



HAL
open science

Interpolation de niveaux d'exposition aux émissions radioélectriques in situ à l'aide de méthodes géostatistiques

Yahya Ould Isselmou

► **To cite this version:**

Yahya Ould Isselmou. Interpolation de niveaux d'exposition aux émissions radioélectriques in situ à l'aide de méthodes géostatistiques. domain_other. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. Français. NNT : 2007ENMP1484 . pastel-00003423

HAL Id: pastel-00003423

<https://pastel.hal.science/pastel-00003423>

Submitted on 22 Feb 2008

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.

Résumé

Les réglementations et normes radioélectriques précisent différentes valeurs limites d'exposition radioélectrique à ne pas dépasser. Les niveaux d'expositions constatés autour des antennes de radio et de télécommunications sont très en dessous des limites d'exposition recommandées par la commission de protection contre les rayonnements non-ionisants. Aujourd'hui, les personnes se trouvant à proximité des émetteurs radio ne cherchent plus simplement à vérifier la conformité aux normes. La demande porte sur l'évaluation du niveau d'exposition auquel ils sont soumis et la probabilité de dépassement d'un seuil donné. Le cadre probabiliste sur lequel sont fondées les méthodes géostatistiques offre la possibilité de répondre à cette question.

Dans cette thèse nous présentons une application des méthodes géostatistiques linéaires ; en particulier le krigeage, pour l'estimation des niveaux d'exposition radioélectriques à partir d'un jeu de données simulées. Une application du krigeage avec dérive externe sur des mesures réelles est ensuite présentée. Dans ces applications, le modèle de variogramme de Cauchy montre une bonne adéquation avec la variabilité de la densité de la puissance. Un troisième exemple d'application a pour objectif d'évaluer la probabilité avec laquelle les niveaux d'exposition peuvent dépasser un seuil déterminé. Nous utilisons deux méthodes de la géostatistique non-linéaire basées sur un modèle «multigaussien» et comparons les résultats des calculs de probabilité de dépassement de seuil par ces deux méthodes sur un ensemble de mesures d'exposition prises dans le centre de la ville de Paris.

Mots clés : Géostatistiques, krigeage, exposition radioélectrique, station de base.

Abstract

Radioelectric norms give different limit values of the radioelectric exposure. Exposure levels measured near radio and telecommunication antennas are very small compared to values recommended by the "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection". Today, persons near radio transmitters are seeking for the evaluation of exposure levels and the probability to exceed some threshold and not only the conformity to norms. Probabilistic framework with geostatistical methods is proposed that permits this evaluation.

In this thesis we present an application of linear geostatistical methods, in particular the kriging method, for the estimation of the radioelectric levels of exposure starting from the output of a numerical model. The application of kriging with external drift to measurements obtained by a dosimeter is presented in this thesis. In these case studies, the Cauchy variogram model shows a good adequacy with the variability of the power density.

A final application aims to evaluate the probability with which the exposure can exceed a determined threshold. We use two methods of non linear geostatistics, which require a Gaussian random function framework.. The practical implementation of these methods involves a transformation of the exposure to Gaussian values. A comparison between the probability of threshold exceedance obtained by application of the two methods on measurements is presented.

Keywords: Geostatistic, kriging, radioelectric exposure, base station.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du centre de géostatistique de l'Ecole de Mines de Paris et au groupe interaction ondes électromagnétiques personnes de France Télécom R&D. Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance aux professeurs Hans Wackernagel, Walid Tabbara et à Joe Wiart pour m'avoir fait confiance et guidé dans cette étude. Je les remercie également pour leurs qualités humaines et scientifiques.

Je tiens à remercier les Professeurs Jean-Paul Chilès et Jacques Rivoirard pour leurs suivis de ce travail et leurs commentaires éclairés. Je voudrais remercier toute l'équipe du groupe IOP : Man Fai Wong, Azeddine Gati, Thierry Sarrebourg, Abdelhamid Hadjem, Emmanuel Larchevêque, Albert Cortel Carrasco et Emmanuelle Conil pour leur sympathie et pour certains, leur aide dans les réalisations des campagnes de mesures.

Je remercie tous les thésards du groupe IOP, mes compagnons de bureau, Saidi Fadila, Guillaume Dauron, Hanae Terchoune, Jessica Carette, Abdelrahmane Nedjar et Tongning Wu. Encore un grand merci à toutes les personnes du Centre de Géostatistique.

Enfin un immense merci à mes parents et mes amis, Hachama Mohamed, Antoine Manzanera. Pardon à ceux que je n'aurais pas cités, merci.

