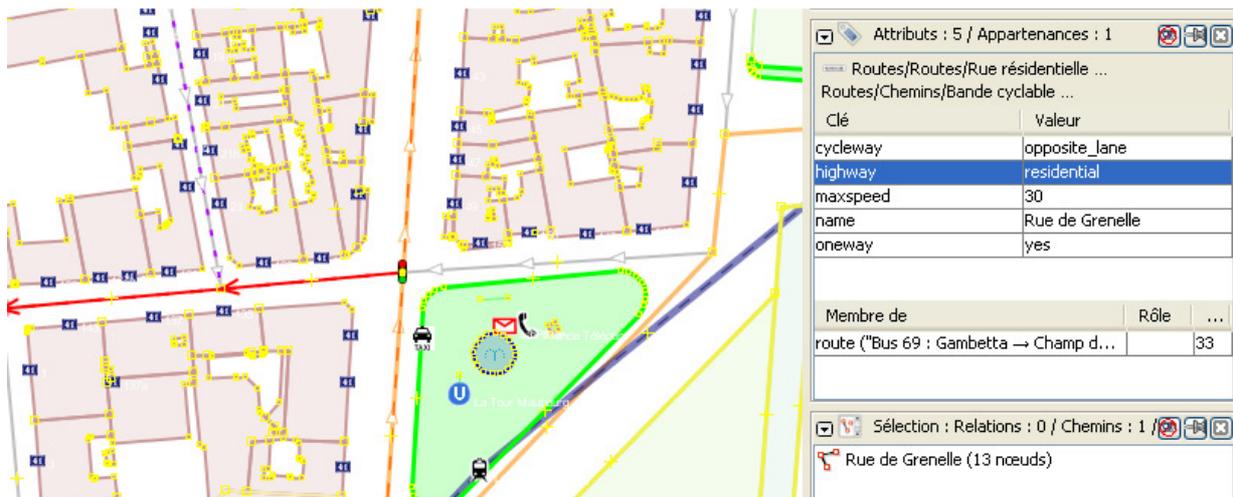


Figure 2.3 : Illustration des données OSM visualisées dans l'éditeur JOSM

Les bases de données OSM sont à la fois utilisées pour la génération d'objets statiques (feux de signalisation, abri-bus...) et pour le déplacement de véhicules dans la scène de propagation. La richesse des informations contenues dans les bases de données permet d'avoir une approche statistique à la génération d'objet. Cette approche est présentée dans la section suivante, ainsi que les modèles de propagation spécifiques aux petites cellules. Elle permet également d'améliorer les modèles de mobilité réalistes existants, notamment la macro-mobilité et la gestion des intersections, qui seront présentés dans la section 2.C.

2.B. Génération et prise en compte de détails statiques

2.B.1. Génération de détails statiques

2.B.1.1. Introduction

La génération de détails statiques peut être imaginée comme l'ajout d'une couche supplémentaire dans les bases de données classiquement utilisées pour prédire la propagation. La pertinence de la prise en compte de détails statiques a été évoquée dans le chapitre 1. Cette partie décrit la génération de certains de ces détails : le mobilier urbain et les voitures stationnées en environnement extérieur. Un environnement déjà existant peut être enrichi de deux manières :

- En rajoutant des détails connus de manière ponctuelle. Cette méthode a l'avantage de proposer un réalisme fin pour une configuration connue. Cependant, elle a à la fois l'inconvénient de reposer sur la fiabilité de la source de données et de ne pas pouvoir répondre aux configurations variables sur de larges échelles temporelles, comme par exemple la position de voitures stationnées le long d'un trottoir.
- En générant de l'information à partir de motifs statistiques. Dans cette méthode, les données connues ou intrinsèques à l'environnement sont utilisées pour reproduire une version potentielle de la scène. Par exemple, le type de route peut influencer les paramètres de la génération le long d'une route de rangées de lampadaires ou de véhicules stationnés.

Dans les paragraphes ci-dessous, nous explorons ces deux possibilités. Dans un premier temps, nous étudions les détails ponctuels disponibles dans les bases de données. Nous listons ensuite l'ensemble des informations permettant une génération plus statistique à des fins de simulations. Le cas de l'environnement extérieur est en particulier détaillé, mais une démarche similaire est possible pour un environnement intérieur.

2.B.1.2. Génération basée sur des données ponctuelles

Les bases de données utilisées classiquement pour faire de la prédiction de propagation dans des environnements urbains incluent des vecteurs 3D décrivant les bâtiments ainsi que des fichiers matriciels décrivant la hauteur du relief. La position des bâtiments peut être utilisée pour répartir aléatoirement du mobilier urbain. Cependant, les bases de données décrivant les topologies de réseau de mobilité, telles que OpenStreetMap, contiennent intrinsèquement des informations géo référencées des croisements de rues ainsi que d'une partie du mobilier urbain.

L'information contenue dans les fichiers .osm est organisée sous forme de *tags*, qui permettent de placer de manière discrète les éléments décrits dans le tableau 2.1, comme par exemple des feux de signalisation ou des abribus. Le caractère collaboratif des bases de données

.osm ne garantissant pas la présence de l'information, il est toujours possible de les rajouter à la main, que ce soit pour enrichir la base ou pour des études ciblées. De plus, lorsqu'une information n'est pas présente, elle peut être extrapolée. Par exemple, si le type d'intersection d'un carrefour n'est pas présent dans une base de donnée de ville française, des panneaux *cédez le passage* peuvent être rajoutés sur les routes non-prioritaires, la priorité à droite étant l'intersection par défaut en France.

Tableau 2.1 : Liste non exhaustive d'information de mobilier urbain dans les fichiers .osm

Tag	Valeur	Option	Elément(s)	Modélise
highway	bus_stop	shelter = yes	node	Abribus
highway	bus_stop	shelter = no	node	Panneau de bus
highway	traffic_signals	/	node	Feu de signalisation
highway	stop	/	node, way	Panneau de stop
highway	street_lamp	/	node	Lampadaire
amenity	telephone	/	node	Cabine téléphonique
...

2.B.1.3. Génération aléatoire

Comme évoqué auparavant, générer du mobilier urbain à partir de motifs génériques de rues permet une plus grande flexibilité et une utilisation statistique basée sur plusieurs versions possibles d'un même environnement. Le placement inclut la définition de paramètres de distribution et de leurs caractéristiques statistiques. La difficulté réside alors dans le degré de réalisme souhaité.

Une première méthode consiste à ajouter un différentiel spatial aléatoire sur les positions des objets obtenues grâce à la base de données. Une deuxième méthode consiste à ajouter des données qui n'existent pas directement dans les bases, mais sur lesquelles une information est connue. Cette méthode de génération est illustrée ci-dessous (cf. figure 2.4) avec deux exemples de choix de paramètres et de distributions statistiques : la génération de lampadaires et de véhicules stationnés.

Lampadaires

Les fichiers .osm incluent l'information de positions ponctuelles de lampadaires. Cependant, cette information est peu renseignée. Pour générer aléatoirement des lampadaires, nous ajoutons un tag spécifique (`street_lamps`) à la présence globale de lampadaires d'un côté d'une rue (`left`, `right` ou `both`). La génération aléatoire des lampadaires est effectuée selon un paramètre de *distance de séparation* tiré aléatoirement suivant une distribution de probabilité. La distance de séparation et les caractéristiques du lampadaire peuvent être spécifiques à chaque type de rue : un boulevard pourra avoir des lampadaires plus espacés et plus hauts qu'une rue étroite. Seule la position du premier lampadaire est tirée de manière aléatoire pour un côté de la rue.

Véhicules stationnés

Le tag `parking:lane`, présent dans OSM, permet de savoir si des places de stationnement sont disponibles d'un côté ou d'un autre de la rue, ainsi que l'orientation de ces places de stationnement (parallèles, en épi ou perpendiculaires). Nous choisissons de générer des véhicules suivant des paramètres de *densité*, de *type de véhicule*, et de *structure de véhicule*. Le paramètre de densité, relié par exemple à des conditions temporelles et sociales (jour de semaine, proximité de bureaux, ...) permet de déterminer le nombre de véhicules stationnés. Le type de véhicule à placer est ensuite tiré aléatoirement parmi une distribution discrète, par exemple voiture ou utilitaire, avec une proportion de 80 % de voitures. Les paramètres de dimensions de la structure du véhicule (hauteur \times longueur \times largeur) suivent chacun une distribution normale, comme évoqué auparavant. Le placement du centre du véhicule généré est ensuite totalement aléatoire : il suit une distribution uniforme le long du linéaire de route.

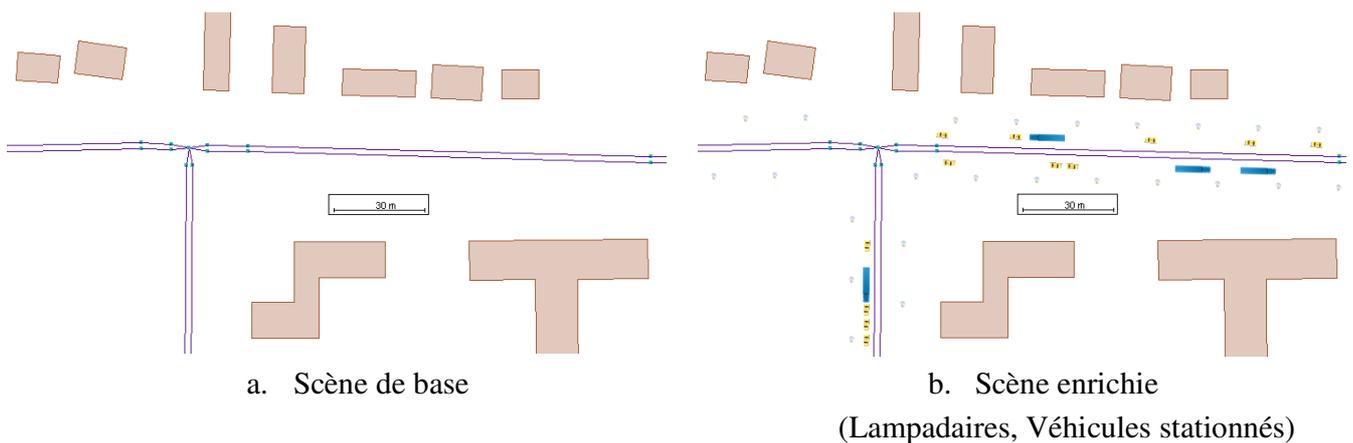


Figure 2.4 : Exemple de scène de propagation enrichie

L'exemple de la génération de véhicules stationnés contient plusieurs niveaux de réalisme. Le paramètre de densité de véhicule peut être très réaliste, s'il est relié à des conditions de jour de la semaine ou de proximité de bureaux, alors que le paramètre de placement de véhicule est basique. Un comportement plus réaliste pour le placement de véhicule aurait inclus la création virtuelle de places de stationnement.

Une fois les objets composant le mobilier urbain générés, il est nécessaire d'étendre les modèles déterministes de propagation existant aux spécificités des petites cellules.

2.B.2. Prédiction de la propagation

2.B.2.1. Introduction

Il existe plusieurs manières de prédire la propagation à partir de bases de données géographiques existantes. Toutes ces méthodes sont basées à des degrés d'approximation plus ou moins forts sur les équations de Maxwell [2] qui sont les équations de base de l'électromagnétisme. Il existe des méthodes pour calculer de manière précise les champs en un point donné en utilisant ces équations, notamment la méthode des moments où les méthodes des différences finies, dans le domaine fréquentiel ou temporel [3], [4].

Les méthodes basées sur l'Optique Géométrique calculent le champ d'une onde propagée d'un point à un autre comme la somme des champs des trajets possibles dus aux interactions de type réflexion avec l'environnement. Ces méthodes sont valides lorsque la longueur d'onde est courte par rapport à la distance entre deux interactions et par rapport aux dimensions des surfaces impliquées dans les interactions. Pour les fréquences utilisées dans les réseaux cellulaires, la longueur d'onde varie de 6 à 40 cm, ce qui permet de respecter ces conditions sur les surfaces de réflexion présentes dans un environnement dense urbain (bâtiments).

L'inconvénient de l'Optique Géométrique est qu'elle introduit des discontinuités lorsqu'on passe d'une région obstruée à une région illuminée. Physiquement, la continuité est assurée par des phénomènes de diffraction se produisant sur les bords des obstacles. Pour introduire ces phénomènes, différents modèles ont été développés. Un obstacle peut être traité simplement en le modélisant par une arête. La méthode dite d'« arête unique en lame de couteau », illustrée sur la figure 2.5 relie l'atténuation au paramètre décrivant l'obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel. Ce paramètre v est calculé selon (2.1) en utilisant l'approximation de h petit devant d_1 et d_2 [5].

$$v \approx h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (d_1 + d_2)}{\lambda \cdot (d_1 \cdot d_2)}} \quad (2.1)$$

où h est la distance de l'arête au trajet direct et d_1 et d_2 sont les distances respectives des projections au sol entre l'émetteur et l'arête et l'arête et le récepteur. λ est la longueur d'onde en mètres.

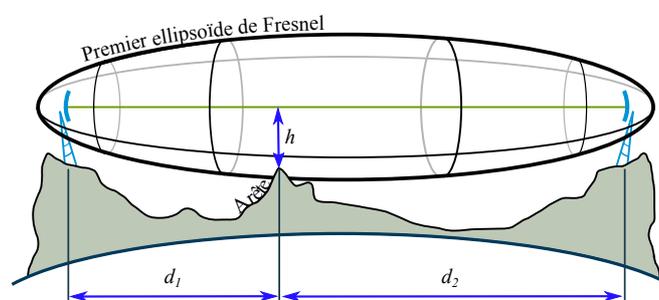


Figure 2.5 : Ellipsoïde de Fresnel et arête unique en lame de couteau

Pour des cas plus complexes, comme la diffraction sur des arêtes verticales de propriétés diélectriques connues, la Théorie Géométrique de la Diffraction [6] permet de calculer les coefficients de diffraction en un point donné. Son extension, la Théorie Uniforme de la Diffraction (TUD, [7]) améliore le calcul du champ dans les régions de transition entre une zone illuminée et une zone obstruée.

2.B.2.2. Les modèles à base de rayons

De nombreux modèles à base de rayon ont été proposés depuis les années 1990 [8] – [12]. Ces modèles permettent de reconstituer les trajets effectués par l'onde dans l'espace, en intégrant à la fois les phénomènes de réflexion et de diffraction sur les bâtiments. D'une part, le champ des rayons peut être prédit avec une grande précision. D'autre part, les caractéristiques spatio-temporelles du canal de propagation urbain peuvent être estimées, notamment les paramètres large-bande, qui sont essentiels pour la simulation des performances des systèmes radio actuels. L'aspect le plus contraignant des méthodes à base de rayons est le temps de calcul et de nombreux efforts ont été faits pour mettre en place des techniques d'accélération. Les méthodes dites à tracé de rayons [9], sont basées sur la théorie des images [10], qui établit que l'interaction d'une source avec une surface est équivalente à la radiation par une source placée de manière symétrique à la surface d'interaction. Ces méthodes permettent de construire les trajectoires exactes des rayons, mais sont coûteuses en temps de calcul. D'autre part, les méthodes dites à lancer de rayons consistent à tracer sans a priori des rayons à partir de la source à un pas angulaire généralement constant. Le lancer de rayons diminue la précision obtenue, au profit d'une amélioration des temps de calcul. Certaines méthodes proposées d'accélération mélangent le tracé de rayon et le lancer de rayons [11]. Au-delà de la méthode d'identification des rayons, le choix des méthodes de calcul (arête unique en lame de couteau, arêtes multiples en lames de couteaux, TUD...) permet d'établir un compromis entre précision et temps de calcul.

SIRADEL a développé un savoir-faire unique dans la prédiction de propagation, avec des méthodes de tracé et de lancer de rayons. Par le biais d'un composant logiciel intégré dans différents outils de planification radio et de simulation du canal, ces modèles permettent de calculer des cartes de couverture de propagation dans différents types d'environnement (intérieur, extérieur), pour des zones très larges et complexes. Le modèle de propagation 3D dans des milieux urbains [8], est une combinaison entre plusieurs méthodes, permettant d'obtenir des résultats réalistes tout en optimisant le temps de calcul. Ce modèle se base sur une séparation de la construction des rayons et du calcul des champs dans les plans horizontal et vertical. Il est composé des étapes suivantes :

- Calcul du trajet direct. Les obstacles sont situés dans le plan vertical situé entre un émetteur et un récepteur. Les obstacles principaux sont approximés par des arêtes en lames de couteaux, et des méthodes spécifiques aux milieux urbains [12] sont utilisées

pour étendre la méthode à arête unique en lame de couteau, illustrée précédemment, au cas d'arêtes multiples.

- Lancer de rayon dans le plan horizontal. Dans cette étape, des rayons sont tirés dans le plan horizontal en ligne droite entre l'émetteur et chaque point d'interaction potentiel (réflexion ou diffraction), sans se soucier des obstacles intermédiaires. Les points de réflexion le long de la façade d'un bâtiment sont définis de manière à respecter un pas angulaire maximum et un pas linéaire (le long d'un bâtiment) maximum, prédéfinis par l'utilisateur. Les points de diffraction sont simplement définis en utilisant les arêtes des bâtiments. Une fois qu'un point d'interaction est trouvé, un masque de visibilité est défini comme la surface 2D qui peut être atteinte sans obstruction par le rayon. La construction de ce masque de visibilité permet de réaliser deux objectifs. Premièrement, il permet d'identifier les récepteurs atteints par le rayon. Deuxièmement, il permet de déterminer facilement les prochains points d'interaction du rayon.
- Dépliage des trajets en 3D. Une fois qu'un point de réception est identifié, un rayon potentiel (2D) relie l'émetteur et le récepteur. Le dépliement en 3D consiste à prendre en compte les variations de hauteur dues au terrain et aux bâtiments. Lorsque le point d'interaction de la trajectoire d'un rayon est plus haut que la hauteur du bâtiment sur lequel se produit cette interaction, le rayon est rejeté.
- Calcul de la norme du champ des contributions, combinant les atténuations qui résultent respectivement des interactions construites dans le plan horizontal et de celles construites dans le plan vertical. La méthode à arête multiples en lames de couteaux améliorée évoquée pour le trajet direct est utilisée pour calculer l'atténuation dans le plan vertical. La méthode TUD est utilisée pour calculer l'atténuation dans le plan horizontal, en faisant l'hypothèse que les ondes se propagent dans un plan quasi-horizontale. La méthode heuristique en 2D pour le calcul du coefficient de diffraction suivant les caractéristiques diélectriques des matériaux [13] peut ainsi être utilisée, ainsi qu'une méthode de calcul de coefficient pour une diffraction double [14].
- Calcul des résultats de prédiction, en utilisant les normes des champs de l'ensemble des rayons. La puissance reçue en bande étroite est calculée comme la somme incohérente des puissances des rayons. Cette puissance correspond à la puissance moyenne, ne tenant pas compte des variations dues à la recombinaison en phase des rayons, et constitue une métrique suffisante pour le calcul de carte de couverture, utile à une planification classique des réseaux.

Dans ce manuscrit, nous nous baserons principalement sur les outils existants, notamment le modèle de propagation 3D dans des milieux urbains décrit ci-dessus. Ce modèle, adapté à des réseaux cellulaires de type macro-cellules, sera amélioré et adapté ci-dessous au cas particulier

des réseaux cellulaires configurés en petites cellules, en prenant notamment en compte les objets enrichissant la scène décrits précédemment.

2.B.2.3. Propagation dans le plan vertical

Le plan vertical est le plan dans lequel se propage le trajet direct, qui va de l'émetteur au récepteur en ligne droite. La réflexion sur le sol est aussi présente dans ce plan. A partir de ces deux contributions, un modèle souvent utilisé pour obtenir une prédiction de propagation simple mais plus réaliste qu'un modèle statistique de perte, est le modèle à deux rayons [15]. Ce modèle est illustré sur la figure 2.6 où la puissance évolue en fonction du déplacement du récepteur, à une fréquence de transmission de 2,0 GHz et des antennes polarisées verticalement à l'émission et à la réception.

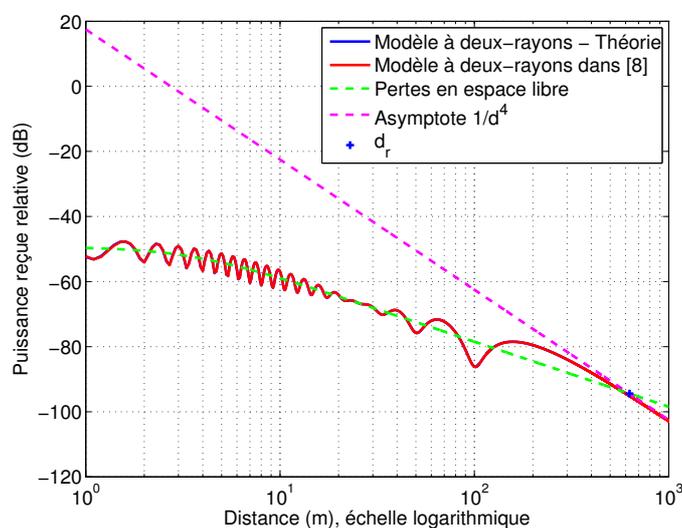


Figure 2.6 : Modèle à deux rayons

Cette illustration met en évidence que le rayon réfléchi sur le sol apporte des déviations importantes par rapport au trajet direct seul. Au-delà d'une certaine distance de rupture d_r , l'amplitude de la puissance reçue est proportionnelle à $1/d^4$. Pour des macro-cellules, où la propagation se produit au-dessus des toits, la réflexion sur le sol est négligée de manière pertinente dans les outils de prédiction. En petites cellules, où le récepteur est souvent en visibilité directe de la station de base, la présence ou non d'objets à l'intérieur du lien radio perturbe fortement la réflexion sur le sol, car les détails générés sont localisés ou se déplacent au niveau du sol. Il est donc important de prendre en compte cette contribution : un premier apport dans le modèle [8] a été d'ajouter la réflexion sur le sol, ainsi que de calculer la phase de manière déterministe. Il est important de noter que la phase calculée de manière déterministe n'est pas pertinente en un point donné. En effet, la phase d'un trajet i est calculée en fonction de sa distance et du nombre d'onde : $\varphi_i = -k_i \times d_i$. Pour les fréquences utilisées dans les réseaux

cellulaires, k est de l'ordre de 15 à 100. Une faible variation de la distance parcourue, par exemple due à l'imprécision sur la position d'un bâtiment, entrainera une forte variation de la phase, qui est périodique entre 0 et 2π . Cependant, nous nous intéressons au comportement moyen et statistique associé à la trajectoire relative d'un mobile dans un référentiel commun. De fait, si l'estimation instantanée n'a pas de sens, les variations et les statistiques de canal sont pertinentes. Il est également important de préciser que la puissance de l'onde réfléchi sur le sol est sensible aux propriétés diélectriques du sol.

L'ajout de détails statiques dans la scène de propagation perturbe les contributions du trajet direct et de la réflexion sur le sol. Si un objet métallique de largeur finie, mais de hauteur et longueur infinies est introduit à l'intérieur du lien radio, toute propagation est strictement bloquée. En réduisant la contrainte de hauteur à une dimension large mais finie, plusieurs situations peuvent être rencontrées :

- Le rayon réfléchi sur le sol peut être physiquement coupé. Cette situation est souvent rencontrée, car le rayon réfléchi par le sol possède un point d'interaction à une hauteur nulle.
- Le trajet direct est perturbé, à un degré plus ou moins important suivant la hauteur de l'objet. En effet, une diffraction est introduite sur la ou les arêtes horizontales supérieures de l'objet.
- Une réflexion diffuse est introduite sur la face horizontale supérieure d'un objet de type pavé (toit) si la hauteur de l'objet est plus faible que la hauteur des antennes d'émission et de réception.

En assimilant un véhicule à un pavé métallique, il faut prendre en compte la réflexion diffuse sur la face horizontale supérieure du véhicule. Dans ce cas-là, la forme et la composition métallique du toit va jouer un rôle important. Le métal composant la structure d'une voiture est plus rigide que celui de la carrosserie (cf. figure 2.7). De plus, la hauteur du toit d'un véhicule est environ la même que celle d'un utilisateur (1,5 m). Cette configuration géométrique exclut une configuration de réflexion spéculaire et l'amplitude du champ du rayon diffus sera faible. Nous émettons donc l'hypothèse que la diffraction sur les arêtes horizontales supérieures sera plus conséquente que la diffusion sur la face horizontale supérieure d'un véhicule.



Figure 2.7 : Structure et carrosserie d'une voiture

Les diffractions introduites par les arêtes horizontales du véhicule impliquent une atténuation du trajet réfléchi et du trajet direct. Ces atténuations sont calculées en utilisant le modèle d'arête en lame de couteau amélioré implémenté dans [8] (cf. figure 2.5 et).

Finalement, en réduisant la contrainte de longueur infinie, la modélisation par rayons n'est plus restreinte au seul plan vertical. Premièrement les trajets multiples existants peuvent être obstrués. Ensuite, des rayons vont être diffractés sur les côtés de l'objet obstruant le trajet direct. Finalement, les objets qui ne sont pas placés dans le trajet direct vont également générer des contributions plus ou moins fortes. C'est pourquoi nous allons étudier l'influence d'objets métalliques locaux sur la propagation de trajets multiples.

2.B.2.4. Trajets multiples

Poteaux métalliques

Nous avons évoqué dans le chapitre 1 quelques études sur la prise en compte de trajets propagés par du mobilier urbain. [16] et [17] proposent un modèle de Surface Equivalente Radar (SER) théorique. La SER bi-statique σ est utilisée pour représenter la part d'énergie retransmise par un objet soumis à une radiation. Elle est utilisée dans la formule bi-statique du radar pour calculer la puissance reçue suite à la diffusion sur un objet (2.2) :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 r_t^2 r_r^2} \sigma \quad (2.2)$$

où P_t et P_r sont respectivement les puissances transmises et reçues par les module d'émission et de réception, qui ont un gain G_t et G_r . L'objet est à une distance r_t du module de transmission et à une distance r_r du module de réception.

Nous avons également choisi cette approche, d'une part pour son réalisme physique et d'autre part pour sa facilité d'implémentation au regard du modèle à rayon disponible, qui permet de calculer les informations angulaires. Contrairement à [16], nous avons choisi de ne pas inclure la réflexion sur le sol dans le calcul de surface équivalente, les angles d'arrivée de la réflexion sur le sol induisant des SER négligeables. Les formules approximées de SER σ d'un cylindre de taille

finie pour le mode Transverse Magnétique (2.3) et pour le mode Transverse Electrique (2.4) proviennent de [18].

$$\sigma_{TM} = \frac{4L^2 \sin^2 \theta_s}{\pi \sin^2 \theta_i} \left\{ \frac{\sin \left(\frac{kL}{2} (\cos \theta_s + \cos \theta_i) \right)}{\frac{kL}{2} (\cos \theta_s + \cos \theta_i)} \right\}^2 \cdot \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n e^{jn\Delta\phi} \frac{J_n(ka \sin \theta_s)}{H_n^{(2)}(ka \sin \theta_i)} \right| \quad (2.3)$$

$$\sigma_{TE} = \frac{4L^2}{\pi k^2 \sin^2 \theta_s} \left\{ \frac{\sin \left[\frac{kL}{2} (\cos \theta_s + \cos \theta_i) \right]}{\frac{kL}{2} (\cos \theta_s + \cos \theta_i)} \right\}^2 \cdot \left\{ \left(\frac{\sin \theta_i \cot \theta_s + \sin \theta_s \cot \theta_i}{a} \right)^2 \times \dots \right. \quad (2.4)$$

$$\left. \dots \times \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n n e^{jn\Delta\phi} \frac{J_n(ka \sin \theta_s)}{H_n^{(2)}(ka \sin \theta_i)} \right|^2 + k^2 \sin^2 \theta_i \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n e^{jn\Delta\phi} \frac{J'_n(ka \sin \theta_s)}{H_n^{(2)}(ka \sin \theta_i)} \right|^2 \right\}$$

où L et α sont respectivement la longueur et le rayon du poteau, k est le nombre d'onde, $\Delta\phi$ est la différence en azimuth entre les ondes incidentes et diffusées. J_n , J'_n et $H_n^{(2)}$ sont respectivement la fonction de Bessel de première espèce, la dérivée de la fonction de Bessel de première espèce et la fonction de Hankel de deuxième type.

De plus, nous considérons les conditions d'application de la formule bi-statique. Celle-ci n'est valable que pour des dimensions d'objet et des distances d'observations précises. Dans des configurations de petites-cellules en particulier, la condition de champs lointain ($d > 2D^2/\lambda$) est rarement satisfaite. Par exemple, la distance minimale d'observation pour un cylindre de 6 m de haut serait de 480 m à une fréquence de 2 GHz. Ce problème est résolu en effectuant une discrétisation verticale du cylindre. Selon les théories exposées dans [19], le découpage de la cible en petits morceaux permet d'utiliser les formules analytiques de champ lointain si chacun des morceaux est en champ lointain de l'émetteur et du récepteur.

Véhicules

Par souci de simplification, nous modélisons dans un premier temps un véhicule comme un pavé métallique. Nous nous sommes inspirés de l'approche SER développée pour les poteaux et utilisée pour des façades d'immeuble dans [20] pour calculer un ensemble de contributions provenant d'une plaque métallique lorsqu'une face du pavé est visible à la fois de l'émetteur et du récepteur.

Dans un deuxième temps, nous avons retenu l'option de structure métallique (squelette) du véhicule comme utilisée dans le cas du plan vertical. Dans ce cas-là, les contributions les plus importantes ont lieu sur les arêtes du pavé droit. Les fonctions de calcul TUD 2D de diffraction sur une arête verticale sont également présentes dans [8]. Un paramètre permettant de calibrer l'impact de la hauteur du véhicule est cependant rajouté. En effet, ces formules sont valides sous

les conditions de hauteur infinie et de propagation dans un plan horizontal. L'hypothèse de propagation horizontale peut être considérée valide en petites cellules. Cependant, dans certains cas, la hauteur théorique de diffraction h_{th} est au-delà de la hauteur de l'arête $h_{arête}$, violant la condition de hauteur infinie. On calcule dans ce cas le ratio de hauteur ρ (2.5), qu'on applique sur le champ théorique f_{th} avec un facteur χ suivant l'équation (2.6).

$$\rho = (2 \times h_{th} - h_{arête}) / (2 \times h_{th}) \quad (2.5)$$

$$f_{diff} = \begin{cases} f_{th} & \text{pour } h_{arête} \geq 2 \times h_{th} \\ f_{th} \times (1 - \rho)^\chi & \text{pour } h_{arête} < 2 \times h_{th} \end{cases} \quad (2.6)$$

Le choix du modèle retenu dépendra de résultats de mesures et fera l'objet d'ajustements par observations empiriques.

2.B.3. Propagation sur des détails dynamiques

L'ajout de détails dynamiques n'apporte pas de défis supplémentaires à la prédiction de propagation car le même ensemble d'éléments de base (cylindres et pavés droits) est utilisé de manière statique à différents instants t . Les défis sont alors de nature logicielle : comment intégrer dynamiquement un changement dans les données de propagation (positions de détails, positions des récepteurs). Un travail de développement conséquent a été réalisé afin d'obtenir un compromis entre l'intégration dynamique de détails dans la base de données et la réutilisation de fonctions incluses dans les outils existants, comme le calcul de diffraction TUD.

Nous décrivons le déplacement d'objets dans la scène de propagation dans la section suivante, et en particulier l'utilisation des bases de données OSM pour rendre les simulations plus réalistes.

2.C. Simulation de la mobilité

2.C.1. Introduction

Le besoin de prendre en compte la mobilité des utilisateurs dans la prédiction du comportement du réseau remonte aux premiers réseaux cellulaires où la question de la simulation de situations telles que le transfert intercellulaire s'est posée. Le but principal de ces modèles est de reproduire la caractéristique d'un mouvement standard d'utilisateur. Comme toute simulation, un compromis doit être fait entre la complexité du calcul et la précision du résultat en fonction des données d'entrée et du résultat attendu. De fait, les modèles les plus utilisés ont d'abord été des modèles purement aléatoires. Ils permettent une approche statistique et sont facilement mis en œuvre. Cependant, ces modèles ont rapidement présenté des limitations. Les solutions apportées pour éviter ces limitations, notamment dans les réseaux ad-hoc, ont conduit à la création de différentes familles de modèles dont la taxonomie est reportée sur la figure 2.8.

Dans le cadre de ce manuscrit, les modèles de mobilité ne servent pas uniquement à simuler la mobilité du récepteur, mais ont pour but principal de simuler la mobilité de l'environnement. Les mêmes modèles peuvent être cependant utilisés dans les deux situations. Après un survol rapide des modèles statistiques et de leurs limitations, certains modèles plus réalistes seront présentés, en détaillant plus particulièrement les modèles de référence, qui servent de base à nos travaux. Nous proposerons finalement plusieurs améliorations à ces modèles de référence. La méthodologie que nous avons mise en place repose sur l'utilisation des bases de données de rues OpenStreetMap, libres et riches en informations, non seulement comme topologie du réseau, mais aussi pour améliorer les modèles de flux de mobilité à l'échelle macroscopique et microscopique. Cette approche, combinée avec la correction de certaines limitations des modèles de référence, permet d'obtenir une simulation de mobilité plus réaliste, nécessaire à une approche déterministe de la prédiction dynamique du canal de propagation.

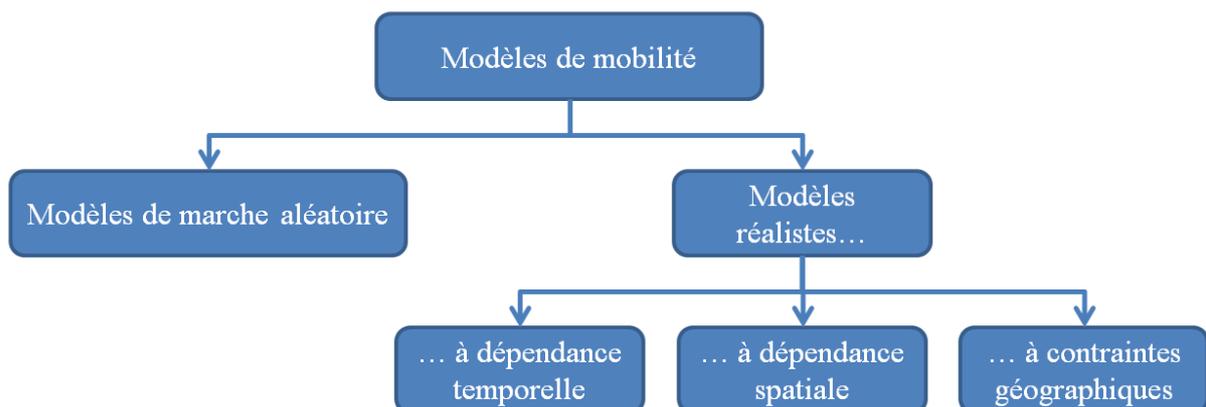


Figure 2.8 : Familles de modèles de mobilité dans les réseaux mobiles ad-hoc [21]

2.C.2. Etat de l'art : des modèles aléatoires aux modèles réalistes

2.C.2.1. Modèles de marche aléatoire : principes et limitations

Les modèles de marche aléatoire ont été développés dans un premier temps pour simuler la mobilité d'un utilisateur unique. Deux paramètres sont définis dans la plupart de ces modèles : la destination et la vitesse. Les modèles les plus utilisés sont le « Random Walk Mobility model » (RWM), ainsi que le « Random WayPoint Model » (RWP) et le « Random Direction Mobility model » (RDM). Le principe de ces modèles est de sélectionner des directions et des destinations aléatoires suivant un pas donné en temps ou en distance. La figure ci-dessous illustre des chemins parcourus en utilisant respectivement RWM (figure 2.9a) et RDM (figure 2.9b).

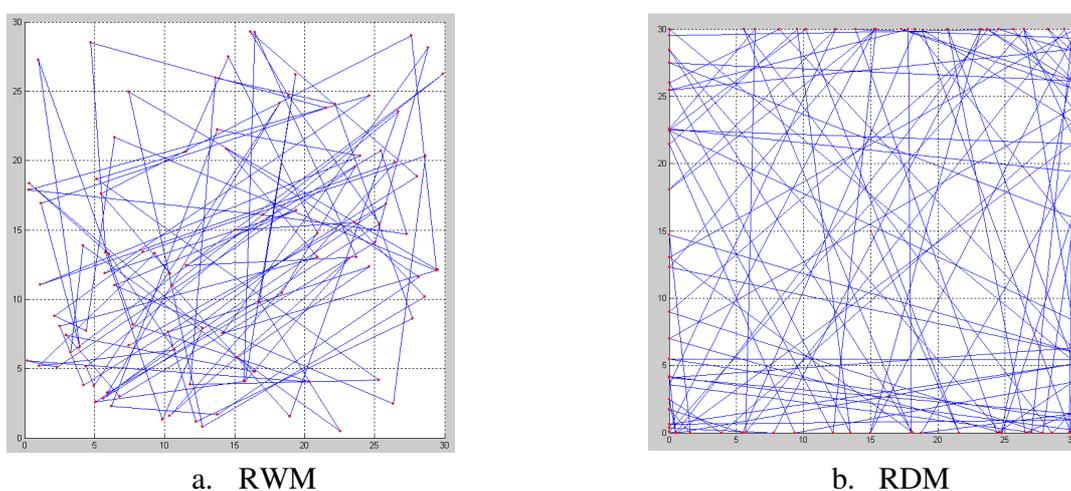


Figure 2.9 : Exemples de motifs de chemins avec des modèles de marche aléatoire

Le lecteur trouvera plus d'information sur les modèles de marche aléatoire dans les références [21] et [22]. A part l'avantage évident de la simplicité algorithmique, le bénéfice des modèles de marche aléatoire est de pouvoir générer des mouvements non-prédictibles et donc de permettre, sur des simulations à long terme, que l'utilisateur explore l'ensemble des régions et des interactions entre les éléments d'un réseau (stations de base, autre utilisateurs). Cependant, certains problèmes inhérents à ce type de modèles ont été mis en évidence au niveau statistique et surtout au niveau du réalisme obtenu. Les problèmes liés au réalisme sont détaillés ci-dessous.

L'inconvénient des modèles de marche aléatoire est de présenter des incohérences sur trois types de contraintes : les dépendances temporelles, les dépendances spatiales (inter-utilisateurs) et les restrictions géographiques.

Dans les modèles de marche aléatoire, la vitesse et la direction du mobile sont des processus à perte de mémoire, ce qui revient à dire que la vitesse à un état t donné est statistiquement indépendante de la vitesse à l'état précédent. Ce genre de processus peut générer des situations

physiques extrêmes et irréalistes : arrêt ou accélération brutal, virages à 180°, ... Dans la réalité, les changements de direction ainsi que les accélérations des piétons ou des voitures sont en général lisses. En partant de cette observation et dans le but d'obtenir des dépendances temporelles réalistes, les auteurs de [23] ont introduit un modèle de mobilité nommé Gauss-Markov Mobility Model. Ce modèle utilise un processus statistique de Gauss-Markov pour corrélérer la vitesse d'un utilisateur dans le temps. Un paramètre de calibrage permet d'ajuster le niveau de dépendance temporelle de la vitesse.

Les modèles à marche aléatoire sont généralement associés à la mobilité d'une entité d'utilisateur. Cependant, si on considère un environnement dans sa globalité, il est fréquent que la mobilité des utilisateurs se fasse de manière commune, que ce soit des véhicules sur une autoroute, un ensemble de personnes dans un musée, une foule de personnes sur un trottoir dans un milieu urbain dense... La corrélation spatiale de la mobilité ne se retrouvera pas si chaque utilisateur est modélisé par un processus indépendant. Dans [24], les auteurs ont observé que les éléments mobiles dans un réseau mobile ad-hoc ont tendance à coordonner leurs mouvements. Ils ont donc créé un modèle appelé « Reference Point Group Model » qui imite des caractéristiques de dépendance inter-utilisateurs. Dans ce modèle, les personnes sont représentées par un groupe dont la direction est déterminée par un meneur (par exemple un guide de musée). Le meneur du groupe bouge selon un vecteur pouvant être déterminé de manière aléatoire, alors que les suiveurs ont un mouvement pseudo-aléatoire calqué sur celui du meneur. En choisissant des chemins prédéfinis pour les meneurs, les auteurs ont pu reproduire des scénarios réels tels que des situations de catastrophe ou des configurations de champ de bataille.

Finalement, le mobile ne possède pas de mouvement contraint dans un modèle de marche aléatoire. En réalité, plusieurs obstacles et chemins définissent la mobilité (bâtiments, murs, trottoirs, bureaux...), introduisant par là même une corrélation entre les bases de données géographiques et la mobilité. Différents modèles tels que le « Pathway Mobility Model » [25] ou le « Obstacle Mobility Model » [26] intègrent ces obstacles et chemins de différentes manières, par exemple en générant des chemins de trottoirs basés sur un plan de ville.

2.C.2.2. Définitions commune des modèles réalistes

Dans le cadre de ce manuscrit, nous utilisons des définitions communes pour décrire la simulation de mobilité réaliste. Les exigences spécifiques à la mobilité véhiculaire et piétonne sont ensuite successivement détaillées.

Nous décomposons un modèle de mobilité réaliste en trois parties. La première dimension est l'ensemble des informations de contrainte du modèle, que ce soit les contraintes géographiques et paramétriques, c'est-à-dire l'identification de **données d'entrées**. Deux niveaux de mobilité peuvent ensuite être distingués dans la simulation proprement dite : macroscopique et microscopique. La **mobilité macroscopique** (ou macro-mobilité) décrit le parcours global d'un

mobile, de manière similaire au parcours d'un graphe, alors que la **mobilité microscopique** (ou micro-mobilité) se concentre sur les propriétés physiques de la mobilité à un instant t le long d'un chemin, en rapport avec les contraintes locales telles que les autres mobiles et la topologie de l'environnement. La figure 2.10 illustre ces trois étapes dans le cas de mobilité véhiculaire.

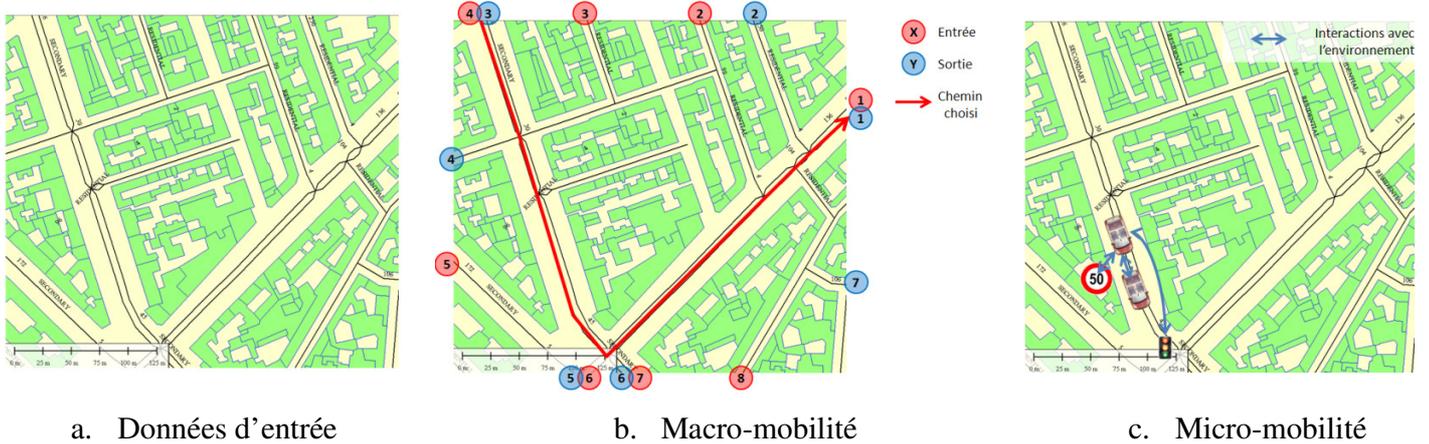


Figure 2.10 : Etapes de simulation de mobilité

2.C.2.3. Modèles de mobilité véhiculaire réalistes

Des modèles de mobilité véhiculaire ont été réalisés dans de nombreux domaines. Dans le cadre de réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET), les auteurs de [27] définissent les défis principaux comme le réalisme du modèle de mobilité et son adaptabilité aux outils de simulation existants. La communauté de chercheurs ne peut généralement pas utiliser des générateurs de trafic réalistes existants, car ils sont commerciaux et ne sont pas conçus pour échanger des informations avec des simulateurs de réseaux. Différents modèles ont été développés dans cette optique, dont VanetMobiSim [28], sélectionné ici en tant que référence pour ses choix de modélisations et son approche physique et donc réaliste, qui améliore lui-même un modèle de micro-mobilité appelé « Intelligent Driver Model » (IDM).

IDM, décrit dans [29], est un modèle microscopique qui se place dans la catégorie des *modèles de poursuite de voiture*. Le comportement d'un véhicule est fonction du véhicule le précédant sur la route. Le modèle calcule de manière instantanée l'accélération d'un véhicule suivant l'équation différentielle (2.7) :

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

$$\text{avec } s^* = s_0 + \left(vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \quad (2.8)$$

où v est la vitesse actuelle du véhicule, v_0 est la vitesse désirée (maximale), s est la distance par rapport au véhicule précédent et s^* est la distance dynamique désirée. Ce dernier paramètre est calculé dans (2.8) et est fonction de la distance minimale de pare-choc à pare-choc s_0 , du temps de réaction minimum T , de la différence de vitesse par rapport au véhicule précédent Δv et de l'accélération et la décélération minimales du véhicule a et b .

IDM peut reproduire des situations d'environnement réel, par exemple une file de voitures sur une route simple. Cependant, comme les auteurs de [28] le remarquent, l'utilisation seule de ce modèle n'est pas suffisante pour obtenir un comportement réaliste, par exemple à un carrefour. Plusieurs extensions d>IDM ont été proposées, comme dans [28] qui gère les intersections. Pour le premier véhicule de la rue, l'accélération dépend de l'intersection à venir et les paramètres suivants sont appliqués :

$$\begin{cases} s = \sigma - S \\ \Delta v = v \end{cases} \quad (2.9)$$

où σ est la distance actuelle du véhicule par rapport à l'intersection et S est une marge de sécurité pour l'intervalle entre le centre de l'intersection et l'endroit où le véhicule doit effectivement s'arrêter.

Une fois que le véhicule est arrivé à un panneau de stop, un module responsable des intersections prend en charge le véhicule dans une file d'attente. Bien qu'améliorant IDM, l'extension ne reproduit que les comportements de type stop ou feux de signalisations et de plus présente certains effets de bord. Le modèle décrit par la suite dans le cadre de ce manuscrit propose de combler ces lacunes.

2.C.2.4. Modèles de mobilité piétonne réalistes

Les auteurs de [30] font état de différents modèles de mobilité piétonne. Une des approches adoptées est d'abstraire les piétons en flux, décrits par les équations de dynamique des fluides. Cependant, les caractéristiques de flux ne sont pas toujours adaptées à tous les cas, notamment dans le cas de mobilité à deux sens. Une autre approche consiste à représenter chaque mobile en tant qu'individu, ou *agent*. Cette méthode a été largement étudiée et adoptée dans le domaine des transports, mais le choix ou non de discrétiser l'espace et/ou le temps dépend de l'utilisation désirée des résultats. Dans des modèles de type automates cellulaires, l'espace des déplacements est modélisé par une grille alors que dans les modèles de type continus, le mouvement est décrit par des équations différentielles. Les modèles semi-continus proposent eux une approche similaire aux modèles continus mais en contraignant les actions du piéton à un ensemble fini de choix, alliant flexibilité et précision. Nous avons donc choisi ce type de modèles comme référence, et en particulier la micro-mobilité décrite ci-dessous.

Guo et al. proposent dans [31] un modèle semi-continu basé sur des forces de répulsion, déjà décrit dans [32] par Helbing et Molnar. Les forces de répulsion sont tout aussi bien physiques (obstacle, mur) que sociales (autres personnes). L'inconvénient admis de ce modèle est qu'il n'est pas adapté à des situations où les piétons se pousseraient, comme des mouvements de panique ou de foules compactes. Cependant, ces cas-là ne nous intéressent pas dans le cadre de nos études. De l'autre côté, il a les avantages d'être rapide, du fait du choix du déplacement dans un ensemble fini, physiquement réaliste et de pouvoir simuler des foules de type clairsemées à denses.

L'ensemble fini de choix de déplacement est constitué d'un ensemble de directions, représentées par des angles comme illustré dans la figure 2.11a. Le calcul des forces sociales décrit dans les équations (2.10) et (2.11) est effectué lorsque l'angle de visée par rapport à un obstacle donné est à l'intérieur du « cône radial » illustré sur la figure 2.11b. Une approche de fonction d'utilité utilisant les forces sociales et la fonction *logit* permet d'assigner à chaque angle une probabilité selon (2.12). Le résultat du mouvement découle ensuite d'un tirage aléatoire.

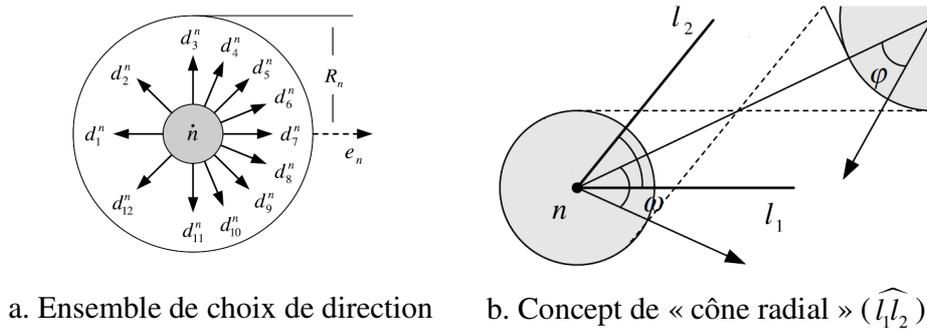


Figure 2.11 : Principes du modèle piéton semi-continu

$$f_i^{mn} = \frac{\tau (\max\{0; \cos(\omega)\} + \xi) (\max\{0; \cos(\varphi)\} + \varepsilon)}{\max\{d_{mn} - r_m - r_n; \delta\}} \quad (2.10)$$

où f_i^{mn} est la force de répulsion entre les piétons n et m pour la direction i . Les paramètres $\{\tau, \xi, \varepsilon\}$ sont des paramètres d'intensité, d_{mn} désigne la distance entre les piétons m et n . Le paramètre ω est l'angle entre la direction désirée e_n de n et le trajet direct vers m . Le paramètre φ est l'angle entre la direction désirée du piéton m et le trajet direct vers n . Les paramètres r_m et r_n désignent les rayons respectifs du piéton m et n .

$$f_i^{wn} = \frac{\tau (\max\{0; \cos(\omega)\} + \xi) (1 + \varepsilon)}{\max\{d_{wn} - r_n; \delta\}} \quad (2.11)$$

où le paramètre f_i^{wn} est la force de répulsion entre le piéton n et le mur w pour la direction i . Les paramètres $\{\tau, \xi, \varepsilon\}$ sont des paramètres d'intensité, d_{wn} désigne la distance n et w . Le paramètre ω

est l'angle entre la direction désirée e_n de n et le trajet direct vers le mur w . Le paramètre r_n est le rayon de n .

$$\begin{cases} P_i^n = \frac{\exp\left[\lambda\left(\max\{0; \cos(\beta_i^n)\} - \sum_m f_i^{mn} - \sum_w f_i^{wn}\right)\right]}{1 + \sum_{k=1}^{12} \exp\left[\lambda\left(\max\{0; \cos(\beta_k^n)\} - \sum_m f_k^{mn} - \sum_w f_k^{wn}\right)\right]} \\ P_0^n = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{12} \exp\left[\lambda\left(\max\{0; \cos(\beta_k^n)\} - \sum_m f_k^{mn} - \sum_w f_k^{wn}\right)\right]} \end{cases} \quad (2.12)$$

où P_i représente pour le piéton n la probabilité du choix de la direction i , l'indice $i = 0$ étant la probabilité de rester sur place. Le paramètre λ est la déviation, représentant la force de l'effet d'évitement, β_i^n est l'angle entre la direction d_i^n et la direction désirée e_n et f_i^{mn}, f_i^{wn} sont les forces de répulsions entre le piéton n et respectivement les autres piétons m et les murs w .

Afin de moduler la vitesse, quatre distances de parcours sont disponibles à chaque itération. Le choix de la distance de parcours résulte du compromis entre la vitesse proposée par défaut et éviter le plus possible les recouvrements de personnes. Après le calcul des positions des mobiles, il est encore possible que des recouvrements se fassent. Dans ce cas-là, aucun des mobiles concernés ne bouge, mais ils sont informés du blocage et remettent en question leur stratégie lors de prochaines itérations.

Les différents modèles réalistes de mobilité piétonne et véhicule évoqués ne permettent souvent de simuler que la micro-mobilité. Dans la section suivante, nous présentons nos propositions de modèles globaux réalistes, en particulier l'utilisation novatrice d'OpenStreetMap pour améliorer la précision des données, la gestion d'intersection et les flux de macro-mobilité du trafic véhiculaire.

2.C.3. Propositions de modèles de mobilité réalistes

2.C.3.1. Mobilité des véhicules

Le modèle véhiculaire que nous souhaitons obtenir doit répondre à de nombreuses exigences. Il doit être physiquement réaliste pour correctement simuler les corrélations spatio-temporelles. De plus, les données obtenues doivent être cohérentes avec les données géographiques utilisées pour la prédiction de propagation. Pour respecter ces contraintes, nous choisissons de nous inspirer du modèle de référence [28] évoqué auparavant, qui contraint les mouvements à un réseau routier et possède un modèle de micro-mobilité réaliste. Le résultat de cette simulation de

mobilité a pour but d'être utilisé à la fois dans la caractérisation fine de phénomènes de propagation, mais aussi de phénomènes plus globaux impactant un réseau cellulaire. Pour cela, l'échelle du réseau routier simulé de manière réaliste doit être au minimum de l'ordre de grandeur d'un ensemble comprenant une macro-cellule centrale et les macro-cellules voisines, c'est-à-dire environ 1 km².

L'hypothèse de base que nous utilisons pour définir la macro-mobilité dans une configuration confinée est que les véhicules arrivent d'un bord du réseau routier pour ressortir à un autre bord. Les phénomènes de fuite (stationnement, sortie de garage) sont donc négligés. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons nos propositions de modélisation et d'implémentation pour les différents niveaux de simulation.

Le réseau routier de la base de données OSM décrit les rues comme une suite de vecteurs linéaires augmentés d'information. Pour faciliter la macro-mobilité, nous modélisons la structure de réseau routier de la simulation comme un graphe dont les nœuds sont les carrefours. Afin de générer des positions de véhicule réalistes, nous avons choisi de séparer les rues à plusieurs voies en amont de la simulation. Dans le cas de rues où la circulation se fait à double sens, une rue abstraite est dupliquée en deux rues physiques. Les différentes étapes de cette duplication et de la jonction aux intersections font intervenir la trigonométrie basique. Les données linéaires ainsi reconstruites sont cohérentes avec les bases de données de vecteurs 3D de bâtiments, comme illustré sur la figure 2.12.