Table des matières

INTRODUCTION.....	15
--------------------------	-----------

PARTIE THEORIQUE.....	18
------------------------------	-----------

CHAPITRE 1: RESEAU CELLULAIRE DE TELEPHONIE MOBILE.....	19
--	-----------

1) QU'EST CE QU'UN RESEAU CELLULAIRE?	19
2) SOUS-SYSTEME RADIO (BSS).....	21
2.1) Station de base (BTS).....	21
2.2) Les amplificateurs de signal	22
2.3) Contrôleur de base (BSC).....	23
3) TRANSMISSION SUR L'INTERFACE RADIO	23
3.1) Les méthodes d'accès aux réseaux	24
3.2) Canal de signalisation et canaux de trafic	25

CHAPITRE 2 : LES NORMES D'EXPOSITION AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES.....	27
--	-----------

1) INTRODUCTION	27
2) GRANDEURS PHYSIQUES UTILISEES	28
3) LE CADRE REGLEMENTAIRE COMMUNAUTAIRE	28
4) L'EXPOSITION DES PERSONNES EN MILIEU PROFESSIONNEL	30
4.1) Le contexte européen.....	30
4.2) Le contexte Français	31
5) CONCLUSION	32

CHAPITRE 3 : PROPAGATION DES ONDES RADIOELECTRIQUES	33
--	-----------

1) LES EQUATIONS DE MAXWELL.....	33
1.1) Propagation dans le vide.....	35
1.2) Propagation dans un milieu homogène isotrope.....	35
1.3) Propagation dans un milieu avec perte	36
2) PROPAGATION D'ONDE PLANE	36
3) ZONES DE PROPAGATION.....	37
4) ANTENNES ET RAYONNEMENT	38
4.1) Les dipôles	38
4.2) Puissance rayonnée.....	40
4.3) Rayonnement d'antenne relais.....	41
5) CONCLUSION	42

CHAPITRE 4 : SIMULATION ET MESURES	43
---	-----------

1) EMF VISUAL	43
2) METHODES DE MESURE.....	45

2.1) Analyseur du spectre	46
2.2) Dosimètre personnel	47
2.3) Comparaison entre les deux équipements	48
3) CONCLUSION	48
CHAPITRE 5 : METHODES D'INTERPOLATION SPATIALES.....	49
1) NOTATION	49
2) METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE	50
2.1) Méthodes d'interpolation déterministes	50
2.2) Méthodes d'interpolation statistiques	51
3) LA METHODE DU KRIGEAGE	52
3.1) Stationnarité.....	53
3.2) Variogramme	53
3.3) Méthode de krigeage	56
4) CONCLUSION	61
CHAPITRE 6: GEOSTATISTIQUE NON LINEAIRE	62
1) ANAMORPHOSE GAUSSIENNE	62
1.1) Définition.....	62
1.2) Polynômes d'Hermite	63
2) CONDITIONNEMENT UNIFORME.....	64
3) SIMULATION CONDITIONNELLES	66
3.1) Post-conditionnement	66
3.2) Méthode de bandes tournantes	67
4) CONCLUSION	68
PARTIE PRATIQUE	69
CHAPITRE 7 : APPLICATION 1: SIMULATION EN ESPACE LIBRE.....	70
1) SIMULATION AVEC EMF VISUAL.....	70
1.1) Description des données	70
1.2) Etude de la corrélation des données	72
2) TECHNIQUES D'ECHANTILLONNAGE	75
2.1) Echantillonnage aléatoire simple.....	75
2.2) Echantillonnage systématique	76
2.3) Echantillonnage stratifié.....	76
3) KRIGEAGE EN ESPACE LIBRE	77
3.1) Description des données	77
3.2) Ajustement du variogramme	77
3.3) Validation du modèle de variogramme	78
3.4) Résultats du krigeage.....	81
4) KRIGEAGE EN PRESENCE DE REFLECTEURS	84
4.1) Variogramme à l'origine	84
4.2) Ajustement du variogramme	85
4.3) Validation du modèle.....	86
4.5) Résultats du krigeage.....	87
5) CONCLUSION	88

CHAPITRE 8 : APPLICATION 2 : MESURES D'EXPOSITION A L'EXTERIEUR DES BATIMENTS.....	89
1) MESURES	89
1.1) Première campagne.....	89
1.2) Deuxième campagne.....	90
2) SIMULATION	92
3) COMBINAISON DES MESURES ET SIMULATION	93
3.1) Variogramme isotrope	94
3.2) Analyse de l'anisotropie	95
3.3) Résultat du krigeage	98
4) COMPARAISON ENTRE KRIGEAGE ORDINAIRE ET KRIGEAGE AVEC DERIVE EXTERNE	99
5) EVALUATION D'INCERTITUDE EN FONCTION DE LA TAILLE D'ECHANTILLON.....	100
6) CONCLUSION	101
CHAPITRE 9 : ETUDE DU MODELE DE VARIOGRAMME.....	102
1) DEUX QUARTIERS VOISINS	102
1.1) Variogrammes de densité de la puissance	103
1.2) Variogrammes de champ radioélectrique	104
1.3) Résultat du krigeage	105
1.4) Validité du variogramme	107
1.5) Validation croisée des modèles	109
2) COMPARAISON ENTRE DEUX CAMPAGNES DE MESURES	111
2.1) GSM 900MHz	112
2.2) GSM 1800 MHz	116
2.3) FM	119
3) CONCLUSION	122
CHAPITRE 10 : PROBABILITE DE DEPASSEMENT DE SEUIL.....	123
1) INTRODUCTION	123
2) CONDITIONNEMENT UNIFORME.....	124
3) SIMULATIONS CONDITIONNELLES	126
4) CONCLUSION	129
CONCLUSION	130
BIBLIOGRAPHIE.....	133
GLOSSAIRE	138
ANNEXE A: CAMPAGNE DES MESURES AVEC L'ANALYSEUR DU SPECTRE	139
1) PLAN DE MESURES	139
2) MESURES EFFECTUEES	139
3) TRAITEMENT GEOSTATISTIQUES	142
ANNEXE B.....	144

Liste des Figures

Figure 1.1 : Exemples de cellules	20
Figure 1.2 : Schéma BTS et Amplificateur.....	23
Figure 3.1 : Propagation d'une onde électromagnétique.	34
Figure 3.2 : Zones de propagation.	38
Figure 3.3 : Dipôle oscillant.....	39
Figure 3.4 : Réseau des dipôles.....	41
Figure 4.1 : Caractéristiques visuelles de simulation.....	44
Figure 4.2 : Exemple de la simulation EMF Visual.....	44
Figure 4.3 : Technique de superposition.....	45
Figure 4.4 : Sonde de mesure.....	46
Figure 4.5 : Switch.....	46
Figure 4.6 : Analyseur du spectre.	47
Figure 4.7 : Dosimètre utilisé dans cette étude et sa structure interne.....	47
Figure 4.8 : Les comparaisons entre les mesures dosimètre-analyseur de spectre	48
Figure 7.1 : Scène de simulation.....	71
Figure 7.2 : Grille régulière de taille (81*81)	71
Figure 7.3 : Résultats des simulations avec EMF Visual (W/m^2).....	71
Figure 7.4 : Variogramme a grande distance	72
Figure 7.5 : Variogrammes expérimentaux au voisinage de l'origine.....	73
Figure 7.6 : Ajustement du variogramme au voisinage de l'origine	73
Figure 7.7 : Ajustement du variogramme par deux modèles de Cauchy	74
Figure 7.8 : Echantillonnage aléatoire simple.....	75
Figure 7.9 : Echantillonnage systématique.	76
Figure 7.10 : Echantillonnage aléatoire stratifié.....	77
Figure 7.11 : Variogrammes omnidirectionnels	78
Figure 7.12 : Résultats de validation croisées.....	80
Figure 7.13 : Les endroits d'erreurs de validation croisée	80
Figure 7.14 : Résultats de krigeage.....	83
Figure 7.15 : Ecart-types du krigeage	83
Figure 7.16 : Cartes des différences.....	84
Figure 7.17 : Résultats des simulations avec réflecteurs	84
Figure 7.18 : Variogramme a l'origine en présence des réflecteurs	85
Figure 7.19 : Variogrammes omnidirectionnels	85
Figure 7.20 : Résultats de validation croisée en présence des réflecteurs	86
Figure 7.21 : Résultats de krigeage avec réflecteurs.....	87
Figure 7.22 : Cartes de différences entre résultats du krigeage avec réflecteurs et les résultats des simulations	88
Figure 8.1 : L'exemple de 220 mesures.....	90
Figure 8.2 : Histogramme des données de GSM 900MHz de dosimètre.....	91
Figure 8.3 : Carte des endroits de prélèvement des données de GSM 900MHz	91
Figure 8.4 : Plan du quartier.	92
Figure 8.5 : Le champ produit avec EMF Visual.....	93