Figure 2.12 : Exemple de superposition de linéaires de rues et de vecteurs 3D de bâtiments

Comme défini précédemment, la macro-mobilité représente le niveau supérieur du déplacement décrit par un véhicule, c'est-à-dire son chemin. Les méthodes que nous mettons en œuvre pour définir la macro-mobilité de manière réaliste exploitent les informations issues des

bases de données OSM. Le nœud d'entrée du mobile dans le réseau est choisi de manière à donner une forte probabilité aux rues à large capacité. La classification offerte par OSM (rue primaire, secondaire, autoroute...) permet d'avoir cette information. L'importance du type de route est ajustée grâce à un facteur χ . Le nœud de sortie du mobile est quant à lui soumis à plusieurs exigences. Premièrement, le chemin formé entre le nœud d'entrée et de sortie doit favoriser le fait de rejoindre des rues à large capacité. Pour cela, nous définissons le paramètre de **type de route moyen** m où le type de route de chaque segment d'un chemin donné est pondéré par sa longueur suivant l'équation (2.13). Le chemin doit également être réaliste, par exemple éviter une boucle. Nous définissons le paramètre de **distance relative** η comme métrique quantifiant le réalisme du chemin. Ce paramètre est défini comme le rapport entre la distance parcourue à vol d'oiseau et la distance effectivement parcourue le long du graphe, suivant l'équation (2.14). L'idée principale est d'éviter les trajets longs, qui finissent proches du point d'entrée et de favoriser les chemins dont la distance parcourue est proche de la distance à vol d'oiseau. Finalement, les paramètres de type de route moyen et de distance relative sont combinés ensemble avec les facteurs d'ajustement κ et ζ suivant l'équation (2.15). Pour calculer le chemin entre le point d'entrée et le point de sortie choisis, la manière la plus évidente est d'utiliser l'algorithme de Dijkstra [33]. Les paramètres de pondération d'arête de l'algorithme peuvent dépendre de la distance, de la vitesse et du trafic si l'utilisateur possède ces informations en temps réel. Les métriques de poids α , β et γ suivant ces trois paramètres est définie dans (2.16). Pour le moment, le choix a été fait de ne pas utiliser la notion de connaissance du trafic ($\gamma = 0$).

$$m_{i,j} = \sum_l length_l \times roadtype_l \quad (2.13)$$

où l correspond aux différentes arêtes du chemin entre i et j .

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \eta_{i,j}} \times \frac{d_{Euclidean(i,j)}}{d_{Graph(i,j)}} \quad (2.14)$$

où N est le nombre de points possibles de sortie pour le point d'entrée i , $d_{Euclidean}$ est la distance à vol d'oiseau entre i et le point de sortie j et d_{Graph} est la distance le long du graphe entre i et j .

$$proba_j = \eta_{i,j}^\kappa \times m_{i,j}^\zeta \quad (2.15)$$

où j détermine le point de sortie étudié pour un point d'entrée i .

$$weight = distance^\alpha . speed^\beta . traffic^\gamma \quad (2.16)$$

Comme défini précédemment, la micro-mobilité modélise la manière dont un véhicule – ou agent – se déplace localement. Dans un contexte de mobilité véhiculaire, cela inclut la vitesse, l'accélération, la décélération et la direction (changement de voie) le long d'une arête du graphe. La micro-mobilité est dépendante des paramètres d'une rue (vitesse, intersections) ainsi que des interactions avec les autres véhicules. Intelligent Driver Model et son extension IDM-IM ont été choisis pour leur réalisme. Cependant, IDM-IM présente certains aspects problématiques ainsi que quelques lacunes que le modèle présenté propose de corriger. Un premier problème a été abordé précédemment : dans IDM-IM, un seul véhicule peut utiliser l'intersection à un temps donné, ce qui est irréaliste et peut provoquer de sérieux problèmes de congestion dans le réseau. Nous avons implémenté la possibilité d'utiliser une intersection par deux véhicules. De plus, l'intersection choisie par défaut est l'arrêt, ainsi qu'une gestion d'intersection prioritaire pour le premier arrivé, ce qui peut aussi aboutir à des situations de congestion si l'intersection réelle est conçue pour éviter l'arrêt, par exemple un cédez le passage. Pour résoudre ces problèmes, nous introduisons un nouveau module de gestion des intersections, décrit sur la figure 2.13 et illustré avec un carrefour à feux.

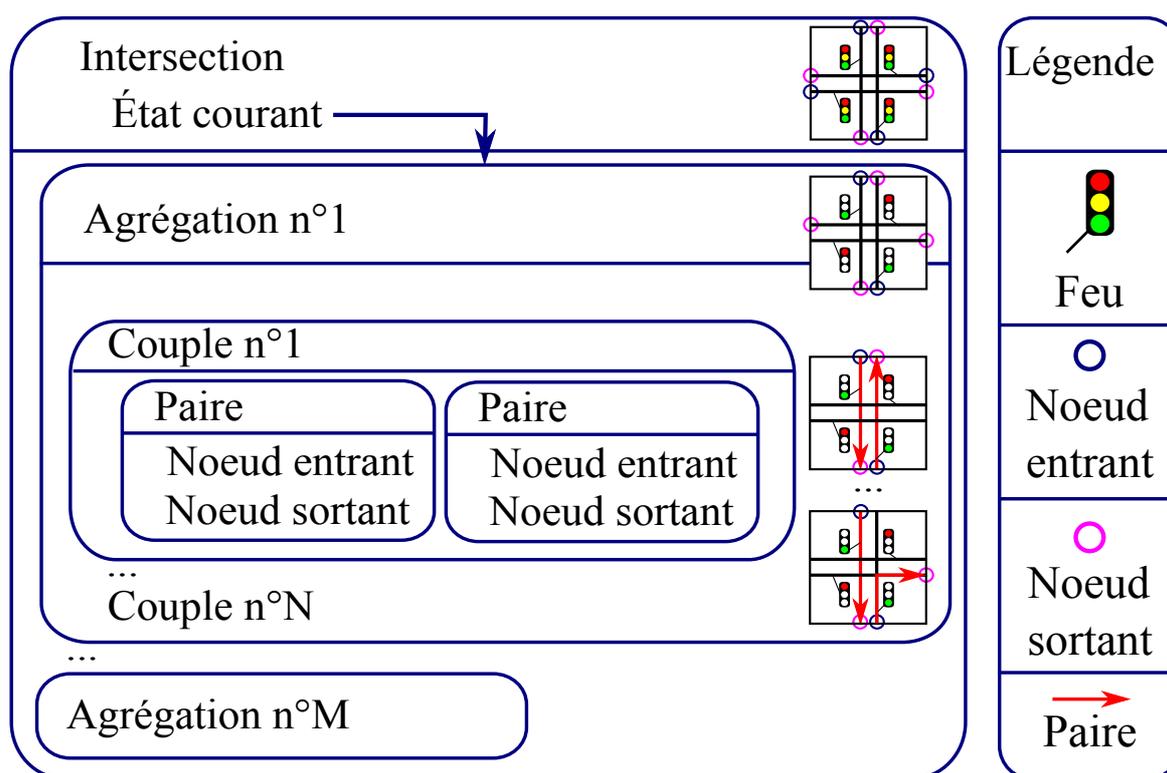


Figure 2.13 : Structure d'un objet intersection

Nous définissons d'abord les notions de **Paire**, de **Couple** et de **Agrégation**. Un *noeud entrant* d'une intersection est le dernier point d'une route empruntée par un véhicule avant qu'il

n'utilise l'intersection pour arriver sur une nouvelle route via un *nœud sortant* de l'intersection. Un ensemble de deux nœuds (entrant et sortant) reliés par une intersection est appelé une **Paire**. Comme deux véhicules peuvent utiliser l'intersection en même temps, tous les ensembles de Paires possibles sont décrits. Un **Couple** représente deux Paires qui peuvent utiliser l'intersection en même temps. Comme une intersection peut avoir différents états (par exemple un feu de circulation), chaque état possède un ensemble de Couples pouvant emprunter l'intersection. L'ensemble de Couples associé à un état est appelé **Agrégation**. Pour une intersection donnée, le paramètre d'**état courant** permet de sélectionner l'Agrégation à utiliser à un instant t .

La priorité entre les différentes Paires puis entre les différents Couples est calculée sur la base du type des routes concernées et du type d'intersection. Par exemple, pour un rond-point, la Paire qui vient du rond-point et y reste est prioritaire par rapport aux autres. En plus des intersections définies dans IDM-IM, d'autres priorités ont été implémentées, telles que le cédez le passage, le rond-point, le mini rond-point...

Finalement, la gestion de l'accélération dans IDM-IM apporte des effets de bord spécifiques. Le problème du « *véhicule aveugle* » illustré sur la figure 2.14 en est un exemple. Dans cette configuration, deux véhicules se suivent sur une route prioritaire (par exemple un feu de signalisation au vert). La première voiture continue sur l'intersection et roule donc à la vitesse maximale. Suivant le modèle de poursuite de véhicule, la seconde voiture roule à la même vitesse que la première. Une fois que la première voiture passe l'intersection, la seconde voiture se rend compte qu'elle tourne et doit donc ralentir brutalement. Pour prendre en compte un ralentissement adapté, la modification apportée dans le modèle développé est de choisir l'accélération minimale à chaque instant entre l'accélération dépendant du véhicule suivi et l'accélération dépendant de la distance à la prochaine intersection.

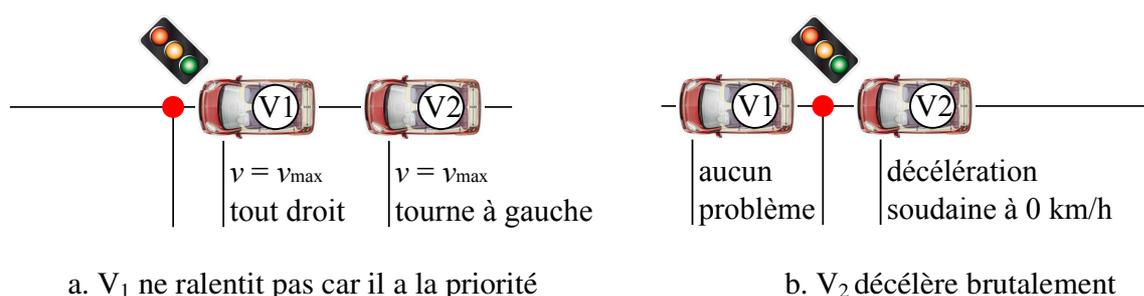


Figure 2.14 : Problème du « véhicule aveugle »

Pour vérifier la pertinence du modèle développé, nous avons extrait des sorties statistiques de la simulation et comparé avec des résultats existants, à la fois dans des environnements virtuels et réels. Les métriques utilisées sont tirées de la littérature (cf. [28]).

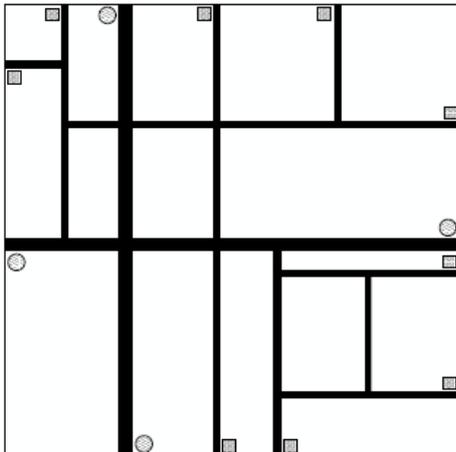
Vitesse moyenne globale

Il s'agit de la vitesse moyennée sur l'ensemble des véhicules et sur la durée de la simulation. Dans des configurations urbaines et à des heures typiques de circulation, la vitesse moyenne est de l'ordre de 15 à 20 km/h [34]. Pour des topologies et densité de trafic analogues, l'ordre de grandeur de vitesse observé est similaire dans la plupart des environnements testés à des échelles moyennes (1 km²). Pour des échelles plus larges, le manque d'information sur le réseau ou sur les relations complexes entre les intersections, notamment la corrélation entre feux de signalisation explique des encombrements locaux et donc une diminution de cette vitesse moyenne globale. Les prochaines métriques permettent de mieux détailler l'influence de la densité sur la vitesse.

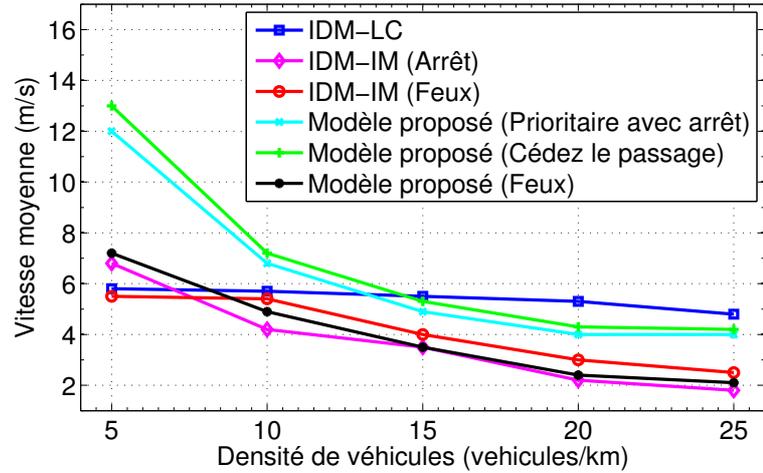
Vitesse en fonction de la densité

Cette métrique est issue d'un protocole expérimental [28] consistant en l'augmentation progressive de la densité (nombre de véhicules par kilomètre) et l'observation de son effet sur la vitesse globale dans le réseau. Pour chaque expérience, un temps transitoire de 900 s est fixé pour stabiliser le trafic dans le réseau, après lequel la vitesse moyenne est enregistrée sur une durée de 3600 s. La densité joue un rôle essentiel dans la simulation de mobilité : en augmentant le nombre de véhicules, le trafic se ralentit considérablement et peut aboutir à des situations d'encombrement. La figure 2.15 illustre les résultats de ce protocole réalisé avec différents modèles de mobilité sur un réseau virtuel rempli avec différents types d'intersection : soit des feux, soit des routes prioritaires avec arrêt, soit des cédez le passage, soit des arrêts obligatoires. En fonction des intersections, la courbe de vitesse en fonction de la densité peut être différente :

- Pour un réseau de feux de signalisation, la courbe décroît relativement faiblement. En effet, qu'il y ait un véhicule ou plusieurs arrêtés à une intersection, les feux ne changent d'état qu'à des instants donnés.
- Pour un réseau constitué d'intersections de type arrêt, l'augmentation de la densité va faire diminuer considérablement la vitesse : des congestions sont rencontrées sur certaines intersections. Avec une densité faible, la vitesse moyenne est cependant plus élevée que pour un réseau de feux de signalisation.
- L'utilisation de nouvelles intersections (routes prioritaires et cédez le passage) permet d'aborder de nouvelles situations de trafic. La différence de vitesse moyenne observée sur les courbes de ces réseaux s'explique par l'afflux permanent de véhicules sur les routes principales, sur lesquelles la vitesse est maximale.



a. Réseau de mobilité étudié

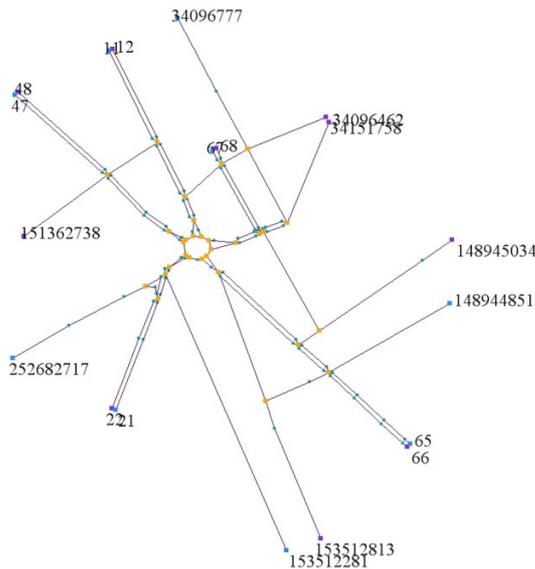


b. Résultats de l'expérience

Figure 2.15 : Exemple d'évolution de la vitesse en fonction de la densité

Statistiques de macro-mobilité

Les statistiques de macro-mobilité sont calculées en fonction des observations d'arrivées de véhicules sur les nœuds d'entrées, ainsi que les relations entre nœuds d'entrées et de sorties. Ces métriques ont pour but d'observer les effets des paramètres de macro-mobilité (dont m , η , κ et ϵ). Sur la figure 2.16, le point n°47 a par exemple une probabilité d'entrée plus forte que les autres dû au type de route (route primaire, cf. figure 2.17), notamment par rapport au n°11 (route tertiaire).



a. Carte de réseau routier (Paris)

	IN	11	47
1	Proportion	0.0794	0.1822

	OUT/IN	11	47
1	12	0	0
2	22	0.2353	0.0769
3	34096462	0.0588	0.0513
4	34151758	0	0.0769
5	151362738	0	0.0769
6	153512813	0.1176	0.3077
7	148945034	0.1176	0.0769
8	48	0.0588	0
9	66	0.2353	0.3333
10	68	0.1765	0

b. Statistiques du trafic simulé

Figure 2.16 : Exemple de statistiques de macro-mobilité

Densité spatiale

La densité spatiale est une métrique représentant le quotient moyen de véhicules pour un créneau donné le long d'une route, par exemple un créneau de 50 cm. Une valeur de densité spatiale de 1 indique que le créneau est toujours occupé, correspondant au maximum de densité. Un exemple de résultat de densité spatiale est illustré sur la figure 2.17. Nous observons par exemple que le trafic est concentré au voisinage des feux de circulation, des routes principales et aux approches des ronds-points. Ce type de comportement se retrouve dans des situations réelles de circulation.

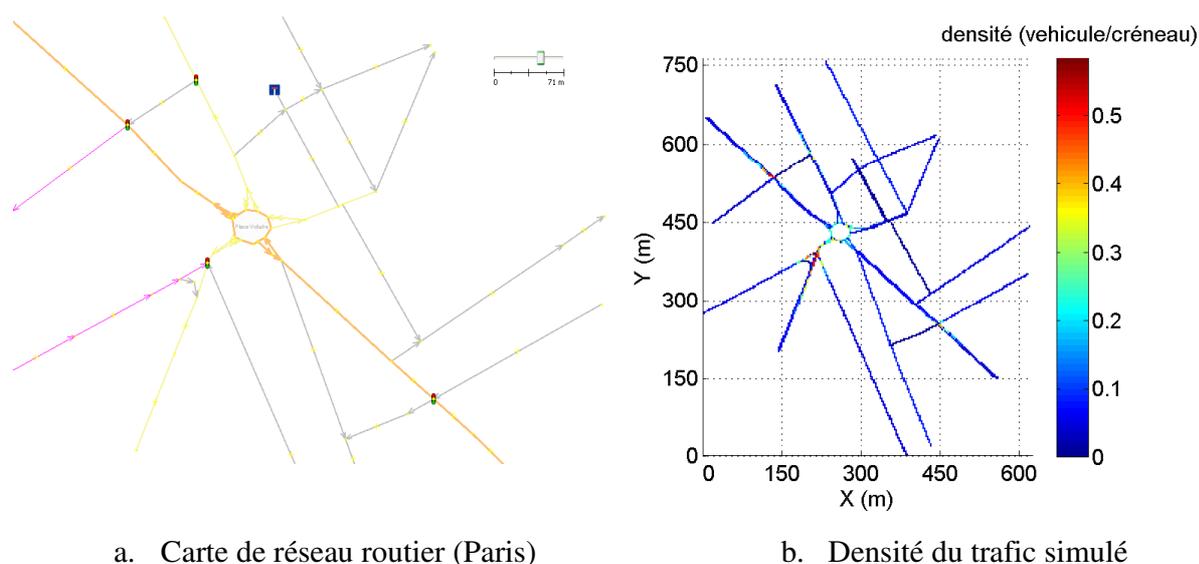


Figure 2.17 : Exemple de densité spatiale

2.C.3.2. Mobilité des piétons

Les véhicules ne sont pas les seuls éléments de l'environnement qui génèrent des variations du canal en configuration dense urbaine. De nombreux éléments pourraient être modélisés : motos, cyclistes, tram... L'impact en particulier des foules de piétons sur les caractéristiques de second ordre du signal a été démontré dans la littérature (cf. chapitre 1). De plus, en configuration intérieure, l'activité humaine est le facteur environnemental mobile qui génère le plus d'impact sur la propagation. Afin de répondre à ces problématiques, nous avons choisi de développer un modèle simple mais réaliste, basé sur les contributions existantes. Ce modèle se focalise sur des situations de mobilité contraintes, qui peuvent être rencontrées en extérieur (trottoirs), mais aussi en intérieur (couloirs). Les niveaux de mobilité simulés sont les mêmes qu'en mobilité véhiculaire. Les hypothèses d'entrée et de départ sur les bords du réseau de mobilité sont également identiques. Cependant, la modélisation de micro-mobilité est moins linéaire et inclut de la dépendance entre les différents piétons, appelés agents.

Il n'existe pas à notre connaissance de bases de données consacrées aux trottoirs d'une ville, qui sont les données d'entrée du modèle. Nous avons développé un algorithme permettant la reconstruction de trottoirs à partir de données de rues et de bâtiments, dont on peut voir une illustration sur la figure 2.18.



Figure 2.18 : Exemple de génération de trottoirs en milieu urbain

Dans la version proposée dans ce manuscrit, les paramètres de macro-mobilité sont élémentaires. Les probabilités de génération d'un piéton sur une zone d'arrivée, ainsi que le choix de la zone de sortie, sont déterminées de manière aléatoire. D'autres solutions peuvent être imaginées, comme une probabilité de génération proportionnelle à la longueur du segment d'arrivée. La position de l'agent sur le segment d'arrivée reproduit la tendance que les piétons ont à créer des lignes lorsqu'ils marchent dans un espace contraint. Pour modéliser cet effet dans le modèle, la distribution d'un agent sur le segment d'arrivée suit une loi normale centrée sur la moitié droite du segment. De cette manière, les agents se déplacent plutôt sur le côté droit de la zone. Le choix du point de sortie désiré dans la zone inclut à la fois ce comportement de déplacement en ligne droite, et l'information de direction empruntée par l'agent, comme illustré sur l'étape c. de la figure 2.19.

La micro-mobilité d'un agent, qui dépend des interactions avec les murs et les autres agents, est modélisée en utilisant le modèle développé par les auteurs de [31], décrit dans le paragraphe 2.C.2.4.

La validité du modèle n'a pas été vérifiée, que ce soit par rapport à des extraits de vidéo ou d'autres simulateurs. Cependant, des comportements réalistes sont observés, tels que le fait de prévoir et éviter les collisions ou la formation de lignes lors de la densification du trafic.

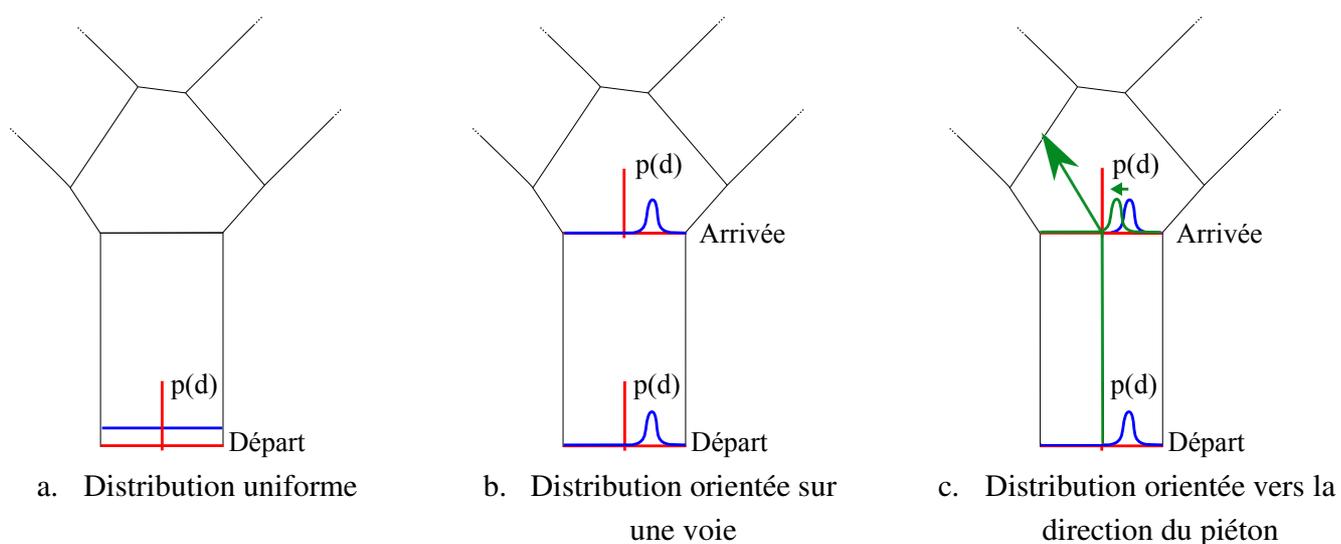


Figure 2.19 : Distribution du piéton sur la zone d'arrivée

La prochaine section illustre les possibilités d'exploitation de la plateforme de simulation composée du générateur d'objets statiques, de modèles de propagation spécifiques aux petites cellules et de modèles de mobilité. Dans le cas d'un environnement extérieur, les variations du signal sont comparées avec et sans prendre en compte l'environnement et sa mobilité.

2.D. Illustrations de l'utilisation de la plateforme de simulation

2.D.1. Réalisme du canal de propagation

Nous présentons dans cette section des exemples d'utilisation de la plateforme de simulation illustrant le réalisme apporté par le rajout de détails statiques, ainsi que par l'évolution des mécanismes de propagation. Ces exemples ne sont pas des scénarios d'étude. Le prochain chapitre présentera des scénarios d'étude plus complets, permettant de caractériser un phénomène ou d'observer l'impact d'un paramètre précis.

Le premier apport observable est la prise en compte de la phase dans le modèle de propagation, ce qui permet la recombinaison constructive ou destructive des rayons aboutissant aux variations du signal. Ce mécanisme est implicitement illustré dans toutes les situations présentées ci-dessous. Des prédictions de propagation sont effectuées dans un scénario urbain, avec une configuration de récepteur mobile, puis d'environnement mobile. Les variations du signal, à petite échelle et à grande échelle, sont comparées avec et sans le rajout de détails statiques (lampadaires, voitures garées) ou de détails mobiles (véhicules).

Au-delà du réalisme des variations du signal illustrées ci-dessous, l'utilisation d'un modèle déterministe permet de prendre en compte de manière implicite les corrélations dans l'espace et le temps. Par exemple, si deux récepteurs mobiles associés à la même station de base sont situés l'un à côté de l'autre, les variations de puissance du signal reçu, dues au passage d'un véhicule dans le lien radio, seront proches.

2.D.1.1. Scénario d'illustration

L'environnement du scénario utilisé dans ces exemples d'illustration est de type dense urbain (cf. figure 2.20). La station de base est fixe et placée à une hauteur de 4 m. Elle émet un signal à une fréquence de 2600 MHz, grâce à une antenne isotrope, polarisée verticalement. Le récepteur est à hauteur humaine ($\approx 1,5$ m) et reçoit le signal grâce à une antenne isotrope, polarisée verticalement.



Figure 2.20 : Vue du scénario d'illustration (© Google 2012)

2.D.1.2. Récepteur mobile

Dans le premier exemple, nous allons comparer les évanouissements à petite et à grande échelle en présence ou non de mobilier urbain. La génération pseudo-aléatoire des véhicules et des lampadaires est telle que décrite dans le paragraphe 2.B.1.3. Afin de mettre en avant des effets isolés, le mobilier urbain rajouté est délibérément clairsemé. La densité de véhicules stationnés est de 20 %, avec une proportion relative de 5 % d'utilitaires, 15 % de camions et 80 % de voitures. Les lampadaires sont générés à 5 m de la rue, avec une distance de séparation de 30 m.

La figure 2.21 illustre le mobilier urbain généré, ainsi que la route empruntée par le récepteur. Pour mieux observer les différences d'évanouissements à petite échelle, deux échantillons sont détaillés : lorsque le récepteur est proche de mobilier urbain (1) et lorsque le trajet direct est obstrué par un obstacle de large taille (2).

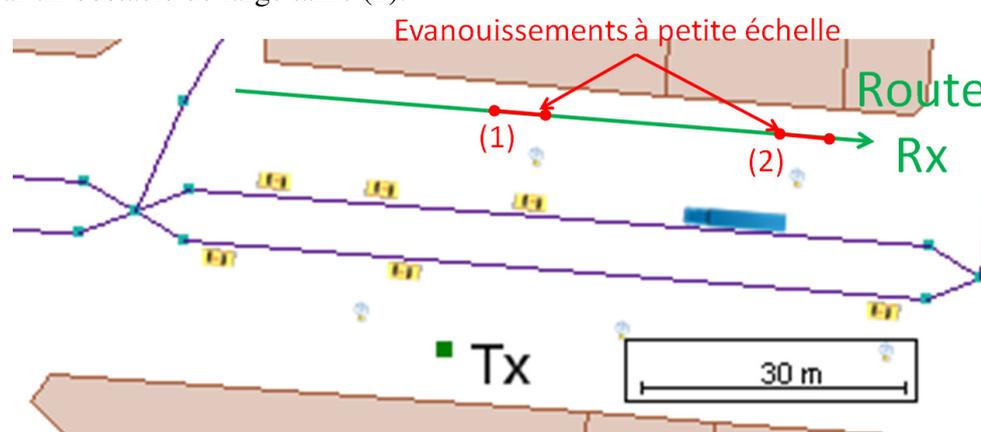


Figure 2.21 : Scène enrichie par le mobilier urbain et trajectoire du récepteur mobile

Les résultats des variations de puissance le long de la route sont présentés sur la figure 2.22. Des différences à grande échelle sont observées en rajoutant le mobilier urbain, par exemple à $t = 8s$, et particulièrement de $t = 63$ à $70 s$, où l'utilisateur passe derrière un camion.

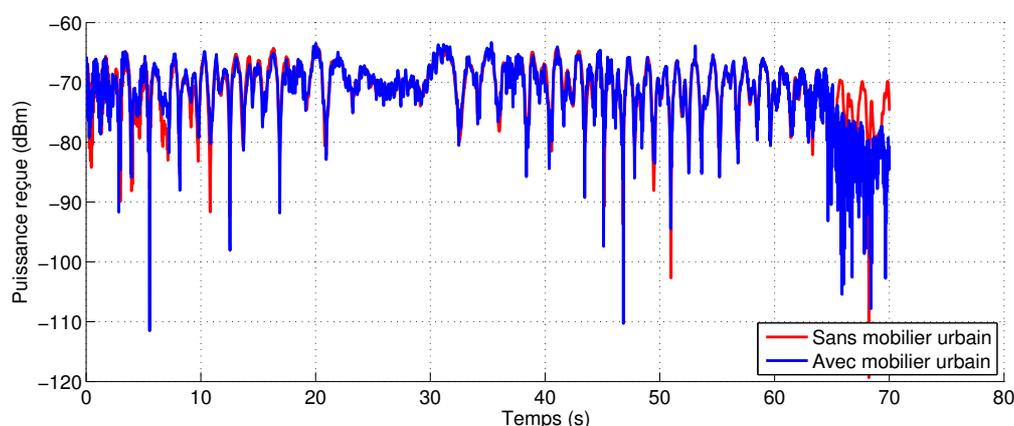


Figure 2.22 : Illustration de la variation de puissance avec un récepteur mobile

La figure 2.23 présente les détails de variations de puissance sur les segments (1) et (2). Sur le segment (1), les variations du signal à petite échelle sont plus fréquentes. La différence entre les deux courbes atteint jusqu'à 5 dB. En effet, l'ajout de contributions dues aux arêtes des véhicules et aux lampadaires permet d'améliorer la prédiction de la diversité du canal. La distribution des angles d'arrivée dans le plan horizontal tend vers une distribution uniforme, qui aboutit à un évanouissement de type Rice pour l'enveloppe du signal (dû au trajet direct prépondérant). Sur le segment (2), les variations du signal sont plus importantes, avec une dynamique observée de 20 dB. Le trajet direct est fortement atténué, le mettant au même niveau que les autres trajets (réflexions, diffractions). Les recombinaisons provoquent donc des évanouissements de plus forte fréquence et amplitude, plus proches d'un évanouissement de type Rayleigh.

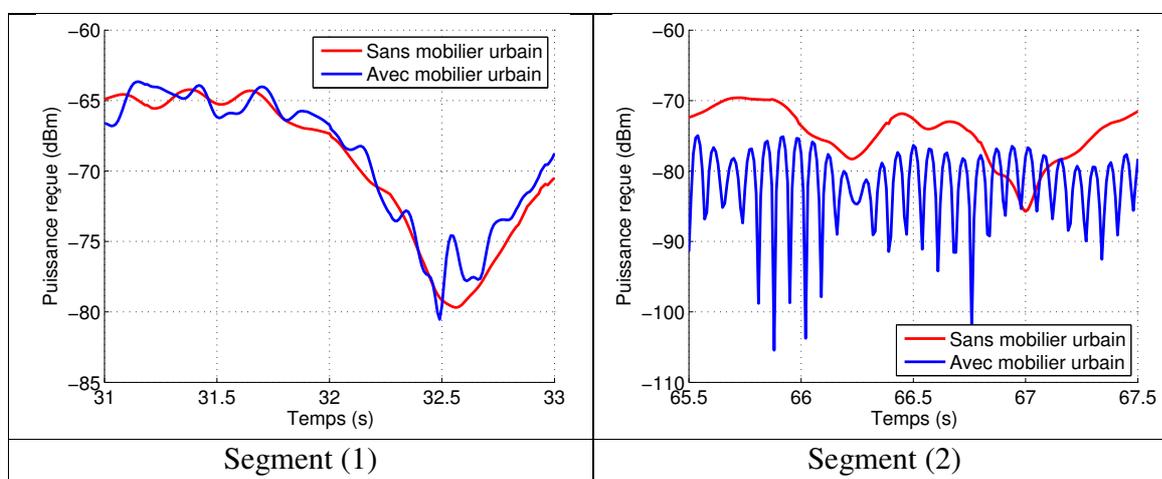


Figure 2.23 : Détails de variation de puissance avec un récepteur mobile

2.D.1.3. Environnement mobile

Dans le deuxième exemple, nous allons comparer les variations de puissance apportées par le trafic véhiculaire, avec un récepteur fixe. La durée de la simulation est de 60 s. La simulation de mobilité est telle que décrite dans le paragraphe 2.C.3, avec une densité de trafic de 10 %, répartis entre les voitures (80 %), les utilitaires (10 %) et les camions (10 %). La figure 2.24 illustre le scénario et la mobilité de l'environnement à deux instants différents.

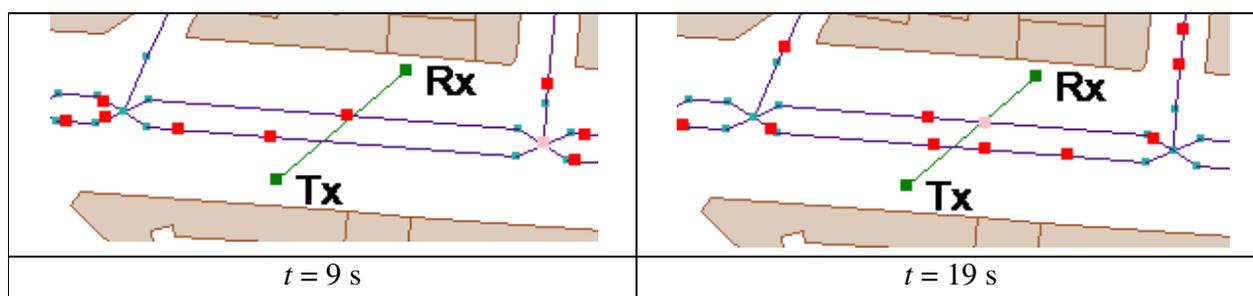


Figure 2.24 : Scène enrichie par des véhicules mobiles

La figure 2.25 présente les variations de puissance durant la simulation. Le passage de véhicules entraîne des variations à petite et grande échelle. Les variations à petite échelle (de l'ordre de quelques millisecondes) sont dues aux diffractions sur les arêtes des véhicules, alors que les variations à grande échelle sont dues aux perturbations que les véhicules produisent sur les trajets existants, notamment le trajet direct. La durée des évanouissements est en particulier liée à la configuration géométrique et aux tailles des véhicules et est plus large que les durées d'évanouissements dus au déplacement du récepteur. Les variations à grande échelle sont dans ce scénario de l'ordre de 0 à 5 dB (voitures et utilitaires) et peuvent atteindre 30 dB pour le passage de bus.

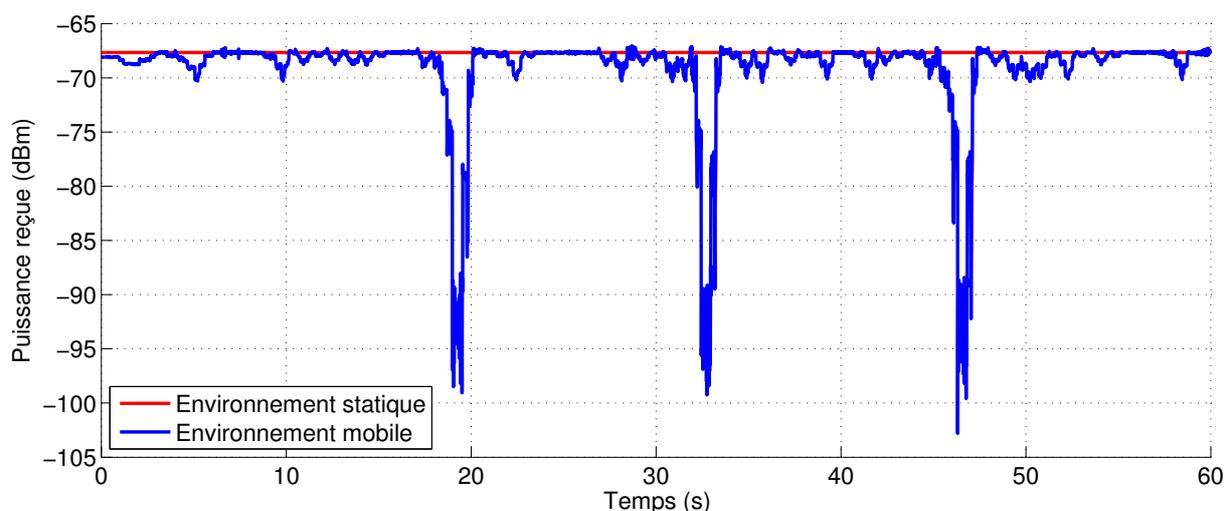


Figure 2.25 : Illustration de la variation de puissance avec un environnement mobile

2.D.2. Contraintes d'utilisation

Les différentes illustrations ci-dessus ont montré les améliorations apportées par l'enrichissement de la scène de propagation. Certaines contraintes ne permettent cependant pas une utilisation sans réserve de la plateforme de simulation, notamment la validation des modèles de propagation et le coût de la simulation en termes de complexité et de ressources de calcul.

Certains mécanismes de propagation sont repris de modèles de la littérature et ont déjà été soumis à des validations. Certains choix au contraire, partent d'hypothèse de mécanismes dominants, par exemple la diffraction sur la structure métallique des véhicules. Une étape de validation est donc nécessaire pour confirmer les mécanismes utilisés. De plus, certains mécanismes sont paramétrables, comme le coefficient de réflexion sur le sol ou encore le coefficient de correction de hauteur pour le coefficient TUD. L'étape de validation doit donc comprendre une part d'ajustements.

De plus, le réalisme obtenu par la plateforme de simulation se fait au détriment d'un surplus de complexité : données d'entrées supplémentaires, connexions d'architecture entre mobilité et propagation, et augmentation des ressources nécessaires au calcul. En effet, la génération de détails, puis, à chaque instant t , la simulation de mobilité et la prédiction de propagation demandent du temps et consomment de la mémoire.

Dans le chapitre suivant, la plateforme de simulation est utilisée pour caractériser l'impact de l'environnement proche. Dans le cas de mobilité de l'environnement en configuration urbaine, une approche complémentaire par mesures est également suivie. Cette approche permet à la fois d'obtenir une première caractérisation de l'impact des véhicules et de valider certains choix de modélisation de la propagation. Une fois les modèles validés, la réalisation de plusieurs études permet de caractériser l'impact de l'environnement proche dans différents scénarios. Ces études sont réalisées dans un contexte où les ressources de calcul ne sont pas une limitation, ce qui permet de s'affranchir de la contrainte de coût de la simulation. Cependant, cette contrainte sera reconsidérée dans le chapitre 4 lorsqu'il s'agira de combiner la plateforme de simulation à des outils possédant eux-mêmes des contraintes de temps de simulation, comme des simulateurs de réseaux.

2.E. Conclusion du chapitre

Nous avons proposé dans ce chapitre une plateforme de simulation permettant de générer et de prendre en compte des détails statiques et dynamiques dans des outils de prédiction déterministe de propagation.

Dans un premier temps, nous avons décrit notre approche combinant une génération aléatoire de détails dans l'environnement et la mise en place de modèles de propagation spécifiques aux petites cellules, qui a fait l'objet d'une présentation à un séminaire¹ et d'une publication². La génération pseudo-aléatoire proposée s'appuie sur des bases de données de topologies de rues OpenStreetMap (OSM) libres et collaboratives. Elle permet d'obtenir plusieurs versions possibles d'une même scène de propagation et d'effectuer des traitements statistiques sur les canaux de propagation résultants. Nous avons ensuite décrit nos travaux pour aboutir à des outils déterministes de propagation spécifiques aux petites cellules. Ces travaux ont consisté en l'amélioration de l'outil de prédiction de propagation de SIRADEL dans un prototype annexe. Dans un premier temps, le calcul de la réflexion sur le sol ainsi que le calcul déterministe de phase ont été implémentés, permettant une analyse cohérente des multi-trajets, comme dans le modèle à deux rayons. L'obstruction de la réflexion sur le sol étant insuffisante pour caractériser l'impact de l'ajout d'objets dans le plan vertical, l'atténuation du trajet direct est calculée grâce à l'ellipsoïde de Fresnel. Les multi-trajets quant à eux ont été enrichis avec l'ajout des contributions dues à des poteaux et des véhicules. Des approches respectives de Surface Equivalente Radar et de diffraction sur les arêtes verticales ont été mises en place, en veillant à respecter les conditions de champ proche.

Dans un deuxième temps, nous avons décrit nos propositions de modèles de mobilité piétonne et véhiculaire permettant de déplacer des objets statiques à l'intérieur d'une scène. Nos travaux ont consisté à améliorer et étendre des modèles de référence proposant une approche réaliste basée sur des contraintes géographiques et paramétriques. D'une part, certaines limitations de ces modèles de référence sont corrigées, en particulier le calcul de la vitesse d'un véhicule à l'approche d'une intersection et l'utilisation simultanée d'une intersection par deux véhicules. D'autre part, l'utilisation des bases de données OSM riches en information a permis d'améliorer les différents niveaux de simulation de mobilité, notamment en reliant les paramètres de macro-mobilité aux propriétés du réseau routier.

Finalement, nous avons illustré les améliorations apportées par cette plateforme de simulation. Elle permet de mieux caractériser les différentes dynamiques dans le canal, à petite et à grande échelle, apportées par le mouvement du récepteur ou de l'émetteur. Du fait du choix de

¹ L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "On the use of statistic in deterministic channel models," in *International Workshop on Propagation and Channel Modeling for Next-Generation Wireless Networks (IWPCM)*, Lyon, 2011.

² G. Gougeon, Y. Lostanlen and L. Maviel, "Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, pp. 3448-3452, 2011.

certaines hypothèses de base, dont la structure métallique des véhicules, il reste à valider certains mécanismes de propagation implémentés et à les ajuster si nécessaire. C'est ce que nous verrons dans le prochain chapitre axé sur la caractérisation de l'impact de l'environnement proche sur le canal de propagation. Cette caractérisation s'appuiera d'abord sur des mesures et des cas d'études précis pour ajuster les mécanismes choisis. Nous utiliserons ensuite la plateforme de simulation pour étudier l'impact de l'environnement à travers des campagnes de scénarios plus étendues.

Bibliographie

- [1] M. Haklay and P. Weber, “OpenStreetMap: user-generated street maps,” *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 12–18, 2008.
- [2] J. Maxwell, “A dynamical theory of the electromagnetic field,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459–512, 1865.
- [3] A. Peterson, L. Ray, and R. Mittra, “Computational methods for electromagnetics,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 2, 1998.
- [4] J.-M. Gorce, K. Runser, and G. De La Roche, “FDTD based efficient 2D simulations of indoor propagation for wireless LAN,” in *IMACS, World Congress Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, (Paris, France), 2005.
- [5] S. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*. Wiley, 2007.
- [6] J. Keller, “A geometrical theory of diffraction,” *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 52, pp. 116–130, 1962.
- [7] R. Kouyoumjian and P. Pathak, “A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448–1461, 1974.
- [8] Y. Corre and Y. Lostanlen, “Three-dimensional urban EM wave propagation model for radio network planning and optimization over large areas,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 3112–3123, 2009.
- [9] K. Rizk, J.-F. Wagen, and F. Gardiol, “Two-dimensional ray-tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 508–518, 1997.
- [10] A. S. Glassner, *An introduction to ray tracing*. Morgan Kaufmann Pub, 1989.
- [11] J.-P. Rossi and Y. Gabillet, “A mixed ray launching/tracing method for full 3-D UHF propagation modeling and comparison with wide-band measurements,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 4, pp. 517–523, 2002.
- [12] Y. Corre, Y. Lostanlen, and Y. Le Helloco, “A new approach for radio propagation modeling in urban environment: Knife-edge diffraction combined with 2D ray-tracing,” in *Proc. of the 55th IEEE Vehicular Technology Conference, (VTC-Spring 2002)*, vol. 1, (Birmingham, AL), pp. 507–511, 2002.
- [13] R. J. Luebbers, “A heuristic UTD slope diffraction coefficient for rough lossy wedges,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 206–211, 1989.
- [14] L. Ivrišimtzis and R. Marhefka, “A note on double edge diffraction for parallel wedges,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, no. 10, pp. 1532–1537, 1991.

- [15] M. Feuerstein, K. Blackard, T. Rappaport, S. Seidel, and H. Xia, "Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3 Part 1, pp. 487–498, 1994.
- [16] M. Ghoraiishi, J. Takada, and T. Imai, "Radio wave scattering from lampposts in microcell urban mobile propagation channel," *ECTI Transactions on Electrical Eng, Electronics and Communications*, vol. 7, no. 11 Part 2, 2009.
- [17] R. Caldeirinha, T. Fernandes, N. Leonor, and D. Ferreira, "Extension of the dRET Model to Include Scattering from Tree Trunks in Microcell Urban Mobile Scenarios," in *Proc. of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, pp. 1–5, 2010.
- [18] V. DiCaudo and W. Martin, "Approximate solution to bistatic radar cross section of finite length, infinitely conducting cylinder," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, p. 668, 1966.
- [19] W. Gordon, "Near field calculations with far field formulas," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1996. AP-S. Digest*, vol. 2, pp. 950–953, IEEE, 2002.
- [20] Y. Ouattara, *Développement d'une Approche Radar pour l'étude des réflexions sur les bâtiments et l'analyse des irrégularités de façade*. PhD thesis, Université Paris Est - MSTIC, 2010.
- [21] F. Bai and A. Helmy, *A survey of mobility models in wireless adhoc networks*, ch. 1. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [22] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications & Mobile Computing*, vol. 2, pp. 483–502, 2002.
- [23] B. Liang and Z. Haas, "Predictive distance-based mobility management for PCS networks," in *Proc. of the 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'99)*, vol. 3, pp. 1377–1384, 1999.
- [24] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. Chiang, "A group mobility model for ad hoc wireless networks," in *Proc. of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 53–60, 1999.
- [25] J. Tian, J. Hahner, C. Becker, I. Stepanov, and K. Rothermel, "Graph-based mobility model for mobile ad hoc network simulation," in *Proc. of the 35th Annual Simulation Symposium*, pp. 337–344, 2002.
- [26] A. Jardosh, E. Belding-Royer, K. Almeroth, and S. Suri, "Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks," in *Proc. of the 9th ACM Annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 217–229, 2003.
- [27] J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet, "Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 4, pp. 19–41, 2009.

- [28] M. Fiore, J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet, “Vehicular mobility simulation for VANETs,” in *40th Annual Simulation Symposium (ANSS’07)*, pp. 301–309, 2007.
- [29] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations,” *Physical Review E*, vol. 62, no. 2, pp. 1805–1824, 2000.
- [30] G. Antonini, M. Bierlaire, and M. Weber, “Discrete choice models of pedestrian walking behavior,” *Transportation Research Part B*, vol. 40, no. 8, pp. 667–687, 2006.
- [31] R. Guo, S. Wong, H. Huang, P. Zhang, and W. Lam, “A microscopic pedestrian-simulation model and its application to intersecting flows,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 389, pp. 512–526, 2010.
- [32] D. Helbing and P. Molnar, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Physical review E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286, 1995.
- [33] E. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
- [34] Observatoire des déplacements à Paris, “Le bilan des déplacements en 2008 à paris,” 2008. (French).

3

Impact de l'environnement proche sur le canal de propagation

Résumé

La première étape de la méthodologie que nous développons dans ce manuscrit est d'utiliser un outil de simulation déterministe fiable pour caractériser les dynamiques du signal dues aux mouvements du récepteur ou de l'environnement. Cette approche permet d'avoir un ensemble large de comportements dans divers environnements réels sans avoir à procéder à des mesures à vaste échelle. La plateforme de simulation décrite dans le chapitre précédent possède tous les mécanismes déterministes pour procéder à la prédiction de propagation dans des scénarios dynamiques. Elle inclut la simulation de mobilité et l'intégration de données enrichies statiques et dynamiques dans un outil de prédiction de propagation à base de rayons. Cependant, les choix des mécanismes prépondérants restent à valider et si besoin à ajuster pour être au plus proche de la réalité. Dans ce chapitre, nous proposons de comparer les résultats obtenus à des références connues, soit par une approche quantitative, basée sur des valeurs de métriques, soit par une approche qualitative, basée sur la reproduction d'un comportement moyen. Dans le cas où ces références ne sont pas connues, nous procéderons à des mesures. Ces mesures sont une première approche de la caractérisation de l'impact de l'environnement proche sur la dynamique du signal, mais sont limitées à un scénario précis. Une fois les mécanismes de la plateforme de la simulation validés, la réalisation de campagnes de simulation permettra de caractériser l'impact de différents facteurs de déploiement sur la propagation.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux dynamiques impliquées par le mouvement du récepteur, dans le cadre de petites cellules en extérieur. Une première étude, publiée dans une conférence européenne (1), portera sur l'impact du mobilier urbain sur le canal de propagation. La proportion de puissance due à l'ajout de lampadaires le long de la mobilité

d'un récepteur sera validée par comparaison avec des mesures existantes. De plus, l'enrichissement des contributions sera illustré par la répartition angulaire des angles horizontaux en émission.

- (1) G. Gougeon, Y. Lostanlen and L. Maviel, "Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, pp. 3448-3452, 2011.

Par la suite, nous confronterons les distributions des évanouissements à grande échelle, obtenues grâce aux simulations déterministes, avec les distributions définies dans les modèles analytiques majoritairement utilisés par la communauté scientifique. Nous montrerons en particulier que pour une caractérisation statistique similaire, les mécanismes de propagation mis en jeu sont de nature différente en petites cellules. Les résultats montrent également, en accord avec différentes études publiées en parallèle, que les corrélations des évanouissements ne peuvent pas être considérées uniformes dans l'espace.

Dans un deuxième temps, nous étudierons les dynamiques dues à la mobilité de l'environnement dans le cadre de petites cellules en extérieur, en particulier l'impact du trafic véhiculaire. Les quelques études présentes à ce sujet dans la littérature ont mis en évidence de fortes atténuations pour des véhicules larges, en environnement rural et urbain, mais l'impact des véhicules moins volumineux et les mécanismes mis en jeu ne sont cependant pas clairement identifiés. Nous proposons de valider par le biais de mesures les différents mécanismes de propagation que nous avons traités dans le chapitre précédent, en particulier l'hypothèse de structure métallique d'une voiture. L'identification de motifs d'évanouissements similaires pour un type de véhicule dans un scénario donné nous permet de confirmer ces mécanismes et d'ajuster des paramètres de modèles de propagation en les comparant à des résultats de prédictions déterministes. La description et l'analyse de ces mesures ont été publiées dans une conférence internationale (2).

- (2) L. Maviel, A. Cordonnier, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, "Measurements of large-scale variations caused by vehicular traffic in small-cells," in *Proc. of the 19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Jounieh, Lebanon, 2012.

Finalement, nous étudierons de manière globale l'impact de la hauteur d'antenne d'émission, qui est un des paramètres déterminants de l'influence du trafic véhiculaire. Cette étude sera réalisée par le biais d'une campagne de simulation permettant de collecter les distributions et les valeurs maximales de l'atténuation due au trafic véhiculaire dans divers environnements réels. L'augmentation de la hauteur d'antenne permet dans plusieurs configurations de diminuer la

probabilité de coupure, mais ne permet pas d'exclure les effets du trafic véhiculaire dans toutes les situations.

3.A. Impact de la mobilité du récepteur

3.A.1. Introduction

Le chapitre 1 a permis de mettre en avant différentes problématiques concernant l'utilisation de modèles analytiques initialement développés pour caractériser les dynamiques du signal dues aux mouvements du récepteur dans des configurations de macro-cellules. La première de ces problématiques est la différenciation des évanouissements en plusieurs échelles. Le modèle caractérisant les évanouissements le plus répandu associe deux composantes, chacune justifiée par un modèle physique [1]. La composante additive donne lieu à des évanouissements à petite échelle et la composante multiplicative donne lieu à des évanouissements à grande échelle. Les fondements physiques du modèle multiplicatif ont été remis en cause par plusieurs auteurs [2], [3], [4], sans pour autant remettre en cause les statistiques du modèle, confirmées par de nombreuses mesures. De plus, le modèle caractérisant les corrélations spatio-temporelles des évanouissements à grande échelle [5] paraît inadapté aux petites cellules.