Figure 8.6 : Histogramme des valeurs GSM 900MHz simulées avec EMF Visual	93
Figure 8.7 : Nuage de corrélation entre mesures et simulation.....	94
Figure 8.8 : Variogramme omnidirectionnel des résidus.....	95
Figure 8.9 : Carte du variogramme	95
Figure 8.10 : Variogramme des résidus	96
Figure 8.11 : Cartes des variogrammes des simulations et des mesures	96
Figure 8.12 : Variogrammes expérimentaux des simulations et des mesures	97
Figure 8.13 : Résultats de validations croisées :.....	97
Figure 8.14 : Carte de krigeage d'exposition de GSM 900.....	98
Figure 8.15 : Carte de krigeage d'exposition de GSM 900 avec modèle anisotrope	99
Figure 8.16 : Résultats de la validation croisée	100
Figure 9.1 : Plan de deux quartiers	102
Figure 9.2 : Histogrammes de données.....	103
Figure 9.3 : Variogramme de données de densité de la puissance.....	104
Figure 9.4 : Variogramme de données champ électrique.	105
Figure 9.5 : Champ radioélectrique calculé à partir de la densité de puissance estimée (V/m).....	105
Figure 9.6 : Résultat du krigeage sur le champ radioélectrique.....	106
Figure 9.7 : Comparaison entre champ estimé par krigeage ordinaire et le champ calculé à l'aide de densité de la puissance estimée.....	106
Figure 9.8 : Plan quartier Latin de Paris (1+2)	107
Figure 9.9 : Histogramme de données total GSM 900MHz (en W/m ²).....	108
Figure 9.10 : Variogramme de données de densité de la puissance GSM 900MHz....	108
Figure 9.11 : Résultat du krigeage ordinaire sur les données de deux quartiers.....	109
Figure 9.12 : Résultats de validation croisée du krigeage ordinaire	110
Figure 9.13 : A gauche le quartier de Boulevard Saint Germain.....	112
Figure 9.14 : Cartes des endroits de prélèvement des données de GSM 900MHz.....	112
Figure 9.15 : Histogrammes de données GSM 900MHz	113
Figure 9.16 : Variogrammes de données GSM 900 MHz, pour les deux quartiers, ajustés avec de modèle de Cauchy	113
Figure 9.17 : Résultats du krigeage ordinaire pour la fréquence 900MHz (V/m).....	114
Figure 9.18 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers	115
Figure 9.19 : Histogrammes de données DCS (1800MHz).....	116
Figure 9.20 : Variogrammes de données DCS pour les deux quartiers ajustés avec une structure de Cauchy et un effet de pépite.....	117
Figure 9.21 : Résultats du krigeage ordinaire pour la fréquence GSM 1800MHz	118
Figure 9.22 : Comparaison entres les mesures et l'estimation	118
Figure 9.23 : Histogrammes des erreurs standardisées.....	119
Figure 9.24 : Histogrammes de données FM.....	120
Figure 9.25 : Variogrammes de données FM.....	120
Figure 9.26 : Résultats du krigeage ordinaire pour les données FM	121
Figure 10.1 : Anamorphoses : ponctuelle, blocs et cellules.....	124
Figure 10.2 : Histogrammes des blocs et des cellules	125
Figure 10.3 : Résultat du krigeage avec dérive externe sur des cellules.....	126
Figure 10.4 : Probabilité de dépassement de 0.1 W/m ²	126
Figure 10.5 : Deux simulations conditionnelles de densité de la puissance sur des cellules 35x35 m ²	127
Figure 10.6 : Carte de probabilité de dépassement de seuil obtenu par simulations conditionnelles.	128
Figure 10.7 : Comparaison entre les deux méthodes	129

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Niveaux de référence aux champs radiofréquences pour le public.	29
Tableau 2.2 : Niveaux de référence a pour le public (GSM, UMTS).....	30
Tableau 2.3 : Niveaux de référence aux champs radiofréquences pour le professionnel.	31
Tableau 7.1 : Paramètres des modèles d'ajustements avec une puissance $p = 2$	74
Tableau 7.2 : Paramètres des modèles en espace libre, avec $p = 2$	78
Tableau 7.3 : Comparaison des résultats statistiques de la validation croisée pour les deux modèles de variogrammes.	81
Tableau 7.4 : Comparaison des résultats statistiques de la validation croisée pour les deux modèles de variogrammes.	82
Tableau 7.5 : Paramètres des modèles en présence de réflecteurs.....	85
Tableau 7.6 : Statistiques de validation croisée en présence des réflecteurs.	87
Tableau 8.1 : Validation croisée (220 mesures)	97
Tableau 8.2 : Comparaison krigeage ordinaire et avec dérive externe	100
Tableau 8.3 : Résultats validation croisée par taille d'échantillon	100
Tableau 9.1 : Statistiques élémentaires pour le deux campagnes de données	103
Tableau 9.2 : Comparaison entres les trois modèles de 900MHz.....	109
Tableau 9.3 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers.....	111
Tableau 9.4 : Paramètres des modèles	114
Tableau 9.5 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers.....	115
Tableau 9.6 : Paramètres des modèles de variogrammes pour 1800 MHz.....	117
Tableau 9.7 : Résultat de validation croisée pour DCS.	119
Tableau 9.8 : Résultat de validation croisée pour les données FM.....	121

Introduction

Les systèmes de communications sans fil ont connu à l'échelle mondiale des progrès importants ces dernières années. Ceci contribue à l'expansion dans notre société du nombre de systèmes basés sur les ondes électromagnétiques (téléphone portable, station de base, équipement médical, écrans d'ordinateurs etc.).