La plateforme développée dans le chapitre 2 permet d'obtenir des prédictions réalistes du canal large-bande sans passer par des mesures à vaste échelle exigeant du matériel complexe. D'une part, l'ajout du calcul de phase permet une analyse de la recombinaison des rayons formant les évanouissements, et d'autre part, l'ajout du mécanisme de réflexion sur le sol et de la diffusion sur le mobilier urbain permet un enrichissement des contributions. Par souci de priorité, nous avons consacré plus de temps à la validation des modèles de propagation dans des situations d'environnement mobile. Dans cette partie, nous décrivons deux études réalisées dans des environnements urbains petites cellules. La première étude s'intéresse aux proportions de puissance induites par le mobilier urbain et ses répartitions angulaires. La deuxième étude porte sur le lien entre les mécanismes à la source des évanouissements grande échelle et la caractérisation de ces évanouissements.

3.A.2. Etude de l'impact des lampadaires

Dans cette première étude, nous analysons l'impact du mobilier urbain sur la puissance reçue par un récepteur mobile le long d'une route. Les études déjà citées sur le sujet, notamment l'étude qui nous sert de référence [6], ont montré que la puissance due au mobilier urbain en condition de visibilité directe atteint 25 à 30 % de la puissance totale hors trajet direct. Nous nous proposons de vérifier cette constatation en incluant le seul effet d'une rangée de lampadaire, et de valider ainsi le modèle de Surface Equivalent Radar en champ proche décrit dans le chapitre 2 comme modèle de diffusion sur les lampadaires. Une validation plus approfondie nécessiterait de procéder à des mesures spatio-temporelles large bande du canal qui sont, comme évoqué, lourdes et coûteuses. Le scénario de test est choisi à l'angle d'un croisement sur un large boulevard (cf. figure 3.1). L'émetteur est situé à une hauteur de 5 m et émet à 2 GHz grâce à une antenne

isotrope émettant une puissance de 0 dBm en polarisation verticale. Des récepteurs en polarisation verticale sont placés à une hauteur de 1,5 m tous les mètres le long de la route sur un des côtés du boulevard. Une partie de ces récepteurs est en condition de non-visibilité optique (NLoS).

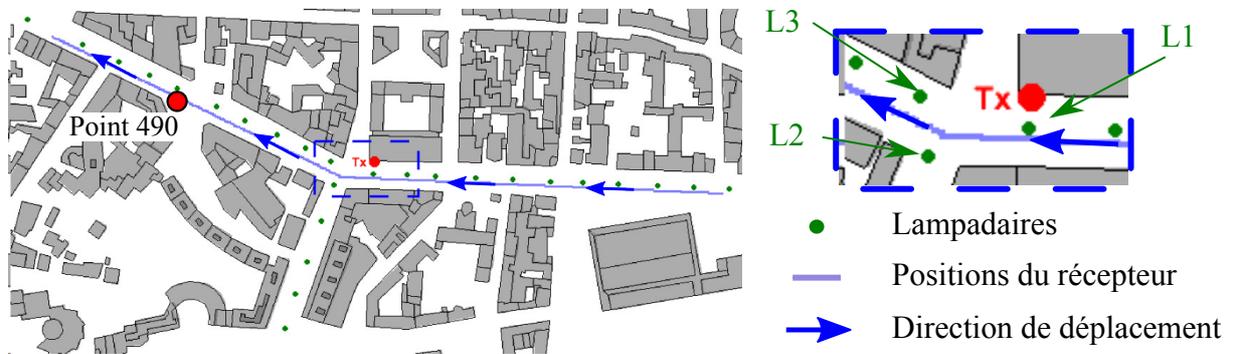


Figure 3.1 : Scénario pour l'étude de l'impact des lampadaires

Les résultats ont été obtenus en considérant une propagation classique à 4 réflexions maximales sur les murs et une diffraction à laquelle on vient ajouter la propagation à rebond unique sur les lampadaires décrite dans le chapitre 2. La figure 3.2 montre la proportion de puissance reçue venant de l'enrichissement par le mobilier urbain où elle atteint 88 % dans les parties en NLoS. La part moyenne de puissance diffusée est de 10 % dans la partie LoS et de 37 % dans la partie NLoS. Ces chiffres concordent avec les mesures réalisées dans l'étude de référence. En partie LoS, les lampadaires ne sont pas les seuls éléments de mobilier urbain à contribuer à la puissance diffuse, ce qui explique pourquoi le résultat obtenu (10 %) est plus faible que le résultat de référence (25 à 30 %). De plus, lorsque les récepteurs sont localisés derrière les lampadaires, la proportion de la puissance due au lampadaire est nulle. En effet, dans cette configuration, le champ du trajet direct est calculé comme la recombinaison du champ sans obstacle et du champ issu du lampadaire. En partie NLoS, le fort résultat obtenu (37 %) peut s'expliquer par l'absence de certaines contributions non modélisées, telles que la réflexion après diffraction ou la double diffraction.

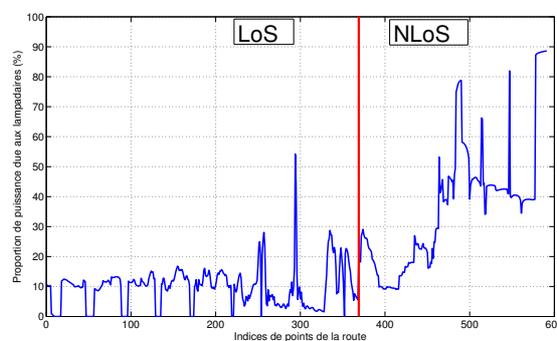
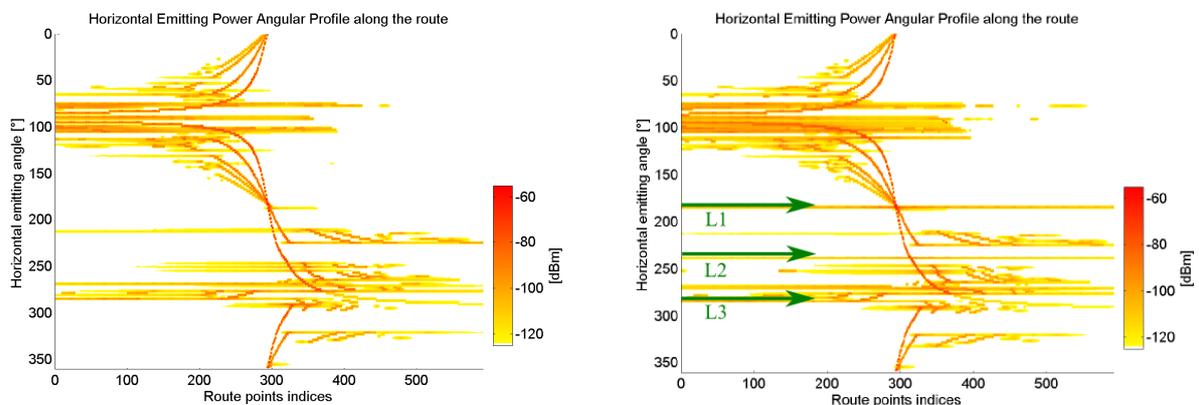


Figure 3.2 : Profil de puissance due au mobilier urbain le long de la route

L'introduction de contributions dues au mobilier urbain augmente l'étalement des retards et l'étalement angulaire en émission et en réception le long de la route. Cette augmentation s'explique par les contributions particulières des lampadaires L1, L2 et L3, qu'on peut voir sur la figure 3.1. Les contributions dues à ces lampadaires sont identifiées sur la figure 3.3, qui décrit le profil angulaire de puissance horizontal en émission le long du trajet du récepteur.

Sans le mobilier urbain, ce profil angulaire en émission est constitué de lignes de puissance constantes ou courbes. Les lignes de puissance constantes sont liées aux contributions dont le point d'interaction est fixe, quelle que soit la position du récepteur (diffractions). Les lignes de puissance courbes sont liées aux contributions dont le point d'interaction bouge avec le récepteur (trajet direct, réflexions). Les lampadaires et l'émetteur étant fixes, les angles d'émission, respectivement de 180° , 240° et 270° , sont constants le long de la route. De plus, ces lampadaires étant proches de l'émetteur, et également visibles de la majorité des récepteurs, leur contribution s'observe quasiment tout le long de la route. Les nouvelles contributions générées par la diffusion à rebond unique sur les lampadaires ont pour caractéristique la dépendance multiplicative de la puissance avec la distance d'incidence (de l'émetteur au diffuseur) et la distance de diffusion (du diffuseur au récepteur). Les résultats illustrent par conséquent un impact local du diffuseur lorsqu'il est proche du récepteur. Par équivalence, lorsque le diffuseur est proche de l'émetteur, il peut impacter les récepteurs sur de larges zones.



a. Modèle urbain – 4R1D

b. Modèle urbain – 4R1D avec mobilier urbain

Figure 3.3 : Profil d'angle d'émission horizontal le long de la route

La figure 3.4 montre le profil puissance-retard discret ainsi que le profil angulaire de puissance horizontal en émission au point n°490 de la route (NLoS). Les trois contributions des lampadaires sont clairement identifiées et sont aussi importantes que le trajet direct (obstrué) et les différents trajets réfléchis. La contribution de L1 en particulier est équivalente au trajet le plus fort, obtenu avec 4 réflexions.

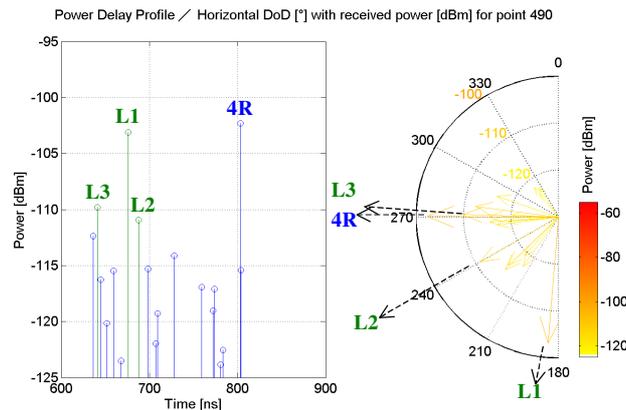


Figure 3.4 : Profil puissance-retard et profil angulaire horizontal en émission pour le point 490

L'enrichissement du modèle de prédiction permet une connaissance plus riche et plus réaliste du canal de propagation. Cet enrichissement se révèle en particulier utile lors de l'évaluation de technologies à multiples antennes (Multiple Input, Multiple Output) incluses dans les couches PHY des réseaux de nouvelle génération, en particulier l'exploitation de la diversité et de la sélectivité spatiale. Ces contributions permettent aussi une meilleure simulation des évanouissements à petite échelle. Pour des dimensions plus importantes de mobilier urbain (abribus, véhicules, ...), les diffuseurs peuvent également jouer le rôle d'obstacles pour le trajet direct ou d'autres trajets prépondérants. Dans le prochain paragraphe, nous allons étudier les phénomènes générant des évanouissements à grande échelle en petites cellules et l'impact du mobilier urbain.

3.A.3. Etude des évanouissements à grande échelle

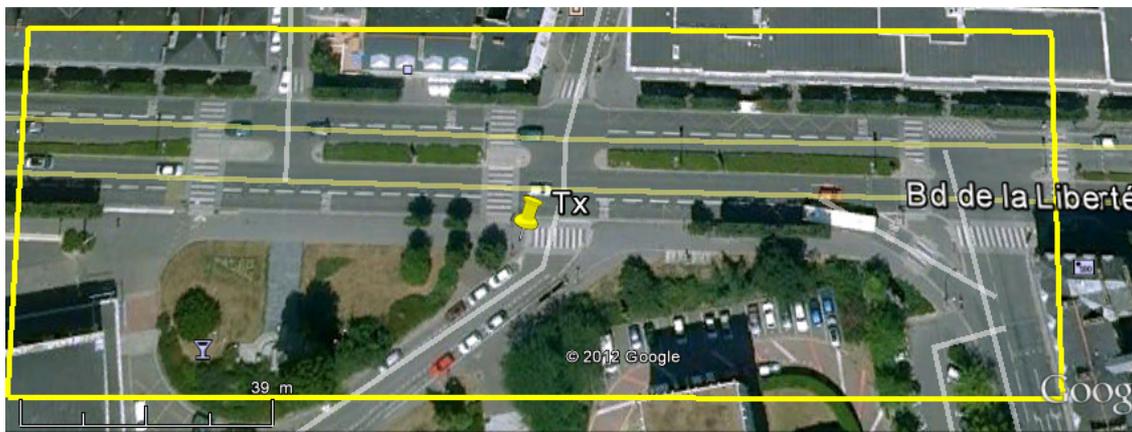
3.A.3.1. Métriques & scénarios

Nous avons vu que la caractérisation des évanouissements en petites cellules pouvait poser plusieurs problèmes. Parmi ces problèmes, la définition d'un seuil d'échelle pour la classification de l'évanouissement est difficile et la pertinence d'un modèle de corrélation uniforme dans l'espace reste à démontrer. Pour étudier les phénomènes d'évanouissement en petites cellules, nous allons comparer dans différents scénarios la puissance moyenne du signal P_{Ω} et la puissance recombinaison en phase des différents rayons P_r . Différents types d'environnement urbains d'une ville française de taille moyenne sont étudiés : un boulevard (figure 3.5a), une rue étroite (figure 3.5b) et finalement une place (figure 3.5c). Dans chacun de ces environnements, la différence de puissance en dB P_{ev} entre P_{Ω} et P_r est calculée selon (3.1). En plus de l'analyse visuelle des évanouissements, nous étudierons les caractéristiques statistiques de P_{ev} ainsi que sa corrélation spatiale.

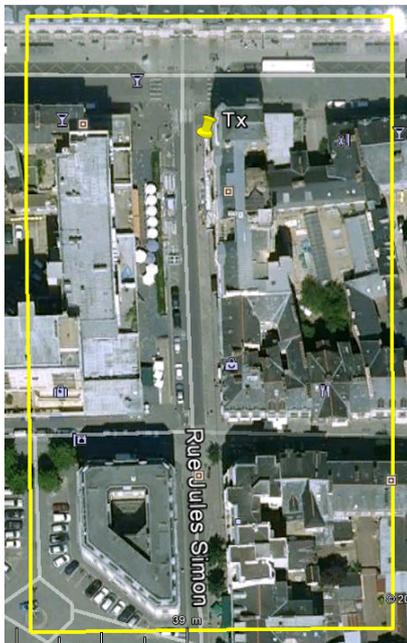
$$P_{ev} = P_{\Omega} - P_r \quad (3.1)$$

La différence de puissance P_{ev} obtenue décrit les variations de puissance, qui peuvent être négatives (évanouissements) ou positives (gain de puissance).

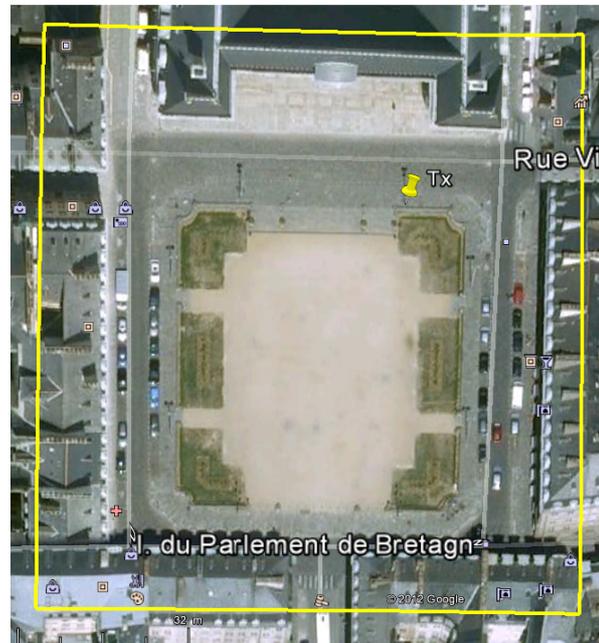
La fréquence utilisée lors des simulations est de 2,6 GHz, la hauteur de l'antenne d'émission est de 6 m. A cette fréquence, les valeurs communément utilisées pour le seuil d'évanouissement à grande échelle vont de 2,3 à 10,4 m, équivalant à un intervalle de 10 à 90 λ ([7], [2]). Lors du déplacement de l'utilisateur sur de telles distances, les jeux de rayons prépondérants restent relativement identiques car les diffuseurs principaux que sont les bâtiments et le sol sont de tailles plus importantes. Par la suite nous utilisons la syntaxe **XRYD+RS** pour décrire les types de trajets calculés. **X** représente le nombre de réflexions maximales sur les murs (**R**), **Y** le nombre de diffusions (**D**) maximales pour un trajet et **RS** le calcul de la réflexion sur le sol.



a. Environnement 1



b. Environnement 2



c. Environnement 3

Figure 3.5 : Scénarios d'étude des évanouissements à grande échelle

3.A.3.2. Prédiction « classique » de propagation

Dans un premier temps, nous étudions les évanouissements à grande échelle provoqués par les mécanismes classiques de propagation. Dans une configuration de petite cellule, le récepteur est la majorité du temps en visibilité directe de l'émetteur. Les évanouissements sont dus à la recombinaison des trajets réfléchis et diffractés sur les bâtiments, ainsi qu'au trajet réfléchi sur le sol. Nous allons étudier ces phénomènes de manière d'abord isolée puis conjointe.

Le premier phénomène étudié est la réflexion sur le sol. Ce phénomène associé au trajet direct donne le modèle à deux rayons évoqué dans le chapitre 2. Les variations du modèle à deux rayons sont bien connues : plus le récepteur s'éloigne de l'émetteur, plus l'amplitude des variations, centrées sur 0, augmente et plus la fréquence des variations diminue, jusqu'à atteindre la distance de rupture où la puissance du signal recombiné est ensuite proportionnelle à $1/d^4$. Dans les scénarios simulés et avec les paramètres de hauteur et de fréquence utilisés, la distance de rupture n'est jamais atteinte. Les variations du modèle à deux rayons se retrouvent sur les résultats de simulation (cf. figure 3.7). Les distributions et ses caractéristiques sont très semblables dans les trois environnements car les distances des zones de calcul sont proches. Comme attendu, la différence de puissance s'étend en cercles concentriques de plus en plus larges en amplitude et étalés en rayon. Cependant, la distribution logarithmique des évanouissements ne suit pas une distribution normale. Comme illustré sur la figure 3.6, la somme de deux champs complexes f_1 et f_2 , en prenant $|f_1| > |f_2|$, $\varphi(f_1)$ fixe et $\varphi(f_2)$ uniformément répartie entre 0 et 2π , donne une distribution asymétrique en échelle logarithmique.

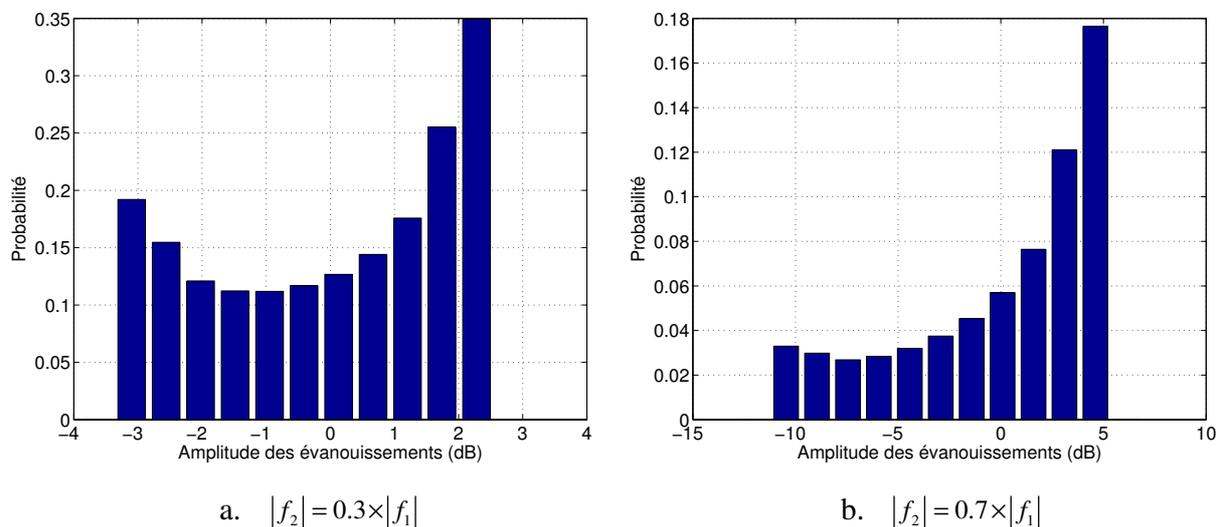


Figure 3.6 : Distribution logarithmique de l'amplitude des évanouissements pour l'addition de deux champs complexes

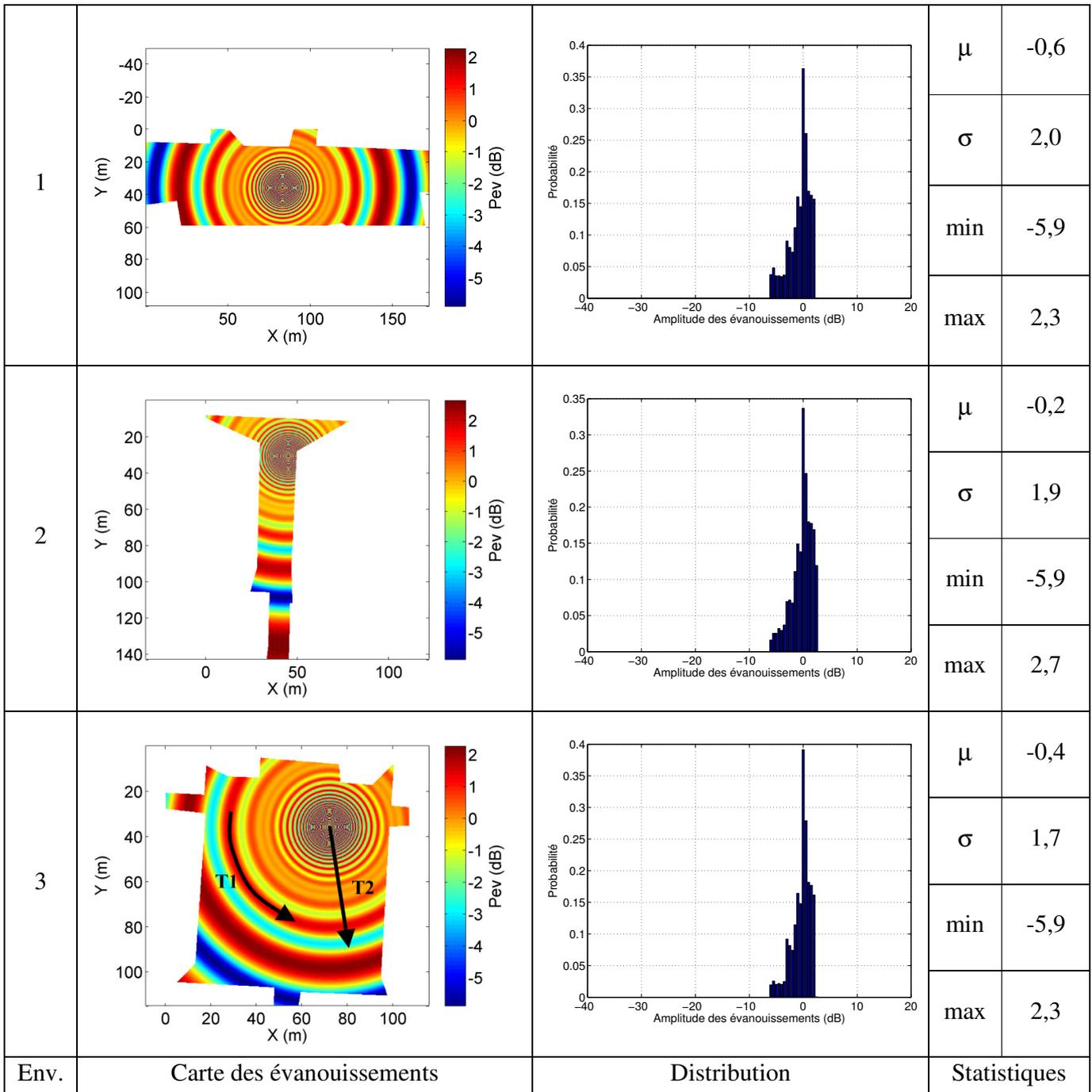


Figure 3.7 : $P_{ev} - (OR0D+RS)$

La corrélation des évanouissements n'est pas uniforme dans l'espace : si le récepteur se déplace sur un arc de cercle centré sur l'émetteur (trajet T1 sur la figure 3.7), l'évanouissement restera constant. Si l'on s'éloigne de l'émetteur en suivant une ligne droite (trajet T2 sur la figure 3.7), les évanouissements seront corrélés selon des distances qu'on peut établir en étudiant le modèle à deux rayons en 1D (cf. figure 3.8). La distance de corrélation est définie simplement ici

comme la différence de distance parcourue entre un maximum de la courbe des évanouissements et l'instant où la courbe dépasse la moitié de ce maximum (en linéaire). Pour la configuration radio donnée, la distance de corrélation est d'environ 12 m pour des récepteurs en bord de cellule ($d_{TxRx} \approx 100$ m). Pour des récepteurs en milieu de cellule ($d_{TxRx} \approx 50$ m), elle est d'environ 3,5 m. En effet, plus la différence de longueur entre le trajet diffusé et le trajet direct tend vers 0, plus la fréquence des évanouissements est faible. Dans le cas de la réflexion sur le sol, la distance sol-récepteur est constante (hauteur du récepteur). Plus le récepteur est loin de l'émetteur, plus la distance du trajet réfléchi sur le sol tend vers la distance du trajet réfléchi et plus longues sont les distances de corrélation.

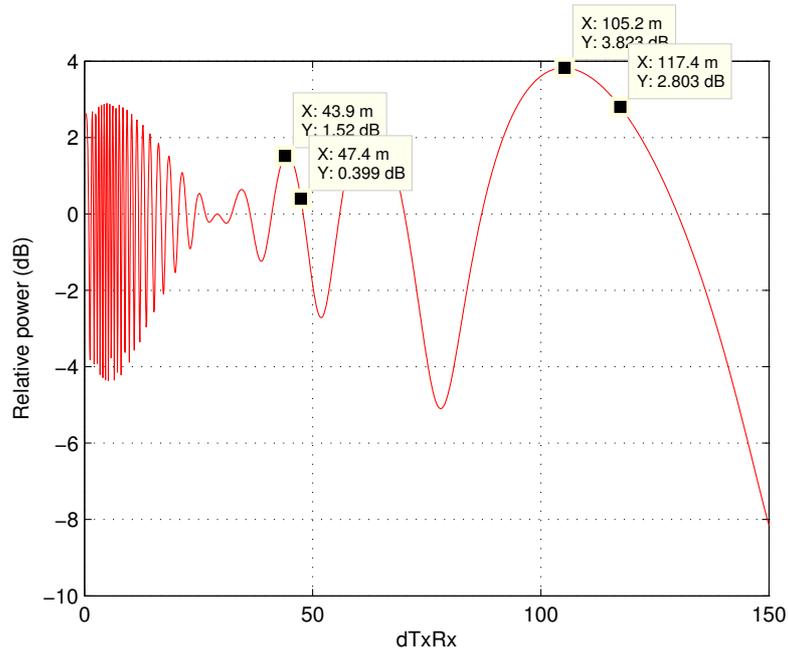


Figure 3.8 : Modèle à deux rayons et distances de corrélation

Le deuxième phénomène étudié est la réflexion sur les murs. La prédiction est calculée dans les mêmes environnements que précédemment, mais en n'autorisant qu'une réflexion maximale sur chaque plan vertical et pas de réflexion sur le sol. Les distributions des évanouissements sont environ centrées sur 0 (en logarithmique) et paraissent proches de distributions normales (cf. figure 3.9). De la même manière que pour la réflexion sur le sol, les valeurs des évanouissements ne sont cependant pas symétriques, avec une forte proportion de valeurs inférieures à -10 dB alors que la valeur maximale ne dépasse pas 10 dB.

Des extraits des cartes d'évanouissement, limités à un intervalle de [-10, 10] dB, ont été choisis afin de visualiser les phénomènes de recombinaison dans l'espace. Nous observons en particulier dans les environnements n° 1 et 2 des lignes de courbure sur lesquelles la puissance est identique. Le comportement décrit pour la réflexion sur le sol se retrouve lorsque le récepteur longe un mur (trajets T1 et T2 sur la figure 3.9). Plus le récepteur s'éloigne de l'émetteur en

longeant le mur, plus la fréquence des évanouissements est faible. De plus, la fréquence des évanouissements est plus faible lorsque le récepteur se déplace à une distance proche du mur. Dans le cas où plusieurs rayons réfléchis prépondérants sont présents dans une zone, les motifs de corrélations dans l'espace deviennent complexes, comme c'est le cas sur l'extrait de l'environnement n°3.

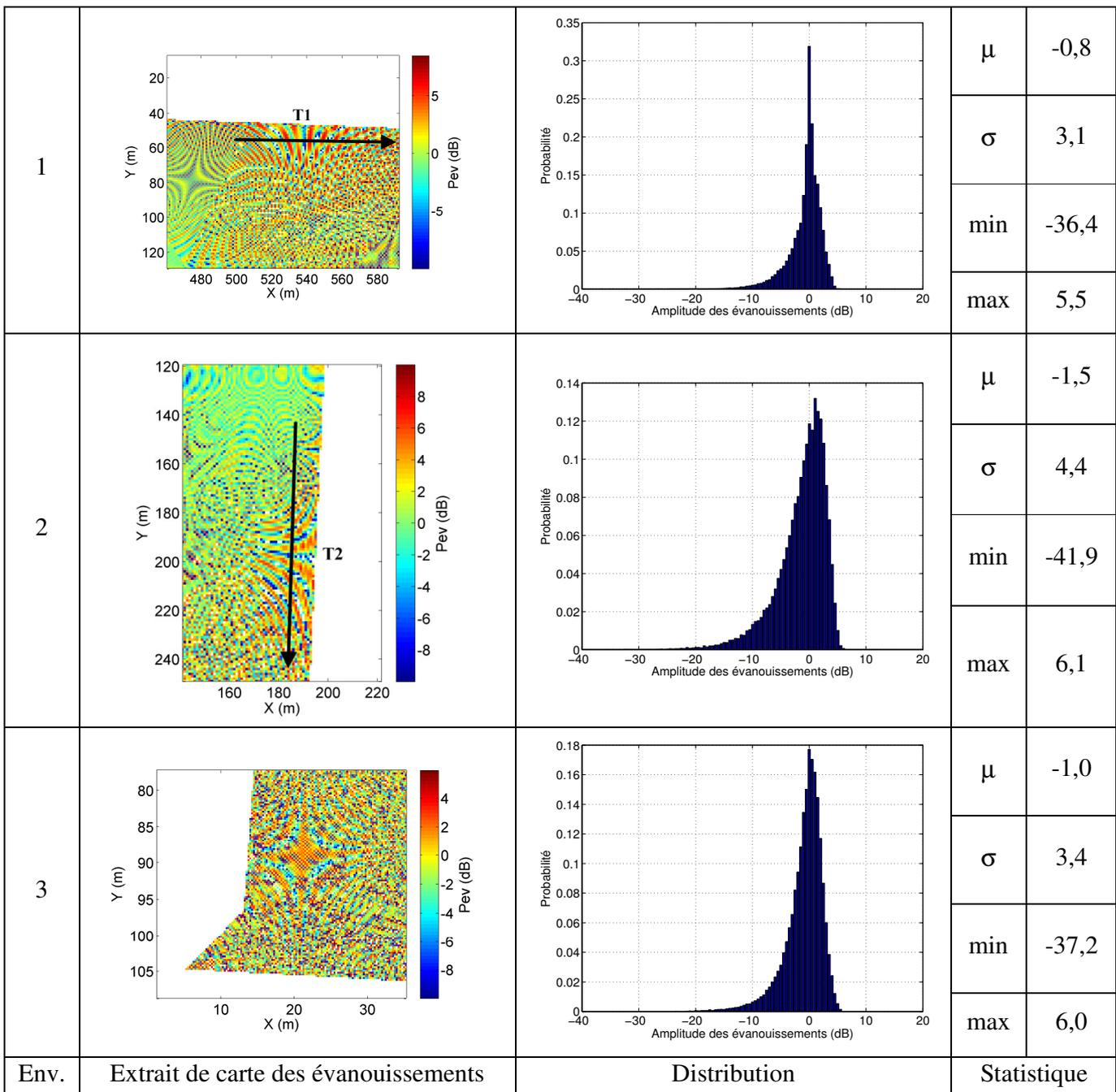


Figure 3.9 : $P_{ev} - (1R0D)$

Lorsque plusieurs rayons réfléchis atteignent le récepteur, des variations du signal à des fréquences plus fortes sont observées. Ce phénomène est illustré sur un chemin parcouru par un récepteur sur l'extrait de carte de l'environnement n°2 (cf. figure 3.10). Lorsque le récepteur longe un mur, la phase du rayon réfléchi sur le mur proche tend à évoluer à la même vitesse que celle du trajet direct. Cependant, la phase des rayons réfléchis sur les autres murs évolue plus rapidement, et leur recombinaison crée des évanouissements à petite échelle. Lorsque la recombinaison du trajet direct et du rayon prépondérant crée un fort évanouissement, la puissance relative des autres rayons devient plus importante, tendant vers une normalisation de la distribution des évanouissements à grande échelle en base logarithmique. Les évanouissements filtrés de la figure 3.10 illustrent cette normalisation. Le filtre passe-bas utilisé est le même dans les deux situations étudiées: prise en compte du rayon réfléchi sur le seul mur le plus proche ou des rayons propagés dans l'ensemble de l'environnement.

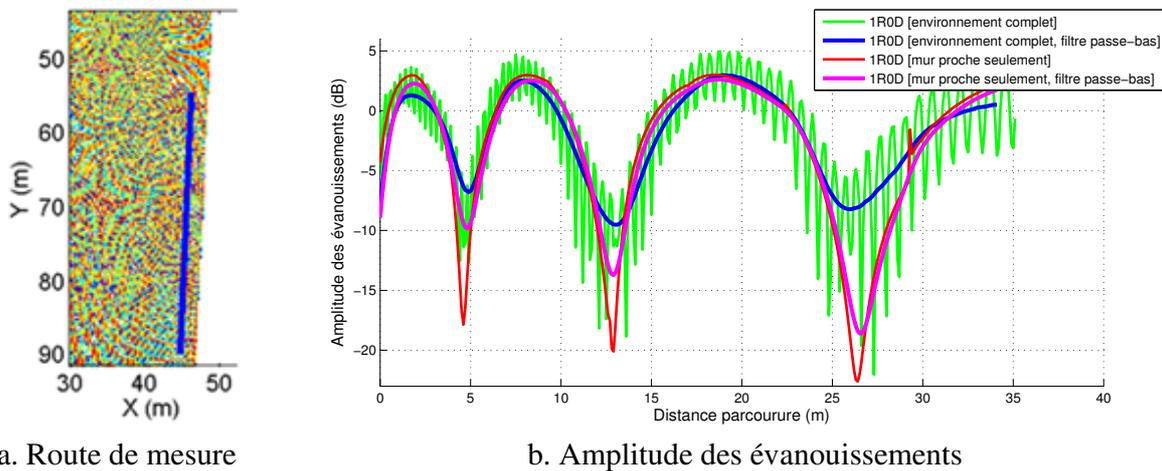


Figure 3.10 : Amplitude des évanouissements le long d'une route (1R0D, environnement 2)

Finalement, nous combinons les différents mécanismes : 2 réflexions maximales plus la réflexion sur le sol. Comme attendu, les distributions globales d'évanouissement observées sur la figure 3.11 ont tendance à s'éloigner de distributions normales centrées sur 0. La moyenne baisse d'environ 0,5 dB, tandis que l'écart-type augmente. Cette tendance reflète l'ajout de recombinaisons menant à des évanouissements à petite échelle.

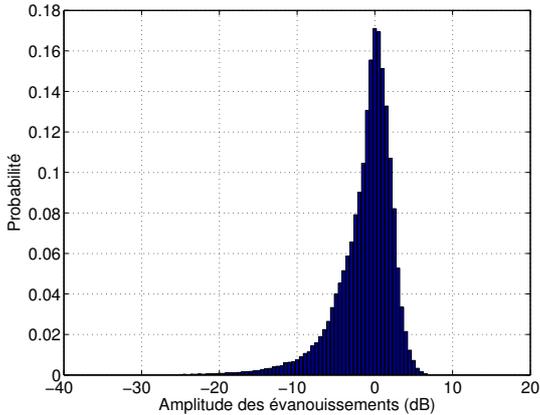
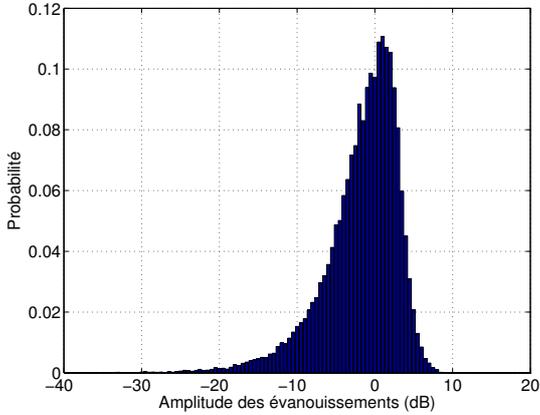
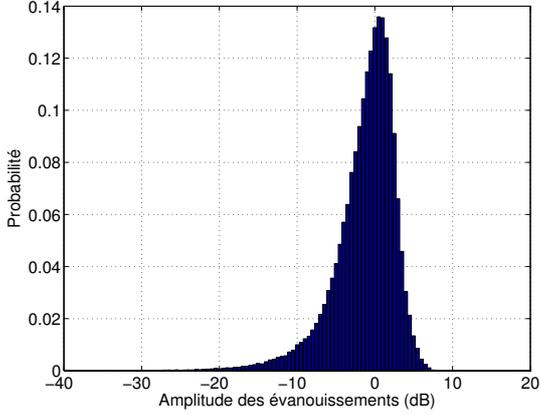
1		μ	-1,3
		σ	3,8
		min	-36,9
		max	7,6
2		μ	-1,78
		σ	4,9
		min	-43,4
		max	8,9
3		μ	-1,3
		σ	4,0
		min	-37,6
		max	8,1
Env.	Distribution	Statistique	

Figure 3.11 : $P_{ev} - (2R0D+RS)$

En conclusion, la séparation classique des évanouissements en différentes échelles est difficilement adaptable en petites cellules. En effet, dans le cas d'une scène vide de détails, il n'y a pas réellement d'objets jouant le rôle d'obstacle à la propagation et les évanouissements sont

uniquement dus aux recombinaisons des rayons. Certaines recombinaisons (réflexion sur le sol ou récepteur proches des murs) produisent des évanouissements à faible fréquence et peuvent être confondues avec des phénomènes de masquage mais sont de nature intrinsèquement différente. En isolant ces phénomènes de recombinaison à grande échelle, nous observons que les valeurs d'évanouissement (en logarithmique) ne sont pas distribuées suivant une loi normale. L'ajout des rayons secondaires fait cependant évoluer les évanouissements à grande échelle vers une distribution normale, allant dans le sens du modèle additif proposé par Salo [4]. Les distributions globales (petite et grande échelle) des évanouissements s'éloignent cependant de lois normales lorsque les mécanismes de propagation apportent des recombinaisons à des fréquences plus élevées.

L'établissement d'une distance de corrélation unique et uniforme dans l'espace pour les évanouissements à grande échelle en petites cellule s'avère impossible pour plusieurs raisons. En effet, nous avons montré que les échelles des évanouissements apportés par les recombinaisons sont différentes selon la position du récepteur par rapport aux diffuseurs et également selon son évolution dans l'espace. Ces conclusions ont été récemment partagées par une étude par simulation portant sur les évanouissements à grande échelle dans des environnements denses de type micro-cellules [8]. Les auteurs montrent que, dans une configuration NLoS, la distance de corrélation lorsque l'utilisateur longe un mur est plus grande que lorsqu'il traverse une rue. Finalement, il faut compter sur le fait que les variations analysées dans cette étude dépendent de la fréquence et de la hauteur des antennes, ce qui rend encore moins générique l'adoption d'un modèle unique de corrélation.

3.A.3.3. Ajout du mobilier urbain

Contrairement au cas de prédiction de propagation dans une scène vide de détails, l'ajout du mobilier urbain permet de modifier localement le jeu de rayons : les éléments ajoutés jouent le rôle de diffuseur mais peuvent aussi obstruer les rayons, en particulier le trajet direct. De plus, les tailles des obstacles ajoutés sont du même ordre de grandeur que le seuil de différenciation d'échelle pour les évanouissements. Nous étudions le cas d'un mobile qui évolue le long d'une route bordée par des véhicules stationnés, dans les mêmes scénarios qu'au paragraphe précédent. Trois routes sont choisies dans chaque environnement (cf. figure 3.12). La puissance des évanouissements P_{ev} est calculée de la même manière que précédemment, en utilisant l'équation (3.1). Pour chaque scénario, une simulation de Monte Carlo sur 100 tirages permet de varier le placement des véhicules stationnés le long de la route. Pour chaque instance de la simulation Monte Carlo, les véhicules sont placés de manière aléatoire et la prédiction de propagation est calculée. La densité de véhicules stationnés est de 50 %, partagée entre des voitures (70%), des utilitaires (10%) et des camions (20%). Les distributions de P_{ev} dans chaque scénario sont calculées sur l'ensemble de la simulation Monte Carlo. On n'inclut dans la prédiction de

propagation que les mécanismes prépondérants générateurs de phénomène à grande échelle : 1 réflexion maximum sur les murs, la réflexion sur le sol et l'obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel par les véhicules, dont la validation est traitée dans la partie B de ce chapitre.

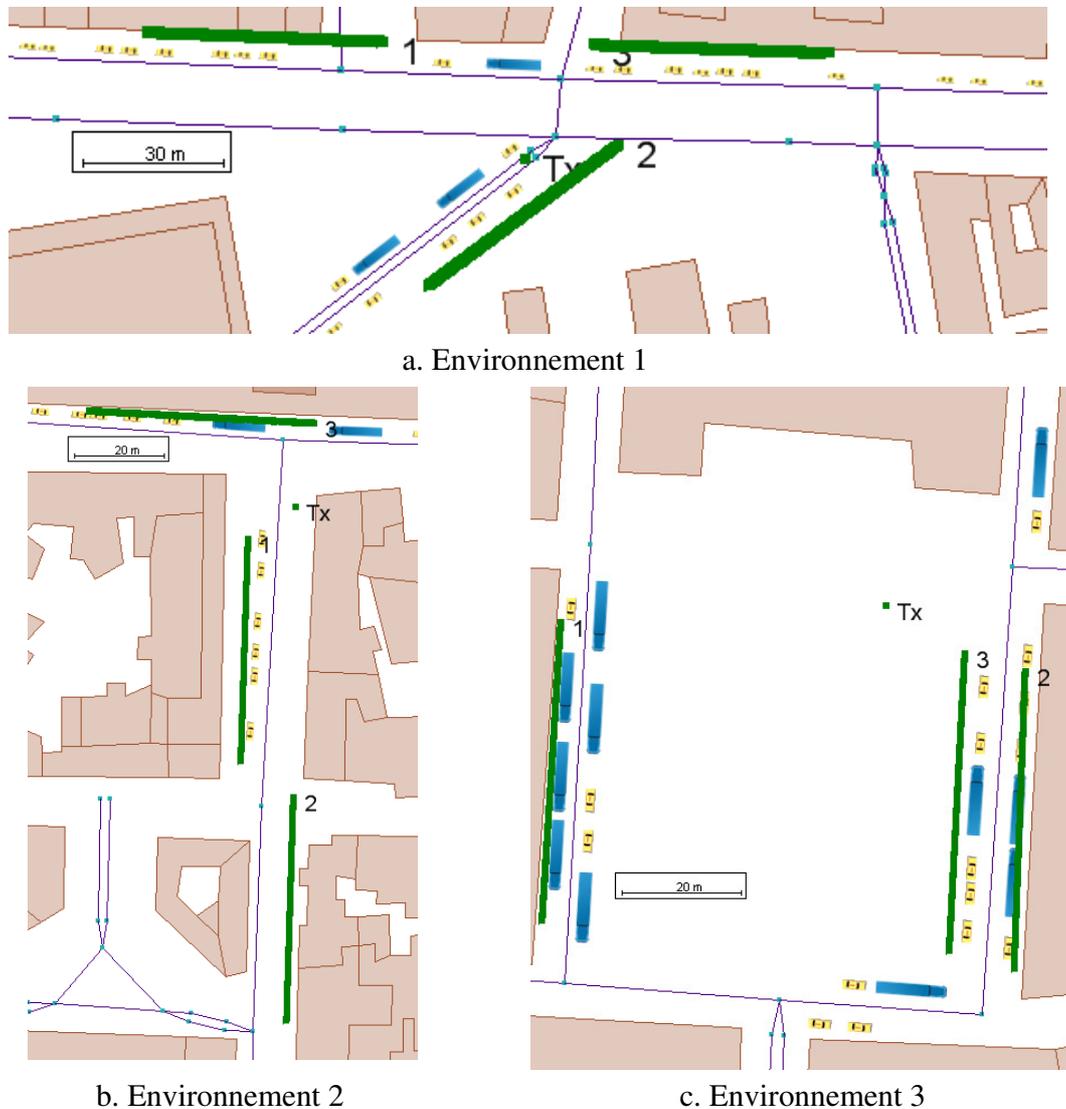


Figure 3.12 : Routes de simulation pour l'étude de l'évanouissement dû au mobilier urbain et illustration de génération de voiture le long des rues

Les figure 3.13, figure 3.14 et figure 3.15 montrent les statistiques de P_{ev} pour chacune des routes étudiées. La configuration **V** désigne les résultats avec les véhicules, la configuration **MP** sans (MultiPath). Les résultats observés peuvent être regroupés en trois catégories.

Les scénarios du premier groupe sont ceux où les véhicules stationnés ne sont pas dans le trajet direct mais peuvent gêner la propagation des trajets réfléchis sur les murs. C'est le cas de la route n°2 dans l'environnement 2 (figure 3.14b) ou de la route n°3 dans l'environnement 3

(figure 3.15c). Les statistiques des évanouissements sont globalement identiques, malgré une légère baisse de la puissance moyenne (0,2 à 0,4 dB).

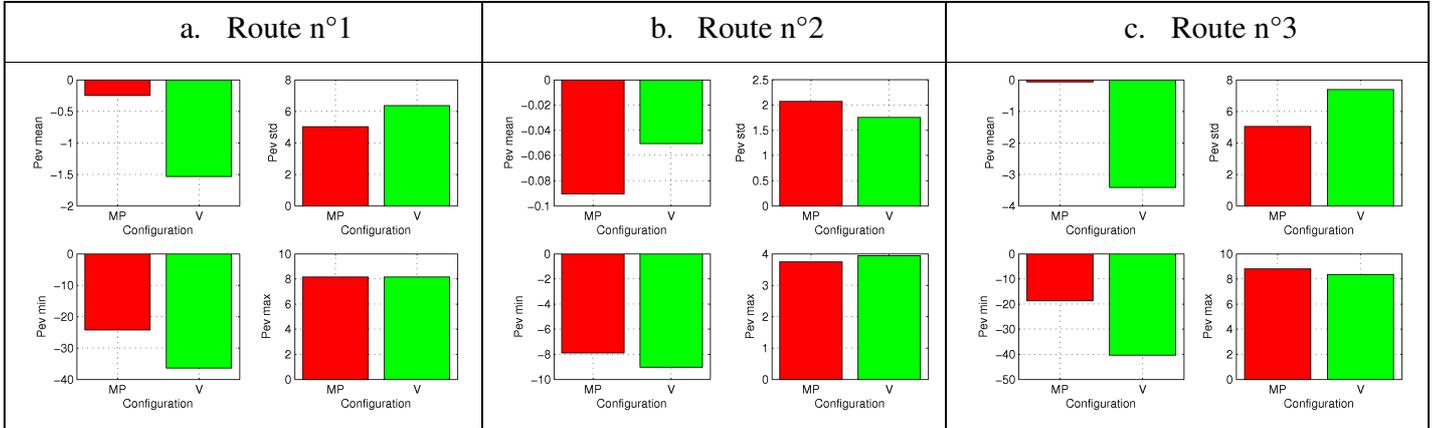


Figure 3.13 : Statistiques comparées de P_{cv} avec et sans véhicules stationnés (Env. 1)

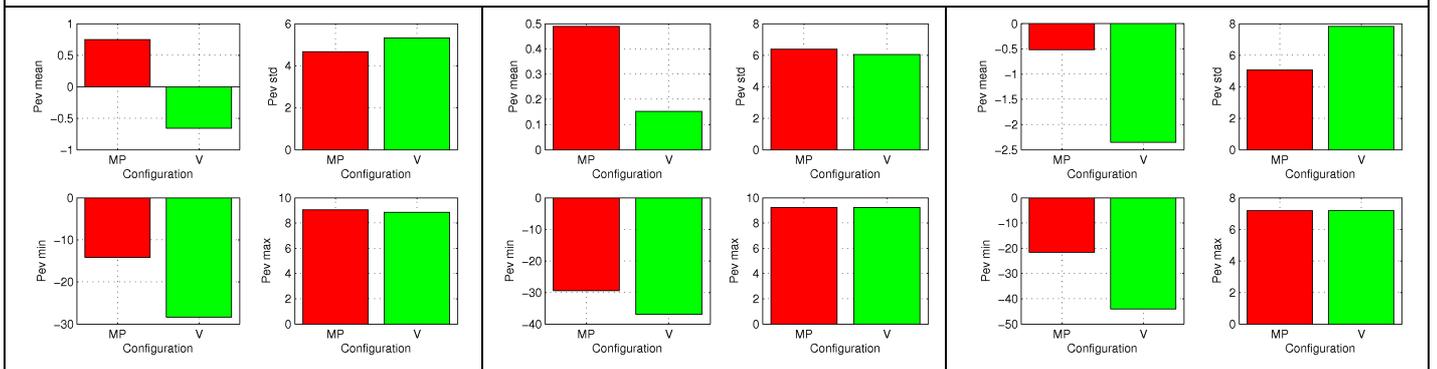


Figure 3.14 : Statistiques comparées de P_{cv} avec et sans véhicules stationnés (Env. 2)

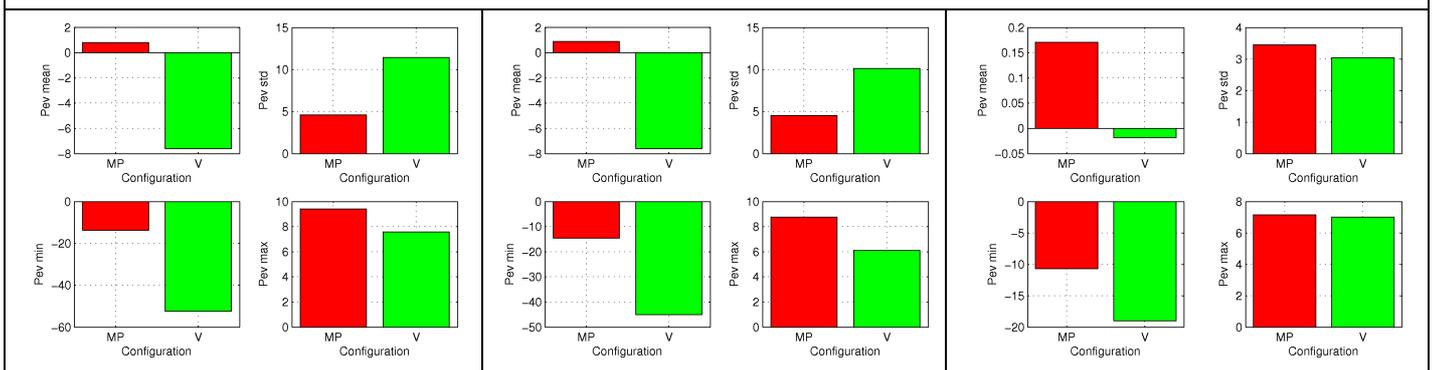


Figure 3.15 : Statistiques comparées de P_{cv} avec et sans véhicules stationnés (Env. 3)

Les scénarios du deuxième groupe sont ceux où les véhicules stationnés sont dans le trajet direct mais n'obstruent le premier ellipsoïde de Fresnel qu'à de faibles degrés. C'est le cas de la route n°2 dans l'environnement 1 (figure 3.13b). La moyenne de la puissance des variations se

rapproche de 0, et sa variance diminue. En effet la réflexion sur le sol est souvent coupée, ce qui limite l'amplitude et la dispersion des variations.

Dans tous les autres scénarios, les véhicules obstruent à des degrés plus ou moins forts le premier ellipsoïde de Fresnel. Dans ces scénarios, une augmentation de l'amplitude des évanouissements est observée. D'une part la puissance moyenne des évanouissements diminue suivant les scénarios de 1 à 7 dB. Les scénarios les plus touchés sont les scénarios de l'environnement 3, où deux rangées de véhicules stationnés obstruent le lien radio. D'autre part, l'écart-type des variations augmente.

En conclusion, l'impact des véhicules stationnés sur les évanouissements d'un récepteur mobile piéton dépend de leurs positions relatives. Les statistiques des évanouissements varient peu, sauf lorsqu'une ou plusieurs rangées de véhicules obstruent le trajet direct. Dans ce cas-là, des phénomènes de masquage locaux se produisent. Les évanouissements observés ont lieu sur des distances égales ou supérieures à la longueur des véhicules, c'est-à-dire à une grande échelle. Les mécanismes de propagation étant essentiellement des masquages aboutissant à des atténuations, l'utilisation d'un modèle log-normal n'est pas approprié.

Dans la prochaine partie, nous nous intéressons également aux évanouissements dus aux véhicules, mais dans le cas de liens fixes. Nous avons vu que les véhicules stationnés peuvent impliquer des masquages forts. Nous nous intéressons donc aux dynamiques impliquées par la mobilité des véhicules, et notamment la durée et l'amplitude des atténuations.

3.B. Impact du trafic de véhicules

3.B.1. Introduction

Nous avons vu dans le chapitre 2 que les modèles stochastiques de variation temporelle du signal prennent rarement en compte la mobilité de l'environnement au profit de la mobilité du récepteur. La dynamique dans le canal de propagation peut cependant être apportée par la mobilité des objets interagissant avec l'onde émise. Dans un cas urbain et petites cellules, nous nous intéressons plus particulièrement à l'impact du trafic véhiculaire sur les variations à grande échelle du signal pour un lien radio fixe. Ce sujet a déjà été traité par quelques études, dans des environnements ruraux et urbains (cf. chapitre 1.C.3). Dans le but d'étendre les conclusions de ces études ainsi que de valider et ajuster les choix de mécanismes de propagation implémentés dans la plateforme de simulation dynamique, nous avons choisi de procéder à des mesures. Le matériel de mesure radiofréquence présent à SIRADEL ne nous permet pas d'effectuer une analyse très fine du canal de propagation large-bande et d'obtenir pour chaque ensemble de rayons, la direction d'arrivée et le retard. Cependant, des mesures de la puissance reçue permettent d'apporter suffisamment d'information pour envisager une approche qualitative.