Cette expansion se traduit par le fait que nous sommes aujourd'hui très souvent à proximité d'un émetteur radio. Pour protéger les personnes, des limites de puissance absorbée par les tissus (par le corps entier et localement par 10g de tissus) ont été établies par la commission de protection contre les rayonnements non ionisant (ICNIRP) [23], ces limites étant exprimées en watt/kilogrammes. Etant donné la difficulté à évaluer in situ cette puissance absorbée des limites dérivées ont été établie par l'ICNIRP. Ce sont les niveaux de références exprimés en Watt par mètre carré ou en Volt par mètre (ou encore en Ampère par mètre). La conformité à ces niveaux de référence vaut conformité aux normes de base [23]. En Europe les niveaux de protection recommandés par l'ICNIRP ont été repris par une recommandation de la commission datée du 12 juillet 1999.

Dans le monde, et en particulier en Europe, de nombreuses études [55] ont été menées pour évaluer l'exposition en un point donné et la conformité aux niveaux de référence. Des organismes internationaux tels que CENELEC, CEI, CEPT ou IEEE ont développé des méthodes basées sur la mesure de champ électrique [55], [10], [11].

En dépit de la faible exposition radioélectrique induite par les émetteurs de radiotéléphonie [2], le public demande des informations sur le niveau d'exposition et pas simplement sur la conformité aux limites de l'ICNIRP. Pour répondre à cette demande, des outils de mesure (e.g. dosimètre individuel) et de simulations (e.g. logiciel tel qu'EMF Visual) ont été développés. Des sites d'information tels que cartoradio en France (www.cartoradio.fr) ou sitefinder au Royaume Uni (www.sitefinder.radio.gov.uk) ont également été mis en place.

Introduction

Ces outils ont cependant des limites: pour les simulations les données d'entrée des simulations sont variables ou connues avec une précision limitée. De plus, le paramétrage des antennes (eg orientation, puissance émise) est souvent très difficile à obtenir. Dans ce cadre les simulations ne sont pas toujours possibles, ce qui nécessite une réalisation de mesures sur le terrain.

Les mesures connaissent également des limites, même si les moyens actuels de mesure ont été fortement améliorés. Des protocoles précis [9] associés à des moyens de mesure tel que l'analyseur de spectre ont été développés, ces moyens impliquant des moyens de mesure assez lourde. Des outils plus légers ont également été développés pour permettre une évaluation d'exposition "in situ" par fréquence. Mais dans tous les cas les mesures sont réalisées en des points ou sur des trajets déterminés alors que la demande est de connaître partout le niveau d'exposition et la probabilité de dépasser un seuil donné.

Dans cette thèse, l'objectif recherché est d'obtenir une cartographie d'exposition et la probabilité de dépassement de seuil. Ce type de cartes pouvant, par exemple, être utilisé comme outil d'aide à la décision et d'information sur l'exposition radioélectrique.

Dans ce contexte, le cadre probabiliste de la géostatistique offre des techniques qui ont été utilisées pour traiter des problèmes similaires, comme l'évaluation de la qualité de l'air [41]. En effet la méthode du krigeage a été développée pour l'estimation spatiale et pour cartographier les variables régionalisés, par exemple, l'exposition radioélectrique, et pour quantifier les erreurs d'estimation. Une autre catégorie des méthodes géostatistiques dites « non linéaires », telle que le conditionnement uniforme et les simulations conditionnelles, ont été développées non pas dans le but d'estimer une valeur vraie inconnue, mais afin de calculer la probabilité avec laquelle cette valeur inconnue est supérieure ou inférieure à un seuil déterminé. Elles ne fournissent plus une carte d'estimation et sa carte de variance associée, mais une carte de probabilité du dépassement de seuil [36].

Dans la première partie, nous présenterons les cadres théoriques de l'électromagnétisme et de la géostatistique linéaire. Nous détaillerons, dans les trois premiers chapitres, les cadres réglementaires d'exposition radioélectrique et les équations de propagation des ondes électromagnétiques. Des systèmes de mesures sont développés dans le quatrième chapitre. Dans les deux derniers chapitres de cette partie, nous présenterons une revue des méthodes d'interpolation spatiale et les détails mathématiques de la méthode du

Introduction

krigeage et des méthodes de géostatistique non linéaire comme le conditionnement uniforme et les simulations conditionnelles.