3.B.2. Mesures

3.B.2.1. Scénarios

Le but fixé lors de la définition des scénarios est d'avoir un ensemble de mesures suffisant pour pouvoir valider et ajuster les mécanismes de propagation. Une phase de pré-étude a été réalisée de manière contrôlée, afin de bien connaître le matériel et ses limites, de montrer l'impact d'un objet statique obstruant le rayon direct et d'avoir une première idée de la dynamique du signal lors du passage d'un véhicule. Afin de contrôler les perturbations, l'environnement sélectionné doit posséder un nombre limité d'objets diffuseurs et le positionnement du véhicule dans le lien doit pouvoir être maîtrisé. Nous avons choisi pour cela le parking vide d'une université (figure 3.16).



Figure 3.16 : Environnement de mesure statique

Dans le premier scénario d'étude statique, un lien radio de longueur d_{TxRx} de 14 m est constitué d'un émetteur (noté Tx) dont l'antenne est installée sur un mât télescopique à des hauteurs de respectivement 3,6 m (noté **L**), ou 6,5 m (noté **H**) et d'un récepteur (noté Rx), dont l'antenne est installée sur un mât fixe à 1,5 m. Le lien radio coupe perpendiculairement le trajet imaginaire d'un véhicule (cf. figure 3.17). La puissance reçue est mesurée en éloignant progressivement le véhicule du récepteur de la distance d_{RxV} avec un pas de 1 m. Ce scénario est répété en variant la position du récepteur le long du trajet du véhicule, pour des distances d_2 respectives de 28 et 56 m. Ces configurations permettent d'obtenir des liens obliques à la route et de distance plus larges.

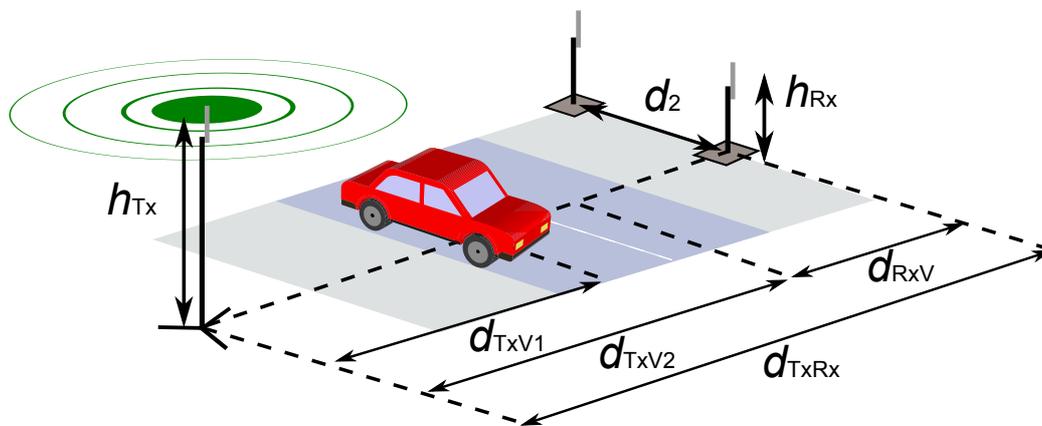


Figure 3.17 : Agencement des scénarios de mesure

Par la suite, les mesures ont été effectuées de manière dynamique dans des environnements de type urbain. Afin de disposer d'un ensemble suffisant de mesures, nous avons sélectionné deux environnements, notés **A** et **B** dans une ville française de taille moyenne. Dans chacun de ces environnements, des immeubles de 4 étages entourent les composants du lien radio mesuré (cf. figure 3.18). La largeur de la chaussée est plus étroite et les immeubles plus denses dans l'environnement A. Le lien radio mesuré est identique au scénario statique et se situe de part et d'autre d'une route à double sens. Pour les deux environnements, deux orientations de lien radio ont été testées. Dans la première configuration (notée \perp), le lien est perpendiculaire à l'axe du trafic véhiculaire. Dans la deuxième configuration (notée α), Rx est déplacé parallèlement à la route. Les valeurs de distance dans les différentes configurations sont illustrées sur la figure 3.17 et formulées dans le tableau 3.1.

Par la suite, l'association des notations pour chacun de ces trois paramètres (hauteur d'antenne d'émission, environnement et orientation du lien) forment un ensemble de configurations. Par exemple, les configurations **AH** se réfèrent à l'ensemble des jeux de mesures dans l'environnement A, avec une antenne à l'émission haute, et quelle que soit l'orientation du lien.



Figure 3.18 : Environnement de mesure dynamique (B)

Tableau 3.1 : Scénarios de mesure et notations

		<i>Environnement</i>	
		A	B
Largeur de rue (m)		14	20
d_{TxV1} (m)		3,5	6
d_{TxV2} (m)		6,5	11
d_{TxRx} (m)		12	15
h_{Tx} (m)	Low	3,6	
	High	6,5	
d_2 (m)	\perp	0	
	α	46	48
h_{Rx} (m)		1.5	

3.B.2.1. Matériel et processus de mesure

Afin de procéder aux mesures, nous disposons d'un générateur d'ondes continues dans la bande de fréquence de 2 GHz. La puissance transmise par l'antenne est de 9,3 dBm en tenant compte des pertes dues au câble. Les antennes utilisées en émission et en réception sont des antennes multi-bandes en polarisation verticale de gain de 2 dBi. Elles sont omnidirectionnelles dans le plan horizontal, et ont un angle d'ouverture de 80° dans le plan vertical. La puissance reçue est acquise en utilisant un analyseur de spectre sur une largeur de bande de 50 kHz et à une résolution de 1 ms. L'analyseur de spectre est contrôlé depuis un ordinateur portable sur lequel les mesures sont enregistrées. La chaîne de mesure est illustrée sur la figure 3.19.

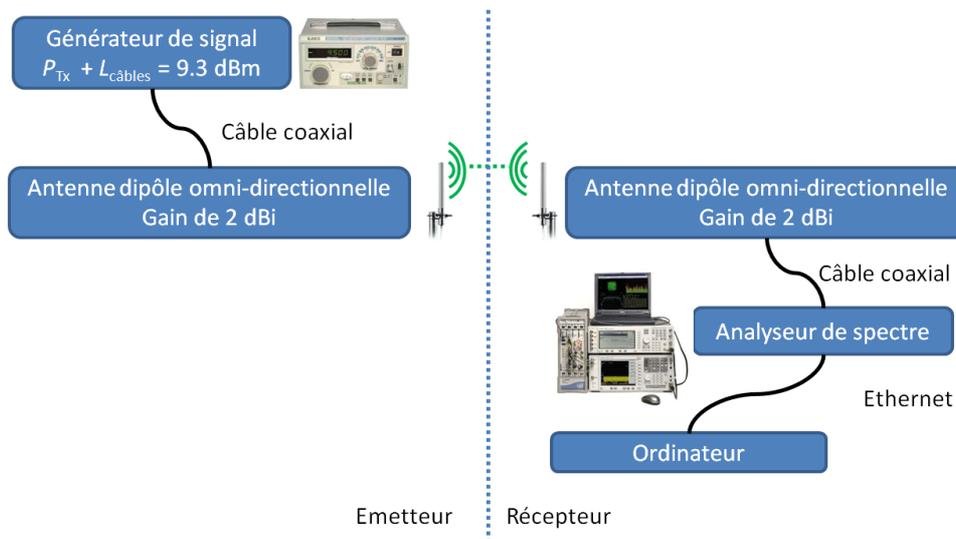


Figure 3.19 : Chaîne de mesure

Afin d'observer l'impact des évanouissements locaux dus à la diversité spatiale, chaque configuration est divisée en 4 points aux coins d'un carré de 30 cm, comme illustré sur la figure 3.20. Chaque session de mesure dure 15 minutes pour une configuration et un point local donné. Durant une session, les instants de passage des véhicules sont enregistrés manuellement, avec une incertitude d'une seconde. En plus des instants de passage, l'enregistrement vidéo réalisé par webcam permet de reconstituer la scène. Les véhicules obstruant le lien radio sont classés en trois catégories : les bus, les utilitaires et les voitures. Nous effectuons aussi une sous-catégorisation en fonction de la distance entre le sens du trafic et le récepteur : plus proche du récepteur ou plus proche de l'émetteur.

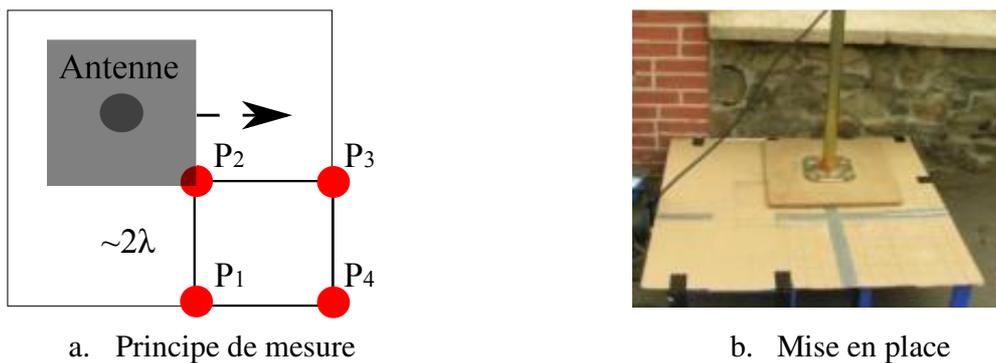


Figure 3.20 : Mesure de la diversité spatiale locale

3.B.2.2. Post-traitement

Afin d'étudier les variations de type grande échelle de la puissance du signal il faut lui soustraire deux types de puissance que nous ne contrôlons pas forcément : les variations rapides

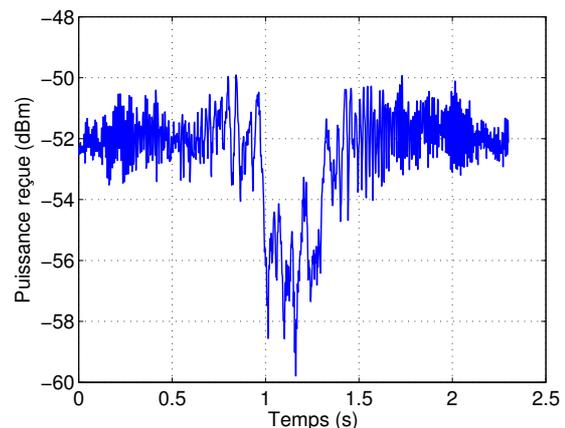
du signal et sa puissance moyenne statique. D'un côté, les déplacements d'autres objets présents dans le canal de propagation (par exemple la végétation) et le bruit interne à l'appareil de mesure créent des fluctuations rapides du signal. La suppression de ces variations est une première étape pour isoler les variations de type grande échelle. Pour cela, un filtre passe-bas à réponse impulsionnelle finie de type Equiripple est utilisé avec une fréquence de coupure normalisée de 0,025 [9]. D'un autre côté, la puissance moyenne enregistrée lors d'une session peut varier sur le long-terme, par exemple si un véhicule se gare près du récepteur. Pour chaque session de mesure, les moments ne présentant pas de passage de véhicule sont isolés afin de calculer la puissance moyenne statique. Lorsqu'il y a des disparités importantes de puissance moyenne à l'intérieur d'une même session (par exemple, déplacement d'un véhicule proche du récepteur), le jeu de mesure est ignoré.

En retirant les fluctuations rapides et la puissance moyenne statique, nous obtenons l'amplitude des variations à grande échelle dues au passage des véhicules. De plus, le processus de mesure permet d'avoir une certaine diversité spatiale : pour chaque lien mesuré, 4 jeux de mesure sont disponibles avec un évanouissement local différent. La puissance moyenne locale est calculée en moyennant les puissances moyennes statiques des 4 points. Les jeux de mesure dont la puissance moyenne statique est inférieure (recombinaison locale destructrice) ou supérieure (recombinaison locale constructive des rayons) de 10 dB à la puissance moyenne locale sont ignorés.

En se basant sur les jeux de mesure sélectionnés, les résultats de variation de signal sont comparés aux enregistrements des passages de véhicule. Le premier résultat de ces mesures est un résultat visuel : il est possible dans la plupart des configurations d'identifier la variation du signal au passage d'un véhicule, comme illustré sur la figure 3.21. On appellera par la suite la variation du signal due à un véhicule 'événement' ou 'jaillissement'.



a. Utilitaire coupant le lien radio



b. Variation de puissance du signal reçu

Figure 3.21 : Capture d'écran d'un passage de véhicule et variation du signal

La variation du signal observée n'est pas discontinue : la phase d'atténuation, dite de plateau, est précédée et suivie d'une phase d'oscillations. Pour un type de véhicule dans une configuration donnée, les durées et amplitude d'un événement sont très proches.

Afin d'avoir des statistiques concernant l'amplitude et la durée moyenne de chaque partie de la variation du signal, nous avons mis en place un processus de post-traitement sous forme d'identification par motif, illustré sur la figure 3.22. Nous choisissons de représenter l'évolution de la puissance reçue par une forme simplifiée appelée motif. Un motif est défini par un ensemble de segments représentant différentes phases associées au passage d'un véhicule. La première étape est la définition visuelle d'un motif moyen, dit de référence, pour un type de véhicule et une configuration donnée. Une fois qu'un motif de référence est spécifié, une première recherche par corrélation croisée basée sur le temps de passage manuel permet de recalibrer le motif sur la variation de signal obtenue (étape 1 sur la figure 3.22). On applique également le filtrage et la soustraction de la puissance moyenne. Ensuite, une optimisation des segments par un algorithme à régions de confiance [10] permet de déterminer précisément pour chaque événement la durée et l'amplitude de chaque segment du motif (étape 2 sur la figure 3.22). L'ensemble des motifs obtenus pour une configuration permet alors d'établir un motif moyenné ainsi que les distributions de durée et d'amplitude maximale que nous allons étudier par la suite.

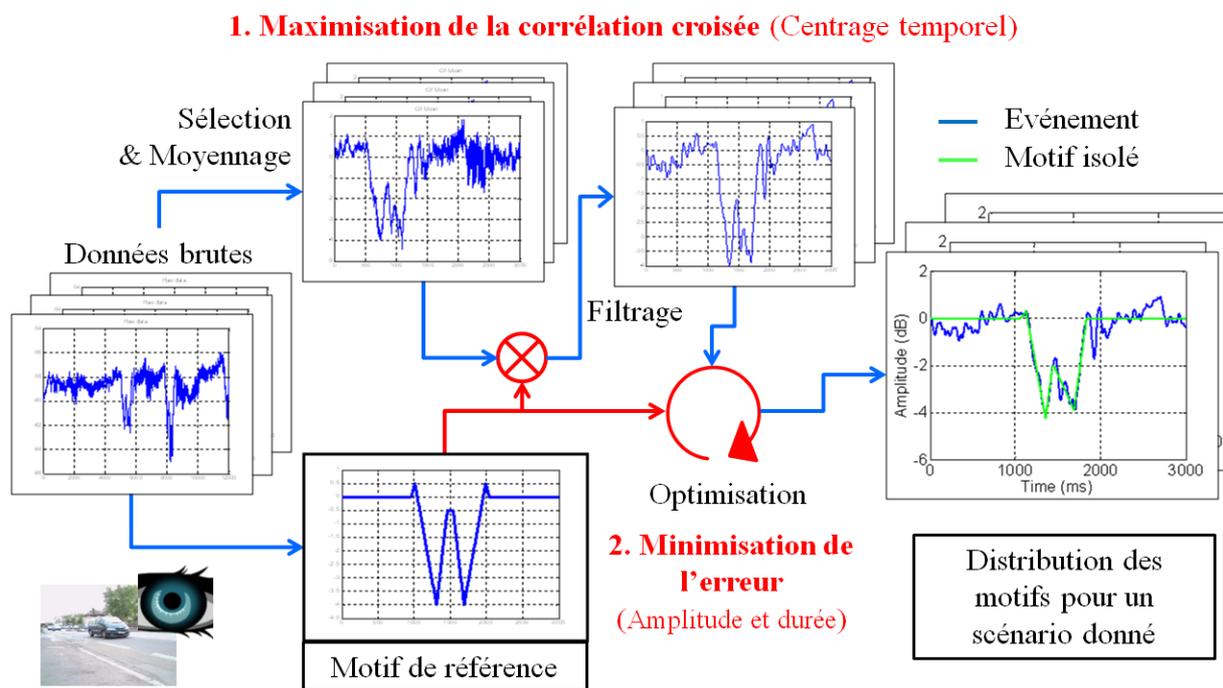


Figure 3.22 : Processus d'identification par motif

3.B.2.3. Résultats

Scénario statique

Nous allons étudier en premier lieu les résultats de la pré-étude en conditions statiques contrôlées. Ces résultats sont synthétisés dans la figure 3.23. Nous observons tout d'abord que le placement d'un utilitaire au milieu d'un lien radio provoque de manière logique un impact plus fort que le celui d'une voiture, de hauteur plus faible.

Pour la voiture, l'impact sur la puissance est faible dans des conditions de lien perpendiculaire ($d_2 = 0$ m). Que l'antenne soit à 3,6 m ou à 6,5 m, l'amplitude des puissances relative ne dépasse pas 2 dB. Pour des liens obliques en revanche, l'atténuation peut atteindre 4 à 6 dB lorsque la voiture est proche du récepteur. Cet impact diminue lorsque la voiture s'éloigne du récepteur et lorsqu'on augmente la hauteur de l'antenne d'émission.

Pour l'utilitaire, une forte atténuation de 5 à 12 dB est présente quelle que soit la configuration et la hauteur de l'antenne d'émission lorsque le véhicule est proche du récepteur. De même manière que pour la voiture, cet impact diminue en éloignant le véhicule du récepteur et/ou en augmentant la hauteur de l'antenne d'émission.

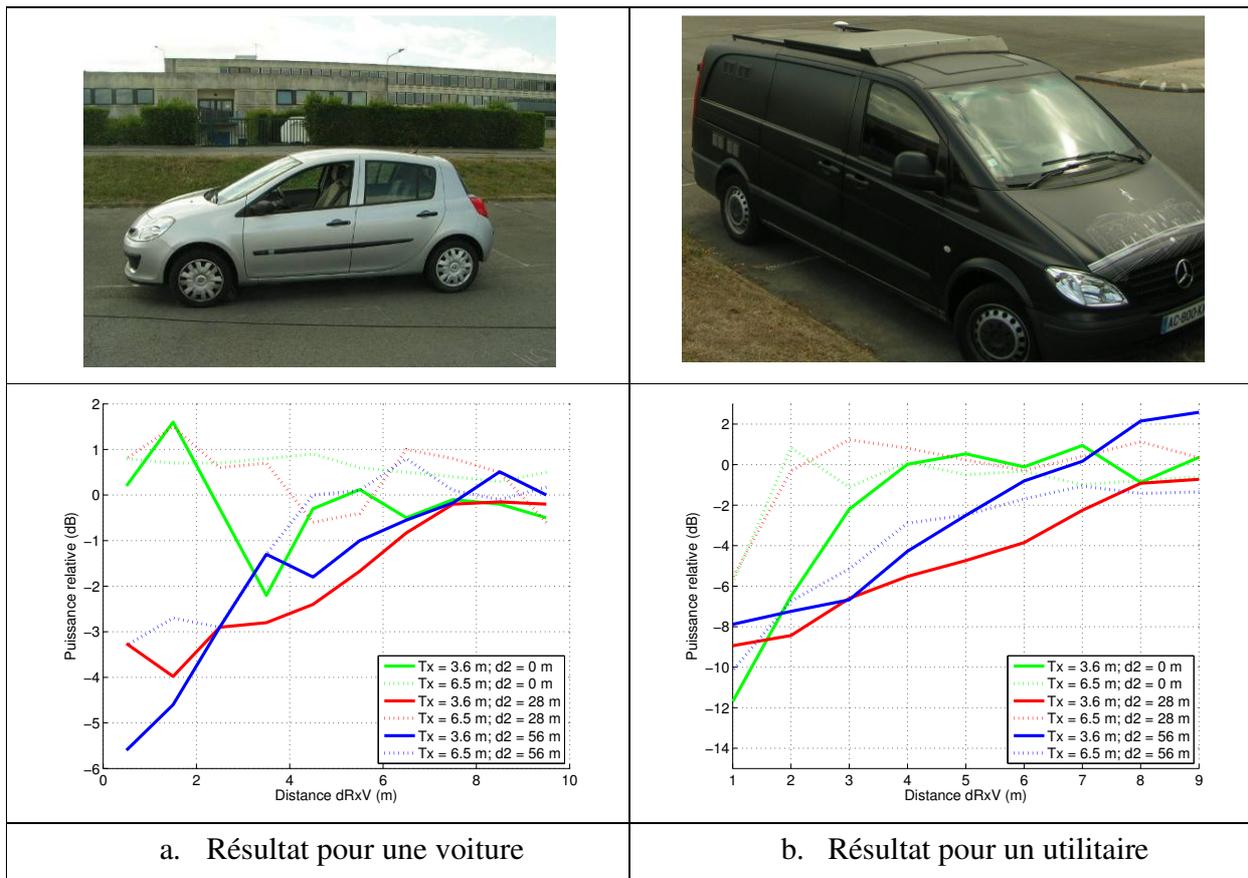
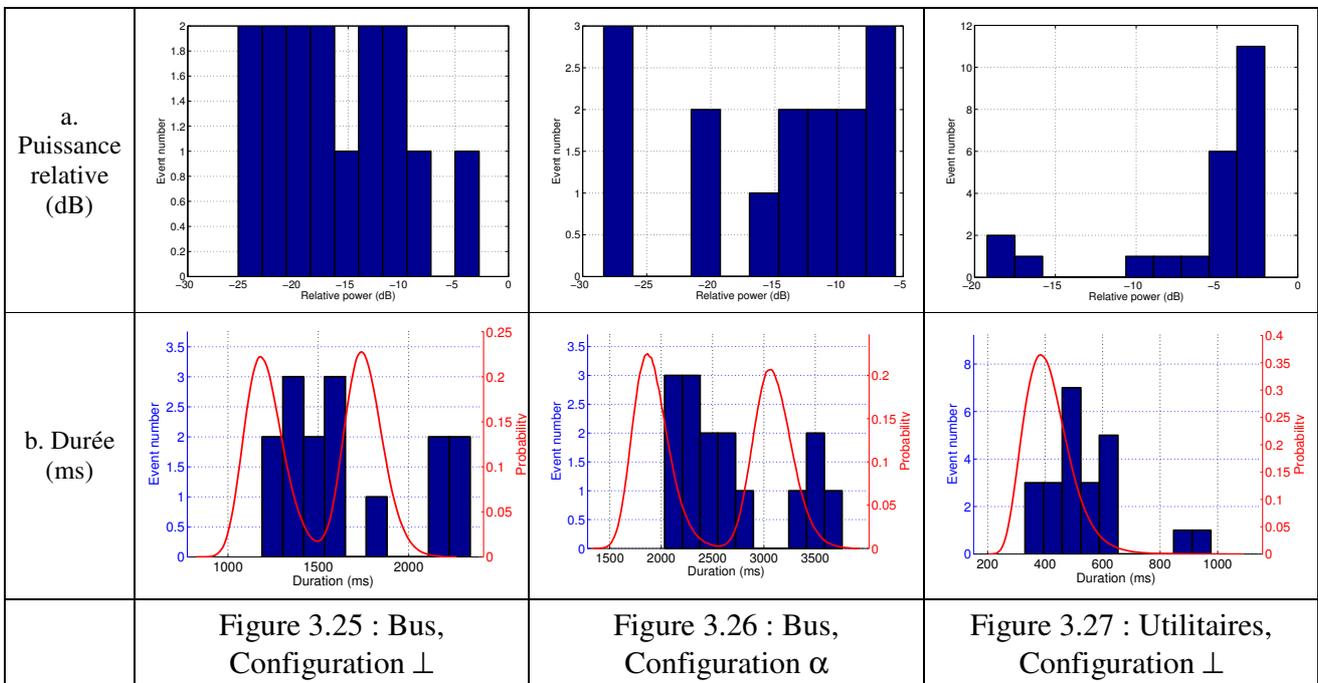
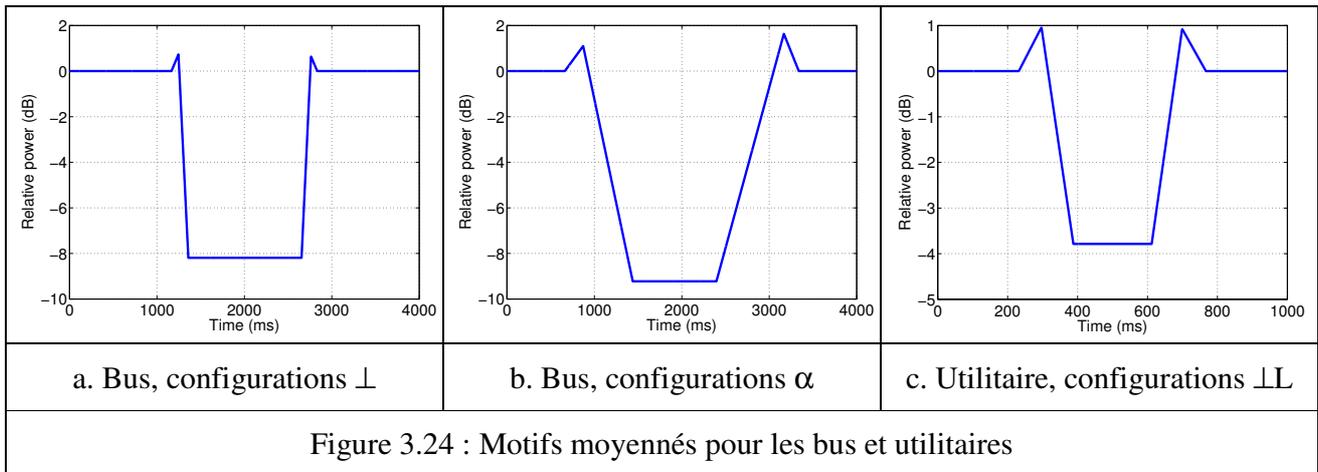


Figure 3.23 : Résultat des mesures statiques

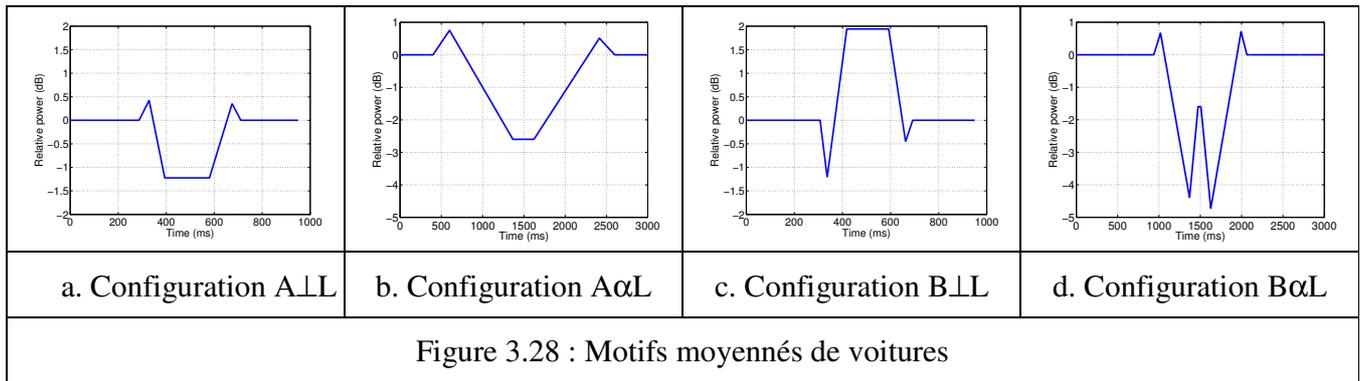
Scénario dynamique

Le premier résultat des mesures dynamiques a déjà été abordé dans la partie post-traitement : dans la plupart des cas, les véhicules passant dans le trajet direct génèrent des jaillissements positifs ou négatifs, comme observé sur la figure 3.21. Il existe cependant des cas où le trafic produit des perturbations à peine plus importantes que le bruit produit par les dynamiques extérieures et l'appareil de mesure. Ce cas se retrouve par exemple lorsque une voiture circule sur la voie opposée dans des scénarios de type \perp . Les résultats présentés par la suite pour les voitures ne considèrent que les configurations où les voitures circulent sur la voie proche du récepteur. Dans d'autres cas, les perturbations produites par un véhicule sont marquées mais difficilement associables à un véhicule en particulier. Ce cas se retrouve dans des scénarios de type α , où un véhicule ne génère pas seulement des perturbations de signal lorsqu'il est dans le trajet direct mais dès qu'il pénètre dans le voisinage de la scène de propagation. De manière générale, l'association du passage d'un véhicule aux perturbations est cependant possible et permet de dériver des motifs spécifiques à chaque type de véhicule et à chaque configuration. Comme évoqué auparavant, un motif est constitué d'évanouissements fluctuant, appelés oscillations de bord et d'une atténuation en plateau. Les oscillations de bord, observés avant et après le plateau, sont produites à une fréquence de plus en plus lente et à des amplitudes plus fortes au fur et à mesure que le véhicule est proche de la zone d'obstruction du trajet direct.

Les pertes de puissance de signal les plus sévères sont associées aux passages des bus. Les motifs des figure 3.24a et figure 3.24b montrent une atténuation moyenne respective de 8,1 et 9,2 dB dans les configurations \perp et α . La distribution des valeurs moyennes s'étale entre 5 et 30 dB (figure 3.25a et figure 3.26a). Dans les configurations α , le motif est plus long et la transition vers le plateau plus douce que dans les configurations \perp . Les distributions de durée sont étalées sur de larges valeurs : entre 1200 ms et 3600 ms (figure 3.26b et figure 3.27b). Bien que le jeu de mesures soit restreint, deux amas de données sont observés pour chaque orientation du lien. Pour les liens \perp , le premier amas est centré sur 1400 ms, et le deuxième sur 2200 ms. Pour les liens α , le premier est centré sur 2500 ms et le deuxième sur 3500 ms.



Les perturbations associées aux utilitaires dans des configurations $\perp L$ présentent un motif similaire à celui des bus (cf. figure 3.24c) avec une durée et une atténuation moyenne plus faible (3,8 dB). La distribution des atténuations maximales montre un pic aux alentours de 3 dB et décroît jusqu'à 20 dB. (cf. figure 3.27a). La distribution des durées (cf. figure 3.27b) montre des perturbations centrées sur 500 ms.



Les perturbations associées aux voitures dans des configurations $\perp L$ ont un effet inverse en fonction de l'environnement. Dans la figure 3.28a, le motif présente des oscillations croissantes précédant une atténuation de 1,2 dB, alors que ces oscillations sont suivies d'un gain de +1,9 dB dans la configuration B \perp L (cf. figure 3.28c). La puissance relative de la plupart des événements est centrée sur la puissance relative moyenne, mais quelques événements présentent des valeurs de puissance relative jusqu'à 7 dB (cf. figure 3.29a et figure 3.31a). Les durées présentent des distributions de forme similaires dans les deux configurations (cf. figure 3.29b et figure 3.31b). Pour la configuration A \perp L, la distribution des durées est centrée sur 400 ms et pour la configuration B \perp L sur 350 ms.

Finalement, les perturbations associées aux voitures dans les configurations αL montrent des durées plus longues et des atténuations plus fortes que pour les liens $\perp L$. Dans la configuration A α L, les jaillissements présentent des atténuations variant entre 1 et 5 dB (cf. figure 3.30a) et des valeurs de durées allant de 1500 à 2500 ms et centrées sur 2200 ms (cf. figure 3.30b). Dans la configuration B α L, les jaillissements présentent des atténuations atteignant 4 dB (cf. figure 3.28d), mais qui se limitent à 1,8 dB sur le segment central. La distribution des puissances relatives (cf. figure 3.32a) présente des valeurs d'atténuation entre 0 et 20 dB, regroupées autour de 5 dB. La distribution des durées s'étale de 800 à 1700 ms et est centrée sur une durée de 1 s (cf. figure 3.32b).

a. Puissance relative (dB)				
b. Durée (ms)				
	Figure 3.29 : Configuration A⊥L	Figure 3.30 : Configuration A∠L	Figure 3.31 : Configuration B⊥L	Figure 3.32 : Configuration B∠L
Distributions des durées et puissances relatives pour les motifs de voitures				

3.B.2.4. Analyse et interprétation

Durées

Afin de mieux comprendre les résultats dynamiques et d'établir un lien entre dimensions du véhicule et durée du motif de fluctuation, nous comparons les valeurs de distributions de durée avec des valeurs théoriques. Ces valeurs théoriques de durée dues à l'obstruction du trajet direct sont obtenues dans chaque configuration en utilisant la formule suivante :

$$t = \frac{L + l \times d_2 / d_{T_x R_x}}{v} \quad (3.2)$$

où v , L et l sont respectivement la vitesse, la longueur et la largeur du véhicule, et d_2 et $d_{T_x R_x}$ sont les paramètres de distance du lien radio comme illustrés sur la figure 3.17. La distribution théorique est obtenue en calculant 1 000 000 de tirages aléatoires de (3.2) où v , L et l sont représentés par des distributions spécifiques. La distribution de la vitesse suit une loi normale tronquée, notée $N(\mu ; \sigma)$, avec un minimum et un maximum respectivement pris à 6 et 20 m/s. Les distributions de longueur et largeur suivent une loi uniforme, notée $U(\min, \max)$. Les valeurs de v_μ , v_σ , L_{\min} , L_{\max} , l_{\min} , l_{\max} sont choisies de manière arbitraire en fonction de l'environnement et des types de véhicules rencontrés lors des mesures.

Les distributions mesurées et théoriques (cf. courbes théoriques en rouge sur les figure 3.25b à figure 3.27b et les figure 3.29b à figure 3.32b) présentent des formes et des durées globalement identiques quelle que soit la configuration. Cependant, la durée moyenne observée en mesure est toujours plus importante que celle obtenue de manière théorique. Nous interprétons ce décalage comme dû aux oscillations de bord dans les motifs, qui sont indépendants du processus de masquage modélisé dans l'équation (3.2). En effet, la durée de l'impact d'un véhicule est plus

large que la seule obstruction du trajet direct. Dans les configurations de type α , les décalages introduits sont plus larges, particulièrement sur la figure 3.30b, où la durée moyenne mesurée est doublée par rapport à la durée théorique. Les valeurs de distribution des paramètres des différents véhicules sont détaillées dans tableau 3.2. Les deux amas observés pour les bus résultent du cadre spécifique à chaque environnement d'étude : la rue dans l'environnement A étant plus étroite, les bus circulent plus lentement. Cette différence de vitesse se retrouve également pour les voitures, où les distributions de durée sont plus étalées dans l'environnement A que dans l'environnement B.

Tableau 3.2 : Valeurs des distributions pour les paramètres des véhicules

	Véhicule		
	Bus	Utilitaire	Voiture
Longueur L (m)	13	U(4 ; 6)	U(3,5 ; 4,2)
Largeur l (m)	2,5	U(1,5 ; 2)	U(1,4 ; 1,8)
Vitesse v_A (m/s)	N(11 ; 1,0)	N(13 ; 2,0)	N(13 ; 2,0)
Vitesse v_B (m/s)	N(7,5 ; 0,5)		

Amplitudes

Une analyse complète des résultats d'amplitude requerrait un jeu de mesure plus important ainsi que des métriques de mesure plus fines, comme les directions d'arrivée prépondérantes en puissance et les délais associés. Nous allons donc nous limiter à une analyse qualitative des mécanismes de propagation potentiels. En effet, comme évoqué dans le chapitre 2, plusieurs phénomènes peuvent générer des évanouissements à grande échelle lorsqu'un véhicule croise un lien radio.

Nous nous intéressons tout d'abord à la puissance relative introduite par un véhicule statique au milieu du lien direct. Le véhicule peut bloquer ou atténuer le trajet direct, et également générer des rayons diffractés sur ses arêtes horizontales. Le trajet direct peut être atténué, mais aussi transmis à travers les vitres du véhicule. Le rayon réfléchi sur le sol peut également être bloqué ou se réfléchir à la place sur la voiture ce qui impacte la distance de rupture pour un modèle à deux rayons, comme expliqué dans [11]. Les résultats de mesure statique montrent deux choses.

Premièrement, les variations d'amplitude observées en éloignant le véhicule du récepteur sont très proches des modèles d'arête unique en lame de couteau. En effet, comme on peut le voir sur la figure 3.33a, plus on éloigne le véhicule du récepteur, plus le paramètre de Fresnel diminue et moins l'atténuation est forte. Cependant, à partir d'une certaine distance, les variations alternent entre amplitude positive et négative. Ce comportement se retrouve à la fois pour une obstruction par un utilitaire et par une voiture. Pour les voitures, à hauteur plus faible, la différence de puissance se situe plutôt dans la zone de fluctuation autour de 0 dB (figure 3.33b).

De plus, lorsque la longueur du lien est augmentée, le paramètre de Fresnel tend, pour une hauteur d'obstacle, donnée vers 0, qu'il soit positif ou négatif. Cela explique le fait que l'obstruction par un utilitaire provoque pour $d_2 = 56$ m, une atténuation moins forte à une distance de 1 m du récepteur que pour $d_2 = 0$ m, mais plus forte à une distance de 5 m.

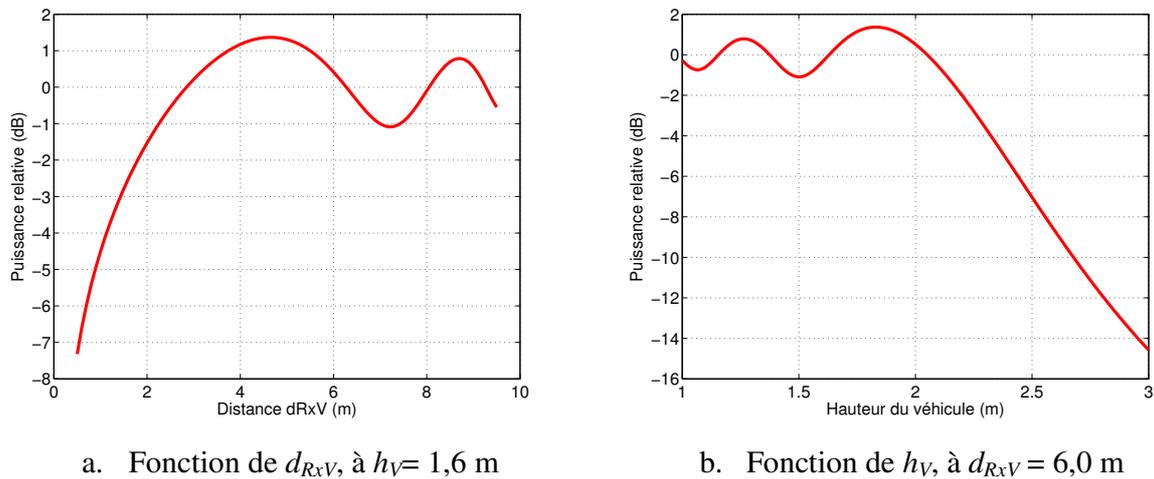


Figure 3.33 : Atténuation due à la diffraction par arête unique en lame de couteau à une fréquence de 2,1 GHz, hauteurs d'émission à 3,6 m et réception à 1,5 m, distance de 14 m

Les atténuations observées dans le cas des mesures dynamiques pour les bus et les utilitaires dans des configurations \perp et $\perp L$ présentent des valeurs proches de l'atténuation due à l'obstruction forte de l'ellipsoïde de Fresnel, qui est de 6 dB lorsque l'arête est au niveau du trajet direct. La notion d'utilitaire regroupant tous les véhicules de hauteurs supérieures à 1,6 m, les atténuations s'étalent sur un large spectre de valeurs. Le large spectre de valeurs d'atténuation rencontrées pour les bus dans des configurations différentes, en particulier la présence de valeurs plus faibles (vers 5 dB) suggère cependant d'autres mécanismes de propagation, tels que la transmission à travers les vitres. Les variations produites par les voitures dans des configurations \perp , dont les valeurs sont positives ou négatives en fonction de la configuration, peuvent être expliquées par la recombinaison des rayons diffractés sur le toit du véhicule avec le trajet direct parfois constructive, parfois destructrice. Ce comportement peut également être expliqué et calculé par l'obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel. Dans des configurations de type α , les distances sont plus larges et vont jusqu'à la limite du rayon de la petite cellule. Lorsqu'on approche la distance de rupture du modèle à deux rayons, la puissance oscille entre ± 5 dB autour de la puissance propagée en espace libre et la réflexion sur le sol devient donc un facteur non négligeable.

Pour les liens obliques, les oscillations de bord introduisant l'excès de durée peuvent être essentiellement expliquées par la diffusion sur l'avant et l'arrière du véhicule, en particulier la diffraction sur ses arêtes verticales.

Le paragraphe suivant va au-delà de la simple analyse et propose de comparer les variations de puissance du signal mesurées aux valeurs qu'on obtient en utilisant l'outil de simulation déterministe décrit dans le chapitre 2 de manière statique et dynamique sur des événements contrôlés.

3.B.3. Validation et ajustements

3.B.3.1. Comparaison avec des mécanismes déterministes

Dans un premier temps, les puissances mesurées dans une configuration statique (cf. figure 3.23) sont comparées à l'atténuation obtenue par l'obstruction du seul trajet direct par une arête unique en lame de couteau. L'arête sélectionnée est l'arête horizontale du toit du véhicule qui va le plus obstruer l'ellipsoïde de Fresnel, généralement la plus proche du récepteur. La hauteur de l'arête est la hauteur du véhicule. Dans ces scénarios, les variables sont multiples : type de véhicule (utilitaire, voiture), hauteur de l'antenne d'émission (3,6 m et 6,5 m), et distance du récepteur par rapport à un lien perpendiculaire ($d_2 = 0 ; 28 ; 56$ m).

Les résultats d'évolution de la puissance reçue en éloignant progressivement un utilitaire du récepteur (mesures statiques), présentés sur la figure 3.34, montrent une forte similitude entre les données mesurées et l'atténuation calculée. Dans tous les scénarios, on retrouve le comportement observé dans la description des mesures : forte atténuation lorsqu'on est proche du récepteur, qui diminue en s'en éloignant, jusqu'à atteindre 0 dB d'atténuation, puis des variations positives. Un décalage de 1 à 2 dB constant sur toute la mesure est cependant observé dans les configurations $d_2 = 28$ m et $d_2 = 56$ m pour une antenne d'émission basse et $d_2 = 56$ m pour une antenne d'émission haute.

Pour une voiture, les résultats sont présentés sur la figure 3.35. Les amplitudes des atténuations dues à l'insertion d'une arête sont plus faibles que dans le cas d'un utilitaire, notamment dans le cas de lien perpendiculaire avec une hauteur d'émission de 6,5 m, avec des variations mesurées de l'ordre de grandeur de 0 à 1 dB. Cependant, les résultats observés présentent le même comportement pour les mesures et les simulations. Ce comportement est identique à celui observé pour les utilitaires : en fonction des paramètres du modèle de diffraction à arête unique en lame de couteau, le véhicule va obstruer le premier ellipsoïde de Fresnel. Les fluctuations du signal sont plus présentes car l'obstruction se fait à une hauteur plus basse. Dans le cas d'antenne basse et de distance de lien radio larges ($d_2 = 28$ et 56 m), les valeurs retrouvées avec le modèle à rayon unique sont pour la plupart translatées verticalement par rapport aux valeurs mesurées de 1 à 3 dB.

La conclusion tirée de cette étude statique est que la diffraction par l'arête unique en lame de couteau modélise plutôt bien les variations d'amplitude du signal. La translation verticale constante de quelques dB qu'on retrouve dans les cas d'antenne d'émission basse et de distance de lien large peut être expliquée par l'impact des mécanismes non pris en compte : coupure du rayon réfléchi sur le sol, diffractions sur le côté des véhicules. L'explication de la coupure du rayon réfléchi paraît plus plausible : la différence d'atténuation est plus forte pour des distances de lien plus larges (d_2 de 28 et 56 m) et est à peu près constante pour toute distance d_{RxV} .

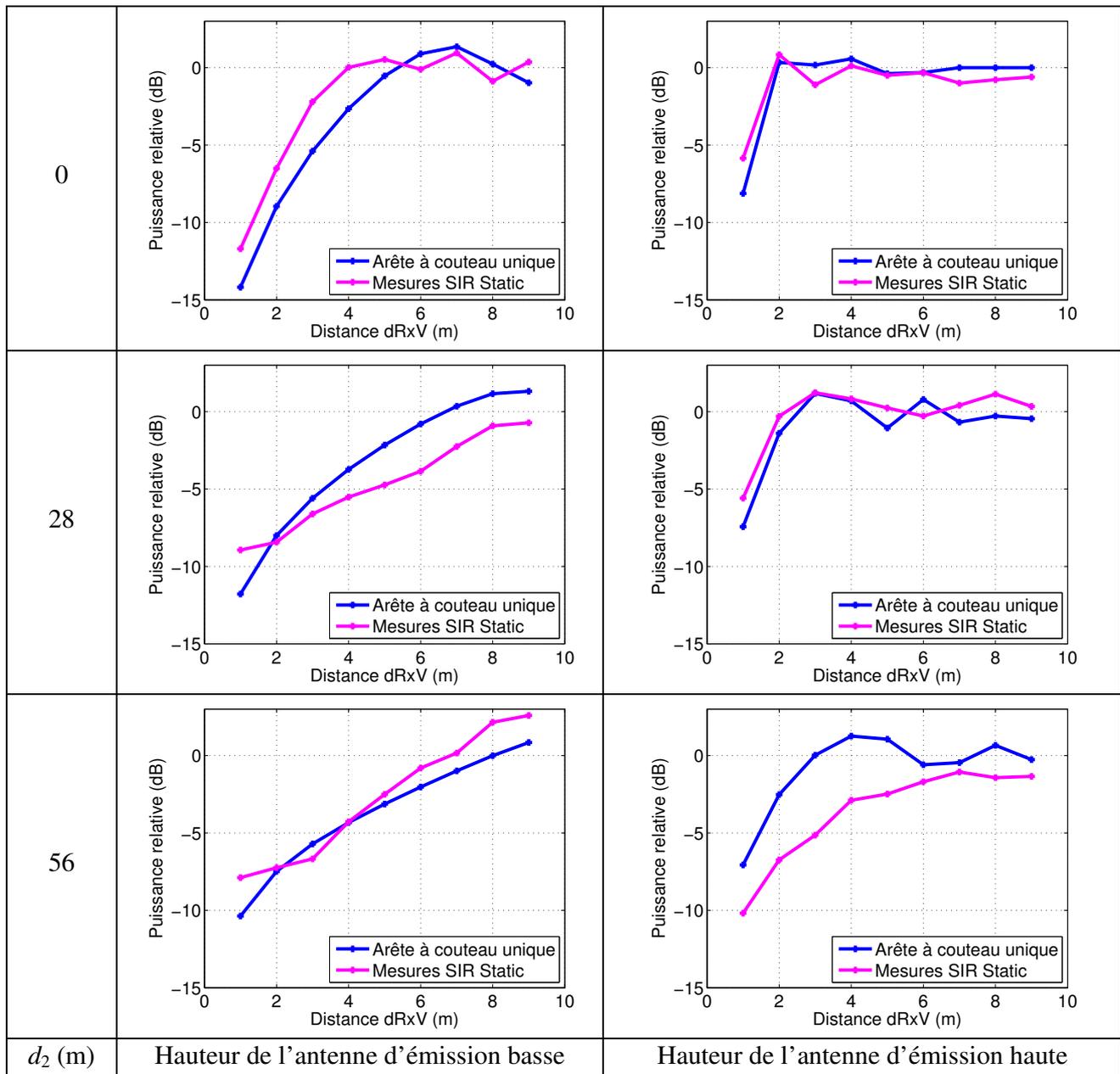


Figure 3.34 : Comparaison de l'atténuation mesurée et calculée avec une diffraction par arête unique en lame de couteau pour un utilitaire

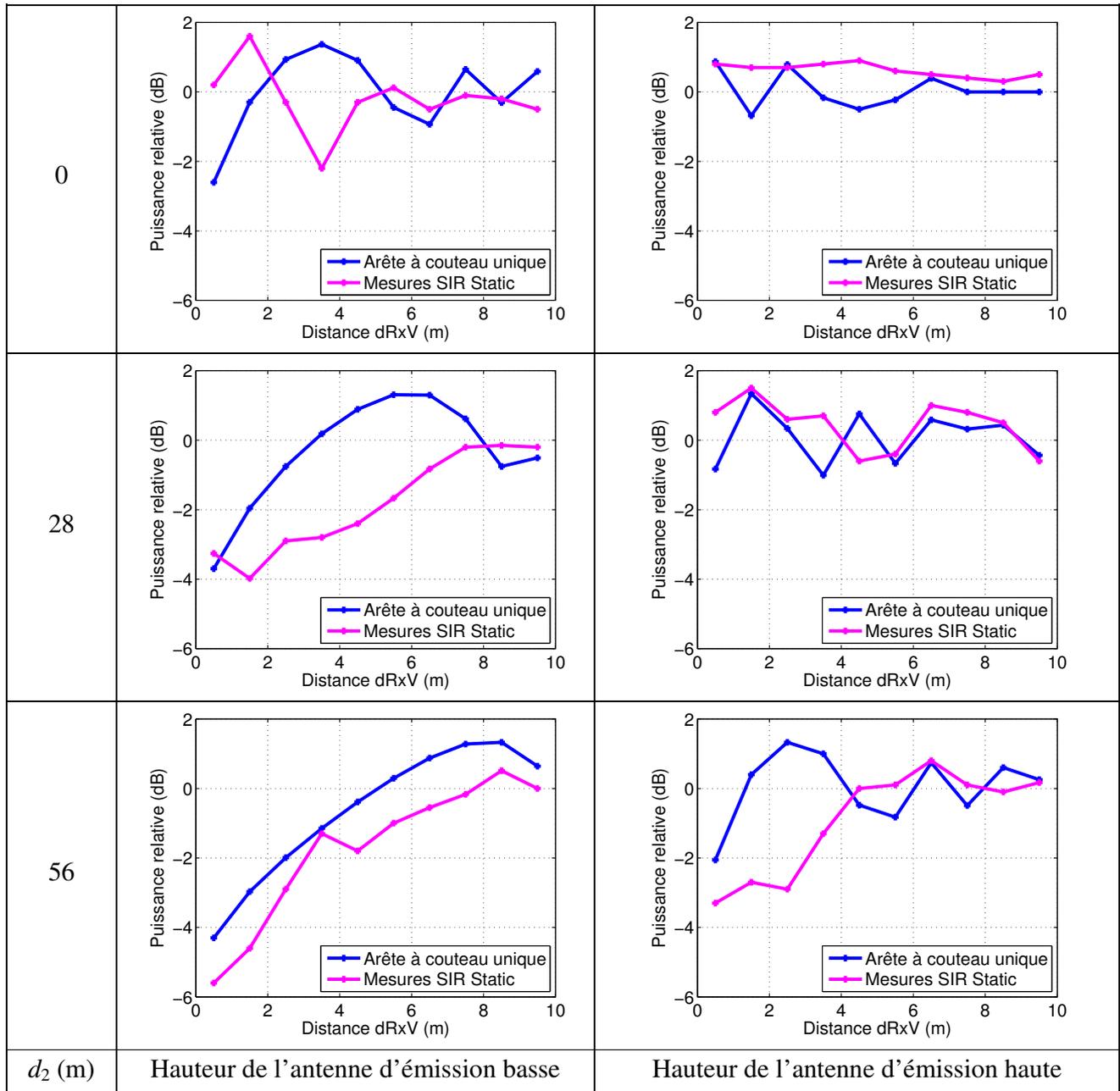


Figure 3.35 : Comparaison de l'atténuation mesurée et calculée avec une diffraction par arête unique en lame de couteau pour une voiture

Concernant les mesures dynamiques, nous comparons les motifs observés lors du post-traitement des mesures et le résultat de prédiction déterministe de propagation, simulé par la plateforme décrite dans le chapitre 2. Les conditions de simulation sont le plus proche possible des conditions de mesure : vitesse des véhicules, présence des bâtiments, distances entre chaque élément du lien radio et topologie des voies de circulation... Pour chaque configuration étudiée,

un exemple de puissance reçue non filtrée sera également présenté. En suivant les conclusions tirées de l'étude statique, nous faisons dans un premier temps l'hypothèse que les diffractions apportées par les arêtes des véhicules sont les sources majeures de variation du signal. Cela concerne à la fois les diffractions horizontales (toit de la voiture modélisé par une arête unique en lame de couteau) ou verticales (côtés de la voiture). La plateforme de simulation est donc configurée pour ne calculer en statique que le trajet direct. Nous rappelons que les doubles diffractions ne sont pas modélisées.

Pour les bus (cf. figure 3.36), les durées des motifs d'évanouissement sont identiques dans 3 cas sur 4. Dans la configuration $A\alpha$, la durée est légèrement supérieure. Ceci peut être dû à un changement de vitesse des bus dans cette configuration. Concernant l'atténuation, le modèle d'arête unique en lame de couteau permet d'avoir des évanouissements dont l'amplitude est forte, ce qu'on retrouve aussi en mesure. Cependant, la valeur d'atténuation moyennée sur l'ensemble des mesures est dans tous les cas plus faible que celle obtenue en simulation. Or, les conditions de simulation sont relativement bien connues, notamment les dimensions des bus, qu'il est facile de retrouver. Une explication possible est la non prise en compte de la transmission à l'intérieur du bus, qui peut réduire l'atténuation apportée par le véhicule, notamment si le bus en question est dans une configuration où le rayon direct est peu obstrué par les parties métalliques (plancher et toit) et passe à travers les vitres.

Pour les utilitaires (cf. figure 3.37), les conclusions sont identiques aux bus. La durée des évanouissements observée pour les simulations et les mesures est identique. Les valeurs d'atténuation observées sont plus faibles (environnement A) ou plus fortes (environnement B) que la valeur moyenne. Ce phénomène peut s'expliquer par deux raisons. Premièrement, le groupe 'utilitaire' recense tous les véhicules dont la hauteur est comprise entre celle d'une grosse voiture et celle d'un camion, c'est à dire supérieure à 1,6 m. La large plage de valeurs de hauteur implique une large plage de valeurs d'atténuation (cf. figure 3.33b). Deuxièmement les configurations de distance émetteur – route sont différentes dans l'environnement A et l'environnement B.

Pour les voitures (cf. figure 3.38), les correspondances sont plus difficiles à observer car la hauteur des voitures fait que l'ellipsoïde de Fresnel est à peine obstrué, même dans des conditions d'antenne d'émission basse. Cependant, le phénomène de recombinaison constructive observé dans la configuration $B\perp L$ se retrouve en simulation. Les durées et amplitudes en configuration $\perp L$ sont similaires. Cependant, en configuration αL les événements obtenus en simulation sont de faible amplitude et rendent la comparaison difficile. Pour le cas $B\alpha L$, les variations sont similaires et de durées identiques, mais de faible amplitude. Pour le cas $A\alpha L$, les variations sont difficilement comparables. Ces deux scénarios mettent en avant le fait que d'autres mécanismes de propagation existent, qui sont dans ce cas-là non négligeables par rapport à l'obstruction de

l'ellipsoïde de Fresnel. Le paragraphe suivant propose de prendre en compte la réflexion sur le sol et d'ajuster de manière simplifiée les différents mécanismes afin d'obtenir un résultat similaire.

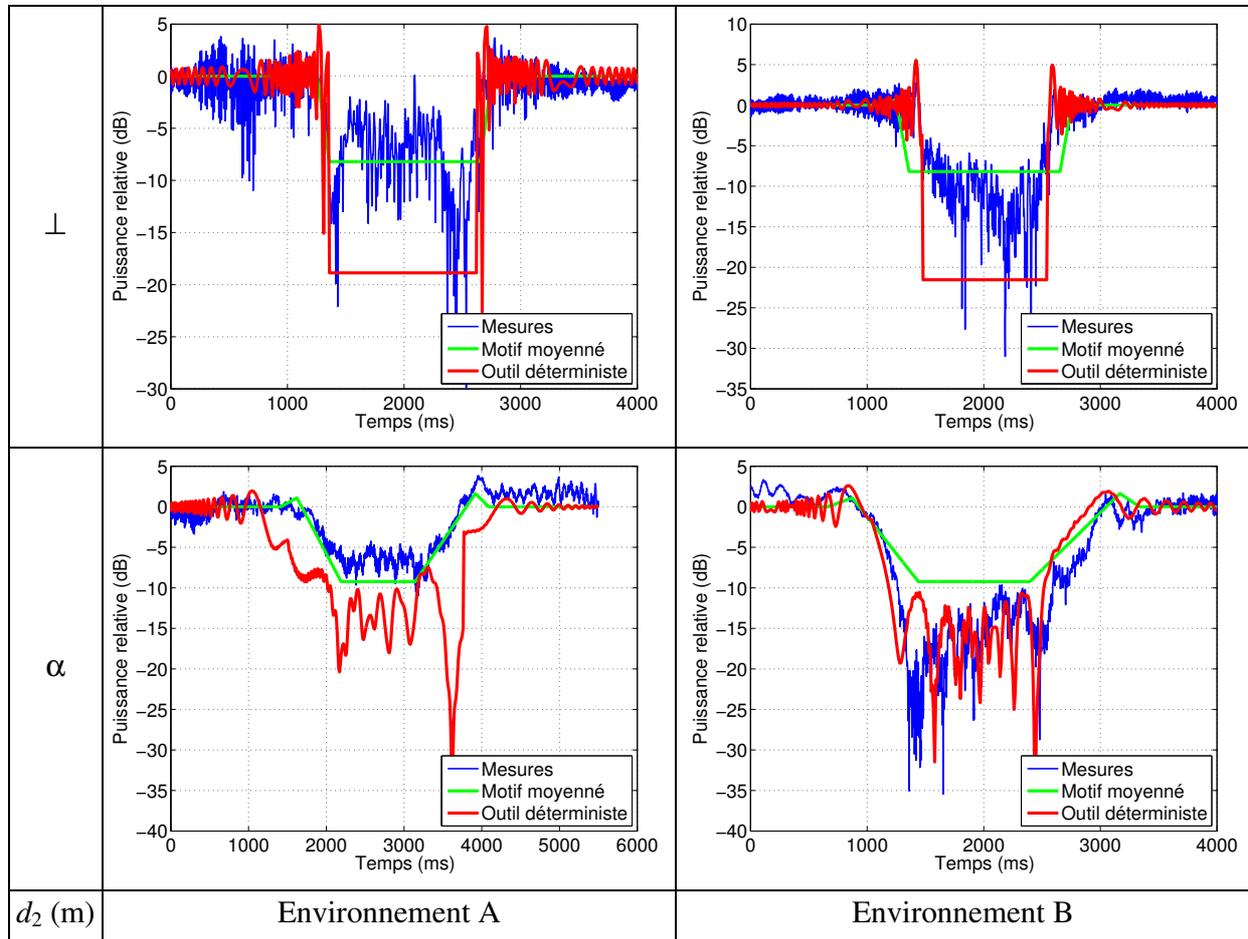


Figure 3.36 : Comparaison des motifs dérivés des mesures et de la prédiction dynamique pour les bus

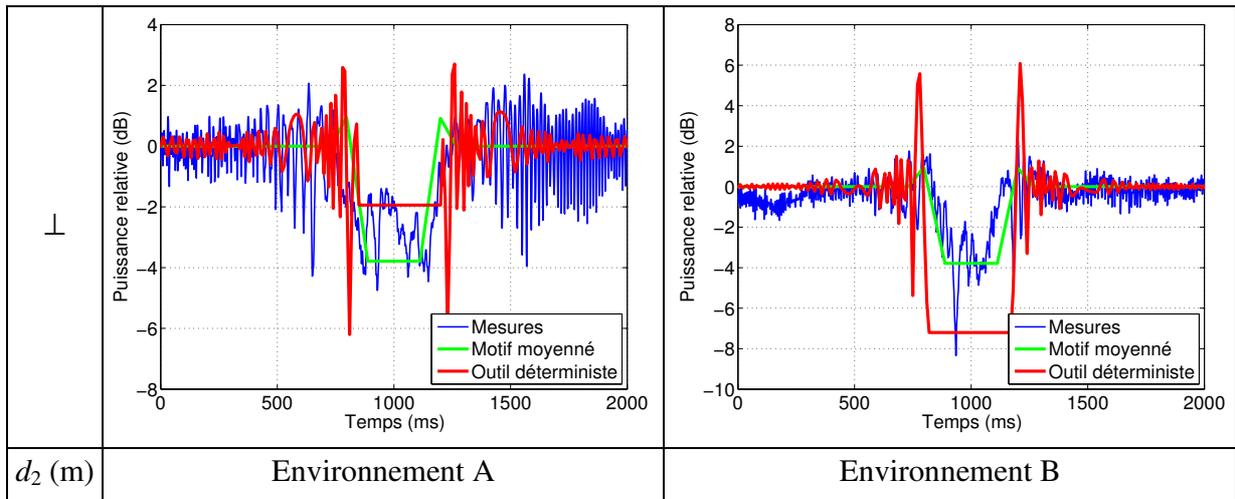


Figure 3.37 : Comparaison des motifs dérivés des mesures et de la prédiction dynamique pour les utilitaires

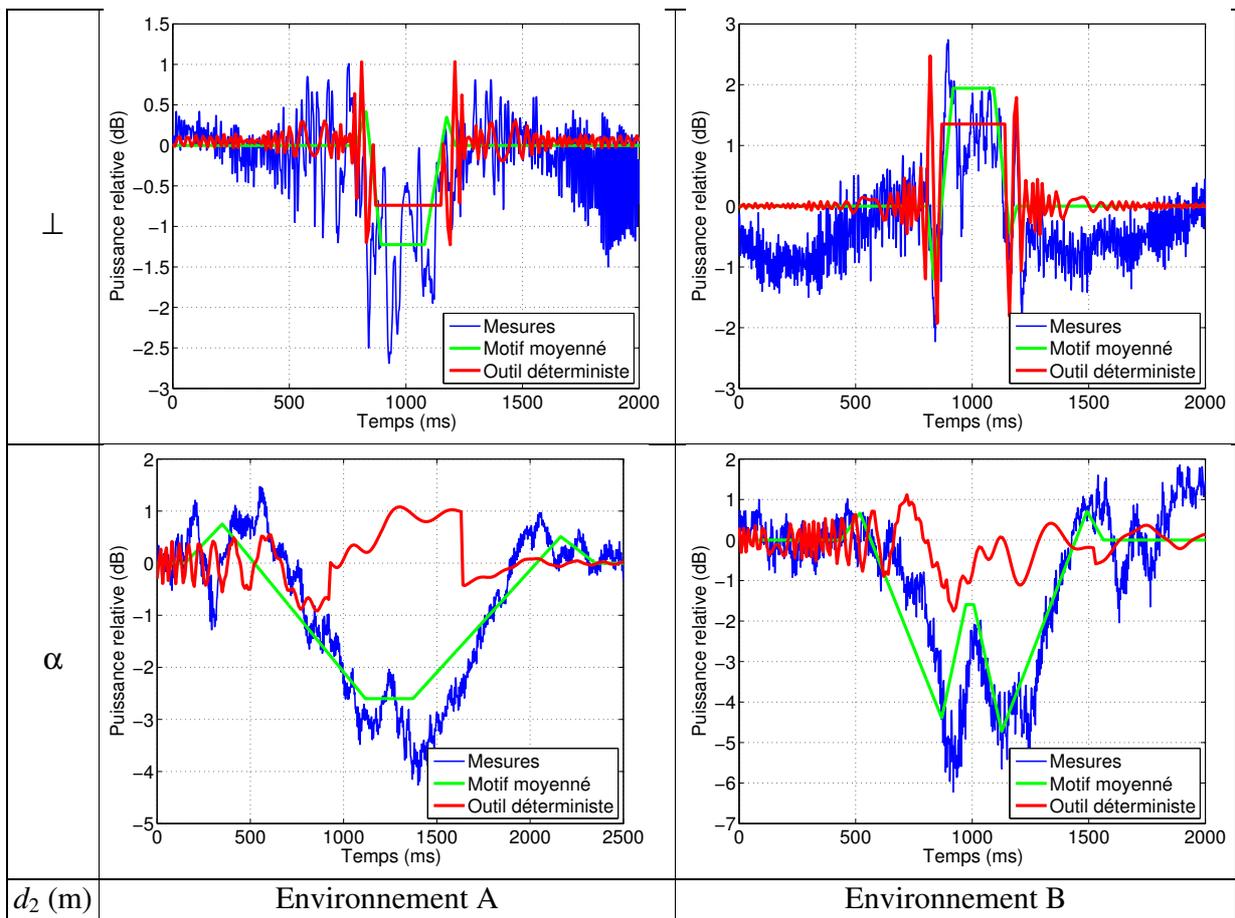


Figure 3.38 : Comparaison des motifs dérivés des mesures et de la prédiction dynamique pour les voitures

3.B.3.2. Ajustement par observations

Les résultats présentés dans le paragraphe précédent montrent que la diffraction par arête unique en lame de couteau ne suffit pas à modéliser l'atténuation dans tous les cas, notamment les scénarios αL pour les voitures. Les ajustements du modèle proposés dans ce paragraphe sont basiques et n'impliquent pas de métrique ni de boucle d'optimisation : les valeurs de simulation dynamique obtenues avec différentes valeurs de paramètres du modèle sont comparées aux résultats de mesure. Le mécanisme de réflexion sur le sol est ajouté et la puissance des différents rayons est réglable, notamment celui de la réflexion sur le sol et le facteur de correction de hauteur pour le calcul utilisant la Théorie Uniforme de la Diffraction des rayons diffractés sur les arêtes verticales du véhicule. Nous procédons à des comparaisons par observation et par sélection des paramètres aboutissant au résultat le plus proche entre la simulation et la mesure.

Nous allons d'abord vérifier l'hypothèse formulée pour le cas statique : la coupure de la réflexion sur le sol apporte une atténuation soit quasi-nulle (pour $d_2 = 0$ m), soit de quelques dB (pour $d_2 = 28$ m et $d_2 = 56$ m). La figure 3.39 illustre l'atténuation apportée par la réflexion sur le sol dans les conditions de mesure. Avec une variation d'environ -0,3 dB pour $d_2 = 0$ m et d'environ respectivement 1,6 dB et 2,3 dB pour $d_2 = 28$ m et $d_2 = 56$ m, notre hypothèse est vérifiée. Nous allons donc recalculer la propagation de manière dynamique pour les voitures dans le cas $A\alpha L$ avec différentes valeurs de poids de la réflexion sur le sol (w_{GR}) et de facteur de correction de hauteur (χ , cf. chapitre 2.B.2).

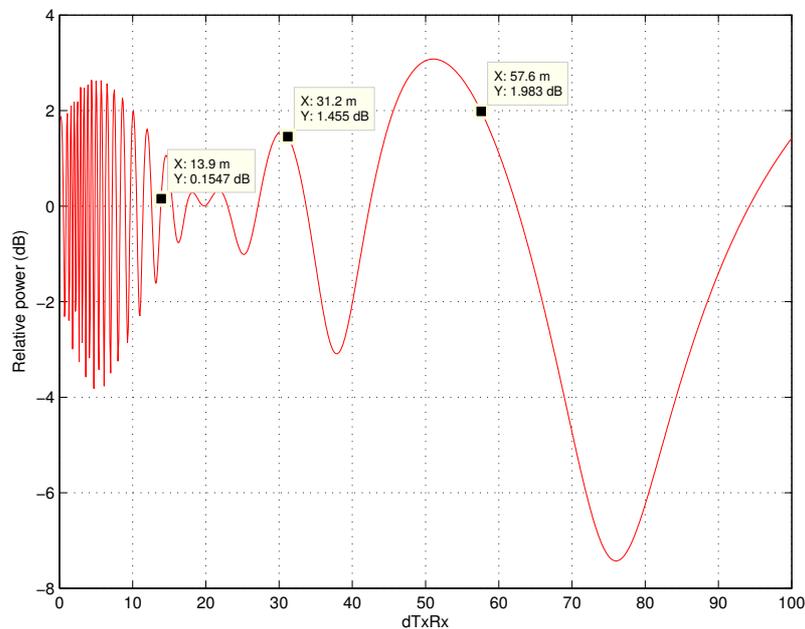


Figure 3.39 : Valeurs des différences d'amplitude entre trajet direct et réflexion sur le sol en fonction de la distance du lien

L'impact de la diminution de la valeur de χ est montré sur les figure 3.40 et figure 3.41. Il en résulte une augmentation de la puissance du signal diffracté sur les arêtes des voitures, et une amélioration de la continuité entre les oscillations de bord et le plateau. Cependant, des valeurs trop fortes pour les rayons diffractés modulent fortement l'atténuation due à la réflexion sur le sol, alors que la modulation observée sur les mesures est assez faible. Sur l'ensemble des configurations testées, la combinaison de $w_{GR} = 1,0$ et $\chi = 1,0$ semble optimale.

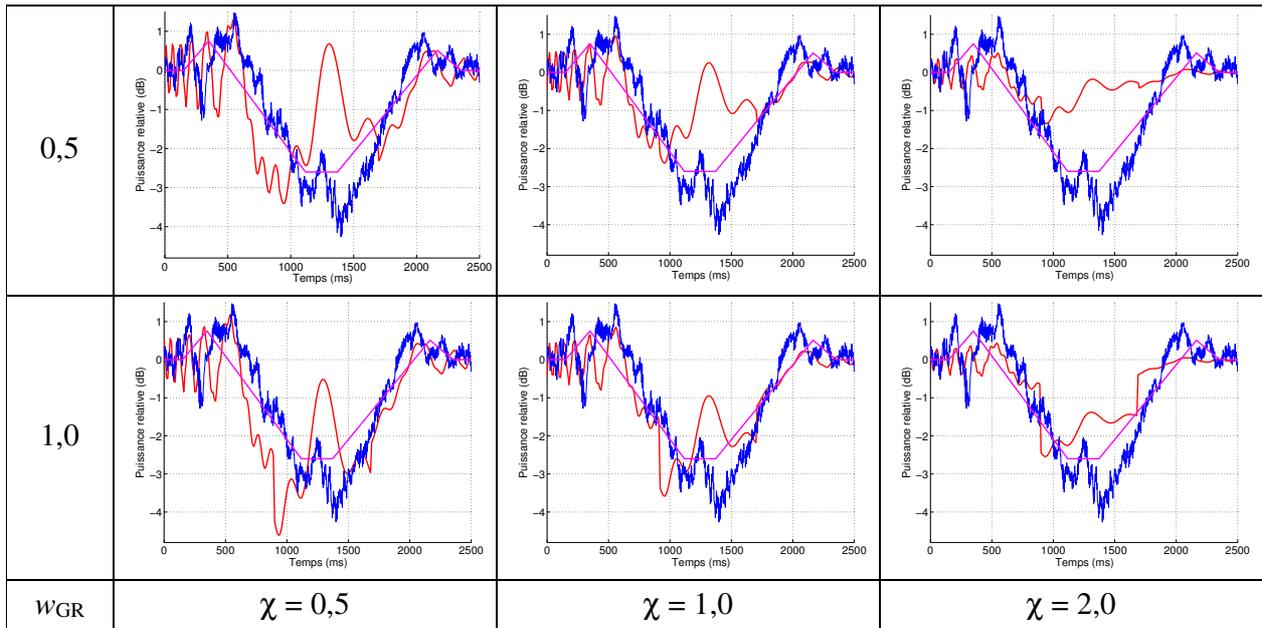


Figure 3.40 : Résultats du modèle ajusté dans la configuration A α L

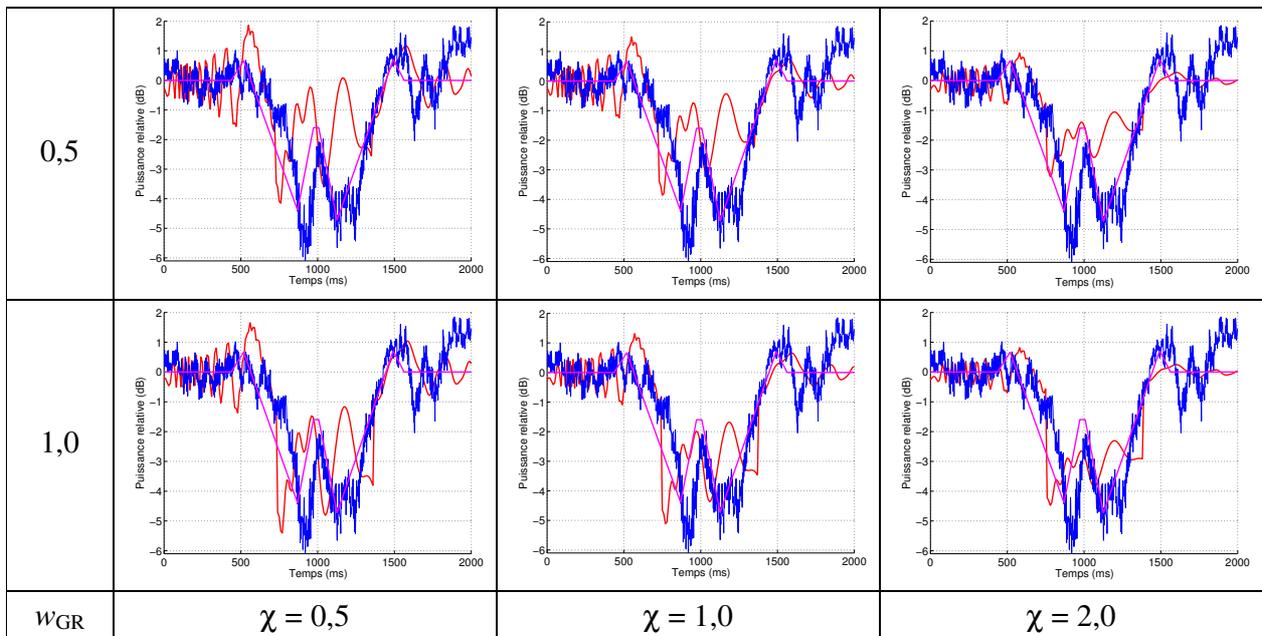


Figure 3.41 : Résultats du modèle ajusté dans la configuration B α L

Cet exemple d'ajustement par observation s'inscrit dans l'approche qualitative des mesures de puissances reçues. Un calibrage poussé impliquerait une approche quantitative et une connaissance plus précise des propriétés large bande du canal de propagation par le biais des directions de départ, d'arrivée, et délai des différents rayons ainsi qu'un contrôle plus fort sur les paramètres de mesure : moins d'imprécision dans les distances, positions des bâtiments, dimension des véhicules... Nous observons néanmoins que les rayons réfléchis ou diffractés sur les façades des bâtiments ont un impact peu important sur ces variations à grande échelle, leur modélisation n'étant pas nécessaire pour avoir des résultats de simulation proche des mesures statiques ou dynamiques.

3.B.4. Campagne de simulation sur l'impact de la hauteur de l'antenne d'émission

3.B.4.1. Objectifs

En étudiant l'impact du trafic véhiculaire sur les conditions de propagation dans des configurations de petites cellules, l'obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel a été identifiée comme le mécanisme le plus affecté. Ce mécanisme est dépendant de plusieurs paramètres : fréquence, distance du lien radio, distance de l'obstacle, hauteur de l'obstacle, hauteur des antennes d'émission et de réception... Parmi ces paramètres, la hauteur de l'antenne d'émission est le principal paramètre d'ajustement pour un opérateur cellulaire lors du déploiement d'un réseau. Dans un cadre de petites cellules, un opérateur peut déployer les stations de base sur des objets présents dans le mobilier urbain (lampadaires, stations de bus, murs...) à différentes hauteurs.

Nous nous posons donc la question suivante : « *Suffit-il d'augmenter la hauteur de la station de base pour réduire les perturbations liées au trafic véhiculaire ?* ». Pour répondre à cette question, nous définissons un jeu de scénarios dans trois environnements. Les simulations sont réalisées en utilisant la plateforme développée et validée dans les chapitres et paragraphes précédents, évitant ainsi des mesures à grande échelle, qui auraient demandé une importante logistique. Les tendances et ordres de grandeur de l'évolution du signal reçu sont mesurés pour certains points de réception par une métrique de probabilité de coupure décrite par la suite.

3.B.4.2. Scénarios

L'utilisation de la plateforme de simulation nous permet d'étudier n'importe quel environnement, à condition de disposer de suffisamment d'information sur les données géographiques et de réseau de mobilité. Dans cette étude, nous considérons les trois environnements urbains avec des structures géométriques différentes décrites dans la partie A de ce chapitre : un boulevard, une rue de taille moyenne et une place. Dans chaque environnement, trois configurations de lien seront simulées suivant la proximité du récepteur par rapport à

l'émetteur : Proche (de l'autre côté de la route, < 20 m), Médium (< 50 m) et Lointain (< 100 m, en limite de cellule).

Pour chaque environnement, le récepteur est placé à une hauteur de 1,5 m, la fréquence est de 2,6 GHz, la propagation statique est calculée en tenant en compte des réflexions, mais pas des diffractions. Même si les mobilités sont par essence localement différentes, nous mettrons la contrainte d'un trafic global identique (15%) dans les trois configurations. Les rapports de distance émetteur-route et route-récepteur, ainsi que les mobilités mesurées pour chacune des configurations sont répertoriées dans le tableau 3.3.



Figure 3.42 : Environnement A1



Figure 3.43 : Environnement A2

Chapitre 3 : Impact de l'environnement proche sur le canal de propagation



Figure 3.44 : Environnement A3

Tableau 3.3 : Rapports de distance et métriques de mobilité pour la campagne de simulation

Lien	Densité locale du trafic	Vitesse moyenne locale du trafic	Rapport de distance Tx-Route
P			
M			
L			

3.B.4.3. Métrique

La distribution des évanouissements peut en général être divisée en deux zones, illustrées sur la figure 3.45.

- Une zone P1 où on observe de fortes atténuations, principalement dues aux véhicules de large taille (camions, bus, ...)
- Une zone P2 où les variations du signal sont en majorité centrées sur une valeur proche de 0 dB. En présence d'un trafic nul, la distribution est un Dirac centré sur 0 dB

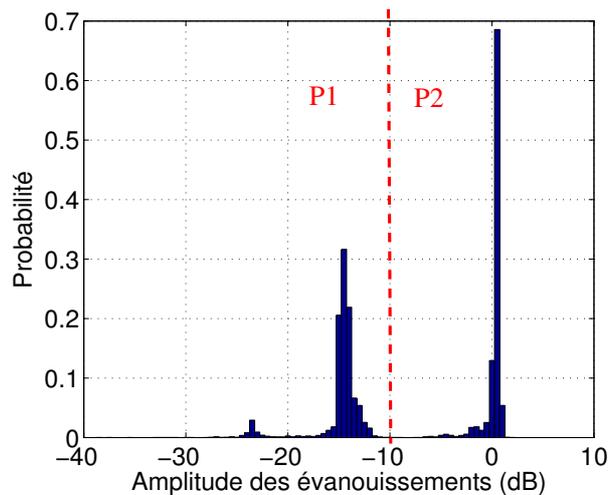


Figure 3.45 : Distribution de l'atténuation dans le cas scénario A1, récepteur proche de l'émetteur

Un seuil de coupure S en base logarithmique est défini pour quantifier la probabilité de perte de qualité du signal. La métrique de probabilité de coupure P_c est définie comme la proportion des évanouissements inférieurs au seuil de coupure (3.3).

$$P_o = P(x_{dB} < S_{dB}) \quad (3.3)$$

En fonction de la géométrie du lien radio et des véhicules composant le trafic, la limite entre les deux zones peut être différente. Nous définissons dans cette étude une valeur de seuil de coupure de 6 dB, qui correspond à une atténuation forte du signal reçu.

3.B.4.4. Résultats

Les résultats présentés sur la figure 3.46 présentent des probabilités de coupure variées (1 à 22 %) pour une hauteur d'antenne d'émission de 3,6 m. Les valeurs obtenues sont d'autant plus fortes qu'une route est proche du récepteur (Environnements 1 & 3, liens Medium et Lointain) et que le trafic est important. En augmentant la hauteur de l'antenne d'émission, les valeurs de probabilité de coupure diminuent et tendent généralement vers 0. Deux comportements typiques peuvent être cependant identifiés. Premièrement, en augmentant la longueur du lien (de Proche à Lointain), la diminution de la probabilité de coupure en fonction de la hauteur de l'antenne

d'émission est moins rapide. Deuxièmement, lorsque le récepteur est proche d'une route (notamment dans l'environnement n°3), la valeur de la probabilité de coupure n'est pas de 0, même lorsque la hauteur de l'antenne d'émission est de 10 m.

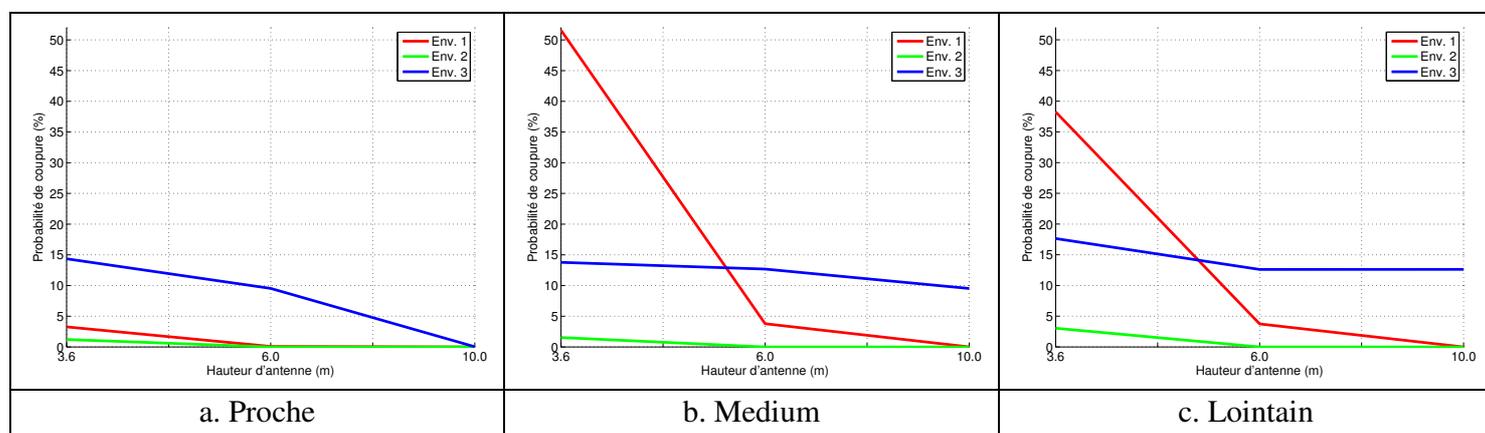


Figure 3.46 : Résultats de probabilité de coupure à un niveau de 6 dB

3.B.4.5. Analyse et interprétation

Les résultats présentent des diminutions fortes de la probabilité de coupure en augmentant la hauteur de l'antenne d'émission. L'ellipsoïde de Fresnel se trouvant déplacé vers le haut, les véhicules ont moins tendance à l'obstruer. Cependant, dans certaines configurations, cette solution n'est pas suffisante pour se garantir de toute atténuation due au trafic véhiculaire. Les résultats montrent notamment que les points de réception proches du trafic véhiculaire sont impactés par des véhicules larges quelle que soit la hauteur de l'antenne. En effet, l'ellipsoïde de Fresnel est peu modifié à proximité du récepteur. De plus, la perturbation de l'onde réfléchi sur le sol par le trafic n'est pas résolue en augmentant la hauteur de l'antenne d'émission. La coupure de la réflexion sur le sol entraîne des variations positives ou négatives suivant la longueur du lien radio, mais plus cette longueur est élevée, plus l'amplitude des variations est forte.

3.C. Conclusions du chapitre

Dans ce chapitre, notre approche consistait à valider les mécanismes déterministes de la plateforme de simulation permettant une prédiction de propagation dynamique, puis à utiliser cette plateforme pour dégager des comportements caractéristiques de l'impact de l'environnement proche sur la dynamique du signal. L'originalité de cette approche est d'éviter la réalisation de campagnes de mesure à vaste échelle tout en disposant de larges échantillons de résultats dans des environnements réels. Cette méthodologie a été appliquée sur les dynamiques dues aux mouvements du récepteur, puis aux dynamiques dues aux mouvements dans l'environnement.

Nous avons d'abord validé le modèle de Surface Equivalente Radar utilisé pour le calcul des contributions dues au mobilier urbain de type poteau dans un scénario d'étude urbain dense. La contribution d'une rangée de lampadaires sur la puissance hors trajet direct est en moyenne de 10 % en visibilité directe et de 37 % en non-visibilité directe. Le bon accord entre ces résultats de simulation et des mesures réalisées dans la littérature [6] a été publié dans une conférence européenne¹. La puissance diffusée sur le mobilier urbain en petites cellules n'est pas négligeable et l'impact du mobilier urbain s'observe également sur l'augmentation significative de l'étalement angulaire dans le plan horizontal. La prise en compte du mobilier urbain s'avère donc essentielle lorsqu'il s'agit d'évaluer des optimisations de la couche PHY, notamment par des techniques MIMO de diversité et de sélectivité spatiale.

D'autre part, il a été montré que les modèles utilisés par la communauté scientifique pour caractériser les évanouissements à grande échelle ne sont pas optimaux en petites cellules. Dans certaines configurations, les variations à grande échelle peuvent être rapprochées de distributions log-normales. Cependant, les mécanismes à l'origine de ces évanouissements sont différents des mécanismes de masquage qui servent de justification physique aux évanouissements à grande échelle dans des cellules de plus grandes tailles. De plus, l'échelle des évanouissements peut varier suivant la position et l'évolution du récepteur par rapport aux diffuseurs prépondérants, ce qui restreint l'utilisation d'une distance unique de corrélation et d'un modèle de corrélation uniforme dans l'espace. Finalement, le mobilier urbain, tels que les véhicules stationnés, peut masquer certaines contributions sur de grandes échelles. Ce masquage résulte majoritairement en l'atténuation du signal reçu.

Nous nous sommes finalement intéressés à la principale autre source de dynamique dans un environnement extérieur : le trafic de véhicules. La validation des mécanismes de propagation liés aux véhicules a nécessité de procéder à des mesures. Ces mesures ont été collectées suivant deux configurations différentes : une première configuration contrôlée statique, puis une

¹ G. Gougeon, Y. Lostanlen and L. Maviel, "Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells," in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, pp. 3448-3452, 2011.

configuration d'environnements réels dynamiques, dont les résultats ont été publiés dans une conférence internationale². Le résultat prépondérant de ces mesures est l'association du passage d'un véhicule aux variations de la puissance du signal. Ces variations de puissance de signal, classées en motifs suivant la configuration du lien radio et le type de véhicule, présentent en particulier de fortes atténuations pour les véhicules de larges dimensions. D'autre part, l'approche qualitative privilégiée pour ces mesures de puissance de signal a confirmé les principaux mécanismes de propagation : l'atténuation du trajet direct, la coupure de la réflexion sur le sol, et la diffraction par les arêtes des véhicules. Les mesures ont également permis d'ajuster sommairement les paramètres du modèle déterministe.

Finalement, l'impact de la hauteur de l'antenne d'émission sur les perturbations dues au trafic véhiculaire a été étudié dans des configurations urbaines typiques. La campagne de simulation a été réalisée à l'aide de la plateforme de simulation ajustée. Cette étude a mis en avant que l'augmentation de la hauteur de l'antenne d'émission permet de diminuer fortement la probabilité de coupure pour un seuil donné. Cependant, les configurations où le récepteur est proche de la route ou loin de l'émetteur présentent des probabilités de coupure fortes, même pour une antenne d'émission haute.

Au vu de la complexité des techniques utilisées dans les nouveaux réseaux de communication sans fil, il est indispensable d'aller plus loin qu'une simple métrique de probabilité de coupure. En effet, les nouveaux systèmes tels que le LTE incluent des mécanismes d'adaptation de codage et de modulation (ACM) qui adaptent en particulier la robustesse de la modulation en fonction de la qualité du lien radio de manière dynamique. De plus, les informations de corrélation spatiale et temporelle sont de plus en plus exploitées pour optimiser la transmission de l'information ([12]), [13]). Des outils de simulation de réseaux permettent de simuler de façon plus ou moins abstraite l'ensemble ou une partie des couches réseaux. L'amélioration des modules de calcul de propagation présents dans ces outils permettrait d'obtenir des résultats plus réalistes, que ça soit par rapport à la diversité spatiale utilisée dans les modes MIMO du LTE, au réalisme des évanouissements à petite échelle fréquentiels utilisés dans la sélection des blocs de ressource ou encore au réalisme des évanouissements à grande échelle utilisés dans le calcul du Rapport Signal à Interférences plus Bruit. Nous avons choisi de nous intéresser en particulier à l'impact des véhicules sur des métriques de type réseau, par exemple la perte de débit utile ou la consommation de puissance. En effet, la plupart des modèles n'intègrent pas la mobilité de l'environnement en extérieur, alors que beaucoup d'études traitent de l'impact de l'activité humaine en environnement intérieur. La nature des simulateurs réseaux est d'établir un compromis entre précision et temps de calcul. Pour pouvoir s'intégrer à ces outils, il faut donc également faire ce compromis et abandonner une prédiction purement déterministe comme nous

² L. Maviel, A. Cordonnier, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, "Measurements of large-scale variations caused by vehicular traffic in small-cells," in *Proc. of the 19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Jounieh, Lebanon, 2012.

l'avons fait jusqu'à présent, pour une prédiction plus flexible. C'est pourquoi nous allons étudier dans le chapitre suivant les différentes façons de réaliser des modèles hybrides : la transition de modèles purement déterministes vers des modèles plus statistiques, et l'enrichissement de modèles géométrique-statistiques avec des données déterministes.

Bibliographie

- [1] H. Suzuki, "A statistical model for urban radio propagation," *IEEE Transactions on Communications [legacy, pre-1988]*, vol. 25, no. 7, pp. 673–680, 1977.
- [2] S. Aun Abbas and A. Sheikh, "On understanding the nature of slow fading in LOS microcellular channels," in *Proc. of the 47th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 662–666, 1997.
- [3] J. Andersen, "Statistical distributions in mobile communications using multiple scattering," in *Proc. of the 27th URSI General Assembly*, (Maastricht, The Netherlands), 2002.
- [4] J. Salo, L. Vuokko, H. El-Sallabi, and P. Vainikainen, "An additive model as a physical basis for shadow fading," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 1, p. 13, 2007.
- [5] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *IEEE Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145–2146, 1991.
- [6] M. Ghoraishi, J. Takada, and T. Imai, "Identification of scattering objects in microcell urban mobile propagation channel," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11 Part 2, pp. 3473–3480, 2006.
- [7] W. Lee, *Mobile communications engineering*. New-York: McGraw-Hill, 1982.
- [8] Z. Li, R. Wang, and A. Molisch, "Shadowing in urban environments with microcellular or peer-to-peer links," in *Proc. of the 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 44–48, 2012.
- [9] T. Parks and C. Burrus, *Digital filter design*. New York: Wiley-Interscience, 1987.
- [10] Y. Yuan, "A review of trust region algorithms for optimization," in *Proc. of the 4th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICM'99)* (J. Ball and J. Hunt, eds.), (Oxford), pp. 271–282, Oxford University Press, 2000.
- [11] Y. Oda, K. Tsunekawa, and M. Hata, "Advanced LOS path-loss model in microcellular mobile communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2121–2125, 2000.
- [12] A. Saleh, O. Bulakci, J. Hämäläinen, S. Redana, and B. Raaf, "Analysis of the impact of site planning on the performance of relay deployments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, 2012.
- [13] C. Oestges, "Multi-link propagation modeling for beyond next generation wireless," in *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, (Loughborough, UK), pp. 1–8, 2011.

4

Modèles de propagation hybrides

Résumé

Nous avons proposé dans les chapitres précédents plusieurs techniques d'amélioration de la prédiction de propagation dans un contexte de petites cellules, par l'enrichissement de la scène. Cependant ces améliorations conduisent à une augmentation significative du temps de calcul. Cette augmentation de temps de calcul n'est pas acceptable quand il s'agit d'intégrer les résultats de propagation au sein d'un outil de simulation de réseaux. En effet, la simulation de réseaux est dynamique et requiert d'importantes ressources de calcul. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons d'utiliser les connaissances acquises sur les mécanismes de propagation ainsi que sur les statistiques de mobilité des éléments influant la dynamique du canal, pour construire des modèles préservant le réalisme des simulations tout en réduisant significativement le temps de calcul.

Dans un premier temps, nous proposerons un modèle hybride permettant la prise en compte du trafic de véhicules dans un environnement extérieur de type petites cellules. L'originalité de notre proposition tient en deux principes qui permettent d'améliorer le temps de calcul en conservant une précision suffisante des résultats. Premièrement, la génération d'obstructions du trajet direct est reproduite de manière stochastique en utilisant les statistiques de mobilité (vitesse moyenne des véhicules et densité du trafic) pour déterminer la durée moyenne entre deux passages de véhicules. Deuxièmement, nous réutilisons l'abstraction des variations du signal en un motif, que nous avons développée lors des mesures en environnement dynamique. Un motif est composé de variations positives et négatives du signal, qui peuvent être reliées de manière simple aux mécanismes de propagation (diffraction, obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel). Ainsi, l'atténuation due à l'obstruction par un véhicule est calculée de manière unique et rapide. La description du modèle hybride a fait l'objet d'une publication à une conférence internationale (1).

- (1) L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, “A hybrid propagation model for large-scale variations caused by vehicular traffic in small cells,” in *Proc. of the 2012 Global Communication Conference (Globecom)*, Anaheim, CA, USA, 2012.

Cependant, dans cette approche, même si deux liens proches dans l'espace possèdent des statistiques de mobilité similaires, le déclenchement des obstructions est réalisé indépendamment pour chaque lien. C'est pourquoi nous proposons ensuite plusieurs extensions pour corrélérer les processus de déclenchement entre différents liens. La modélisation de ces corrélations est en particulier utile pour l'évaluation d'algorithmes d'allocation des ressources et leur optimisation dans le cadre de réseaux de prochaines générations, par le biais de relais par une station de base voisine ou par un mobile coopératif. Ces extensions ont été publiées dans une conférence européenne (2). Finalement, nous évaluerons le modèle et ses extensions en termes de validité des résultats et de temps de calcul. Les données d'entrée du modèle, ainsi que les statistiques de premier ordre des évanouissements seront validées, à l'aide du modèle purement déterministe décrit dans le chapitre 2 et des mesures effectuées dans le chapitre 3. Nous montrerons que les propriétés des corrélations entre liens proches sont préservées dans les extensions proposées. Enfin, nous mettrons en avant les améliorations de temps de calcul obtenues grâce à l'approche hybride développée, pouvant atteindre un facteur de gain de 40.

- (2) L. Maviel, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, “Fast generation of correlated large-scale variations caused by vehicular scattering in small cells,” in *Proc. of the 7th European Conference on Antennas and Propagation*, Gothenburg, Sweden, 2013.

Dans un second temps, nous proposerons des améliorations aux Modèles Stochastiques de Canaux basés sur la Géométrie (MSCG). Ces modèles ont été développés pour permettre d'avoir à la fois une approche statistique, et donc générique, et de présenter des caractéristiques large-bande réalistes. La prise en compte de la mobilité de l'environnement, dans des environnements intérieur et extérieur sera intégrée à WINNER II, un des MSCGs les plus utilisés. L'approche hybride proposée pour l'activité humaine comprend une partie statistique basée sur la probabilité d'obstruction lorsqu'une personne est éloignée du lien radio et une partie déterministe lorsqu'une personne est au voisinage du lien radio. Le modèle proposé pour la prise en compte des véhicules est une adaptation du modèle hybride présenté dans la première partie en tenant compte des contraintes de WINNER 2 sur la non-connaissance de la géométrie des trajets et des angles verticaux d'arrivée et de départ.

4.A. Vers une modélisation plus statistique dans les outils déterministes

4.A.1. Introduction

Dans le modèle hybride décrit dans cette partie, nous proposons d'exploiter les statistiques de mobilité du trafic véhiculaire. Au lieu de générer des instances de voitures et de simuler leur mobilité sur tout le réseau, l'impact des véhicules est introduit de manière statistique pour tous les points où les trajets d'un lien radio croisent localement les routes de trafic. Les multi-trajets d'un lien radio sont en effet bien connus de manière statique, de même que les statistiques de mobilité (cf. chapitre 2).

Un processus stochastique à deux états est associé à chaque couple *lien radio / route croisée*. L'état du processus renseigne sur le fait que le Trajet Direct (TD) est obstrué ou non. En effet, l'obstruction du TD est le mécanisme de propagation le plus important dans le calcul des variations du signal. Il est aisé de comprendre de manière intuitive, que plus la statistique de densité de trafic est élevée, plus le taux de transition entre les deux états est important. Lorsque le TD est dans un état d'obstruction, la puissance reçue est altérée. Au lieu de calculer de manière déterministe les variations du signal pour chaque position où le véhicule obstruera le lien, nous avons choisi de simplifier l'impact d'un véhicule sous la forme d'un motif. Ce motif tient compte dans sa durée et son amplitude des phénomènes de propagation les plus importants : obstruction physique du premier ellipsoïde de Fresnel et oscillations de bord, dues aux arêtes du véhicule avant et après l'obstruction physique.

Nous décrirons dans un premier temps les paramètres d'entrée du modèle hybride, avant d'expliquer les paramètres du processus stochastique créé pour chaque couple *lien radio / route croisée*. Nous inclurons dans cette partie la description des différentes options disponibles pour introduire de la corrélation entre les différents processus. Dans un troisième temps, la génération des motifs de fluctuation sera détaillée. Chaque étape du modèle sera ensuite résumée, en particulier le calcul de l'atténuation pour un lien à un instant t . En effet, un lien peut être associé à plusieurs processus, donc plusieurs motifs qu'il faut combiner. Finalement, nous évaluerons le modèle proposé en termes de validité des résultats et de temps de calcul, en utilisant en particulier le modèle déterministe décrit dans le chapitre 2 et les mesures décrites dans le chapitre 3.

4.A.2. Données d'entrée

4.A.2.1. Statistiques de mobilité

Les statistiques de mobilité sont obtenues en enregistrant à chaque instant t les informations en chaque point local du réseau de mobilité simulé. Le temps de simulation nécessaire pour avoir une statistique fiable est proportionnel à la taille du réseau et demande un temps d'adaptation pour atteindre l'équilibre du trafic.

La simulation de mobilité est obtenue en utilisant le modèle proposé dans le chapitre 2, basé sur VanetMobiSim [1] et sur les données de réseau routier d'OpenStreetMap (OSM, [2]). Dans le but de valider et comparer les résultats de mobilité véhiculaire obtenus avec différents modèles, deux métriques sont communément utilisées par la communauté [3] : la densité moyenne (véhicules/km²) et la vitesse moyenne (m/s) le long des arêtes représentant le réseau routier. Ces métriques représentant les statistiques de la mobilité sont réutilisées sous une forme similaire. Dans chaque segment représentant une rue, les informations de vitesse moyenne s_m en m/s et de ratio de densité de trafic ρ_r sont disponibles en chaque point. La densité de trafic représente la proportion de temps où un point local est occupé par un véhicule. Des exemples de ces deux métriques sont présentés sur la figure 4.1.

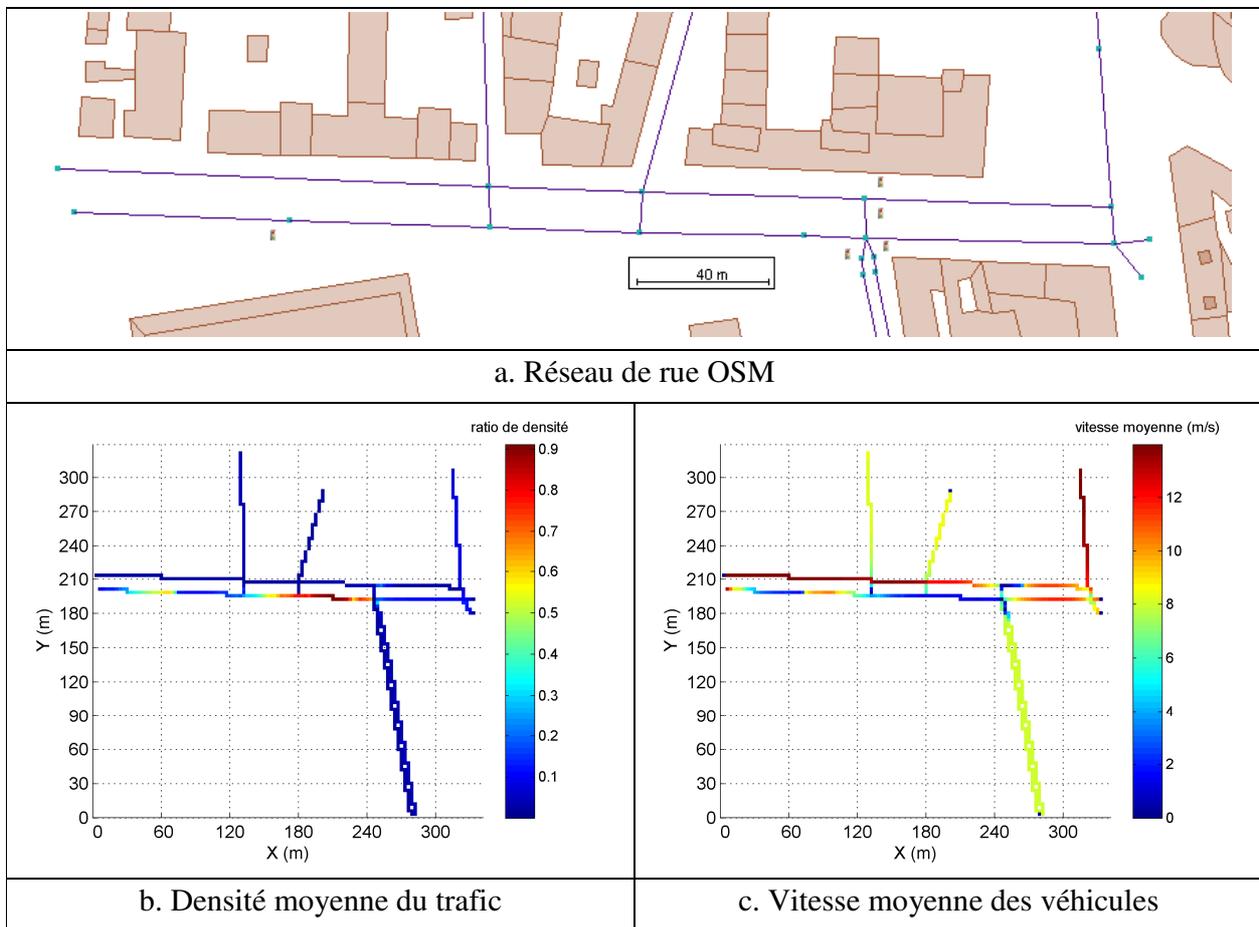


Figure 4.1 : Exemples d'un réseau de mobilité et des statistiques de trafic

Nous définissons également des statistiques sur les véhicules, notées ζ_v . Les dimensions d'un véhicule suivent des standards et sont donc modélisées par des distributions normales. Pour chaque type de véhicule v , les statistiques incluent la moyenne (μ) et la variance (σ) de la longueur (l), de la largeur (w) et de la hauteur (h). De plus, un ratio de distribution τ_v permet

d'assigner à chaque type de véhicule une probabilité discrète de génération, la somme des probabilités étant égale à 1. Dans le cas de liens corrélés, les positions et dimensions des véhicules peuvent également être enregistrées à chaque période lors de la simulation de mobilité.

4.A.2.2. Prédiction de propagation statique

La prédiction de propagation statique est calculée en utilisant l'outil basé sur le lancer de rayon existant à SIRADEL [4]. Les mécanismes de cet outil de prédiction à lancement de rayons peuvent être consultés dans le chapitre 2. Les sorties de cet outil renseignent sur le caractère large-bande du canal de propagation avec la liste des trajets diffusés (Trajet Direct, réflexions, diffractions, et leurs combinaisons...). Pour chaque trajet de rayon dans l'ensemble des NP rayons, nous disposons :

- Du champ complexe $\{B_p e^{j\phi_p}\}$
- De la puissance P_p
- De la direction de départ
- De la direction d'arrivée
- De la trajectoire (Ensemble des positions des points de diffusion)

La figure 4.2 illustre une scène de propagation ainsi que l'ensemble des trajectoires des rayons.

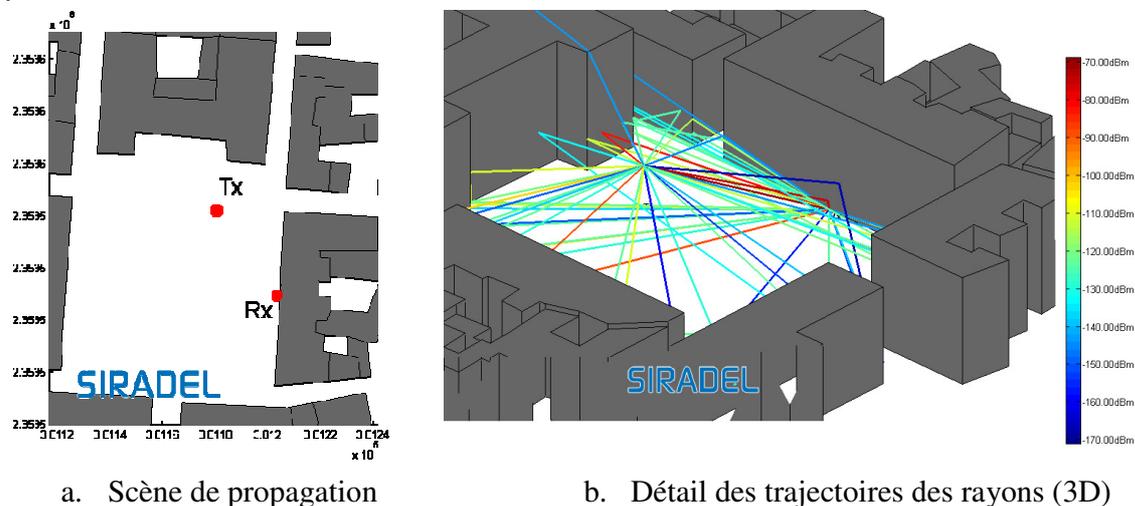


Figure 4.2 : Exemple d'une base de données vectorielle et des rayons des trajectoires

4.A.3. Paramètres du processus

Ce paragraphe décrit comment chaque couple *lien radio / route croisée* est représenté par un processus stochastique à deux états qui modélise l'état d'obstruction du lien.

4.A.3.1. Processus à deux états

Un processus à deux états est associé à chaque couple *lien radio / route croisée*, comme illustré sur la figure 4.3. La durée de vie de l'état visible représente la durée entre deux obstructions. Elle est dépendante de la densité de trafic ρ_r , de la vitesse moyenne s_m et des statistiques des véhicules ζ_v . La durée de vie de l'état d'obstruction représente le temps qu'un véhicule occupe le point local d'intersection entre le lien radio et la route croisée. Le lecteur notera que le processus à deux états n'est pas un processus de Markov, car la durée de l'état d'obstruction est arbitraire et donc n'est pas un processus sans mémoire, alors que la durée de vie de l'état visible l'est. Les paramètres des deux états du processus sont décrits ci-dessous.