Dans la deuxième partie, nous montrerons des applications du krigeage et des méthodes de géostatistique non linéaire comme le conditionnement uniforme et la simulation conditionnelle sur des données électromagnétiques. La première application, réalisée sur des données numériques simulées avec EMF Visual, sera présentée dans le septième chapitre. Dans le chapitre 8, nous présenterons une deuxième application sur des mesures réelles réalisées dans le Quartier Latin de Paris. Le chapitre 9 est consacré à l'étude de la validité du modèle de variogramme. Des comparaisons sont faites entre les modèles dans deux quartiers voisins, d'une part, et deux quartiers éloignés, d'autre part. Une troisième application des méthodes géostatistiques non linéaires est réalisée dans le chapitre 10. Dans ce chapitre nous présenterons des applications des méthodes de géostatistique non linéaire pour l'évaluation des probabilités de dépassement de seuil. Enfin, nous terminerons par des conclusions et des perspectives.

Partie théorique

Dans cette partie, nous présentons le cadre théorique de l'électromagnétisme et la géostatistique. Dans le premier chapitre, nous exposons le concept de réseau cellulaire et les composants techniques essentiels pour son fonctionnement. Dans le chapitre 2, nous exposons le cadre réglementaire d'exposition radioélectrique en Europe et en particulier en France. Ensuite, au chapitre 3, nous détaillons les équations de propagation des ondes radioélectriques. Après avoir présenté les équations de Maxwell, nous décrivons la théorie de rayonnement des antennes. Dans le chapitre 4, nous présentons les outils des simulations électromagnétiques en particulier EMF Visual. Dans la seconde section nous décrivons les systèmes et les méthodes des mesures.

Le chapitre 5 présente une revue des principales méthodes d'interpolation spatiale. Deux catégories de méthodes sont présentées : des méthodes déterministes, et des méthodes statistiques comme le krigeage.

Dans le chapitre 6, nous détaillons la méthode du krigeage. Dans la première section de ce chapitre, nous présentons l'analyse variographique, fonction de semi-variogramme et sa modélisation. Dans la seconde section, nous exposons les détails mathématiques du krigeage, et enfin pour terminer par une présentation de deux types de krigeage; krigeage ordinaire et krigeage avec dérive externe.

Chapitre 1: Réseau cellulaire de téléphonie mobile

La révolution actuelle dans le domaine des télécommunications entraîne un essor considérable des réseaux mobiles. Dans ce chapitre, nous présentons les différents composants techniques nécessaires à l'exploitation d'un réseau cellulaire dans le but de comprendre les problèmes de transmission. Dans la première section nous définissons le réseau cellulaire, ensuite, nous présentons les constituants du réseau qui gèrent l'échange et la transmission des données en particulier la station de base et le contrôleur de station. Enfin, nous présentons les méthodes d'accès aux réseaux tels que le FDMA, TDMA et CDMA.

1) Qu'est ce qu'un réseau cellulaire?

Un réseau cellulaire est un réseau de télécommunications mobiles qui doit répondre aux contraintes imposées par la mobilité de l'abonné dans le réseau, par l'étendue du réseau et enfin par les ondes radios qui lui sont allouées.

L'onde radio dans le cas d'un réseau cellulaire est le lien entre l'abonné et l'infrastructure de l'opérateur. Comme dans tout réseau téléphonique l'échange de données doit se faire dans les deux sens. Ainsi contrairement à la radio FM classique, l'installation d'une antenne émettrice puissante par l'opérateur ne suffit pas à réaliser un réseau efficace [61]. L'abonné doit aussi émettre: Si on appelle P_e la puissance d'émission d'un émetteur en espace libre et P_r la puissance reçue par un récepteur à une distance r en champ lointain, les lois de la propagation des ondes nous disent que:

$$P_r = \frac{P_e}{r^2}$$

Cette contrainte impose donc que l'abonné et l'émetteur du réseau soient à proximité. De plus un opérateur n'a qu'une bande de fréquence réduite (bande passante) qui lui est

allouée par l'UIT (Union Internationale des Télécommunications). Si on part du principe qu'un téléphone égale une fréquence, l'ensemble des fréquences pour tout le réseau GSM français permettrait de satisfaire tout au plus un demi millier d'abonnés (capacité théorique du réseau) on en compte plus de treize millions. Il a donc fallu trouver des astuces pour ouvrir au plus grand nombre ces réseaux. Tout d'abord chaque terminal utilise lors d'une communication une fréquence variable qui lui est attribuée par l'opérateur en fonction des ressources disponibles [5]. Mais cette seule astuce ne suffirait pas à satisfaire tous les abonnés dans les zones les plus denses.