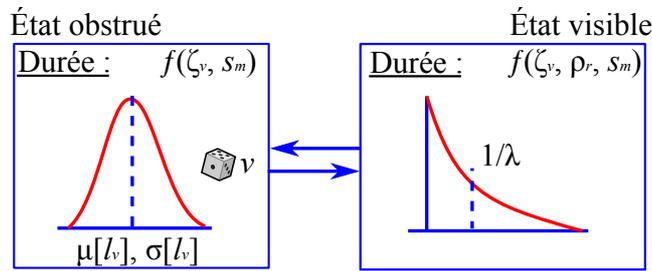


Figure 4.3 : Processus à deux états

4.A.3.2. Déclenchement de l'état obstrué

Chaque lien radio possède sa propre liste de processus pour chaque route qui croise le lien. Lorsqu'il n'y a pas de contrainte de corrélation entre les différents liens, le déclenchement d'un processus est indépendant des processus des autres liens. Le paramètre de durée de vie de l'état visible λ est l'inverse de la moyenne de la distribution exponentielle. Comme la durée de vie de l'état visible représente le temps entre deux obstructions, nous relierons ce paramètre aux statistiques de mobilité connues. Le **croisement** est défini comme le passage d'un véhicule sur le point local d'intersection. L'**obstruction** est définie comme le masquage physique de la projection sur le sol du trajet direct par un véhicule. Pour les liens radio perpendiculaires à la route, la durée du croisement et de l'obstruction est identique. Cependant, pour les liens obliques à la route, avec un angle γ , l'obstruction peut démarrer avant et continuer après le croisement (cf. figure 4.4), car les longueurs effectives sont différentes. La longueur effective pondérée de croisement (lep_{cross}) et la longueur effective pondérée d'obstruction (lep_{obs}) sont définies comme les sommes des longueurs effectives des véhicules v dans le cas respectif de croisement ou d'obstruction, pondérées par le taux de génération des véhicules τ_v (4.1).

$$\begin{aligned}
 lep_{cross} &= \sum_v (\mu[l_v] \times \tau_v) \\
 lep_{obs} &= \sum_v ([\mu[l_v] + \mu[w_v] \times \cot(\gamma)] \times \tau_v)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Dans la majorité des cas, la durée d'obstruction est donc plus large que la durée de croisement. La durée moyenne de croisement (\bar{d}_{cross}) et la durée moyenne d'obstruction (\bar{d}_{obs}) sont définies comme la longueur effective pondérée, respectivement de croisement et d'obstruction, divisée par la vitesse moyenne locale s_m .

$$\begin{aligned}\bar{d}_{cross} &= lep_{cross} / s_m \\ \bar{d}_{obs} &= lep_{obs} / s_m\end{aligned}\quad (4.2)$$

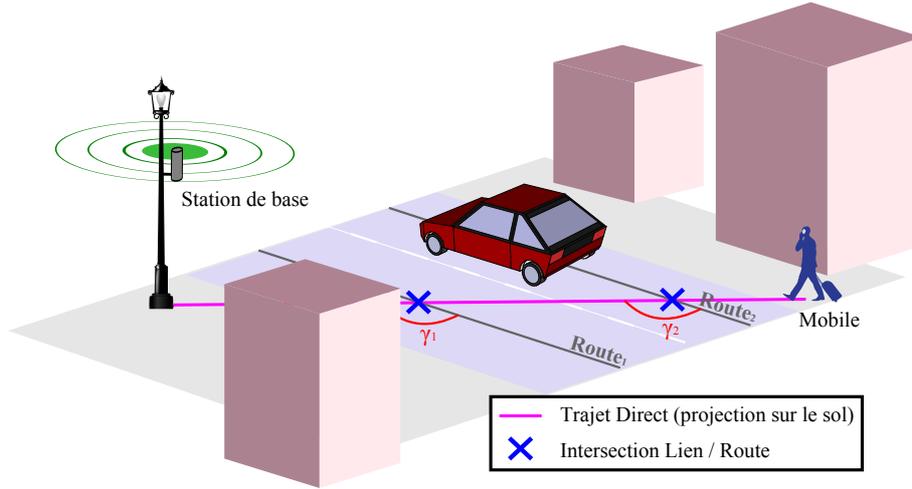


Figure 4.4 : Scénario de petites cellules et intersections lien / route

Le nombre attendu de croisements $E[n_{cross}]$ pendant la simulation est défini comme le rapport entre la durée totale de simulation, pondérée par la densité de trafic local, et la durée moyenne de croisement.

$$E[n_{cross}] = (d_{sim} \times \rho_r) / \bar{d}_{cross} \quad (4.3)$$

La durée totale attendue d'obstruction $E[dt_{obs}]$ est ensuite obtenue en multipliant le nombre attendu de croisements par la durée moyenne d'une obstruction. La valeur de $E[dt_{obs}]$ est donc dépendante de l'angle γ .

$$E[dt_{obs}] = E[n_{cross}] \times \bar{d}_{obs} \quad (4.4)$$

Finalement, la durée moyenne attendue entre deux obstructions $E[d_{bw}]$ est obtenue en calculant la différence entre la durée totale de simulation et la durée totale d'obstruction et en la divisant par le nombre de croisements. Le paramètre λ est ensuite calculé comme l'inverse de $E[d_{bw}]$.

$$\begin{aligned}E[d_{bw}] &= (d_{sim} - E[dt_{obs}]) / E[n_{cross}] \\ &= \bar{d}_{cross} / \rho_r - \bar{d}_{obs} \\ \lambda &= \rho_r / (\bar{d}_{cross} - \rho_r \times \bar{d}_{obs})\end{aligned}\quad (4.5)$$

4.A.3.3. Corrélation entre processus

Le paramétrage de λ de chaque processus en fonction des statistiques de mobilité se prête bien à la simulation d'un lien radio unique ou de liens décorrés. Cependant dans un environnement réel, lorsque deux récepteurs sont proches l'un de l'autre, l'atténuation subie par un récepteur sera très proche de l'atténuation du récepteur voisin, à la fois dans le temps, mais aussi en amplitude. En fonction de la position respective des récepteurs par rapport à la station de base, elle pourra avoir lieu avant, après ou simultanément. Afin de simuler au mieux les couches PHY et MAC et pouvoir exploiter les corrélations spatio-temporelles, les utilisateurs du modèle peuvent avoir besoin de cette corrélation.

Une première méthode pour obtenir la corrélation est de faire transiter les processus de l'état visible à l'état obstrué en fonction des positions des véhicules, préalablement enregistrées à chaque temps t de la simulation. Le déclenchement de l'état obstrué se faisant sur des données physique corrélées, les processus seront implicitement corrélés dans l'espace et le temps. Cependant cette méthode peut être coûteuse en stockage de données sur le disque et en temps de simulation (simulation de mobilité, écriture et lecture des données).

Une deuxième méthode consiste à grouper les processus des différents liens en chaînes de processus corrélés. En effet, pour une voie à sens unique, les processus dont le croisement est à la fin de la rue ne se déclencheront que si les processus du début de la rue ont été déclenchés auparavant. Nous définissons donc un ensemble de chaînes, sur la totalité du réseau de mobilité. Une chaîne est définie pour chaque intervalle séparant deux intersections d'une même route orientée dans une rue (cf. figure 4.5). En effet, le croisement entre plusieurs rues brouille la simulation de mobilité pour plusieurs raisons : le temps d'arrêt d'un véhicule à l'intersection et les statistiques de déplacement sur chaque carrefour ne sont pas connus de manière statistique. De plus, la corrélation des évanouissements n'est utile qu'entre deux récepteurs proches ou deux émetteurs le long d'une même rue. Les processus, qui sont représentés de manière géographique par l'intersection entre un lien et une route, sont rassemblés dans les chaînes correspondantes à l'identifiant de la route croisée. Dans une chaîne, le déclenchement de chaque processus est relatif au déclenchement du premier processus, appelé maître. Le déclenchement de l'état d'obstruction pour le processus maître est stochastique, comme pour le modèle à liens indépendants. Le déclenchement de l'état d'obstruction pour les autres processus, appelés esclaves, dépend des caractéristiques géométriques des liens. Le temps de déclenchement Δt (en secondes) du processus i est défini par (4.6)

$$\Delta t_i = \Delta d_i / \bar{v}_i \quad (4.6)$$

où Δd_i (en mètres) est la distance le long de la route entre le point intersection du processus maître et le point d'intersection du processus esclave (cf. figure 4.5). La vitesse \bar{v}_i en mètres/secondes est la moyenne entre la vitesse locale du processus maître et la vitesse locale du

processus esclave i . Comme une chaîne ne contient aucune intersection, la vitesse est considérée comme linéairement croissante ou décroissante le long de la rue. Les dimensions du véhicule généré par le processus maître sont également propagées avec le temps de déclenchement.

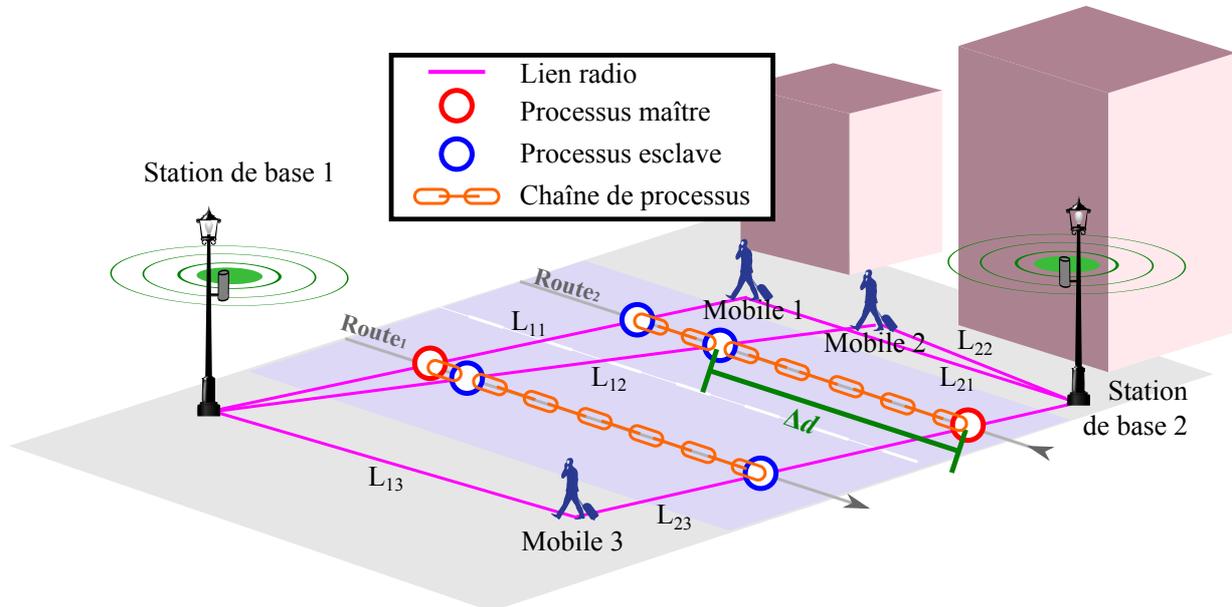


Figure 4.5 : Chaînes de processus corrélés

4.A.3.4. Durée de l'état d'obstruction

La durée de l'état d'obstruction ne correspond pas à la durée de l'obstruction par le véhicule. En effet, plusieurs véhicules circulant sur une même route peuvent en même temps obstruer physiquement le trajet direct, mais un seul peut occuper physiquement le point d'intersection. Par conséquent la durée de vie de l'état d'obstruction est simplement la durée moyenne de croisement \bar{d}_{cross} calculée dans (4.2). Lorsque le processus entre dans l'état d'obstruction, un motif de fluctuation est généré et associé au lien (voir ci-dessous). Lorsque la durée moyenne de croisement est écoulée, le processus retourne dans l'état visible. Dans le cas de liens obliques, le lien radio peut être obstrué par deux véhicules consécutivement sans retourner par l'état visible. Le lecteur notera que dans le modèle, ce comportement ne peut pas être reproduit, car le processus retourne à l'état visible dès la durée de croisement terminée, au moins pour une période de simulation.

4.A.4. Génération des motifs de fluctuation

4.A.4.1. Phénomènes physiques

Les mesures effectuées dans le chapitre 3 ont permis d'analyser et déterminer les principaux phénomènes physiques de propagation dus au trafic véhiculaire dans des petites cellules. Le

passage de véhicule a pu être identifié à des motifs de fluctuation, comme celui présenté sur la figure 4.6a. Dans ce modèle hybride, nous proposons de générer ce même type de motifs de manière générique suivant le format de la figure 4.6b. La durée et la puissance relative de chaque segment s'adapte en fonction du véhicule qui obstrue le lien au lieu de calculer pour chaque période de simulation la résultante des phénomènes de propagation. Le point essentiel est donc la définition et le paramétrage de la durée et de la puissance relative des motifs.

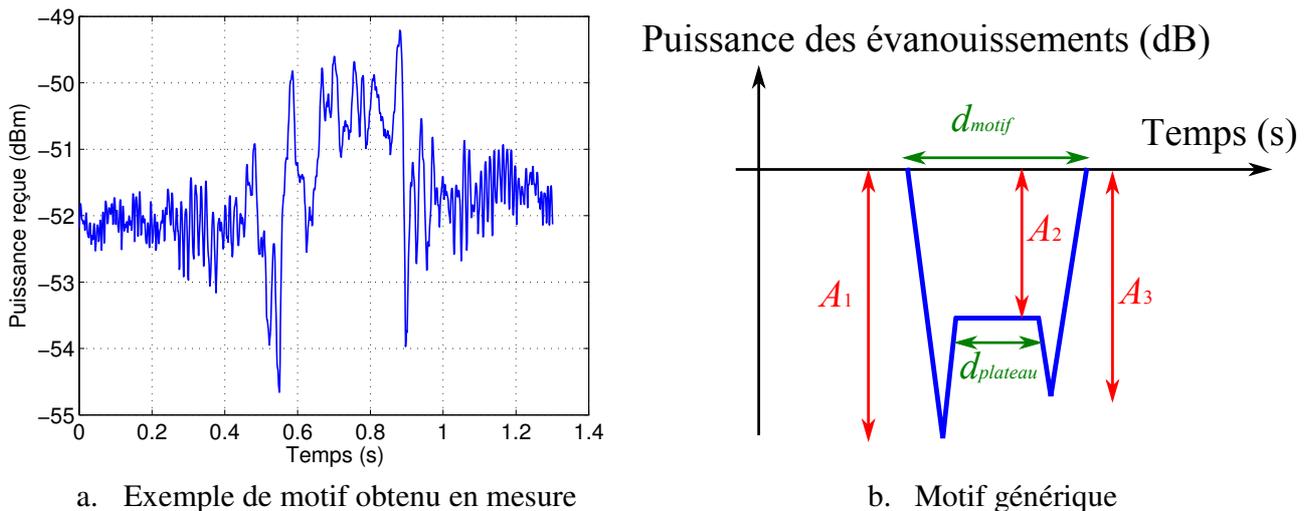


Figure 4.6 : Motifs de fluctuation

Dans les discussions suivant les mesures du chapitre 3, deux phénomènes principaux ont été dégagés. Premièrement, tous les motifs font apparaître un plateau au centre des fluctuations. Ce plateau est associé au masquage physique du lien radio par un véhicule. Ensuite, les fluctuations en dehors du masquage, appelées oscillations de bord, sont non négligeables, surtout les plus proches du plateau. Ces oscillations sont dues aux diffractions sur les arêtes du véhicule. Ce phénomène peut être représenté par un modèle analytique : parmi les différentes contributions de diffraction sur les arêtes du véhicule, celle dont le trajet est le plus court est plus importante en puissance (cf. figure 4.7). Lorsque le véhicule approche du croisement, la longueur du trajet de diffraction prédominant approche la longueur du Trajet Direct (TD). La différence de longueur génère un changement de phase qui explique les oscillations observées : la recombinaison est parfois destructive, parfois constructive. Pour simplifier les calculs, nous choisissons d'utiliser ce modèle analytique en ne retenant que l'oscillation précédant et suivant la coupure du Trajet Direct. Le maximum de ces oscillations intervient lorsque le TD et le rayon diffracté sont en déphasage et que leur puissance se combine de manière destructive. Le paramétrage de la durée et de la puissance relative des motifs en fonction des modèles choisis est expliqué dans les paragraphes suivants.

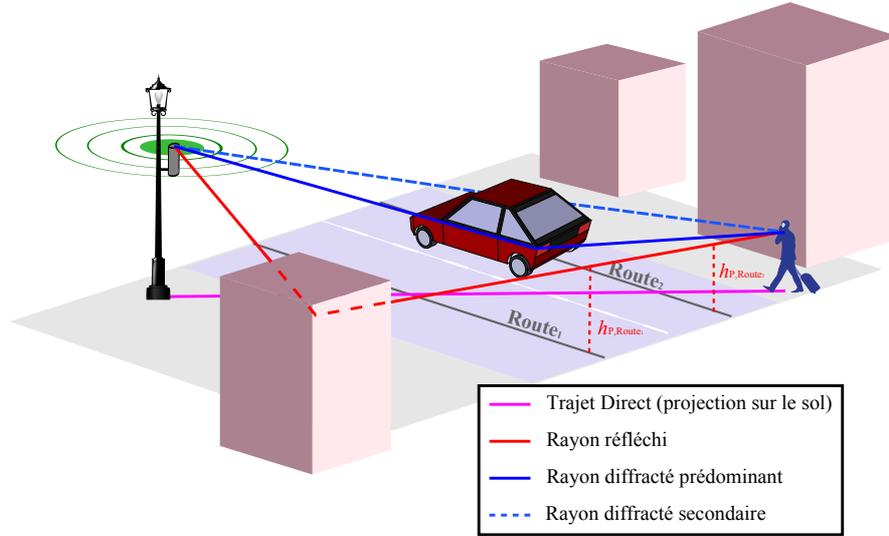


Figure 4.7 : Trajet direct, réflexion et diffractions sur les arêtes d'un véhicule dans un scénario de petites cellules

4.A.4.2. Durée

La durée d'un motif est reliée à la durée d'obstruction d'un véhicule v . La longueur effective d'une obstruction dépend des dimensions du véhicule obstruant et de l'angle du lien oblique γ suivant (4.7). La durée d'obstruction dépend de la longueur effective d'obstruction et de la vitesse moyenne s_m suivant l'équation (4.8). Le facteur χ modélise l'excès de durée du motif dû aux oscillations de bord produits par la diffraction sur les bords des véhicules. Pour calculer ce facteur, l'hypothèse analytique de diffraction proposée ci-dessus est utilisée et la distance d_{phase} qui génère le rayon déphasé le plus proche est calculée en utilisant la géométrie. Ensuite, le facteur χ est calculé comme le rapport entre la distance totale du motif sur la distance de masquage l_{obs} .

$$le_{obs} = l_v + w_v \times \cot(\gamma) \quad (4.7)$$

$$d_{obs} = le_{obs} / s_m \quad (4.8)$$

$$\chi = (d_{phase} + le_{obs}) / le_{obs} \quad (4.9)$$

Finalement, les motifs observés lors des mesures révèlent que plus l'excès de durée est important, plus la longueur du plateau est réduite. Ce comportement est modélisé par les formules de l'équation (4.10). La durée des oscillations est équitablement répartie entre les segments après et avant le plateau.

$$\begin{aligned} d_{motif} &= \chi \times d_{obs} \\ d_{plateau} &= d_{obs} / \chi \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.A.4.3. Amplitude

La cause principale de l'atténuation dans la zone de plateau est la perte de puissance du trajet direct. Cette perte est facilement modélisée par l'obstruction du premier ellipsoïde de Fresnel du lien radio. Cette perte est calculée de même manière que le modèle déterministe, cf. chapitre 2, §B.2.

Lorsque le trajet direct est atténué, les autres trajets peuvent avoir des puissances comparables, ce qui résulte en des combinaisons destructives ou constructives. Cependant, ces trajets peuvent également être bloqués par le véhicule obstruant le trajet direct. Les trajets corrélés sont définis comme l'ensemble des trajets dont la trajectoire est également croisée par le véhicule. C'est typiquement le cas de la réflexion sur le sol. La figure 4.8 illustre des cas de trajets corrélés et non corrélés. Dans le cas de trajet corrélé, la puissance du trajet est pondérée par l'atténuation due à l'obstruction du premier ellipsoïde de Fresnel.

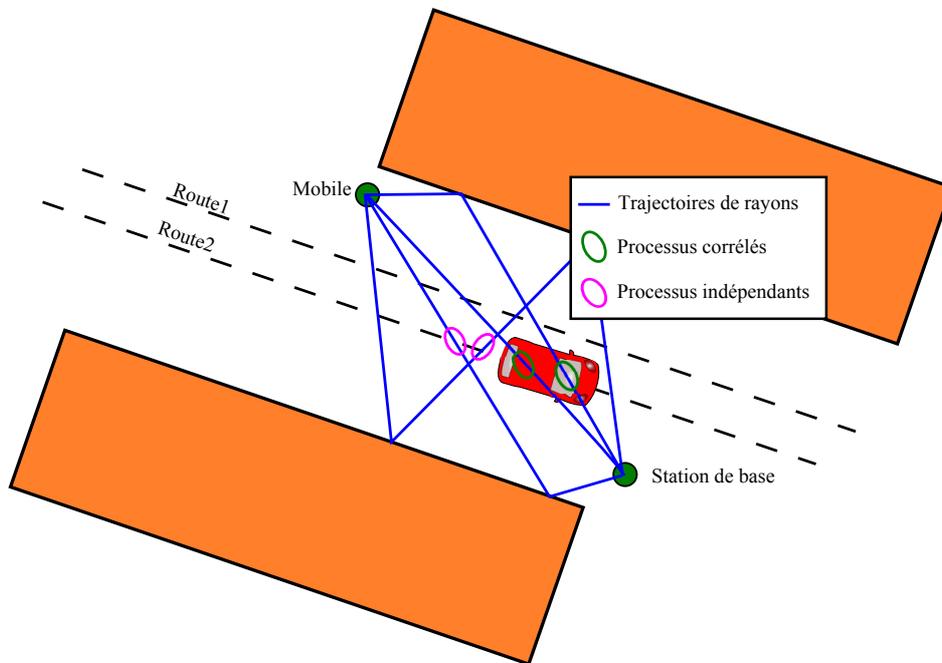


Figure 4.8 : Exemple de corrélation de multi-trajets

Les trajets non corrélés ne sont pas obstrués par le véhicule qui bloque le trajet direct, mais ils peuvent être obstrués par d'autres véhicules. Leur obstruction est donc décidée de manière pseudo-aléatoire, en fonction de la densité de trafic locale et de la hauteur du rayon sur chacun des points de la route croisée par la trajectoire du rayon ($h_{P,Road}$, cf. figure 4.7). La probabilité de blocage est calculée à l'initialisation du processus de simulation en utilisant :

$$\tau_{block} = \sum_v \rho_r \times P[h_v \geq h_{P,Road}] \times \tau_v \quad (4.11)$$

où $P[h_v \geq h_{p,Road}]$ est la probabilité qu'un véhicule v soit plus haut que la hauteur de l'intersection. Comme les dimensions du véhicule suivent des distributions normales, $P[h_v \leq h_{p,Road}]$ peut être calculé comme la fonction de répartition pour $x = h_{p,Road}$.

$$\begin{aligned}
 P[h_v \geq h_{p,Road}] &= (1 - P[h_v \leq h_{p,Road}]) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{h_{p,Road} - \mu[h_v]}{\sigma[h_v] \sqrt{2}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

où erf est la fonction d'erreur.

L'ensemble S de NP multi-trajets statiques est obtenu en utilisant l'outil de lancer de rayon comme décrit en entrée. L'atténuation A_2 est obtenue en calculant la différence de puissance cohérente (somme des champs complexes $B_p e^{j\varphi_p}$) entre S et l'ensemble modifié S' (qui contient NP' trajets notés p') suivant l'équation (4.13). Le lecteur notera que A_2 peut être positif ou négatif.

$$A_2 = P_{static} - 20 \times \log_{10} \left(\sum_{p'=0}^{NP'} B_{p'} e^{j\varphi_{p'}} \right) \tag{4.13}$$

Le champ du rayon diffracté est calculé suivant :

$$f_{diff} = c(\alpha, h_v) \times f_{TD} \times e^{-j\pi} \tag{4.14}$$

où f_{TD} est le champ complexe du trajet direct et c est le coefficient scalaire TUD, qui dépend des directions α d'incidence i et de départ d du rayon sur le point de diffraction. En pratique, le coefficient de diffraction TUD est calculé en 2D, suivant l'hypothèse de propagation de l'onde dans un plan horizontal (cf. figure 4.9). Les angles φ_i et φ_d représentent les angles horizontaux d'incidence et de départ du rayon diffracté.

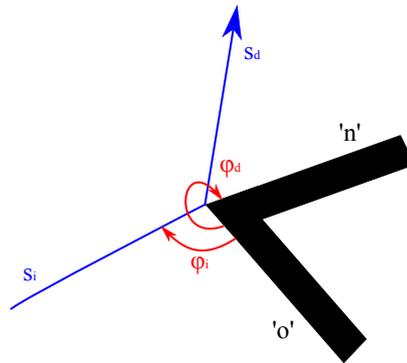


Figure 4.9 : Paramètres du calcul TUD en 2D

Comme dans le calcul déterministe, un facteur de calibrage α permet de corriger l'approximation en hauteur du coefficient TUD calculé dans le plan horizontal, par la différence entre la hauteur théorique du point de diffraction h_{th} et la hauteur du véhicule h_v suivant l'équation (4.15). Finalement, le champ du rayon diffracté est rajouté à l'ensemble S . L'ensemble S'' obtenu avec $NP'' = NP + 1$ rayons permet de calculer A_1 and A_3 en utilisant la différence de puissance cohérentes comme décrit dans (4.13).

$$c_{UTD,3D}(c_{UTD,2D}, h_v) = \begin{cases} c_{UTD,2D}(\alpha, h_v) & \text{for } h_v \geq 2 \times h_{th} \\ c_{UTD,2D}(\alpha, h_v) \times \frac{1}{1 + (h_{th} - h_v/2)^4} & \text{for } h_v < 2 \times h_{th} \end{cases} \quad (4.15)$$

4.A.5. Résumé des étapes du processus

1. Calcul des statistiques de mobilité s_m et ρ_r en chaque point de l'ensemble du réseau véhiculaire en utilisant un simulateur de mobilité. Sur une durée de simulation longue ($\geq 1h$), la présence de véhicules et leur vitesse moyenne est enregistrée à espace régulier le long des rues, puis moyennée pour aboutir aux statistiques.
2. Prédiction de la propagation de l'ensemble S de NP multi-trajets en utilisant un outil de lancer de rayon et des données géographiques de terrain
3. Pour chaque couple *lien radio / route croisée*, création d'un processus à deux états et calcul du paramètre de transition λ en utilisant (4.5)
4. Lancement du calcul itératif. À chaque itération et pour chaque processus, un nombre aléatoire est généré à partir d'une distribution uniforme sur $[0 ; 1]$ et est comparé à λ . Si le résultat est inférieur, l'état passe à obstrué.
5. A chaque fois que le processus rentre dans l'état obstrué
 - a. Génération d'un véhicule v selon les statistiques de type et de dimensions ζ_v .
Calcul de la durée de croisement et affectation à la durée de l'état.
 - b. Génération du motif de fluctuation selon 4.A.4 et affectation au lien
6. Pour chaque itération, calcul de la puissance de chaque lien en prenant le minimum de la puissance relative actuelle de chaque processus

Pour le modèle multi-liens basé sur la mobilité des véhicules, l'étape 4 est remplacée par :

4. A chaque itération et pour chaque processus, la transition à l'état obstrué se fait par un test sur l'intersection entre le point d'intersection et l'ensemble des positions des voitures à cet instant.

Pour le modèle multi-liens basé sur la géométrie, l'étape 4 est remplacée par :

4. A chaque itération et pour chaque chaîne de processus corrélés, un nombre aléatoire est généré pour le processus maître à partir d'une distribution uniforme sur $[0 ; 1]$ et est comparé à λ . Si le résultat est inférieur, l'état passe à obstrué. De plus, le véhicule généré et le temps de déclenchement est propagé aux processus esclaves en utilisant (4.6)

4.A.6. Evaluation du modèle

Afin d'évaluer le modèle hybride proposé en terme de précision et de rapidité, différentes métriques issues de la simulation sont comparées à des valeurs de référence. Dans un premier temps, l'émulation de la mobilité et les statistiques de premier ordre des résultats de simulation seront validées par comparaison aux résultats des mesures décrites dans le chapitre 3. Dans un deuxième temps, le gain en temps de simulation apporté par l'approche hybride sera illustré dans un contexte de déploiement de réseau hétérogène. Les résultats issus du modèle hybride seront comparés aux résultats de simulation avec l'outil purement déterministe développé dans le chapitre 2. Ces comparaisons valideront également les statistiques de premier ordre, ainsi que les propriétés de corrélation multi-liens.

4.A.6.1. Comparaison aux résultats de mesures

Les scénarios de mesures sont numérisés en utilisant des données vectorielles 3D de bâtiment ainsi que des données OSM pour représenter le réseau routier. Parmi l'ensemble des mesures effectuées, 4 scénarios typiques sont utilisés pour la validation. Dans chacun des environnements de type urbain **A** et **B**, deux orientations différentes du lien par rapport à la rue sont sélectionnés : perpendiculaire (\perp) et oblique (α) avec un angle de 30° . La hauteur de l'antenne d'émission est de 3,6 m et l'antenne de réception est à hauteur humaine (1,5 m). La simulation de mobilité et la prédiction statique de la propagation sont calculées de manière indépendante. Les conditions de trafic sont adaptées aux conditions observées lors des mesures. Ces mesures ont été faites en milieu de journée avec une faible densité de trafic (0,03), dont la composition est partagée entre les transports publics, les utilitaires et les voitures (cf. tableau 4.1). Pour un résumé des paramètres et des valeurs typiques du modèle de mobilité véhiculaire, le lecteur peut se reporter à [1]. La valeur maximale de vitesse autorisée sur la route est de 10 m/s pour l'environnement A et 13 m/s pour l'environnement B. Pour la prédiction de propagation statique, les paramètres du modèle à lancer de rayons sont identiques aux conditions de mesure : fréquence à 2 GHz et polarisation verticale. Seules les réflexions sont modélisées, car les diffractions contribuent majoritairement aux évanouissements à petite échelle en condition de visibilité directe. Le nombre de réflexions sur les murs est limité à deux, en plus de la réflexion sur le sol pondérée d'un poids de 0,5. La simulation de propagation dynamique est effectuée sur une durée de 1h.

Deux métriques sont utilisées pour valider le modèle. La première métrique est le paramètre régissant le processus à deux états : la durée inter-obstruction, dont la distribution est

exponentiellement décroissante et de moyenne $1/\lambda$. Les distributions de durée inter-obstruction sont reconstruites à partir des mesures et comparées à une distribution exponentielle ajustée et à la distribution utilisée dans la simulation, où λ est calculé à partir de (4.5). La vitesse moyenne au croisement entre la route et le lien radio correspond aux vitesses maximales autorisées. En effet, le réseau routier est localement simple : peu de trafic et pas d'intersection proche. La seconde métrique est la probabilité de coupure (P_c) à un niveau x en dB. Cette métrique est calculée comme la probabilité cumulée que la puissance reçue variant dans le temps P_{dyn} est plus faible ou égale à la puissance statique sans véhicule P_{stat} moins un niveau de coupure x .

$$P_c(x) = P(P_{dyn} \leq (P_{stat} - x)) \quad (4.16)$$

où P_{dyn} et P_{stat} sont en dBm. La valeur de P_c est comprise entre 0 (pas de coupure) et 1 (coupure constante).

Pour rappel, les résultats de mesure sont tirés de la partie B du chapitre 3, où nous mesurons la variation de puissance du signal, causée par un trafic réel de véhicules. Les scénarios sont de type dense urbain, sur des heures de circulation moyenne (pendant les heures de travail, la semaine).

Etant donné que les mesures ont été effectuées dans des conditions réelles, la puissance moyenne locale varie pendant une session (par exemple si un véhicule garé bouge). Pour permettre un calcul correct de (4.16), la puissance moyenne locale P_{stat} est obtenue en effectuant une moyenne glissante sur les échantillons de mesure. Concernant la simulation, la probabilité P_c est calculée en utilisant la somme des rayons pour P_{stat} et les résultats de simulation pour P_{dyn} . Des niveaux de coupure entre 2 et 8 dB à un pas de 0,25 dB ont été choisis pour observer l'impact des différents types de véhicule traversant le lien radio.

Tableau 4.1 : Distribution des véhicules

Véhicule	Voiture	Utilitaire	Bus
Proportion (τ_v)	0,85	0,12	0,03

Les résultats de comparaison des distributions des durées inter-obstruction sont présentés sur la figure 4.10. Nous observons que la distribution exponentielle correspond globalement à la distribution de la durée inter-obstruction, sauf pour deux zones bien précises de ces distributions. Pour des courts délais (≈ 0 s, cf. Z1), la distribution exponentielle théorique prédit une densité de probabilité non nulle. Cette situation n'est pas totalement réaliste car les véhicules ont toujours des distances de sécurité. Pour des délais larges (> 100 s, cf. Z2) certaines valeurs de durée inter-obstruction sont observées en mesure alors que la courbe théorique tend rapidement vers 0. En effet, les véhicules ont tendance à arriver en paquets qui peuvent être périodiques, par exemple dû à un effet de rétention de feux de signalisation. Des valeurs plus larges peuvent alors avoir des

probabilités plus importantes au lieu de tendre vers 0 comme dans le cas d'une distribution exponentielle.

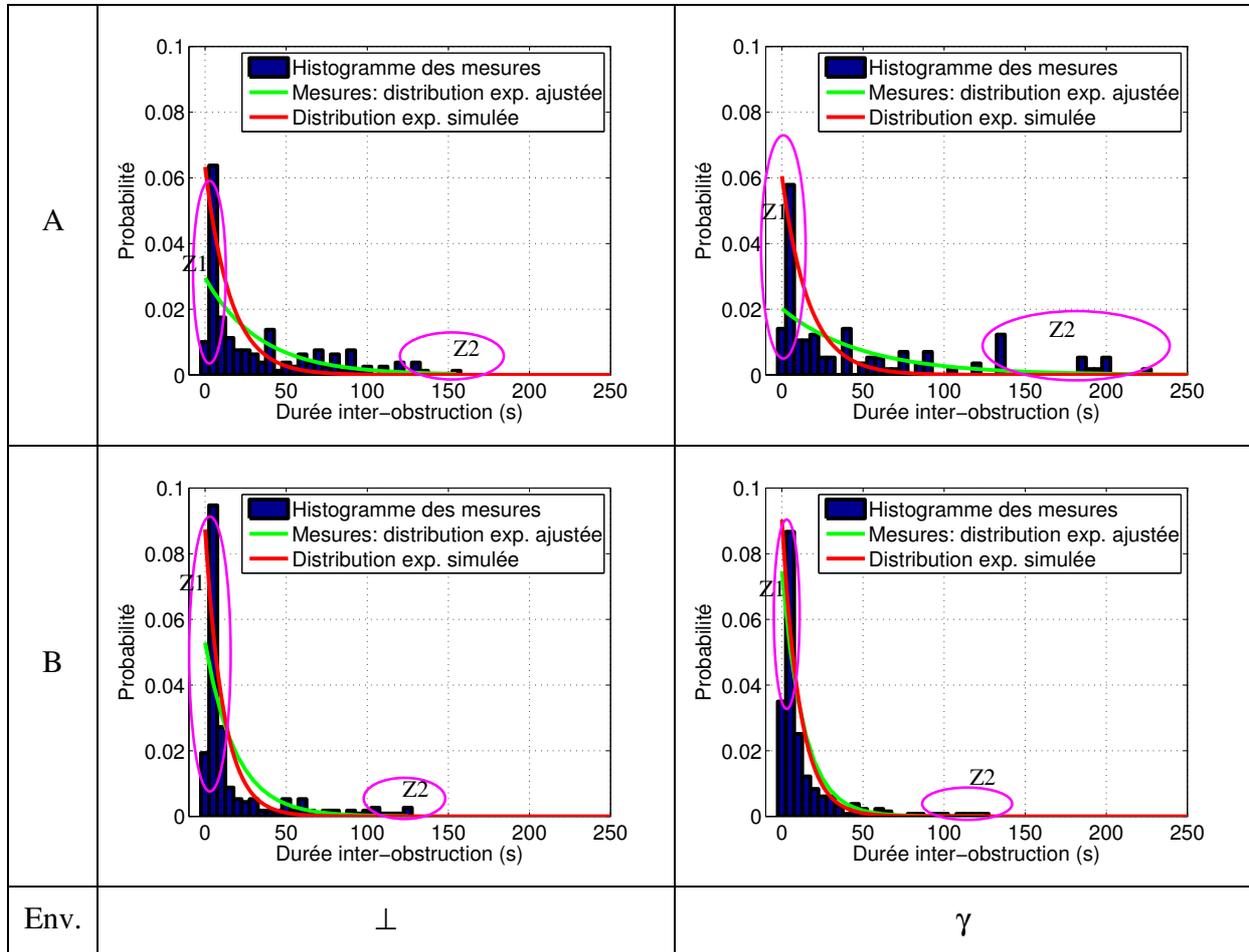


Figure 4.10 : Distribution des durées inter-obstruction, comparaison avec les mesures

La figure 4.11 compare les probabilités de coupure mesurées et simulées pour différents niveaux de coupure. Nous observons premièrement que toutes les courbes suivent la même tendance : lorsque le niveau de coupure augmente, la probabilité diminue. Les déviations locales observées entre mesures et simulations sont expliquées par les inconnues des conditions de mesure, à la fois en statique (voitures garées, végétation) ou dynamique (vent).

Les valeurs de probabilité de coupure sont faibles, en particulier dans les configurations où le lien est perpendiculaire à la route, avec un ordre de grandeur d'environ 1 %. Cet ordre de grandeur peut être expliqué par la faible densité de trafic observée durant les mesures. En effet, dans les cas les plus simples, la densité de trafic et la distribution des véhicules peuvent être directement associées à la probabilité de coupure. Par exemple, seuls les bus génèrent des coupures directes de la visibilité et donc des évanouissements de 8 dB ou plus dans les

configurations \perp . Sachant que les bus représentent 3 % du trafic total, dont le rapport de densité est de 3 %, sur deux routes, la probabilité attendue est de $0,03 \times 0,03 \times 2 = 0,18$ %. En accord avec ce qui est conclu dans le chapitre 3, la probabilité de coupure est plus large lorsque le récepteur est à la limite du rayon de la cellule (configurations α). À un niveau de 2 dB, la probabilité de coupure est de 5 à 10 fois plus élevée que pour les configurations \perp . Cette différence est expliquée par deux facteurs : premièrement, les phénomènes de diffraction et d'atténuation due à l'obstruction sont plus importants et la durée des motifs d'obstruction plus longue, à cause du lien oblique.

Finalement, la baisse de probabilité de coupure observée de 4 à 8 dB est expliquée par la présence d'utilitaires, dont la hauteur est intermédiaire entre les voitures et les bus, ce qui implique ces atténuations moyennes.

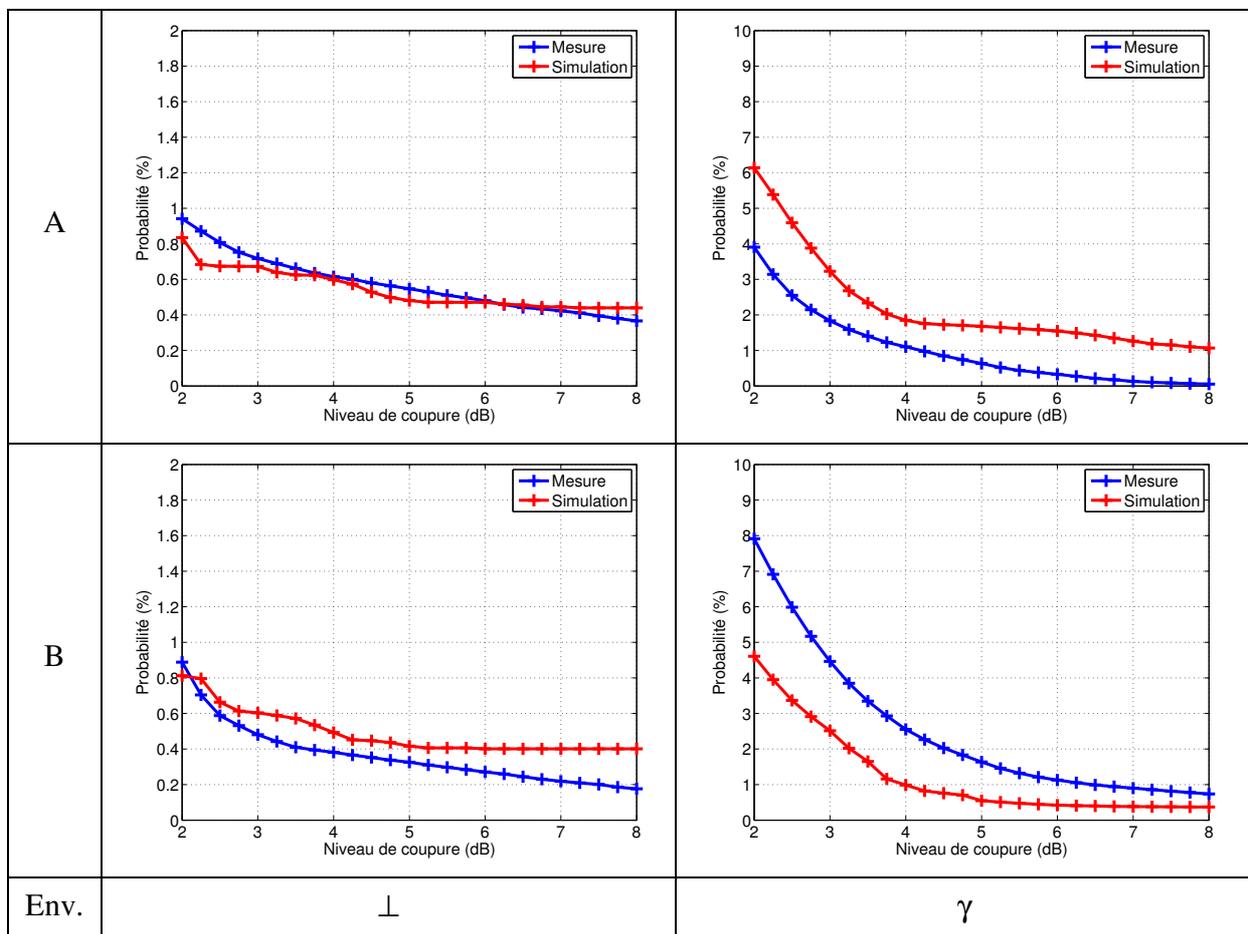


Figure 4.11 : Probabilités de coupure, comparaison avec les mesures

4.A.6.2. Comparaison aux résultats de simulations déterministes

Finalement, le modèle est évalué dans un contexte plus global, où les statistiques de premier ordre des atténuations, les corrélations entre liens et les durées de simulation sont comparées entre un modèle purement déterministe et les différents modèles hybrides proposés : modèle stochastique sans et avec prise en compte de la corrélation. Le scénario d'étude est un déploiement cellulaire de type LTE hétérogène où une petite cellule (PC) extérieure décharge un secteur d'une macro-cellule (cf. figure 4.12). Le réseau opère à une fréquence de 2,6 GHz et la hauteur de l'antenne de la petite cellule est de 5 m. Les utilisateurs (UEs) sont fixes et placés à une hauteur de 1,5 m sur les trottoirs à une densité de 1000 UE/km², ce qui représente environ 10 utilisateurs dans la petite cellule. Cette densité est obtenue en utilisant une densité de population de 15 000 pop/km², répartie équitablement entre 3 opérateurs cellulaires et dont 20 % des abonnés d'un opérateur sont considérés actifs. Les conditions de trafic incluent des feux de signalisation, des routes limitées à 13 m/s et une densité globale de 15 véhicules/km.

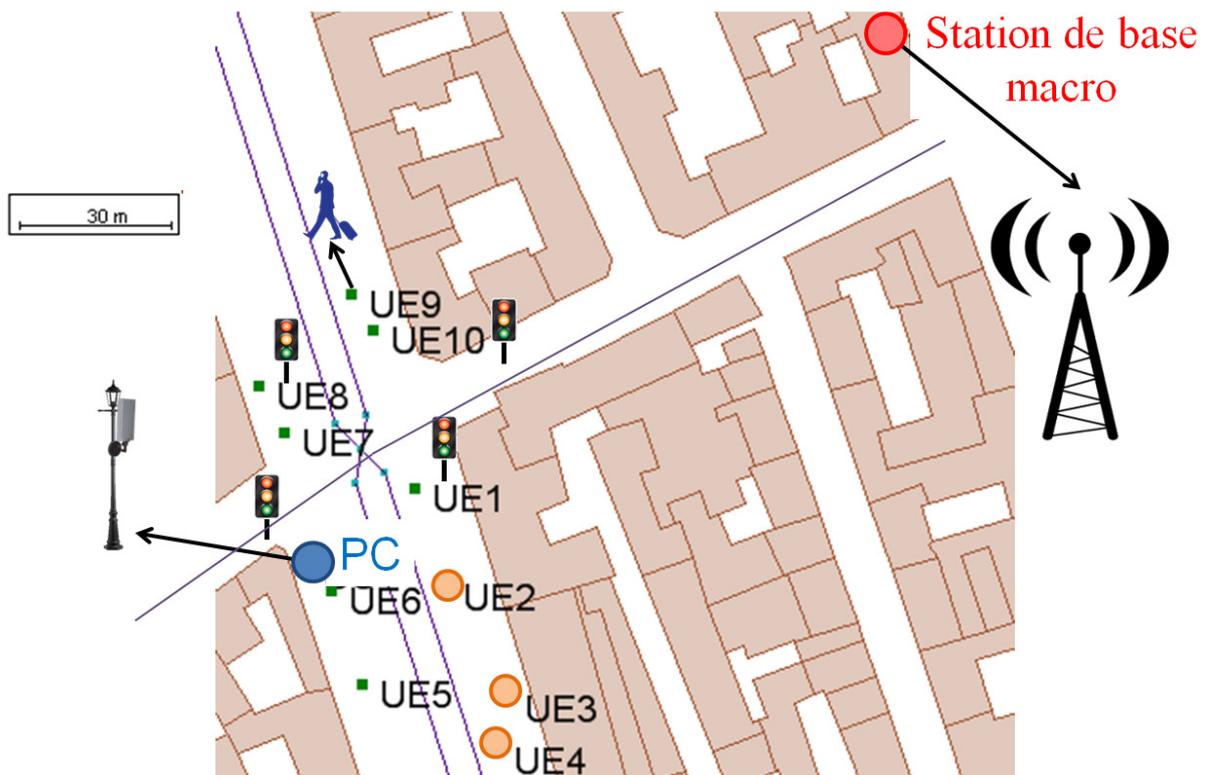


Figure 4.12 : Scénario de validation : déploiement LTE hétérogène

Pour évaluer les statistiques de premier ordre des résultats de simulation, les fonctions de répartition des évanouissements obtenues sont comparées pour chacune des méthodes proposées. Les fonctions de répartition sont moyennées sur l'ensemble des liens pour chaque méthode. Afin d'évaluer la cohérence des propriétés d'inter-corrélation entre les différents liens, nous utilisons

comme métrique l'obstruction d'un lien. En effet, deux liens proches dans l'espace seront obstrués de manière synchrone, mais l'atténuation observée ne sera pas forcément identique. Finalement, le gain en temps de calcul apporté par l'approche hybride entre déterministe et stochastique est évalué avec la métrique de facteur de gain de temps de calcul, qui est le rapport entre le temps de calcul du modèle purement déterministe et le temps de calcul t de la méthode i (4.17). Le facteur de gain est affiché en échelle logarithmique pour plus de lisibilité.

$$\text{facteur de gain de temps de calcul} = \frac{t_{\text{Pur déterministe}}}{t_i} \quad (4.17)$$

En plus de comparer le facteur de gain en temps de calcul pour chaque méthode, les processus sont décomposés pour avoir un meilleur aperçu de la durée de chaque étape du processus.

Les résultats des fonctions de répartition des évanouissements, moyennées sur l'ensemble des liens sont illustrés sur la figure 4.13. Les probabilités de coupure sont équivalentes dans le cas de la méthode purement déterministe et de la méthode incluant la corrélation basée sur la mobilité. Pour ces deux méthodes, les déclenchements des obstructions sont réalisés lors de la coupure physique du lien par un véhicule. Les résultats sont légèrement différents pour les méthodes stochastiques et de corrélation basée sur la géométrie : un léger décalage de quelques pourcents est observé. Cette différence s'explique par l'utilisation de processus stochastique. En effet, la durée du processus d'obstruction est une reproduction de la durée moyenne d'obstruction du lien. Cette différence tend vers 0 en augmentant la durée de la simulation.

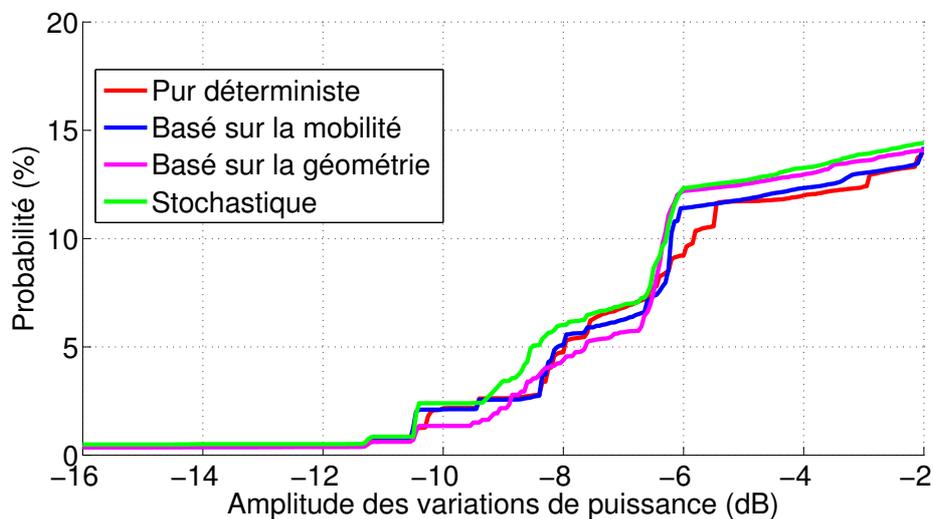


Figure 4.13 : Probabilités de coupure, comparaison avec un outil déterministe

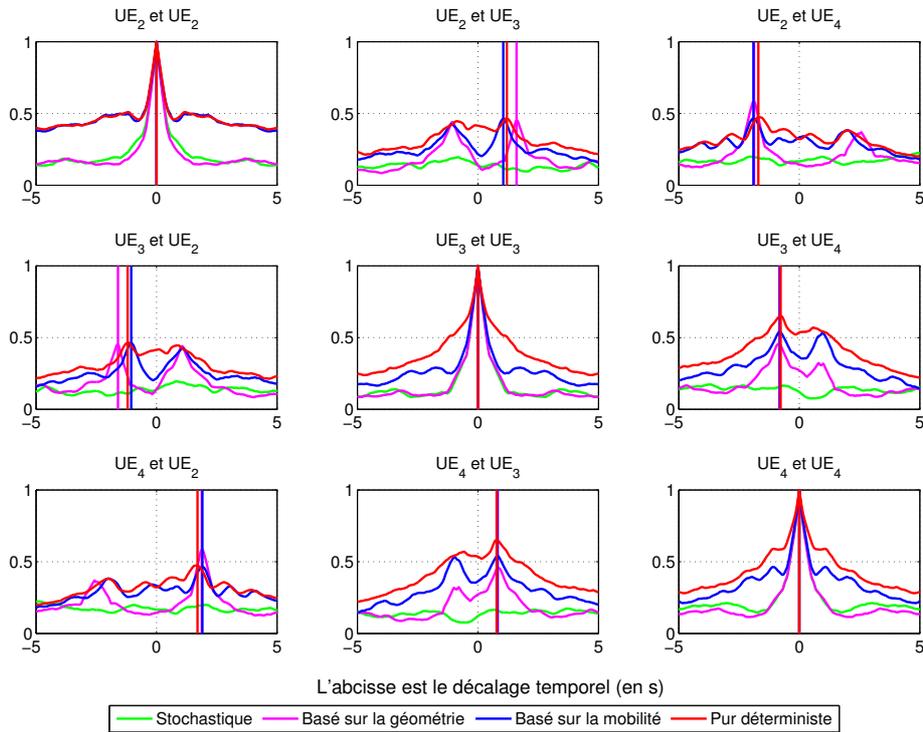


Figure 4.14 : Matrice de corrélation des obstructions pour 3 utilisateurs

La figure 4.14 démontre que les propriétés de corrélation des événements d'obstruction sont préservées avec les extensions proposées. Cette matrice de corrélation illustre les auto- et inter-corrélations pour les utilisateurs UE₂, UE₃ et UE₄. Pour chaque affichage de corrélation entre paire d'utilisateurs, une ligne verticale indique le maximum de corrélation lorsqu'il est situé dans l'intervalle de temps utilisé de [+5s, -5s]. L'auto-corrélation produit, de manière prévisible, des pics centrés en 0, quelle que soit la méthode utilisée. Avec la méthode stochastique, aucune inter-corrélation n'est détectée. En effet, les événements d'obstruction entre deux liens, même proches spatialement sont déclenchés de manière indépendante. Au contraire, des pics d'inter-corrélation sont observés pour la méthode déterministe et les extensions prenant en compte la corrélation, dont les valeurs et les décalages temporels sont similaires. Les valeurs de décalage temporel et de corrélation sont cependant plus proches entre la méthode déterministe et la méthode basée sur la mobilité. Deux pics d'atténuation se distinguent en particulier sur les inter-corrélations, avant et après le décalage temporel nul. Ces deux pics de corrélation correspondent aux deux voies de la route qui perturbent le lien radio. Les pics ne sont pas symétriques, car les distances entre les processus corrélés sont différentes sur chaque voie. Par exemple, un véhicule circulant du nord vers le sud obstruera le lien de l'utilisateur UE₂, puis environ 1,5 s plus tard, celui de l'utilisateur UE₄. Un véhicule circulant dans l'autre sens obstruera d'abord le lien de l'utilisateur UE₄, puis environ 1,8 secondes plus tard, celui de l'utilisateur UE₂.

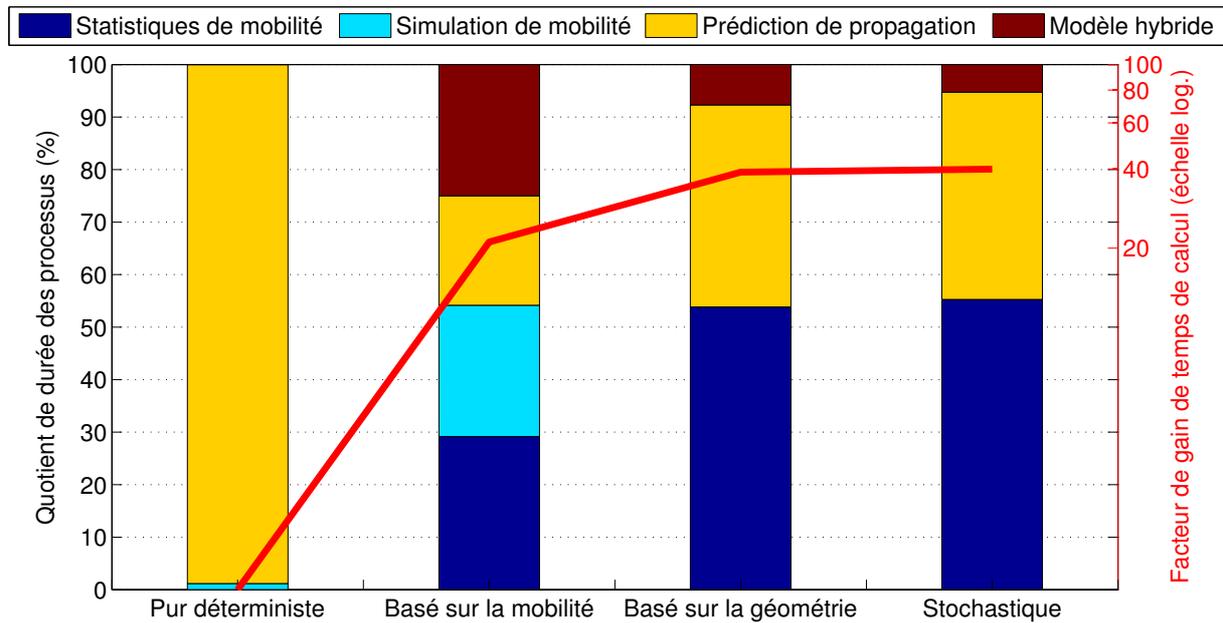


Figure 4.15 : Comparaison des gains de temps de simulation et des durées des processus

Le facteur de gain de temps de calcul est de l'ordre de grandeur de 20 à 40 en utilisant le modèle hybride proposé en comparaison à une méthode purement déterministe (cf. figure 4.15). Ce gain est dû à l'approche hybride proposé, qui permet d'émuler le passage de véhicules plutôt que de le calculer et de générer un motif unique plutôt que de recalculer les trajets à chaque période de simulation. En plus de ce gain immédiat, le calcul de statistique de mobilité est un processus qui n'a besoin d'être fait qu'une seule fois pour une zone donnée. Une fois ces statistiques obtenues, le modèle peut générer des évanouissements, corrélés ou non, pour n'importe quelle position de lien radio. La surcharge de durée ajoutée par la prise en compte de la corrélation multi-liens représente 5 % dans le cas de la méthode basée sur la géométrie alors qu'elle est de 90 % dans le cas du modèle basé sur la mobilité. La méthode basée sur la géométrie va 45 % plus vite que la méthode basée sur la mobilité. Cette différence s'explique par le temps de simulation, mais aussi de stockage et de lecture des positions et dimensions des véhicules.

Dans cette section, nous avons suivi une approche permettant d'introduire des données statistiques dans un modèle déterministe, en l'occurrence des statistiques concernant la mobilité des objets dans la scène de propagation. Nous allons voir dans la prochaine section comment introduire des données déterministes dans des modèles géo-stochastiques.

4.B. Vers une modélisation plus réaliste dans les outils stochastiques

4.B.1. Introduction

Lors de la simulation de réseaux sans-fils, le temps de simulation de chaque couche doit être rapide. De plus en plus de détails sur le canal de propagation sont cependant indispensables afin d'estimer correctement les performances des systèmes de nouvelle génération. Nous avons vu dans le chapitre 1 que les Modèles de Canal Stochastiques basés sur la Géométrie (MCSG) permettent de combiner ces deux contraintes. Ils proposent une approche du canal basé sur la notion d'amas de rayons représentant chacun un diffuseur présent dans l'environnement.

Malgré la recherche de solutions garantissant la continuité dans le temps et dans l'espace des propriétés des rayons, ces modèles présentent plusieurs défauts, notamment l'absence de phénomènes de masquages par mobilité de l'environnement dans WINNER 2 [5] (cf. 4.B.1.1).

La recherche d'un modèle permettant une génération rapide et réaliste nous a conduits dans la première partie à combiner des modélisations statistiques (mobilité, motifs d'atténuation) et déterministes (amplitude et durée des motifs d'atténuation spécifiques au véhicule obstruant). Dans cette partie, nous nous proposons d'étudier différentes manières de prendre en compte l'impact de l'environnement dans des MCSG, et plus spécifiquement dans WINNER II.

4.B.1.1. Spécificités de WINNER II

WINNER 2 fait une séparation claire entre variations à petite et à large échelle. La notion de *drop* implique la quasi-stationnarité du canal, où ont lieu les phénomènes à petite échelle. Pour un *drop*, les caractéristiques des rayons et des amas de rayon (retard, puissance, directions de départ et d'arrivée) sont tirés aléatoirement suivant des modèles statistiques dont certains paramètres dépendent des caractéristiques à large échelle. Les variations de puissance pour un lien sont alors uniquement dues au changement de phase des rayons. La distance (ou le temps) entre deux *drops* est considérée comme suffisante pour que le jeu de rayon change. Les auteurs proposent de fixer la durée d'un *drop* à un déplacement sur 50λ , soit une longueur d'environ 5,5 m à une fréquence de 2,6 GHz, équivalente à une durée de 5,5 s pour un utilisateur piéton (1 m/s).

Les auteurs ont introduit le concept d'amas de rayons en mouvement dans le cas indoor ou pour des liens stationnaires point-à-point. Pour un *drop*, le calcul du facteur K et le spectre Doppler dépendent alors de la proportion d'amas mobiles et de leur vitesse. Ce concept permet de générer des évanouissements à petite échelle qui respectent les spectres Doppler spécifiques à la vitesse de déplacement des diffuseurs mobiles.

Cependant, WINNER 2 ne permet pas d'inclure le phénomène de masquage du trajet direct, qui peut se produire en configuration de petites cellules lorsque des éléments larges circulent dans le voisinage des liens radio. Lorsque l'environnement masque des trajets à fort puissance (notamment le trajet direct), la notion de quasi-stationnarité pour un *drop* est inadéquate. En effet,

nous avons vu dans les chapitres précédents que de fortes variations dues à des véhicules avaient lieu sur des intervalles inférieurs à 5,5 secondes.

Nous proposons dans cette partie deux extensions de WINNER 2 pour prendre en compte les masquages dus à l'environnement. Ces extensions se basent sur une approche déterministe et utilisent les caractéristiques spatiales des rayons. Cette approche peut sembler contradictoire avec celle développée lors de la conception des MCSG, c'est-à-dire d'obtenir une représentation réaliste du canal sans aucune donnée géographique. Cependant, nous proposons ici de ne rajouter que des éléments géographiques liés à l'environnement (positions de mobiles ou routes de mobilité). Comme nous le verrons, la définition d'un modèle d'évanouissements large échelle dus à la mobilité purement stochastique est difficile, surtout lorsqu'on veut prendre en compte les corrélations entre liens.

Contrairement au cas du modèle de propagation à base de lancer de rayon, les trajectoires des rayons ne sont pas connues dans WINNER II, à part celle du trajet direct, qui relie l'émetteur au récepteur. De plus, le modèle fournit les directions d'émission et de réception dans le plan vertical pour des environnements intérieurs mais ces angles verticaux ne sont pas inclus dans les environnements extérieurs de type micro-cellule. Ces contraintes nous ont conduits à adapter les modèles déterministes dans des environnements intérieurs et extérieurs.

4.B.2. Activité humaine dans WINNER II

À travers différents projets collaboratifs (cf. Introduction), l'équipe R&T de SIRADEL a mis en place un modèle de canal de propagation pour des liens fixes en milieu intérieur [6], en se basant sur des résultats de WINNER II. Dans le but de proposer une étude exhaustive, nous proposons de résumer ici les travaux dans ce contexte.

Le processus défini pour modéliser des variations temporelles pour une instance de canal d'un lien SISO WINNER II est le suivant. Premièrement, les N multi-trajets du lien SISO sont générés en utilisant une implémentation de WINNER II (Scénario A, pour environnements intérieurs). En parallèle, un modèle de mobilité humaine, comme celui proposé dans le chapitre 2, permet de prédire les positions précises d'une ou plusieurs personnes à chaque période d'une simulation de durée donnée. Une personne est représentée par un cylindre de rayon et hauteur donnés. Pour chaque instant t de la simulation, le modèle proposé détermine si chaque trajet de l'ensemble de N multi-trajets est obstrué ou non par une des P personnes présentes. Les trajectoires des rayons n'étant pas connues, deux stratégies sont élaborées suivant que l'obstruction traite du trajet direct ou non.

Lorsqu'un obstacle mobile (une personne) est proche du trajet direct, les contributions dues aux diffractions sur cet obstacle sont prises en compte. Les diffractions horizontales autour du cylindre et verticales sont calculées en utilisant le modèle d'arête à couteau unique (cf. figure 4.16).

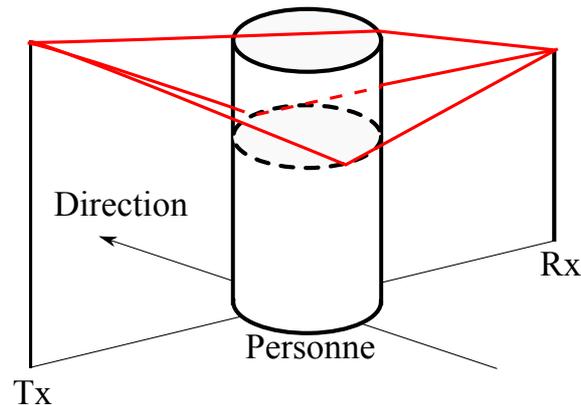


Figure 4.16 : Diffractions horizontales et verticales sur une personne

Pour chaque autre trajet, l'état d'obstruction est modélisé par une probabilité, qui dépend de 9 paramètres. Ces paramètres décrivent la différence entre les propriétés géométriques du trajet et les propriétés géométriques d'un trajet imaginaire reliant l'émetteur, l'obstacle et le récepteur. Ce sont la différence de longueur de trajet, les différences de distances horizontales et verticales en émission et en réception et les différences angulaires horizontales et verticales du trajet en émission et en réception. Une fois qu'un trajet est dans un état d'obstruction, une atténuation de 7 dB y est appliquée ainsi qu'une fréquence Doppler, tirée aléatoirement à partir d'une distribution respectant un spectre de puissance Doppler Gaussien. Une probabilité de transition permet de garantir une durée d'obstruction cohérente avec le rayon et la vitesse de la personne.

La fonction déterminant la probabilité à partir des variables décrits ci-dessus est paramétrée en utilisant un outil de tracé de rayon intérieur [7] de manière intensive. L'environnement étudié est quadrillé de cylindres, représentant les personnes, et de récepteurs. Pour chaque couple trajet-personne, la distribution de probabilité de coupure est établie. Une formulation analytique est ensuite dérivée.

Le modèle proposé étend donc les capacités de WINNER II à un milieu intérieur sujet à de la mobilité de l'environnement (activité humaine). Ce modèle est utile pour évaluer l'impact de phénomènes dynamiques qui ne sont pas nativement pris en compte par WINNER II.

4.B.3. Trafic véhiculaire dans WINNER II

Il existe différentes manières d'introduire l'impact du trafic véhiculaire – et notamment le masquage du trajet direct – dans WINNER II. Comme pour le modèle hybride présenté dans la première partie de ce chapitre, la part de déterministe et de statistique est ajustable. Certaines hypothèses de départ ont donc été énoncées :

- La position des routes est un paramètre connu. En effet, si la position des routes n'est pas connue, le seul paramètre de distance entre deux utilisateurs n'est pas assez pertinent pour établir des corrélations entre les processus.

- L'obstruction du trajet direct est un processus stochastique. WINNER II étant un modèle statistique, le résultat de simulation de la mobilité comme paramètre d'entrée du modèle n'est pas envisagée.
- L'obstruction de certains trajets indirects peut être corrélée avec l'obstruction du trajet direct. En effet, un trajet qui a des caractéristiques angulaires proches du trajet direct en émission ou en réception risque d'être obstrué en même temps que le trajet direct.
- Les trajets indirects non corrélés peuvent être obstrués de manière indépendante. Ces trajets ont des trajectoires différentes du trajet direct et donc peuvent être soumis à des obstructions par d'autres véhicules.

Le placement des routes étant connu, les principes du modèle hybride développé dans la première partie peuvent être réutilisés. Ainsi, les statistiques de mobilité sont connues pour chaque point d'une route, et le lien possède pour chaque route croisée un processus d'obstruction stochastique à deux états. Les résultats du modèle de canal WINNER II possèdent cependant des contraintes par rapport à une prédiction de propagation à base de lancer de rayons. Premièrement, les trajectoires des rayons ne sont pas connues. Deuxièmement, les directions d'émission et de réception dans le plan vertical ne sont pas fournies par le modèle dans des environnements de type micro-cellule. La gestion des trajets indirects est donc plus complexe.

Pour simplifier, la métrique permettant de corréliser ou non l'obstruction d'un trajet indirect au trajet direct se base uniquement sur un seuil angulaire σ (par exemple de 10°), en émission ou en réception, comme formulé dans (4.18). Pour les multi-trajets corrélés avec le trajet direct, l'atténuation est la même que l'atténuation du trajet direct (obtenu avec obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel, cf. 4.A.4.3).

$$\Delta\varphi \leq \sigma \quad (4.18)$$

Pour les trajets indirects, nous proposons d'associer un nombre de routes aléatoire, parmi une distribution discrète de 0 à 4. La définition de cette distribution dépend de simulations faites au préalable. Pour chaque route croisée, la hauteur de la trajectoire du rayon à l'intersection est déterminée en tirant une variable aléatoire entre les bornes $[h_b ; h_m]$, avec h_b la hauteur de la station de base et h_m la hauteur du récepteur mobile. Ensuite, la probabilité d'obstruction du trajet indirect, lorsque le trajet direct est obstrué, est calculée de la même manière que dans 4.A.4.3, avec la fonction d'erreur.

4.C. Conclusions du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons introduit différentes manières de concilier des approches déterministes et des approches stochastiques pour la prédiction de propagation incluant de la mobilité dans le canal. L'approche déterministe permet d'obtenir des résultats précis, mais le temps de calcul nécessaire pour une simulation dynamique est prohibitif pour un emploi dans un outil de simulation de réseaux. L'approche stochastique, telle que rencontrée dans des Modèles de Canal Stochastiques basés sur la Géométrie (MCSG) permet de décrire un ensemble de multi-trajets qui possèdent les propriétés typiques du milieu considéré. Malgré les progrès réalisés pour avoir un réalisme dans l'espace et dans le temps, cette approche possède certaines limites dans la cohérence des amas de rayons dans le temps.

Dans un premier temps, nous avons proposé un modèle hybride¹, reproduisant les évanouissements à grande échelle dus au trafic de véhicules dans un environnement extérieur de type petites cellules. Le modèle permet d'obtenir un gain de temps de simulation grâce à une combinaison entre prédictions statiques de propagation et statistiques de mobilité. Premièrement, les statistiques de mobilité permettent de reproduire l'obstruction du trajet direct par des véhicules, au lieu de pré-calculer l'ensemble des positions des véhicules durant la simulation. Une fois l'obstruction du trajet direct déclenchée, un véhicule est aléatoirement choisi parmi la distribution statistique des véhicules. Deuxièmement, l'atténuation provoquée par le véhicule est modélisée sous la forme d'un motif, ce qui permet un calcul à la fois unique (donc rapide) et déterministe. La corrélation des atténuations entre différents liens peut être apportée par deux extensions², qui synchronisent le déclenchement des obstructions, de manière implicite (solution basée sur la mobilité des véhicules) ou explicite (solution basée sur des chaînes de processus corrélés). La validité de la reproduction de passage de véhicules a été présentée en comparant les mesures dynamiques effectuées dans le chapitre 2 au processus sans mémoire utilisé dans le modèle hybride. Les statistiques de premier ordre du modèle ont été validées par rapport aux résultats des mesures dynamiques, puis par rapport à un outil purement déterministe. Nous avons montré que les propriétés d'inter-corrélation entre différents liens étaient préservées avec les extensions proposées. Finalement, nous avons mis en évidence des facteurs de gain de temps de simulation de l'ordre de grandeur de 20 à 40, suivant les modèles de corrélation utilisés, confirmant la pertinence de l'approche hybride.

Dans un deuxième temps, nous avons proposé des extensions pour WINNER II, qui est un MSCG, pour prendre en compte la mobilité de l'environnement, dans des environnements

¹ L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "A hybrid propagation model for large-scale variations caused by vehicular traffic in small cells," in *Proc. of the 2012 Global Communication Conference (Globecom)*, Anaheim, CA, USA, 2012.

² L. Maviel, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, "Fast generation of correlated large-scale variations caused by vehicular scattering in small cells," in *Proc. of the 7th European Conference on Antennas and Propagation*, Gothenburg, Sweden, 2013.

intérieurs et extérieurs. En environnement intérieur, l'activité humaine est d'abord simulée, puis prise en compte de manière déterministe ou statistique, suivant la position des individus relativement au lien radio. Lorsqu'une personne est au voisinage du trajet direct, les rayons diffractés sur le cylindre qui modélise la personne sont calculés. Lorsqu'une personne est éloignée du trajet direct, une formule analytique dérivée de simulations intensives permet de calculer une probabilité de coupure en fonction de la géométrie des éléments. En environnement extérieur, le modèle hybride décrit dans la première partie est adapté aux contraintes de WINNER II : pas de connaissance de trajet, ni des angles verticaux d'arrivée et de départ.

Ces approches hybrides permettent l'utilisation de modèles prenant en compte la mobilité de l'environnement dans des outils existants de simulation de réseaux. Le prochain chapitre sera l'objet de cette étude applicative, notamment par l'intégration des évanouissements à grande échelle dus au trafic de véhicules dans un simulateur de réseau LTE.

Bibliographie

- [1] J. Harri, M. Fiore, F. Filali, and C. Bonnet, “Vehicular Mobility Simulation with VanetMobiSim,” *Transactions of The Society for Modeling and Simulation*, 2009.
- [2] M. Haklay and P. Weber, “OpenStreetMap: user-generated street maps,” *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 12–18, 2008.
- [3] M. Fiore, J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet, “Vehicular mobility simulation for VANETs,” in *40th Annual Simulation Symposium (ANSS’07)*, 2007, pp. 301–309.
- [4] Y. Corre and Y. Lostanlen, “Three-dimensional urban EM wave propagation model for radio network planning and optimization over large areas,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 3112–3123, 2009.
- [5] P. Kyosti, J. Meinila, L. Hentila, X. Zhao, T. Jamsa, C. Schneider, M. Narandzic, M. Milojevic, A. Hong, J. Ylitalo *et al.*, “Winner II channel models,” *IST-WINNER Deliverable*, vol. 1, no. 2, 2007.
- [6] Y. Corre, M. Brau, and Y. Lostanlen, “Femtocell wireless time-variant stochastic channel modelling related to indoor human activity,” in *IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2011, pp. 1088–1092.
- [7] Y. Lostanlen, Y. Corre, Y. Louët, Y. Le Helloco, S. Collonge, and G. El-Zein, “Comparison of measurements and simulations in indoor environments for wireless local networks at 60 GHz,” in *Proc. of the 55th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring 2002)*, vol. 1, 2002, pp. 389–393.

5

Application: Impact de la mobilité de l'environnement proche sur le réseau en contexte LTE hétérogène

Résumé

Le modèle hybride décrit dans le chapitre précédent permet de fournir des résultats de génération d'évanouissements à grande échelle (appelés traces) dus au passage de véhicules dans le canal de propagation de petites cellules. Nous proposons dans ce chapitre une phase applicative d'intégration des résultats de propagation dynamique dans la simulation d'un réseau basé sur la technologie Long Term Evolution (LTE). Cette démarche de prise en compte de mobilité de l'environnement dans la simulation de réseaux est novatrice en environnement extérieur. Les résultats de simulations permettront d'illustrer l'impact de la mobilité de l'environnement proche sur les performances de débit du réseau, puis de mettre en avant les perturbations apportées dans l'utilisation des ressources et finalement d'esquisser des perspectives d'amélioration.

Dans une première partie, nous décrivons la mise en place de la simulation de réseaux LTE et nos propositions pour prendre en compte la mobilité de l'environnement dans le cadre de simulation de liens fixes. Tout d'abord, le choix de la technologie LTE et ses principes seront brièvement décrits, en particulier les mécanismes d'allocation de ressources qui sont étroitement liés à l'état du canal de propagation. Le choix du simulateur sera ensuite détaillé, ainsi que son intégration dans le processus de simulation. Finalement, nous décrivons les diverses modifications apportées au simulateur pour prendre en compte un canal de propagation variant dans le temps, mais aussi pour améliorer le réalisme et la vitesse de calcul du simulateur. Nous appliquerons ensuite ce processus de simulation dans deux cas d'étude portant sur l'impact de la mobilité de l'environnement en milieu extérieur.

Dans la première étude, nous simulerons un réseau à flux continu. Cette hypothèse de simplification du modèle de trafic est fréquemment utilisée pour simuler les performances d'un réseau et consiste à émettre en permanence des données : la charge sur les cellules servant au moins un utilisateur est donc maximale. Avec un réseau à flux continu, nous pouvons illustrer certaines caractéristiques de variation du débit due à l'introduction de véhicules dans le canal de propagation. Des baisses de débit sont notamment observées pour des utilisateurs individuels et sur le réseau global, ainsi que des pertes de transmission pour certains utilisateurs. De plus, les différences de variations de débit entre les algorithmes d'allocation des ressources Proportional-Fair et Round-Robin seront présentées et analysées. Les résultats principaux de cette étude vont être présentés à une conférence internationale.

- (1) L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "The impact of neglecting vehicular scattering in LTE heterogeneous networks," in *Proc. of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC 2013-Fall)*, Las Vegas, NV, USA, 2013.

Dans la deuxième étude, l'hypothèse de simplification sera levée et des modèles de trafic réalistes seront utilisés. Nous évoquerons en premier lieu la méthodologie spécifique suivie dans cette étude. Un modèle de trafic de type streaming sera en particulier utilisé pour observer l'impact de la prise en compte des véhicules sur la consommation d'énergie et sur le respect de contrainte de Qualité de Service (QoS). Nous optimiserons la rapidité de simulation du réseau par la conception d'un algorithme d'allocation spécifiquement adapté pour un trafic contraint en délai et l'utilisation de mécanismes de charge par défaut sur les cellules voisines. Nous montrerons que le débit utile d'un utilisateur individuel dont le lien radio est perturbé par des véhicules peut être parfois préservé au prix d'une consommation supplémentaire d'énergie. Dans des configurations plus contraignantes, avec de fortes atténuations ou de fortes charges, le débit utile peut cependant diminuer.

5.A. Simulation de réseaux LTE hétérogènes

5.A.1. Introduction

Pour faire face à la demande croissante de débit sur les mobiles, les réseaux cellulaires de prochaine génération effectuent une mutation à deux niveaux : les topologies de déploiement et les techniques de communication employées. Nous avons vu qu'une première façon d'augmenter la capacité du réseau était de créer des réseaux hétérogènes incluant des petites cellules avec des rayons limités à une portion de rue et des antennes en dessous des toits. L'évolution des techniques de communication est une deuxième façon de répondre à cette demande. Deux standards principaux ont été proposés pour augmenter les débits de la génération actuelle (High Speed Packet Access et dérivés) : le LTE [1] et le WiMAX [2]. Le LTE rencontre un succès notable auprès des opérateurs et est déjà en phase de déploiement dans plusieurs pays. Le WiMAX quant à lui pourrait être utilisé comme système de communication pour les liaisons entre les stations de base et le cœur du réseau. Pour cette raison, nous avons choisi de placer nos simulations dans un cadre de réseau LTE.

Les évolutions apportées par le standard LTE se situent pour la plupart au niveau physique. L'utilisation d'antennes multiples à l'émission comme à la réception (MIMO pour Multiple Input Multiple Output) permet de doubler le nombre de canaux sur lesquels l'information est transmise. L'utilisation de diverses techniques de fréquences orthogonales (OFDM) permet à la fois de combattre les interférences inter-symboles dues à l'utilisation d'une bande de fréquence plus large mais également de faire de l'allocation multiplexée de ressources à travers l'OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). En effet, les ressources en LTE peuvent être vues comme des blocs définis dans deux dimensions : le temps et la fréquence (cf. figure 5.1). Une trame LTE, qui dure 10 ms, est composée de 10 sous-frames de 1 ms, durée qu'on appelle également l'Intervalle de Temps de Transmission (ITT). La bande de fréquence est décomposée tous les 180 kHz. Des sous-porteuses de garde sont ajoutées en fonction de la bande totale du canal pour minimiser les interférences entre canaux. Un Bloc de Ressource est défini comme un bloc de 180 kHz sur 0,5 s. La ressource minimale allouée à un utilisateur est composée d'une paire de Blocs de Ressources. Dans la suite de ce chapitre, la notion de Bloc de Ressource désignera directement une paire de Blocs de Ressources (180 kHz sur un ITT).

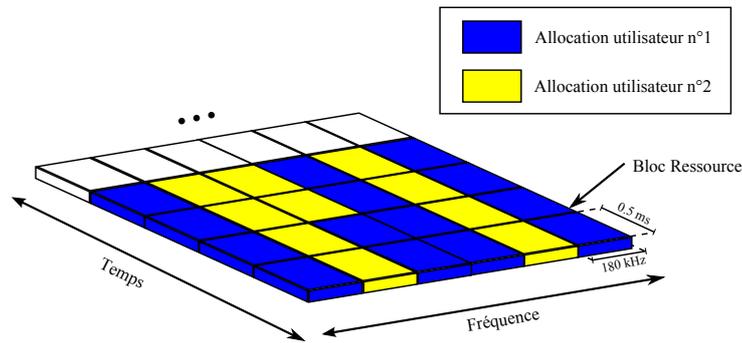


Figure 5.1 : Allocation en bloc temps/fréquence en LTE [3]

L'allocation de ressources sur une large bande de fréquence, conjuguée aux informations de retour fournies par l'utilisateur sur l'état du canal, permet de profiter au mieux du canal variant dans le temps et sélectif en fréquence. Comme illustré sur la figure 5.2, l'allocation des ressources peut tenir compte de l'état du canal et ainsi allouer à un utilisateur des Blocs de Ressources sur les fréquences les moins atténuées. Les atténuations en fréquence étant décorrélées entre deux utilisateurs, l'allocation peut être optimisée. Le module de la station de base implémentant l'algorithme d'allocation de ressource s'appelle un ordonnanceur.

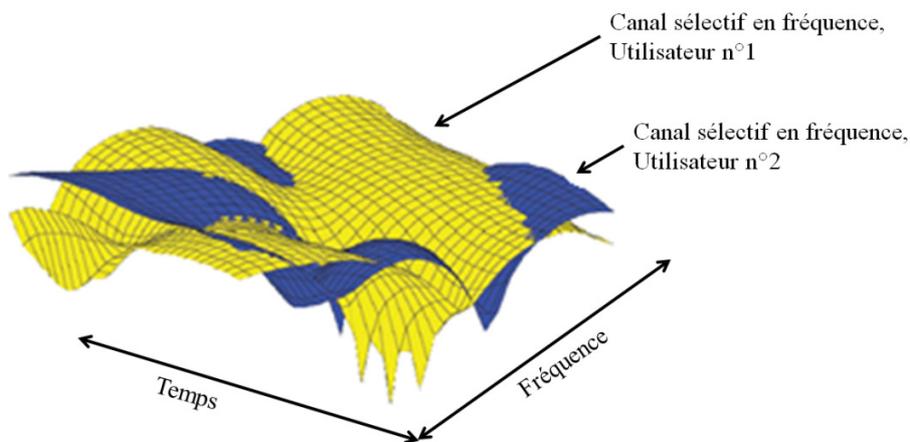


Figure 5.2 : Canal LTE temps/fréquence pour deux utilisateurs [3]

Le LTE Advanced [4], en cours de normalisation, inclut des techniques d'optimisation du LTE, telles que l'agrégation de porteuses, la Coordination d'Interférence Inter-Cellule (ICIC), la transmission coordonnée des stations de base (CoMP) et l'utilisation de relais. Ces technologies seront évoquées dans les perspectives mais les simulations de ce chapitre se basent exclusivement sur la version du LTE décrite par le document 3GPP LTE-Release 9.

Nous avons vu dans le chapitre 1 (§ 1.A.4) que, malgré plusieurs études de l'impact de l'activité humaine sur le réseau ([5], [6]), il n'y avait pas d'études équivalentes en environnement extérieur, tout particulièrement dans un contexte de réseau LTE hétérogène. La démonstration de

viabilité de nouveaux algorithmes réseaux se fait entre autres au travers de simulations. De la même manière que [7], où les auteurs adaptent les caractéristiques des spectres Doppler au cas particulier de liens sans fil fixes, nous proposons d'adapter un simulateur existant pour inclure des variations à grande échelle dues au trafic véhiculaire. Nous avons choisi de travailler avec un simulateur système LTE à lien descendant, développé par l'université de Vienne [8].

Dans la suite de cette partie, nous décrirons d'abord les mécanismes globaux du simulateur LTE ainsi que les raisons de notre choix. Nous proposerons ensuite des modifications à ce simulateur, notamment pour prendre en compte l'impact des véhicules sur les variations à grande échelle. Les variations à grande échelle seront calculées en utilisant le modèle hybride proposé dans le chapitre 4. Nous décrirons le processus de simulation intégrant le déploiement du réseau, les prédictions de propagation et la définition des scénarios de simulation. Diverses modifications du simulateur liées à la simulation de liens fixes seront également proposées. Dans la suite du chapitre, l'impact du trafic véhiculaire sur un réseau LTE hétérogène sera étudié suivant deux hypothèses de charge du réseau : réseau à charge maximale et réseau à charge réaliste.

5.A.2. Simulateur LTE de l'université de Vienne

5.A.2.1. Description

Le simulateur LTE de l'université de Vienne utilise une programmation séquentielle et discrète en temps pour évaluer les performances de réseaux LTE hétérogènes mobiles configurés au préalable. Les principales étapes du processus de simulation, organisées sous forme de modules, sont illustrées sur la figure 5.3, puis décrites ci-dessous. Le pas temporel de la boucle de simulation est de 1 ITT (1 ms).

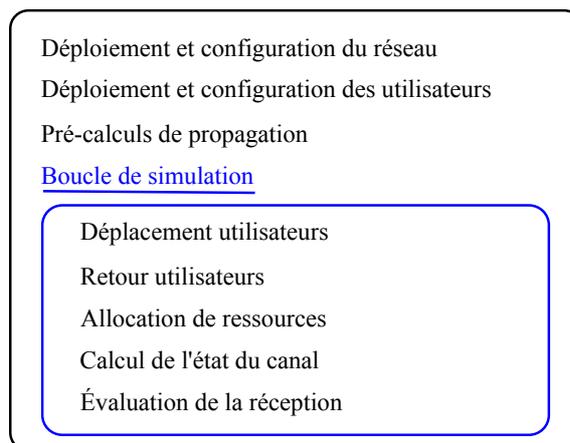


Figure 5.3 : Principales étapes de processus du simulateur LTE de l'université de Vienne

Déploiement et configuration du réseau : Le déploiement des cellules du réseau hétérogène (macro-cellules et petites cellules) peut être automatisé (simulation générique) ou défini par l'auteur de la simulation (simulation spécifique). Les paramètres du réseau comprennent entre autre le nombre d'antennes en émission, la fréquence et la bande, le mode de transmission MIMO...

Déploiement et configuration des utilisateurs : Cette étape permet d'une part de définir la position des utilisateurs, et éventuellement leur vitesse, qui va conditionner leur déplacement. Cette étape de déplacement génère dans le temps des changements de cellule et des mécanismes de handover. D'autre part, l'auteur de la simulation peut spécifier le type de trafic de données associé à un utilisateur. Parmi les grands types de trafic, les deux grandes catégories distinguées sont le trafic de type élastique (navigation web, mail, ...) et de trafic de type streaming (voix, vidéo...), et sont liées aux contraintes de délai. Les modèles de trafic de données sont évoqués dans la partie 5.C (étude n°2).

Propagation : La puissance du signal émis par une cellule vers un utilisateur à un temps et sur une bande de fréquence donnée est obtenue en combinant trois paramètres : la puissance moyenne, les évanouissements à large échelle et les évanouissements à petite échelle. Premièrement, la puissance moyenne est obtenue grâce à des cartes de couverture pré-calculées. De même, les évanouissements à large échelle (dus uniquement à la mobilité de l'utilisateur) sont pré-calculés sur une carte à deux dimensions, corrélée dans l'espace (cf. chapitre 1, paragraphe 1.3.A.1). Finalement, les évanouissements à petite échelle, dus au déplacement de l'utilisateur sur de courtes distances, sont pré-calculés sous forme d'échantillons répétés durant quelques secondes, et dont les caractéristiques dépendent de la vitesse de l'utilisateur et du type d'environnement dans lequel il évolue. Ces calculs de propagation utilisent par défaut les modèles stochastiques basés sur la géométrie de WINNER 2, mais l'implémentation d'alternatives est possible, par exemple le calcul à base de lancer de rayons basé sur la position des cellules et les bâtiments environnants. La métrique permettant d'évaluer la qualité d'un lien est le Rapport Signal à Interférences plus Bruit, résultant du rapport de puissance du signal utile d'un lien sur la somme du bruit et des signaux interférents, c'est à dire venant de cellules voisines émettant sur le même canal.

Allocation de ressources : La littérature contient plusieurs algorithmes permettant d'allouer les ressources d'une cellule en fonction de différentes contraintes. Parmi ces algorithmes, un des plus utilisés est le Proportional-Fair [9], qui effectue un compromis entre le fait de consacrer des ressources aux utilisateurs dont le débit passé est faible et aux utilisateurs qui maximisent les performances du canal actuel. À des fins de comparaison, un algorithme de Round-Robin est utilisé pour certains scénarios. Cet algorithme répartit de manière équitable les ressources entre les différents utilisateurs affectés à une cellule.

Evaluation de la réception : Le niveau d'application de ce simulateur est le niveau système, c'est-à-dire qu'une partie du fonctionnement des couches physique et de liaison de données a été abstraite pour améliorer les vitesses de calcul. En effet, les simulations au niveau lien impliquent une modélisation poussée de la couche physique. Celles-ci sont donc limitées en nombre de liens et imposent d'importantes ressources de calcul. L'abstraction de la couche physique repose sur l'utilisation de la métrique de RSIB effectif. Un Bloc de Transport désigne dans le simulateur l'ensemble des Blocs de Ressources alloués à un utilisateur à un ITT donné. En LTE, tous les Blocs de Ressources d'un Bloc de Transport utilisent le même codage et la même modulation. Pour un Bloc de Transport donné, une combinaison non-linéaire des RSIB sur les différents Blocs de Ressources utilisés permet de définir un RSIB moyen. Dans la dernière version du simulateur, les auteurs utilisent la méthode de RSIB effectif à information mutuelle [10]. Des courbes de Taux d'Erreur Bloc permettent ensuite de relier un RSIB effectif à une probabilité d'erreur sur un Bloc de Transport, émis à partir d'une Information de Qualité du Canal donnée. Ces courbes sont obtenues grâce à des simulations au niveau lien [11]. Un tirage aléatoire sur une distribution uniforme suffit ensuite pour savoir si un Bloc de Transport a été correctement reçu ou non.

5.A.2.2. Choix et positionnement

Plusieurs motifs ont conduit au choix du simulateur système LTE de l'université de Vienne, adopté dans le cadre du projet ANR ECOSCells, auquel SIRADEL et le laboratoire CITI participent. En plus de pouvoir simuler un réseau se basant sur la technologie LTE, il devait présenter un code-source compréhensible et modifiable pour étendre les mécanismes existants. Ces conditions sont remplies par le simulateur choisi. D'une part, c'est l'un des premiers à avoir abordé le LTE, et de nombreux auteurs¹ s'en servent comme référence pour valider leurs travaux. D'autre part, il est développé sous une licence académique en Matlab, langage de programmation scientifique répandu. Finalement, les mécanismes de prise en compte de la propagation sont suffisamment simples pour adapter facilement un mécanisme d'évanouissement à grande échelle variant dans le temps.

Il existe des alternatives au simulateur choisi, tels que les simulateurs à code source ouvert ns-3 [12], ou OMNeT++ [13] ou le simulateur payant OPNET [14]. Ces simulateurs utilisent la programmation événementielle, qui permet d'éviter les boucles et les opérations inutiles et donc d'optimiser le temps de simulation. Au moment de notre choix, les extensions LTE de ces simulateurs n'étaient pas encore développées ou abouties, ce qui n'est plus le cas maintenant, par exemple [15] pour ns-3. D'autre part, l'utilisation d'un simulateur payant n'était pas envisagée pour des raisons de budget.

¹ 132 références à l'heure actuelle

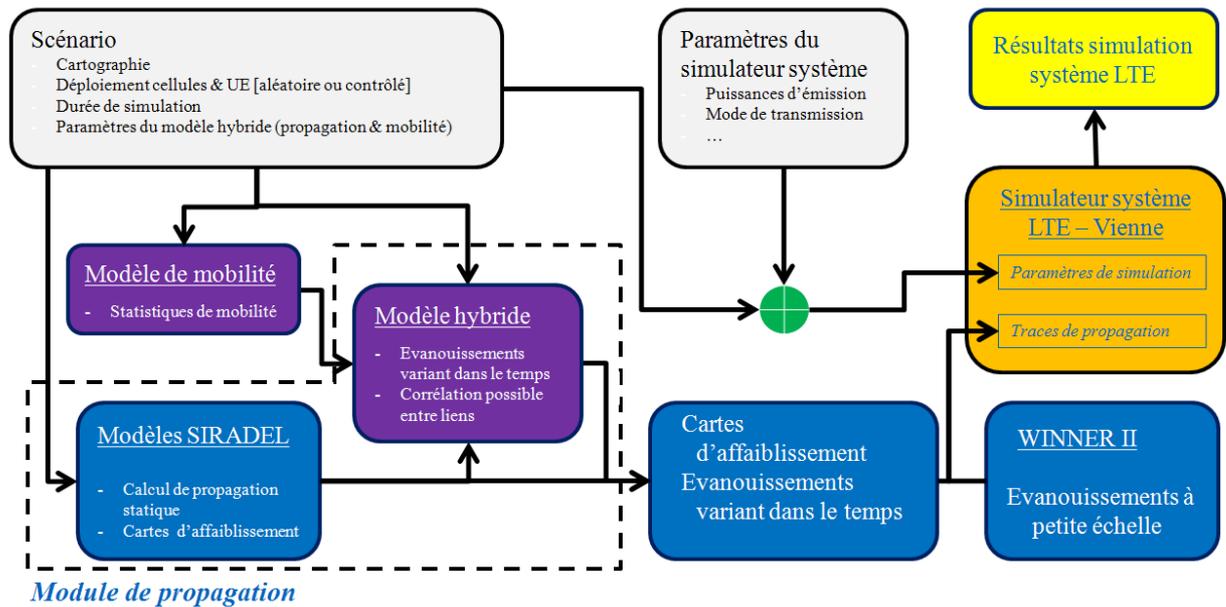


Figure 5.4 : Processus de simulation LTE

5.A.2.3. Modifications et utilisation

L'utilisation du simulateur système LTE s'inscrit dans un processus global de génération et de simulation de scénarios. Le processus décrit dans la figure 5.4 reprend les principales composantes. Le processus commence par la définition d'un scénario, dont le but principal est de déployer des stations de base et des utilisateurs de manière aléatoire ou contrôlée. Différents paramètres de la simulation, tels que la fréquence d'opération et les paramètres de prédiction de propagation sont également définis dans ce scénario. Ensuite, une partie des modules va utiliser les déploiements générés pour établir les traces de propagation, c'est-à-dire à la fois les cartes d'affaiblissement du signal pour chaque station de base, mais aussi les variations à grande échelle dues aux véhicules. La puissance du signal est calculée avec l'outil de prédiction basé sur le lancer de rayon de SIRADEL [16] et inclut donc de manière implicite les phénomènes de masquage. D'autre part, les paramètres du réseau déployé sont complétés avec des paramètres spécifiques à la simulation système, par exemple la puissance de transmission sur les macro-cellules et les petites cellules ou le mode de transmission LTE.

Les traces d'évanouissements à grande échelle sont pré-générées avec le modèle hybride décrit dans le chapitre 4. Ces traces sont le résultat des atténuations causées par les véhicules sur des liens en petites cellules. Les mécanismes de masquage existants dans le simulateur LTE sont ensuite étendus aux traces pré-générées. Lorsque le simulateur système calcule, à un ITT donné, le RSIB sur chaque Bloc de Ressource d'un récepteur, il additionne le résultat du modèle d'affaiblissement et la valeur de masquage à la coordonnée du récepteur. Cette opération est

effectuée pour le signal du récepteur donné, mais aussi pour tous les signaux interférents. Nous proposons d'ajouter en plus la valeur de l'évanouissement dû aux véhicules à la valeur du signal obtenu (cf. figure 5.5). Cette valeur est obtenue simplement grâce à un mécanisme de lecture des traces générées par le modèle hybride.

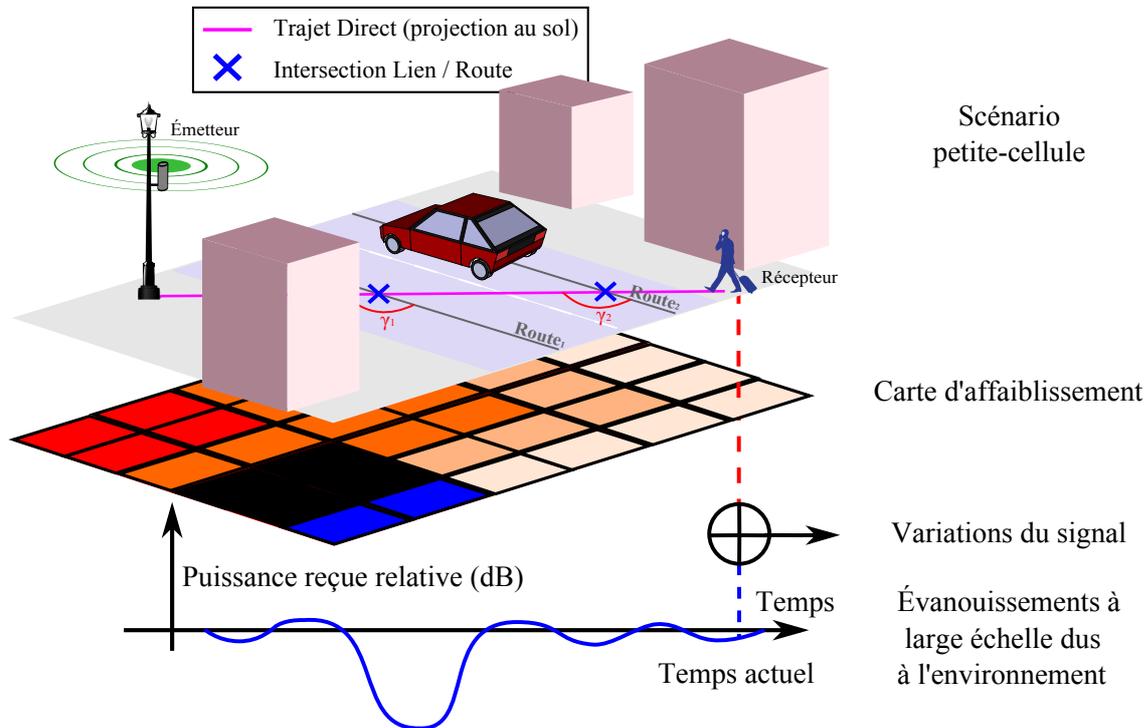


Figure 5.5 : Génération de puissance variant dans le temps dans le simulateur LTE

En plus de ces mécanismes d'évanouissements, le simulateur a été amélioré en rajoutant un mécanisme d'Expansion de Rayon de Cellule (ERC), décrit dans [17]. Ce mécanisme favorise l'association d'un mobile avec des petites cellules et donc la décharge du réseau macro-cellulaire. De plus, nous avons optimisé le nombre nécessaire d'utilisateurs pour simuler le réseau. En effet, une cellule sans utilisateur n'émet pas de données et donc ne génère pas d'interférences. Pour s'affranchir du besoin de placer des utilisateurs uniquement pour générer des interférences, nous avons implémenté une charge par défaut sur les cellules sans utilisateurs. Les Blocs de Ressources alloués sont périodiquement et aléatoirement répartis de manière à obtenir la charge spécifiée. De cette manière, une étude réaliste ne nécessite de placer des utilisateurs que sur la zone d'étude, voire sur quelques cellules voisines. Les cellules plus éloignées n'ont pas d'utilisateurs, mais génèrent quand même des interférences. Cette option est importante pour améliorer la vitesse des calculs pour des scénarios d'étude spécifiques.

Dans la suite de ce chapitre, nous appliquons le processus de simulation décrit ci-dessus pour deux cas d'études. Ces études consistent à évaluer les performances du réseau hétérogène en

environnement réel, lorsque le canal de propagation des petites cellules est perturbé par le trafic de véhicules. Dans une première étude, nous observerons les variations du débit maximal avec des hypothèses de trafic simples. Dans une deuxième étude, nous utiliserons des hypothèses de trafic réalistes pour avoir un aperçu plus précis de l'impact des véhicules sur les mécanismes d'allocation de ressource et par conséquent sur l'énergie consommée pour transmettre les données et le débit utile atteint.

5.B. Etude n°1 : Simulations de réseau à charge maximale

5.B.1. Scénarios et méthodologie

Dans cette première étude, nous déployons un réseau cellulaire initial de 7 stations de bases macro-cellules (MBS) à trois secteurs dans un environnement urbain dense, où le réseau de MBSs est déchargé avec 15 stations de bases petite cellule (PC) le long des routes principales (cf. figure 5.6a). Plusieurs simulations sont effectuées en augmentant progressivement le nombre d'utilisateurs fixes dans le réseau. Cette méthodologie permet d'observer les conséquences du trafic de véhicules à la fois sur les variations de débit pour les utilisateurs individuels et aussi sur les performances globales du réseau.

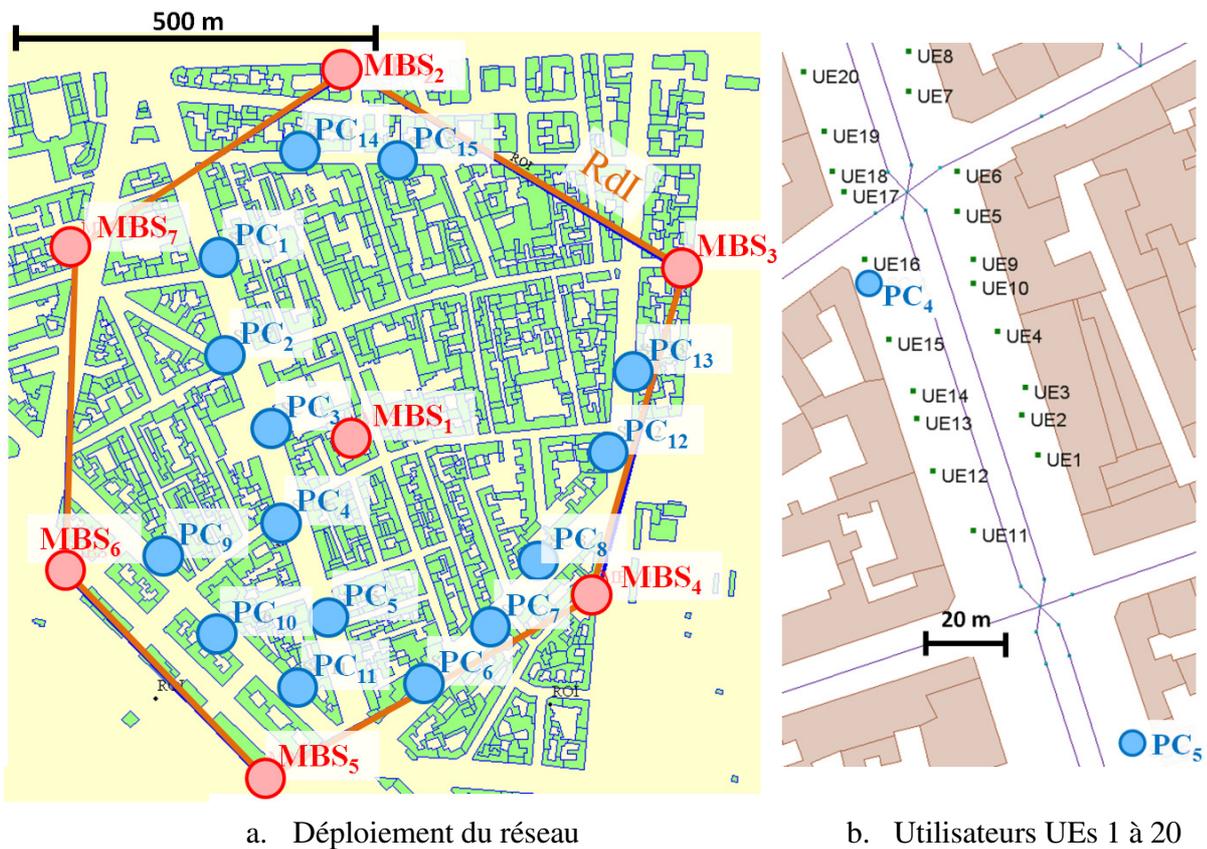


Figure 5.6 : Scénarios de déploiement pour l'étude n°1

Dans les trois premiers scénarios (A à C), 20 utilisateurs fixes sont progressivement placés manuellement dans la zone desservie par la petite cellule PC₄ (cf. figure 5.6b). Dans le scénario A, UE₁ est seul, puis UE₂ est ajouté dans le scénario B, puis le reste des utilisateurs dans le scénario C. Dans le dernier scénario (D), les utilisateurs fixes sont déployés le long des trottoirs dans la région d'intérêt (RdI), définie autour la MBS centrale. Plusieurs générations aléatoires

permettent de tracer des statistiques sur le débit global du réseau. La densité d'utilisateur est fixée à environ 1000 UE/km². Cette densité correspond à une densité de population de 15 000 utilisateurs/km², avec des abonnés répartis équitablement sur 3 opérateurs mobiles, et dont 20 % des abonnés à un opérateur sont actifs. Les MBSs sont placées au-dessus des toits (de 30 m à 40 m), les PCs sont à une hauteur de 5 m et les utilisateurs sont à hauteur humaine (1,5 m). Ces chiffres sont dérivés des scénarios du projet ECOSCells³. Les utilisateurs sont placés sur les trottoirs afin d'avoir une proportion suffisante de canaux de propagation affectés par le flux de véhicules.

La fréquence d'opération du réseau LTE est de 2,6 GHz. Les hypothèses de charge maximale et de flux continu de données sont utilisées lorsqu'au moins un utilisateur est assigné à une cellule. Les ordonnanceurs utilisés ne prennent donc pas en compte la demande de Qualité de Service (QoS) des utilisateurs. La charge de trafic sur les cellules sans utilisateurs est de 100 %. Un algorithme d'allocation Proportional-Fair est utilisé par défaut et l'algorithme Round-Robin est utilisé à des fins de comparaison pour certains scénarios. Pour le calcul de RSIB, toutes les stations de base travaillent dans la même bande de fréquence, et aucune technique de Réutilisation Flexible de Fréquence ou de Coordination d'Interférence Inter-Cellule n'a été utilisée. Le transfert intercellulaire n'est pas activé et l'Expansion de Rayon de Cellule est utilisé avec un seuil de 3 dB. Pour plus de détails sur les paramètres de simulation, voir le tableau 5.1. Les cartes d'affaiblissement sont calculées avec l'outil de prédiction de propagation [16], et contiennent donc les phénomènes de masquage. Les évanouissements variant dans le temps sont calculés avec le modèle hybride présenté dans le chapitre 4, sans la prise en compte de corrélations inter-liens.

Pour chaque scénario, nous comparons les résultats de la simulation du réseau MBS seul, puis du réseau hétérogène déchargé avec les PCs, et finalement du réseau hétérogène en incluant les évanouissements variant dans le temps dus au trafic de véhicule dans les petites cellules.

5.B.2. Résultats

Nous présentons dans cette section les résultats des simulations, qui sont analysés dans la prochaine section. Dans une première partie, le débit de certains utilisateurs individuels est décrit, en se concentrant sur l'impact des évanouissements variant dans le temps. Dans une seconde partie, nous illustrerons l'importance du choix de l'algorithme d'allocation des ressources. Finalement, les fonctions de répartition des débits globaux du réseau sur plusieurs générations d'utilisateurs sont présentées, illustrant le gain de décharge des petites cellules et la perte causée par le trafic de véhicules.

³ <http://www.systematic-paris-region.org/fr/projets/ecoscells>

Tableau 5.1 : Paramètres de simulation pour l'étude n°1

Paramètre	Valeur
Fréquence d'opération du système	2600 MHz
Largeur de bande du système	20 MHz
Répartition des Ressources Blocs	96 BRs pour les données ; 4 BRs pour le contrôle
Facteur de réutilisation des fréquences	1
Durée de simulation	30 s
Puissance maximale de transmission (MBS)	46 dBm
Puissance maximale de transmission (PC)	33 dBm
Seuil ERC	3 dB
Modèle de trafic	Charge maximale ; Flux continu
Algorithme d'allocation de ressources	Proportional-Fair; Round-Robin
PF_{α}, PF_{β}	1
Réseau d'antenne à l'émission	2-Tx
Réseau d'antenne à la réception	2-Rx
Mode de transmission LTE	3 – OLSM (Open Loop Spatial Multiplexing)

5.B.2.1. Impact sur les utilisateurs individuels

Pour illustrer l'impact du trafic de véhicules, la même trace d'évanouissement à grande échelle est utilisée pour l'utilisateur UE₁ dans les scénarios A à C, où les utilisateurs sont restreints à la cellule PC₄. Cette trace est présentée sur la figure 5.7a, où plusieurs durées et profondeurs d'évanouissement sont observées, résultant du passage de véhicules différents (bus, utilitaires, voitures). La durée relativement longue des motifs (jusqu'à 3 s) s'explique grâce à deux facteurs. Premièrement, l'angle γ entre la route et le lien est faible, ce qui implique des longueurs d'obstruction importantes. Deuxièmement, le trafic de véhicules sur la route proche de l'émetteur est important localement, dû à la présence proche de feux de signalisation. Lorsque le nombre d'utilisateurs est augmenté, les ressources sont distribuées entre UE₁ et les autres utilisateurs dans la cellule, de sorte que le débit de UE₁ diminue (cf. figure 5.7). Des pertes de débit fréquentes peuvent être observées notamment autour de $t = 23$ s et de $t = 9$ s, où le débit est à la limite de la perte de connexion. Ces pertes peuvent être directement reliées aux traces d'évanouissements variant dans le temps.

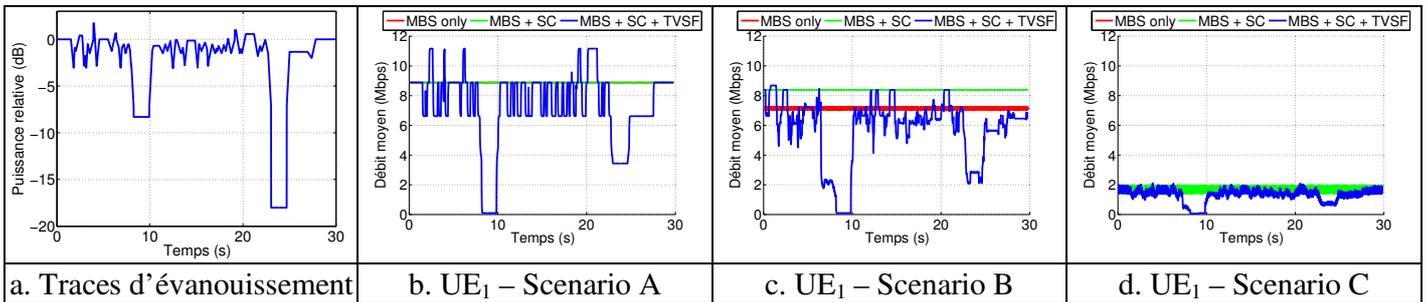


Figure 5.7 : Résultats de simulation – UE₁

La figure 5.8 illustre le débit moyen pour un utilisateur qui est du même côté de la route que la station de base petite cellule qui lui est assignée (UE₁₁). Les véhicules n'obstruent pas le signal venant de la station de l'utilisateur, mais atténuent le signal des stations de base voisines. Une augmentation du signal est observée lorsque le signal venant de la station PC₅ est fortement obstrué autour de $t = \{5, 11, 19\}$ s.