L'opérateur peut réutiliser une fréquence dans plusieurs endroits géographiques dans la mesure où il n'y a pas de risque d'interférences. Chaque zone couverte par un émetteur est appelée cellule. Leur taille est variable de 200 mètres à 20 kilomètres pour les plus grandes. Plus la taille d'une cellule est petite, plus la quantité d'appels passés sur le réseau pour une surface donnée est grande. On modélise les cellules par des hexagones, ce qui permet de bien visualiser les contacts avec les cellules voisines et donc de limiter les risques d'interférences.

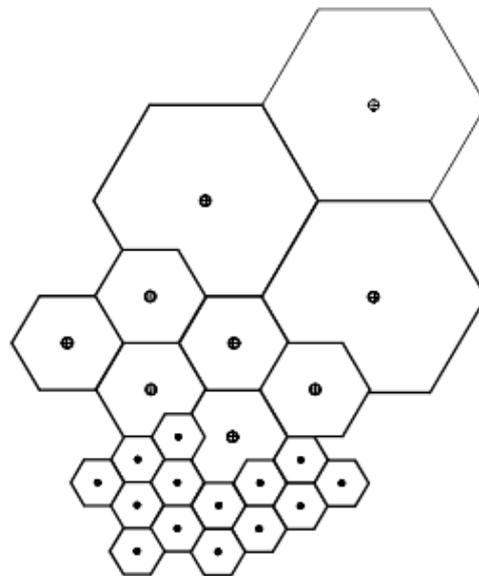


Figure 1.1 : Exemples de cellules

La présence d'un grand nombre de cellules liées à la mobilité de l'utilisateur implique une des fonctionnalités les plus révolutionnaires du GSM: le "handover": c'est à dire la capacité pour un terminal de changer de cellule et donc de relais de manière tout à fait transparente (sans coupure de la communication).

Un réseau de radiotéléphonie peut se découper en trois sous-ensembles:

- Le sous-système radio (BSS) qui assure les transmissions et gère la ressource radio,
- Le sous-système réseau (NSS) qui comprend l'ensemble des fonctions nécessaires à l'établissement des appels et à la mobilité,
- Le sous-système d'exploitation (OMC) et de maintenance qui permet à l'opérateur d'administrer son réseau.

2) Sous-système radio (BSS)

Le sous-système radio est l'ensemble des constituants du réseau qui gère l'échange et la transmission des données par la voie hertzienne [5]. Le sous-système radio est principalement constitué de deux éléments: la station de base et le contrôleur de station.

2.1) Station de base (BTS)

La BTS est un ensemble d'émetteurs-récepteurs. Elle gère les problèmes liés à la transmission radio (modulation, démodulation, égalisation, codage correcteur d'erreur...). Le placement et le type des BTS déterminent la forme des cellules. Elle réalise aussi des mesures radio pour vérifier qu'une communication en cours se déroule correctement (évaluation de la distance et de la puissance du signal émis par le terminal de l'abonné): Ces mesures sont directement transmises au contrôleur de station de base (BSC).

La répartition géographique et le type de BTS utilisées jouent un rôle primordial pour évaluer la qualité d'un réseau [61]. La capacité maximale d'une BTS est de 16 porteuses, c'est à dire qu'elle peut supporter au plus une centaine de communications simultanées. Une configuration en zone urbaine est constituée d'une BTS à 4 porteuses pouvant écouler environ 28 communications. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la bande passante allouée à un opérateur est limitée. C'est pourquoi il doit réduire au minimum la puissance de ses BTS en ville de manière à ce qu'elles couvrent une zone la plus restreinte possible. De plus la croissance des réseaux en termes d'abonnés impose une continuelle remise à niveau des BTS. La plupart du temps, les

opérateurs choisissent d'augmenter la densité des BTS en réduisant leur portée: ce choix impose le redéploiement du réseau déjà existant.

Il existe plusieurs types d'antennes de station de base et le choix de celles-ci dépend de l'environnement à couvrir. Ces stations sont conçues par différents constructeurs qui respectent strictement la norme GSM de manière à ce que le matériel de différents constructeurs puisse être compatible. Les BTS sont de puissance variable de manière à éviter les interférences entre deux cellules.