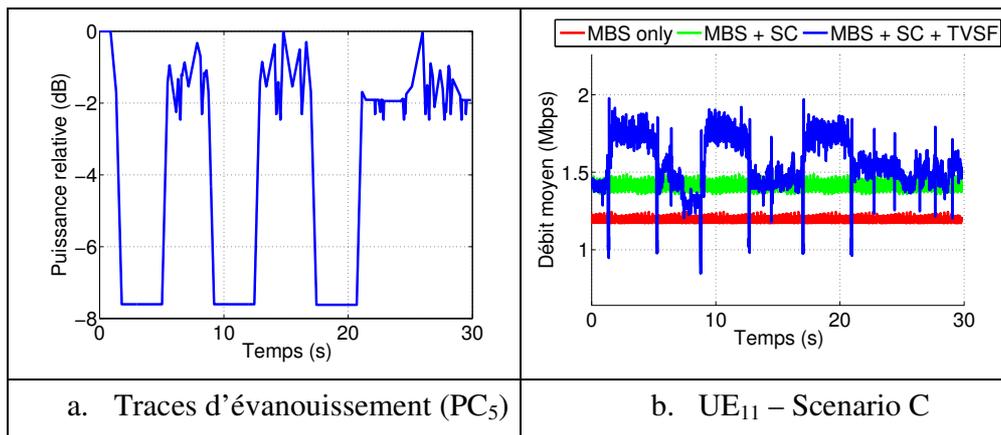


Figure 5.8 : Résultats de simulation – UE₁₁

5.B.2.2. Importance de l'algorithme d'allocation des ressources

Le débit de l'utilisateur UE₂, qui est du côté opposé de la route, est comparé dans le scénario B pour deux algorithmes d'allocation des ressources : Round-Robin (RR) et Proportional-Fair (PF) sur la figure 5.9. Dans ce cas spécifique, le débit de l'utilisateur est plus faible pour l'algorithme Proportional-Fair. Dans le cas du PF, le débit diminue autour de $t = 9$ s, ce qui correspond à l'évanouissement sur UE₁. Cette baisse de débit spécifique à l'algorithme PF se retrouve également sur la figure 5.10, où l'impact des évanouissements à grande échelle sur le débit total du réseau est plus fort pour un algorithme PF que pour un algorithme RR. Ces comportements s'expliquent par le partage de ressource particulier à l'algorithme PF, qui sont détaillés dans l'analyse des résultats.

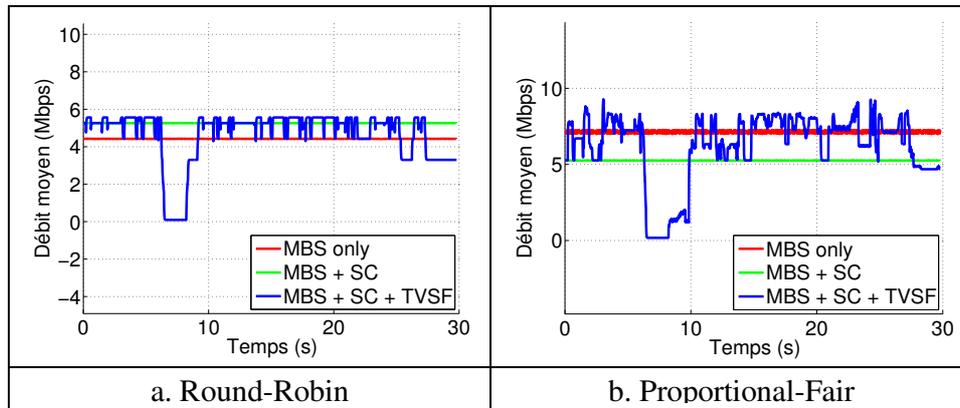


Figure 5.9 : Résultats de simulation – UE₂ (Scenario B)

5.B.2.3. Impact sur le réseau

Finalement, les fonctions de répartition des débits totaux du réseau sont illustrées sur la figure 5.10. Pour un algorithme d'allocation Round-Robin, un gain de 250 % est atteint en moyenne en rajoutant les petites cellules dans le réseau macro-cellulaire. Une perte moyenne de 3 % est observée lorsque les évanouissements dus aux véhicules sont considérés. Pour un algorithme d'allocation Proportional-Fair, un gain de 180 % est atteint en moyenne en rajoutant les petites cellules dans le réseau macro-cellulaire. Une perte moyenne de 8,8 % est observée lorsque les évanouissements dus aux véhicules sont considérés, et atteint au maximum 14 %.

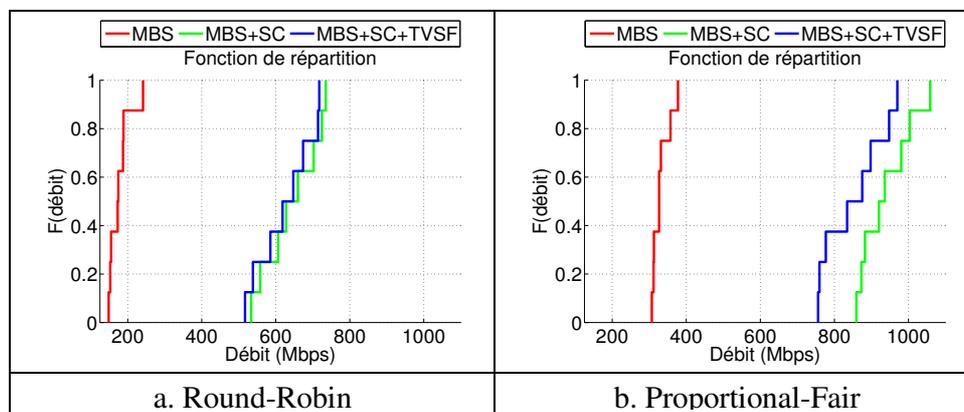


Figure 5.10 : Résultats de simulation – Réseau (Scenario D)

5.B.3. Analyse et interprétation

Pour un utilisateur individuel d'une petite cellule dont le lien radio est croisé par une route, les évanouissements dus aux véhicules provoquent des pertes locales de connexion ou de débit, en fonction de la qualité initiale du RSIB du lien et du type de véhicule qui croise le lien. Les utilisateurs à la fois en bord de cellule et de l'autre côté de la route sont plus affectés pour deux

raisons. Premièrement les évanouissements variant dans le temps sont plus longs et peuvent être plus profonds que pour un utilisateur proche de l'émetteur. Deuxièmement, les interférences des autres cellules sont plus importantes. Ces constatations expliquent également pourquoi le débit moyen d'un utilisateur situé sur le même côté de la route qu'une station de base petite cellule peut être augmenté. En effet, le déploiement choisi alterne les positions des petites cellules le long du boulevard. Un utilisateur qui sera du même côté que la station de base qui le sert aura donc des cellules voisines de l'autre côté de la route. Les interférences des cellules voisines seront donc plus faibles, en prenant en compte l'impact des véhicules.

Le choix d'un algorithme adaptatif d'allocation des ressources, comme le Proportional-Fair (PF), influence les pertes de débits pour des utilisateurs individuels, comme on l'observe pour l'utilisateur UE_2 dans le scénario B. Avec un algorithme Round-Robin, seuls les évanouissements sur l'utilisateur UE_2 ont un impact sur son débit, alors qu'avec un algorithme PF, lorsque l'utilisateur UE_1 subit des évanouissements, plus de ressources lui sont consacrées, et le débit de l'utilisateur UE_2 diminue. Dans le cas d'une coupure de la transmission pour UE_1 , l'ensemble des ressources se libèrerait et serait disponible pour UE_2 . Ce comportement explique la différence de perte de débit global sur le réseau entre les algorithmes RR et PF.

L'ajout de petites cellules fait fortement progresser le débit maximal sur le réseau global. Cependant, les évanouissements dus au flux de véhicules impliquent des pertes de débit qui sont en moyenne de 3 à 9 % suivant l'ordonnanceur utilisé et qui atteignent 14 % dans cette étude. Ce pourcentage est cependant dépendant de la distribution des utilisateurs dans la région d'intérêt, du déploiement initial des petites cellules et de la densité du trafic de véhicules. Dans le scénario de simulation, environ $2/3$ des utilisateurs sont assignés dans des petites cellules, et la moitié des liens formés est croisée par le trafic de véhicules. Avec une perte moyenne de débit d'environ 20 % par utilisateur touché, la perte de débit moyenne est de 6,6 %, proche des valeurs observées. Un scénario de déploiement plus réaliste pourrait considérer des utilisateurs en milieu intérieur, dont le canal de propagation serait moins affecté par les véhicules, mais pourrait être affecté par les mouvements des personnes proches du récepteur.

Les métriques de performance ne peuvent toutefois pas être réduites au seul débit, car l'intérêt des petites cellules est non seulement de décharger le trafic de données des stations de base macro-cellules, mais aussi d'optimiser la consommation d'énergie et la Qualité de Service de l'utilisateur. Dans ce but, les hypothèses de flux continu et de charge maximale doivent être abandonnées au profit de modèles de trafic réalistes. C'est ce que nous allons voir dans la prochaine partie.

5.C. Etude n°2 : Simulations de réseau à charge réaliste

5.C.1. Introduction

L'étude réalisée dans la partie précédente a permis de mettre en avant différents impacts de la mobilité de l'environnement sur des liens fixes. Les conditions de flux continu et de charge maximale ne sont cependant pas réalistes. En réalité, les ressources d'une station de base, pour une unité de temps donnée, peuvent ne pas toutes être utilisées. D'une part, la taille des données transmises à un utilisateur est limitée par le débit désiré, défini par le service demandé. D'autre part, le flux d'arrivée des données dépend du type de trafic de données. Il existe deux grands types de trafic de données, le streaming et le trafic élastique. Le streaming possède des contraintes de débit, ou de manière équivalente en temporel, de délai. La perte d'information est tolérée à un certain degré. Ce type de trafic de donnée est typiquement associé à la transmission de voix, vidéo ou de jeu en temps réel. Le trafic élastique possède pas ou peu de contrainte de délai, mais nécessite un transfert intégral du contenu. Ce trafic concerne les données numériques : HTTP, FTP, e-mail... Le fait d'avoir des charges réalistes influe fortement le débit utile du réseau dans sa globalité, car les interférences venant des cellules voisines seront plus faibles qu'avec une charge maximale.

La version actuelle du simulateur possède plusieurs mécanismes dérivés des recommandations d'organismes de standardisation internationaux [18] pour générer du trafic mixte de données. La mixité du trafic peut impliquer à la fois d'utiliser des modèles de trafic différents pour l'ensemble des utilisateurs et une succession de modèles pour un utilisateur particulier. La répartition des types de trafic entre les utilisateurs est un paramètre de simulation. Le simulateur possède aussi des mécanismes pour tenir compte du type de trafic dans l'allocation de ressource : *l'ordonnanceur contraint* permet de faire du Proportional-Fair sans dépasser la taille des données dans la queue de chaque utilisateur. De cette manière, si un seul utilisateur est présent dans une cellule et que le flux d'arrivée des données dans la queue de trafic est faible en fréquence et en taille de données, quelques Blocs de Ressources seulement seront alloués de manière éparse en temps et en fréquence. Cependant, l'ordonnanceur contraint présente trois défauts principaux. Premièrement, il est très long, car mathématiquement optimal, contrairement à d'autres implémentations du Proportional-Fair dans le simulateur. Deuxièmement, il n'est pas adapté à tous les types de trafic, dont le trafic mixte, puisqu'il ne prend pas en compte les contraintes de délai du trafic de type streaming. Troisièmement, il ne semble pas avoir été validé, car certaines erreurs ont été découvertes dans le code. Ces trois raisons nous ont poussés à établir une méthodologie spécifique à notre étude, que nous décrivons ci-dessous, en prenant en compte les contraintes de temps de simulation et de réalisme.

5.C.2. Scénarios et méthodologie

Le but de cette étude est d'évaluer l'impact de l'environnement non pas sur des métriques de débit maximal comme pour l'étude n°1, mais sur des métriques de Qualité de Service (QoS) et de consommation d'énergie. Les métriques de QoS les plus utilisées sont le respect du débit moyen associé à un type de trafic, le taux de perte des paquets et le délai moyen de transmission des paquets.

Nous avons vu que le flux de véhicules avait un impact sur le débit maximal de certains liens. Dans des situations de charges réalistes, l'impact des véhicules peut affecter la qualité du canal, mais les ressources peuvent être suffisantes pour respecter les débits moyens. Ce respect de débit moyen se fera cependant à un coût. Ce coût est généralement l'allocation de ressources supplémentaires (augmentation de l'énergie consommée), mais peut aussi être l'introduction d'un délai. Pour observer l'impact des véhicules sur les métriques de consommation d'énergie et de délai, ainsi que pour pallier aux défauts de l'ordonnanceur contraint énoncés auparavant, nous choisissons de simuler des utilisateurs utilisant uniquement un trafic de type streaming. D'une part, cette solution permet de fixer un débit moyen requis. Le streaming peut être associé par exemple à de la visioconférence, dont le débit dépend de la qualité de la définition vidéo. Nous choisissons ici un débit standard moyen à 400 kbp/s [19]. La génération de données est simplifiée en un modèle semi-continu : un paquet de 1 kilo-octet est généré toutes les 20 ms. D'autre part, nous pouvons utiliser des articles de référence pour implémenter des techniques d'allocation de ressource spécifiques au streaming et donc moins coûteuses en temps de calcul qu'un ordonnanceur mathématiquement optimal supportant le trafic mixte. Nous avons choisi d'implémenter un ordonnanceur centré sur la notion de délai limite pour transmettre un paquet, traitée notamment dans [20], en ajoutant la notion d'utilisation efficace du canal, que l'ordonnanceur connaît grâce aux informations de retour des utilisateurs. La métrique permettant de choisir à chaque ITT quel utilisateur est alloué est un compromis, pour un Bloc de Ressource donné, entre l'efficacité spectrale es et le délai restant δ_i , suivant (5.1). Comme pour l'ordonnanceur contraint, l'ordonnanceur implémenté prend en compte la présence et la taille des données dans la queue de trafic de l'utilisateur.

$$\mu(UE, BC) = \frac{(es(UE, BC)/ES_{max})^\alpha}{(\delta_i(UE)/D_{max})^\beta} \quad (5.1)$$

où es est l'efficacité spectrale en bit par temps-symbole et par sous-porteuse, ES_{max} est le maximum d'efficacité spectrale sur tous les utilisateurs et tous les Blocs de Ressources, δ_i est le délai restant (en ITT) avant que le premier paquet d'un utilisateur soit supprimé et D_{max} est le délai maximal de transmission d'un paquet. Le paramètre D_{max} est fixé ici à 40 ms pour tous les utilisateurs, c'est-à-dire au double de la période de génération des paquets. Les paramètres α et β

sont les paramètres d'ajustement de l'ordonnanceur entre respect du délai et utilisation optimale du canal.

Pour diminuer les temps de calcul et mieux observer les effets sur l'allocation des ressources des flux de véhicules, la bande de fréquence est divisée par deux par rapport à la première étude (10 MHz). L'ensemble des paramètres de simulation est synthétisé sur le tableau 5.2. L'environnement utilisé dans le scénario est le même que pour l'étude précédente. Afin d'optimiser le temps de simulation, nous simulons le réseau sur un seul secteur, en nous aidant du mécanisme de charge par défaut défini précédemment, section 5.A.2.3. Pour calculer la charge par défaut, nous faisons des simulations en plusieurs temps.

Tableau 5.2 : Paramètres de simulation pour l'étude n°2

Paramètre	Valeur
Fréquence d'opération du système	2600 MHz
Largeur de bande du système	10 MHz
Répartition des Ressources Blocs	48 RBs pour les données ; 2 RBs pour le contrôle
Facteur de réutilisation des fréquences	1
Durée de simulation	30 s
Puissance maximale d'émission (MBS)	46 dBm
Puissance maximale d'émission (PC)	33 dBm
Seuil ERC	3 dB
Modèle de trafic	Vidéo-conférence, 400 kbps
Algorithme d'allocation de ressources	Compromis délai/efficacité spectrale (DF)
DF_{α}, DF_{β}	1
Réseau d'antenne à l'émission	2-Tx
Réseau d'antenne à la réception	2-Rx
Mode de transmission LTE	3 – OLSM (Open Loop Spatial Multiplexing)

Dans un premier temps, nous simulons le secteur étudié seul, sans interférences. Nous répartissons dans le secteur étudié environ 50 utilisateurs sur les trottoirs (cf. figure 5.11), correspondant aux recommandations de densité définies dans l'étude n°1. Les identifiants des utilisateurs sont identiques, mais les placements sont différents de l'étude n°1. La charge de trafic ainsi obtenue pour le secteur étudié seul est de 45 %. Nous définissons ensuite la charge de trafic par défaut des autres secteurs à 45 % et nous simulons le réseau complet. La charge de trafic étudié sur le secteur en incluant les interférences est maintenant de 52 %.

Nous définissons la charge de trafic par défaut à 52 % et nous rajoutons quatre petites cellules dans le secteur d'étude. La charge de trafic passe à 12 % sur la station macro-cellule, et est de 11 % en moyenne sur les petites cellules. Afin de simuler les interférences des cellules voisines,

nous ajoutons finalement deux petites cellules dans chacun des deux secteurs voisins les plus interférents (cf. figure 5.11a). La charge de ces cellules est de 11 % par défaut. Nous considérons que le réseau de petites cellules ne concerne que le secteur étudié, nous ne changeons donc pas la charge par défaut sur les macro-cellules. Le réseau partiel ainsi déployé est considéré comme réaliste et adapté à des simulations rapides.

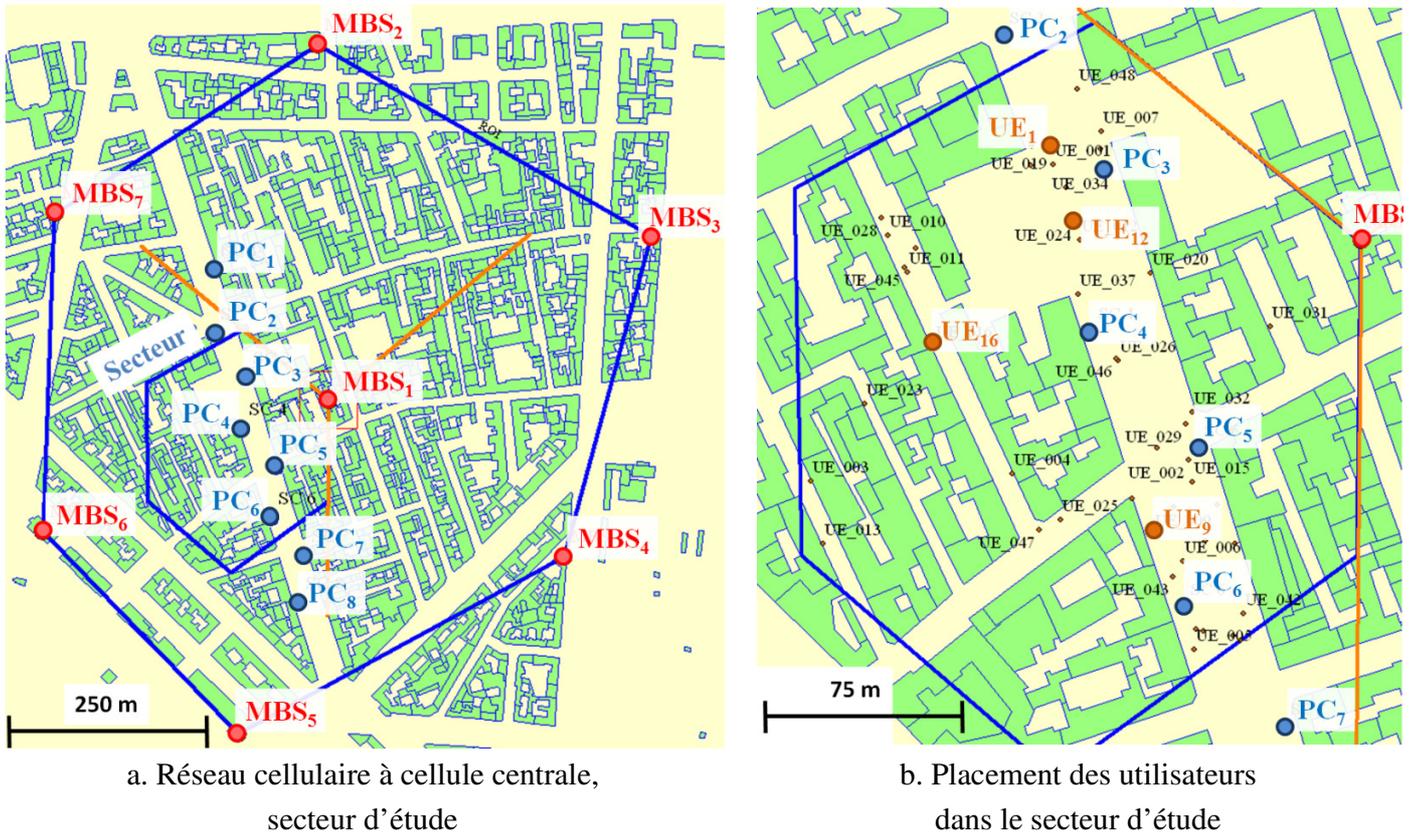


Figure 5.11 : Scénario de déploiement pour l'étude n°2

5.C.3. Résultats

Nous présentons dans une première partie l'impact des évanouissements variant dans le temps sur les métriques de consommation d'énergie et de QoS pour des utilisateurs individuels. Ces résultats sont analysés et interprétés dans la section suivante. La métrique choisie pour illustrer la consommation est l'énergie moyenne consommée (en J), qui résulte de la puissance transmise sur l'ensemble des Blocs de Ressources alloués pour un utilisateur à chaque ITT, moyennée sur la durée de la simulation. La mesure de l'énergie consommée n'est donc pas équivalente à une consommation réelle totale, qui inclurait l'énergie de fonctionnement des stations de bases et l'énergie nécessaire à transmettre l'information au cœur du réseau. La métrique choisie pour illustrer la QoS est le débit utile, en Mbps, c'est-à-dire le débit moyen de réception de paquets

sans erreur par le récepteur. Différents comportements sont observés en fonction de la position de l'utilisateur au sein du secteur étudié. Dans une deuxième partie, les métriques seront analysées à l'échelle du réseau. Les résultats sont analysés dans la prochaine section.

5.C.3.1. Impact sur les utilisateurs individuels

Pour les utilisateurs assignés à une petite cellule, et dont le lien radio croise une route, nous observons deux types de comportement. Pour certains utilisateurs, l'énergie moyenne consommée augmente avec l'introduction des évanouissements, mais le débit utile reste stable (cf. utilisateur UE₁, figure 5.12). Pour d'autres utilisateurs, le débit utile diminue, mais l'énergie consommée diminue alors également (cf. utilisateur UE₁₂, figure 5.13).

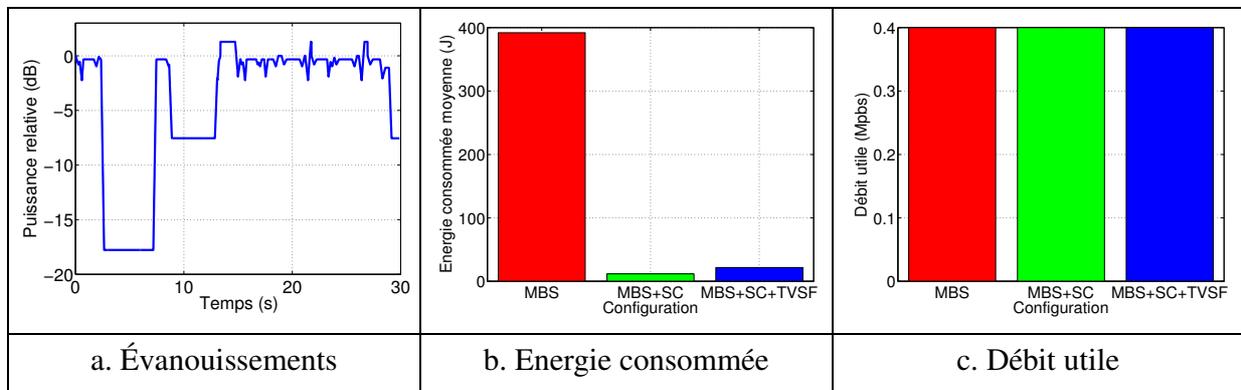


Figure 5.12 : Résultats de simulation – UE₁

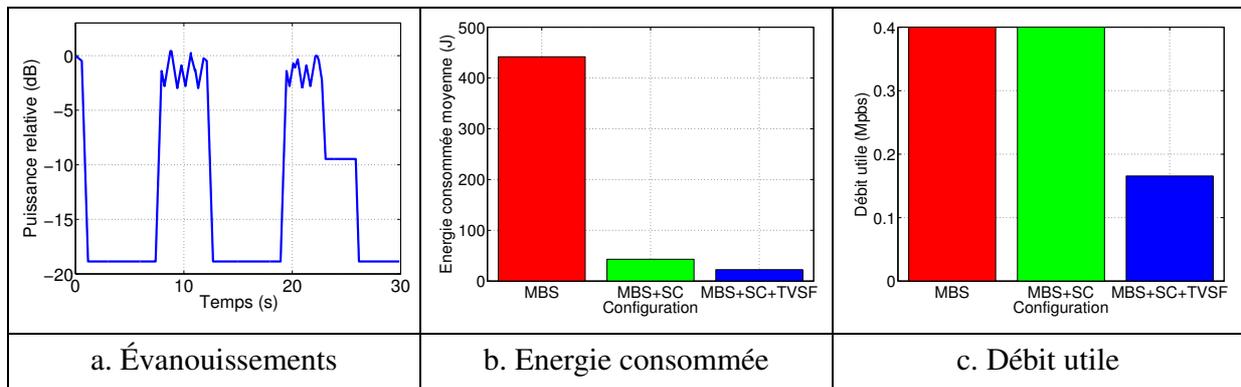


Figure 5.13 : Résultats de simulation – UE₁₂

Pour les utilisateurs assignés à une petite cellule et qui sont du même côté de la route que la station de base, le débit utile reste stable, mais l'énergie consommée augmente dans la majorité des cas, comme illustré sur la figure 5.14 avec l'utilisateur UE₉.

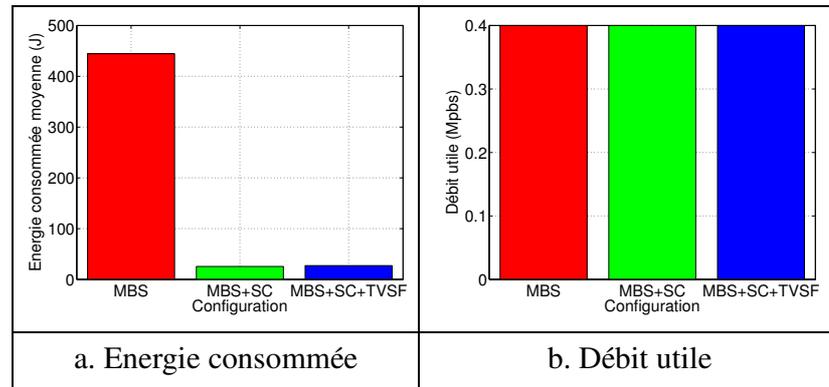


Figure 5.14 : Résultats de simulation – UE₉

Finalement, pour un utilisateur qui reste assigné à une station de base macro-cellule, le débit utile reste également stable dans tous les cas (cf. utilisateur UE₁₆, figure 5.15). L'énergie consommée est équivalente avec ou sans la prise en compte des évanouissements dus aux véhicules. La consommation d'énergie due à l'ajout de petites cellules augmente ou diminue suivant les utilisateurs.

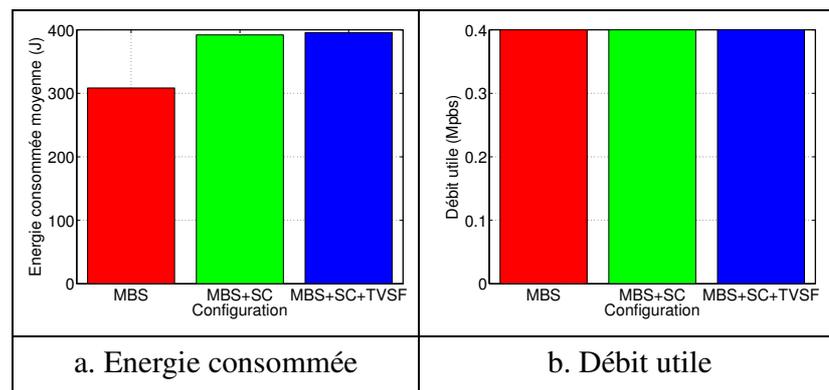


Figure 5.15 : Résultats de simulation – UE₁₆

5.C.3.2. Impact sur le réseau

La figure 5.16 illustre l'impact sur le réseau de l'ajout de petites cellules, ainsi que l'impact de la prise en compte des évanouissements dus aux véhicules dans les petites cellules. L'énergie nécessaire à la transmission de l'information seule en rajoutant un réseau de petites cellules est fortement diminuée (-75 %). Cette énergie ne comprend cependant pas l'énergie de fonctionnement et de liaison au cœur du réseau. La prise en compte des évanouissements augmente la consommation d'énergie sur les petites cellules (+20 %), mais l'augmentation de la consommation d'énergie sur le réseau est faible (+4 %). Le débit utile global baisse légèrement (-5 %).

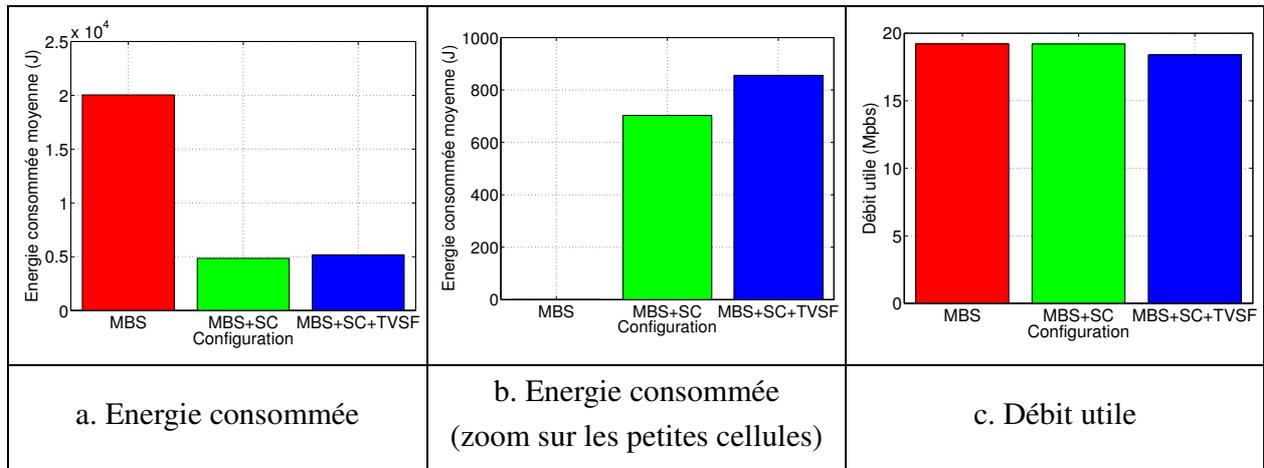


Figure 5.16 : Résultats de simulation – Réseau

5.C.4. Analyse et interprétation

Les deux comportements observés pour des utilisateurs en petite cellule dont le lien radio croise une route s'explique en fonction des atténuations rencontrées. Pour des atténuations faibles, le nombre de Blocs de Ressource alloués augmente, car la modulation utilisée a besoin d'être plus robuste que sans atténuations. La charge maximale sur la cellule n'est cependant pas atteinte. L'énergie consommée augmente donc, mais le débit désiré est atteint. Pour des atténuations plus fortes, l'indice de qualité du canal est si faible que la station de base n'alloue aucune ressource pour l'utilisateur concerné. L'énergie consommée diminue donc, mais le débit utile n'est plus le débit désiré. La situation suivante peut également être envisagée : une petite cellule du réseau hétérogène est proche de sa limite de capacité. L'introduction d'évanouissements variant dans le temps fait que les utilisateurs ont besoin de plus de Blocs de Ressources pour atteindre le débit désiré. Par conséquent, la cellule atteindra plus rapidement sa charge maximale, et certains paquets ne pourront plus respecter le délai requis. Pour un utilisateur, qui n'aura transmis que 80 % d'un paquet avant qu'il ne soit abandonné, l'énergie consommée sera donc équivalente, et son débit utile dégradé.

La consommation d'énergie supplémentaire observée pour les utilisateurs de petite cellule dont le canal n'est pas dégradé par les véhicules s'explique par deux raisons. Premièrement, la charge de trafic augmentant sur les cellules voisines, les interférences augmentent. Deuxièmement, l'allocation de ressources pour le paquet d'un utilisateur dont le délai restant est proche de la limite autorisée étant prioritaire, l'efficacité spectrale du canal à un instant t n'est pas exploitée à son maximum. Pour les utilisateurs en bords de cellule, la faible charge ($\approx 11\%$) sur les cellules voisines fait que la diminution des interférences observée dans l'étude n°1 a moins d'impact sur le RSIB.

Finalement, les interférences provoquées par les petites cellules expliquent l'augmentation de la consommation d'énergie pour les utilisateurs restants sur la macro-cellule et proches des stations petites cellules. Au contraire, pour des utilisateurs loin des stations petites cellules, le fait d'avoir plus de choix dans les Blocs de Ressources implique une meilleure utilisation de l'efficacité spectrale du canal.

Sur le réseau total, la consommation d'énergie reste stable, alors que le débit utile baisse pour plusieurs utilisateurs impactés par les véhicules, ce qui fait baisser le débit utile global de 5 %. La puissance d'émission d'une macro-cellule est cependant plus grande que pour une petite cellule. En ne comptabilisant que les utilisateurs alloués sur des petites cellules, la consommation augmente de 20 %, dû à une baisse de la qualité du canal pour les utilisateurs impactés par les véhicules.

5.D. Conclusions du chapitre

Nous avons mis en place dans ce chapitre des processus de simulation novateurs en environnement extérieur intégrant des canaux de propagation dynamiques et un simulateur de réseau LTE existant. Les résultats des simulations ont mis en avant un impact non négligeable du passage de véhicules dans des liens radio de type petite cellule sur les métriques du réseau. En prenant l'hypothèse de charge maximale et de flux continu, nous avons publié des résultats⁴ montrant une dégradation voire une interruption du débit d'un utilisateur individuel. La méthodologie ensuite proposée a permis d'observer les effets du passage de véhicules sur la puissance consommée et la Qualité de Service, grâce à un modèle de trafic contraint en délai et un ordonnanceur de ressource adapté. Avec cette hypothèse de modèle de trafic réaliste, nous observons que le débit utile peut rester stable avec le passage de véhicules, mais au prix d'une allocation de plus de ressources, donc d'une consommation énergétique plus importante. Les résultats montrent également des diminutions du débit utile dans certaines configurations : soit dans des conditions de fortes atténuations, soit dans des conditions de fortes charges. Les utilisateurs placés en bord de cellule sont en particulier concernés, car les atténuations sont plus longues et peuvent être plus fortes que pour les utilisateurs proches du récepteur. Nous observons cependant que dans certaines situations où les interférences venant des cellules voisines sont fortes, les évanouissements dus aux véhicules peuvent perturber ces signaux interférents, et donc réduire le nombre de ressources nécessaires à la transmission de l'information.

Ces études ont montré l'impact non négligeable du trafic de véhicule sur le débit et la consommation d'énergie dans des réseaux hétérogènes LTE réalistes. Les questions qui se posent par la suite sont donc : *comment améliorer ces performances ?* et *comment tirer profit de ces évanouissements ?* Nous proposons deux pistes pour y répondre :

- L'anticipation des situations critiques lors de la phase de déploiement d'un réseau hétérogène.
- L'intégration dans la conception des systèmes, des contraintes de propagation de petites cellules, par exemple la conception d'algorithmes d'allocation dynamiques en fonction de l'état du canal d'un lien et sa corrélation avec l'état des canaux de liens proches.

Ces recommandations et perspectives sont traitées dans le chapitre suivant, qui fait la synthèse des différentes conclusions de cette thèse en décrivant en particulier l'importance de la mobilité de l'environnement dans des milieux urbains. Cette conclusion aborde à la fois l'impact

⁴ L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, "The impact of neglecting vehicular scattering in LTE heterogeneous networks," in *Proc. of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC 2013-Fall)*, Las Vegas, NV, USA, 2013.

des véhicules sur le canal de propagation, mais aussi les perturbations produites sur le réseau ainsi que les perspectives de recherche envisagées.

Bibliographie

- [1] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [2] K. Etemad, "Overview of mobile WiMAX technology and evolution," *IEEE Communication Magazine*, vol. 46, no. 10, pp. 31–40, 2008.
- [3] D. Astély, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Lindstrom, and S. Parkvall, "LTE: the evolution of mobile broadband," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 44–51, 2009.
- [4] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-Advanced: next-generation wireless broadband technology [invited paper]," *IEEE Wireless Communication Magazine*, vol. 17, no. 3, pp. 10–22, 2010.
- [5] K. Ziri-Castro, W. Scanlon, and N. Evans, "Prediction of variation in MIMO channel capacity for the populated indoor environment using a radar cross-section-based pedestrian model," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 1186–1194, 2005.
- [6] M. Varshney and R. Bagrodia, "Performance implication of environmental mobility in wireless networks," in *Proc. of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2007, pp. 767–775.
- [7] S. Castillo and L. Ahumada, "On the simulation of fixed wireless users in ns-2," in *Proc. of the 15th IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2010, pp. 16–20.
- [8] J. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, "System level simulation of LTE networks," in *Proc. of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 1–5.
- [9] H. J. Kushner and P. A. Whiting, "Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 4, pp. 1250–1259, 2004.
- [10] K. Brueninghaus, D. Astely, T. Salzer, S. Visuri, A. Alexiou, S. Karger, and G. Seraji, "Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems," in *Proc. of IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2005)*, vol. 4, 2005, pp. 2306–2311.
- [11] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the long term evolution physical layer," in *Proc. of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO '09)*, vol. 27, Glasgow, Scotland, 2009, p. 124.
- [12] T. Henderson, M. Lacage, G. Riley, C. Dowell, and J. Kopena, "Network simulations with the ns-3 simulator," *SIGCOMM demonstration*, 2008.

- [13] A. Varga *et al.*, “The OMNeT++ discrete event simulation system,” in *Proc. of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, 2001, pp. 319–324.
- [14] X. Chang, “Network simulations with OPNET,” in *Proc. of Simulation Conference (Winter '99)*, vol. 1, 1999, pp. 307–314.
- [15] N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, and J. Nin-Guerrero, “An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3,” in *Proc. of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, 2011, pp. 293–298.
- [16] Y. Corre and Y. Lostanlen, “Three-dimensional urban EM wave propagation model for radio network planning and optimization over large areas,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 3112–3123, 2009.
- [17] K. Okino, T. Nakayama, C. Yamazaki, H. Sato, and Y. Kusano, “Pico cell range expansion with interference mitigation toward LTE-Advanced heterogeneous networks,” in *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. IEEE, 2011, pp. 1–5.
- [18] Orange, China Mobile., KPN, NTT Docomo., Sprint, T-Mobile, Vodaphone, and Telecom Italia., “LTE physical layer framework for performance verification,” 3GPP TSG-RAN1, Tech. Rep., 2007.
- [19] M. Liou, “Overview of the p x 64 kbit/s video coding standard,” *Communications of the ACM*, vol. 34, no. 4, pp. 59–63, 1991.
- [20] S. Shakkottai and R. Srikant, “Scheduling real-time traffic with deadlines over a wireless channel,” *Wireless Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 13–26, 2002.

Conclusion

La demande croissante en données a poussé les opérateurs à densifier leurs réseaux et à adopter des topologies, dites de petites cellules, où la station de base est proche de l'utilisateur. L'évaluation des systèmes de nouvelle génération dans des réseaux hétérogènes, constitués de la combinaison de cellules classiques et de ces nouvelles topologies, nécessite une meilleure caractérisation des canaux de propagation. En effet, les modèles empiriques et analytiques caractérisant la dynamique du canal de propagation dans des configurations de type macro-cellules ne sont pas adaptés aux petites cellules. Le placement de l'antenne des stations de base à des hauteurs plus faibles rend le canal de propagation plus sensible aux détails de l'environnement. D'une part, les modélisations des évanouissements à grande échelle dus au déplacement de l'utilisateur ne sont plus appropriées, car les mécanismes physiques à la source des variations du signal sont différents. D'autre part, les phénomènes d'évanouissements dus à l'environnement prennent plus d'importance. Nous avons choisi dans ce manuscrit de traiter principalement ces problématiques dans des environnements extérieurs. En effet, les travaux de la communauté scientifique ont déjà mis en avant ce phénomène dans des environnements intérieurs, notamment l'impact de l'activité humaine à 60 GHz, mais aussi dans des systèmes WiFi et UWB. En plus de plusieurs mesures de caractérisation, de nombreux modèles ont été développés en environnement intérieur pour améliorer l'évaluation des systèmes.

Nous avons mis en place dans ce manuscrit une approche déterministe pour caractériser l'impact de l'environnement sur la dynamique dans le canal, via une plateforme de simulation. Cette approche a d'abord nécessité d'enrichir les bases de données géographiques servant de support à la prédiction de propagation avec des détails statiques et dynamiques. Une démarche pseudo-aléatoire de génération de mobilier urbain (lampadaires, véhicule stationnés...), permet d'avoir un ensemble de scènes de propagation potentielles et d'effectuer des traitements statistiques sur les résultats de simulation. Nous avons utilisé pour cela une base de données libre

et collaborative appelée OpenStreetMap, qui contient des informations sur la topologie des réseaux urbains et sur les objets s'en rattachant : rues, types d'intersection, présence d'arrêts de bus.... La richesse de ces informations nous a également servi à améliorer les modèles réalistes de macro- et de micro-mobilité pour déplacer des objets dans la scène. Des modèles déterministes de propagation ont été adaptés pour correspondre aux topologies de petites cellules et permettre l'analyse de recombinaison des trajets. Les perturbations sur les contributions existantes et les contributions supplémentaires apportées par les détails dans l'environnement ont été prises en compte, en veillant à respecter les conditions d'application des formules en champ proche. Les modèles de propagation développés ont été validés et ajustés en appliquant des démarches quantitatives et qualitatives. La proportion de puissance hors trajet direct due au mobilier urbain a été confrontée à des résultats de mesure existants dans la littérature. Des mesures de l'impact du trafic de véhicule en milieu extérieur ont été réalisées pour valider les mécanismes de propagation déterminants sur les structures métalliques des véhicules et ajuster certains paramètres du modèle.

Les mesures effectuées et les études réalisées avec la plateforme de simulation nous ont permis d'apporter des réponses aux problématiques de modélisation des dynamiques du canal de propagation en petites cellules. D'une part, nous avons montré, parallèlement à d'autres études, que plusieurs aspects des modèles décrivant les évanouissements à grande échelle n'étaient pas adéquats. Premièrement, la justification physique du modèle logarithmique par une approche multiplicative des rayons n'est pas fondée. En effet, les rayons ne subissent pas de masquage et les variations à grande échelle observées sont le résultat de recombinaison des rayons. Deuxièmement, les corrélations entre différents liens proches dans l'espace ne sont pas uniformes mais dépendent des éléments de propagation environnants. D'autre part, nous avons montré que la prise en compte de la mobilité de l'environnement est essentielle à la modélisation des dynamiques du canal de propagation en petites cellules, contrairement aux configurations macro-cellules où l'essentiel des trajets de diffusion passent au dessus des toits. Les mesures effectuées ont en effet permis d'associer le passage d'un véhicule aux variations de la puissance du signal sous la forme de motifs, propres à un type de véhicule et à une configuration du lien radio. Pour des véhicules larges et des utilitaires, des atténuations fortes de 5 à 20 dB sont observées. Pour des voitures, l'obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel est moins forte et a donc un impact moindre sur l'atténuation lorsque l'utilisateur est proche de la station de base. Cependant, lorsque l'utilisateur est en limite de rayon d'une cellule, d'autres mécanismes tels que la réflexion sur le sol entrent en jeu et peuvent entraîner des évanouissements plus forts, sur des durées plus longues.

La hauteur des antennes de station de base est à la fois une variable importante lors du calcul de l'amplitude des évanouissements dus au trafic de véhicule et un des paramètres ajustables par l'opérateur lors du déploiement d'un réseau de petites cellules. Nous avons réalisé une étude

portant sur la probabilité de coupure d'un lien fixe dans trois environnements réalistes pour différentes hauteurs d'antenne. L'augmentation de la hauteur permet en effet une réduction significative de la probabilité de coupure. Cette solution est cependant à relativiser : d'une part, certaines contraintes de propagation, comme l'obstruction de la réflexion sur le sol, ne sont pas résolues lorsque l'utilisateur est loin de la station de base. D'autre part, les évanouissements apportés par le trafic de véhicules peuvent être utilisés pour éliminer, sans surcoût algorithmique, les interférences des cellules voisines.

Dans le futur, les modèles d'évanouissements, à la fois analytiques et déterministes, devront être améliorés pour fournir une évaluation réaliste des systèmes. Dans les petites cellules, les mêmes phénomènes de recombinaison de rayons sont à l'origine des évanouissements à petite et à grande échelle, mais sont traités de manière disjointe. De plus, les évanouissements dus à l'environnement, à petite et grande échelle, doivent être modélisés de manière conjointe avec les évanouissements dans l'espace. En effet, l'état de phase d'une recombinaison dans l'espace influe sur les perturbations apportées par l'environnement sur l'ensemble des rayons.

Au-delà de l'aspect de la propagation, nous nous sommes ensuite intéressés à l'impact de l'environnement sur les mécanismes et les performances du réseau, qui est un sujet de recherches en environnement intérieur mais qui n'est pas traité en environnement extérieur. La simulation de réseaux requiert cependant d'importantes ressources de calcul en temps et en mémoire, ce qui rend peu judicieux l'utilisation d'un modèle purement déterministe pour la prédiction de propagation dynamique. Nous avons proposé dans ce manuscrit un modèle hybride qui combine les qualités des approches statistiques et déterministes, que sont respectivement la rapidité et la précision des résultats. Le gain en temps de calcul est obtenu grâce à deux optimisations. Premièrement, le déclenchement d'une obstruction du lien radio est effectué de manière stochastique en utilisant les statistiques de mobilité du réseau véhiculaire au lieu de générer des positions de mobilité pour chaque période de la simulation. Deuxièmement, les variations du signal associées au véhicule obstruant sont calculées de manière unique sous forme de motif, au lieu de recombinaison des rayons pour chaque période de la simulation. Ces motifs, similaires aux motifs observés lors des mesures, sont reconstruits en utilisant les principaux mécanismes de propagation : obstruction de l'ellipsoïde de Fresnel, diffraction sur l'arête du véhicule la plus proche, et obstruction des rayons existants. Cette approche hybride a également été appliquée à un modèle de canal stochastique, pour des environnements intérieurs et extérieurs.

L'impact du trafic des véhicules sur un réseau LTE hétérogène a été étudié dans une phase applicative. Nous avons pour cela mis en place un processus de simulation novateur, intégrant le modèle de propagation hybride et un simulateur système LTE existant. En utilisant une hypothèse de simplification du trafic, à charge maximale et à flux continu, nous observons que le débit d'un utilisateur individuel peut être dégradé, voire interrompu par le passage de véhicules. Nous avons

ensuite développé une méthodologie spécifique pour observer l'impact de la prise en compte des véhicules sur la consommation d'énergie et sur le respect de contrainte de Qualité de Service (QoS). L'utilisation d'un modèle de trafic de type streaming, combiné à la conception d'un algorithme d'allocation spécifiquement adapté pour un trafic contraint en délai et l'utilisation de mécanismes de charge par défaut sur les cellules voisines ont permis d'optimiser la rapidité de simulation du réseau. En utilisant une hypothèse de modèle de trafic réaliste, les résultats de simulation montrent que le débit utile peut rester stable avec le passage de véhicules, en échange d'un nombre plus important de ressources allouées, conduisant à une consommation énergétique plus importante. Des diminutions du débit utile sont également observées lorsqu'un lien subit de fortes atténuations ou lorsque la charge sur le réseau est élevée. En lien avec les conclusions tirées des caractérisations du canal de propagation, les utilisateurs placés en bord de cellule sont en particulier concernés, car les atténuations sont plus longues et peuvent être plus fortes que pour les utilisateurs proches du récepteur. Les évanouissements dus aux véhicules ne sont cependant pas forcément défavorables pour un système dans sa globalité, car ils peuvent également faire diminuer fortement les interférences venant des petites cellules voisines.

Après avoir conclu que le trafic de véhicules peut avoir un impact non négligeable sur le débit et la consommation d'énergie dans des réseaux hétérogènes LTE réalistes, les prochaines questions que nous nous posons sont : *comment améliorer les performances et comment tirer profit de ces évanouissements ?*

Dans l'immédiat, nous recommandons d'anticiper les situations critiques lors de la phase de déploiement du réseau hétérogène. Par exemple, lors de la conception d'un réseau de petites cellules, la prise en compte de la proximité d'une route devrait influencer la position des stations de base. Les endroits où le trafic de données se concentre devraient être identifiés afin de placer les stations de base voisines de manière à favoriser les atténuations d'interférences, surtout en bords de cellule. De même, le choix de la hauteur de la station de base devrait résulter d'une optimisation. D'une part, la hauteur des stations de base devrait être suffisamment élevée pour que le trafic ait peu d'impact sur les utilisateurs de la cellule. D'autre part, la hauteur des stations de base devrait être suffisamment faible pour que les véhicules atténuent les interférences des stations de base voisines.

Dans le futur, la conception des systèmes pourra prendre en compte l'environnement et sa dynamique. Des algorithmes d'allocations dynamiques pourraient par exemple permettre d'anticiper les évanouissements profonds pour un utilisateur en transférant le trafic de données vers un nœud qui ne subirait pas l'atténuation en même temps. Ce transfert peut s'établir soit vers une autre station de base coordonnée, soit vers un relai proche, par exemple un utilisateur mobile coopératif. De manière similaire, si deux utilisateurs sont proches spatialement, la détection d'un fort évanouissement sur l'un d'entre eux peut porter l'ordonnanceur de ressources à décider par anticipation de ne pas allouer de ressources (si le lien est interrompu) ou d'en allouer plus (si le

lien est dégradé) à l'utilisateur voisin dans un avenir proche. Pour prendre en compte ces configurations, plusieurs aspects de la simulation doivent être améliorés. Premièrement, comme évoqué dans les recommandations de la partie propagation, les résultats de génération d'évanouissements dus au trafic de véhicules devraient inclure à la fois les évanouissements à grande échelle mais aussi les évanouissements à petite échelle pour être réalistes. Deuxièmement, l'optimisation dans l'espace et le temps des différents liens requiert des évanouissements variant dans le temps corrélés. Le modèle hybride utilisé dans la partie applicative de ce manuscrit ne prend pas en compte ces corrélations, mais cette option est incluse dans deux extensions du modèle que nous avons présentées.

Liste des contributions

Conférences internationales avec actes

L. Maviel, A. Cordonnier, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, “Measurements of large-scale variations caused by vehicular traffic in small-cells,” in *Proc. of the 19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Jounieh, Lebanon, 2012.

L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, “A hybrid propagation model for large-scale variations caused by vehicular traffic in small cells,” in *Proc. of the 2012 Global Communication Conference (Globecom)*, Anaheim, CA, USA, 2012.

L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, “The impact of neglecting vehicular scattering in LTE heterogeneous networks,” in *Proc. of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC 2013-Fall)*, Las Vegas, NV, USA, 2013.

Conférences européennes avec actes

G. Gougeon, Y. Lostanlen and L. Maviel, “Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells,” in *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, pp. 3448-3452, 2011.

L. Maviel, Y. Lostanlen and J-M. Gorce, “Fast generation of correlated large-scale variations caused by vehicular scattering in small cells,” in *Proc. of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, 2013.

Séminaire international

L. Maviel, J-M. Gorce and Y. Lostanlen, “On the use of statistic in deterministic channel models,” in *International Workshop on Propagation and Channel Modeling for Next-Generation Wireless Networks (IWPCM)*, Lyon, France, 2011.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : MAVIEL
(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

DATE de SOUTENANCE : 27 mai 2013

Prénoms : Laurent

TITRE : Modélisation et simulation des réseaux sans fil hétérogènes et non-stationnaires. Application aux topologies de petites cellules

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2013ISAL0036

Ecole doctorale : Électronique, Électrotechnique et Automatique

Spécialité : STIC Santé

RESUME :

Les nouveaux services de télécommunication accessibles en mobilité entraînent une demande croissante de débit et amènent aux limites de capacités des réseaux actuels. Pour répondre à cette demande, les opérateurs cellulaires déploient de nouvelles technologies et densifient leurs réseaux en ajoutant des petites cellules, où les stations de base sont plus proches des utilisateurs. Compte tenu de la visibilité directe et de la faible hauteur des antennes, le canal de propagation des petites cellules est différent de celui des macro-cellules et les modèles stochastiques de canal existants ne sont plus adaptés. C'est dans ce contexte que se situe cette thèse, qui explore les problématiques de dynamique dans le canal de propagation et dans l'utilisation des ressources radio.

Nous proposons dans une première partie de caractériser les dynamiques dans le canal de propagation de petite cellule en milieu extérieur. Cette caractérisation se base sur des prédictions déterministes, où une partie de l'environnement est généré de manière aléatoire afin de procéder à des études statistiques. Pour cela, nous mettons en place une plateforme de simulation, capable de générer des objets statiques, de les déplacer et de les prendre en compte dans des outils de prédiction de propagation adaptés aux petites cellules. Une phase de mesures de l'impact du trafic de véhicules sur la puissance du signal permet de valider les outils de propagation développés dans la plateforme.

L'objectif de la deuxième partie de la thèse est d'évaluer l'impact de ces nouvelles topologies sur les performances des réseaux hétérogènes. Nous présentons un modèle hybride de propagation qui prend en compte les variations de signal dues au trafic de véhicules en combinant les approches déterministes et statistiques, pour avoir les avantages de résultats précis et d'un temps de calcul rapide. Ce modèle hybride est utilisé par la suite dans un processus de simulation de réseau cellulaire 3G LTE au niveau système, où nous évaluons l'impact du trafic de véhicules sur le débit maximal, la consommation d'énergie et le respect de la qualité de service.

MOTS-CLES : réseaux cellulaires hétérogènes ; petites cellules ; propagation ; mobilité de l'environnement ; modèles de mobilité réalistes ; modélisation hybride

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire CITI (Université de Lyon, INSA Lyon, INRIA)

Directeur de thèse:

Jean-Marie GORCE, Professeur à l'INSA de Lyon – CITI

Président de jury :

Ghaïs El Zein, Professeur à l'INSA de Rennes – IETR

Composition du jury :

Jean-Marie Gorce, Professeur à l'INSA de Lyon – CITI, Directeur de thèse

Yves Lostanlen, Directeur Technique Wireless à SIRADEL, Co-encadrant

Ghaïs El Zein, Professeur à l'INSA de Rennes – IETR

Rodolphe Vauzelle, Professeur à l'Université de Poitiers – XLIM-SIC

Marion Berbineau, Directrice de recherche à l'IFSTTAR – LEOST

Claude Oestges, Professeur associé à l'Université Catholique de Louvain, Belgique