- Les plus petites, c'est-à-dire les stations picocellulaires sont installées à l'intérieur de bâtiments comme des bureaux. Elles sont généralement placées sur les plafonds et les murs. Leur rayon d'action (leur portée) est inférieur à 100 m.
- Les stations microcellulaires ont une puissance un peu plus élevée et sont utilisées pour couvrir des zones peu étendues mais où la densité des utilisateurs est forte (gares ou centres commerciaux par exemple). Elles sont installées sur les façades et leur rayon d'action est inférieur à 1 000 m.
- Les plus courantes sont les stations macrocellulaires. Physiquement, elles sont constituées d'une antenne et de matériel radio contenant le dispositif électronique. Ces antennes sont de différents types (antennes perches, panneaux...) selon la couverture voulue dans la cellule. Elles sont reliées par des câbles de liaison au matériel radio composé, entre autres, d'émetteurs-récepteurs, et contenues dans une « armoire » placée à proximité de l'antenne.

La plupart des antennes disposées dans le réseau sont des antennes directionnelles se présentant sous forme de panneaux, ce qui a donné le nom « antenne panneau ». En général, elles sont installées à l'extérieur, sur des mâts, et utilisées pour couvrir les zones urbaines et rurales. Cette catégorie d'antennes directionnelles présente un gain pouvant aller jusqu'à 18 dB pour une hauteur d'environ 2.5 m à 900 MHz. Plus l'antenne est haute, plus le gain est grand.

2.2) Les amplificateurs de signal

Ce ne sont pas des BTS proprement dites mais ils permettent de couvrir une autre cellule comme le ferait une véritable BTS. Les amplificateurs de signal captent le signal émis par les BTS, l'amplifient et le réémettent d'un autre site. Ils permettent de couvrir une cellule à moindre coût. De plus, ces amplificateurs ne nécessitent aucune

connexion vers les BSC, ils peuvent donc être placés sans contraintes physiques (sommet isolé de tous réseaux électriques et télécoms). Idéals pour couvrir les zones à faible densité ou à relief difficile, ils sont néanmoins très gourmands en ressource réseau, car la BTS mère doit gérer tout le trafic des réémetteurs.

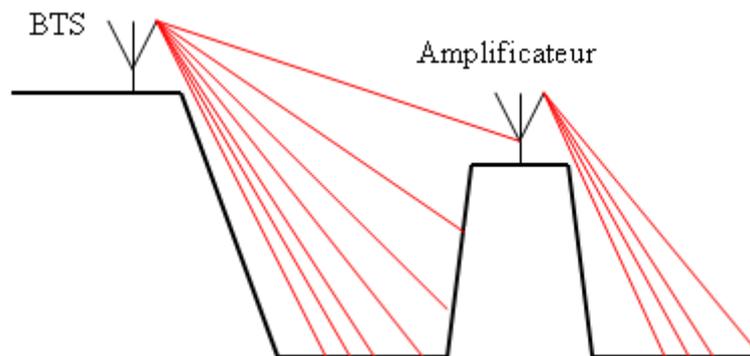


Figure 1.2 : Schéma BTS et Amplificateur

2.3) Contrôleur de base (BSC)

Le contrôleur de base (BSC) est l'organe intelligent du sous système radio. Il a pour fonction de gérer la ressource radio. Il commande l'allocation des canaux, utilise les mesures effectuées par la BTS pour contrôler les puissances d'émission du mobile: cette dernière est fonction de la distance mobile émetteur de telle manière que la liaison soit toujours de bonne qualité. En ville, si un portable émet à pleine puissance, il perturbe toutes les cellules aux alentours [30]. La MSC par le biais de la BTS envoie l'ordre de baisser ou d'augmenter la puissance d'émission.

Il gère et prend la décision de l'exécution du handover. De plus, c'est un commutateur qui réalise une concentration vers le MSC.

3) Transmission sur l'interface radio

L'interface radio est une des parties les plus sophistiquées du système; nous allons présenter les caractéristiques de base de cette interface (méthode d'accès et Canal de signalisation et canaux de trafic).

3.1) Les méthodes d'accès aux réseaux

Dans les réseaux de mobiles, la transmission radio passe par l'interface radio, que se partagent les utilisateurs d'une même cellule. Plusieurs méthodes permettent aux mobiles d'accéder à la ressource radio. Ces méthodes ont toutes pour principe de diviser la bande de fréquences, généralement très limitée, en plusieurs canaux physiques assurant la communication tout en respectant les contraintes permettant d'éviter les interférences [61]. Les trois principales méthodes d'accès utilisées par les réseaux de mobiles sont FDMA (Frequency Division Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access) et CDMA (Code Division Multiple Access) [5].

3.1.1) Le FDMA

La méthode d'accès FDMA, ou accès multiple par division de fréquences, repose sur un multiplexage en fréquences. Le multiplexage fréquentiel divise la bande de fréquences en plusieurs sous-bandes. Chacune est placée sur une fréquence dite porteuse, qui est la fréquence spécifique du canal. Chaque porteuse ne peut transporter que le signal d'un seul utilisateur. Cette méthode nécessite une séparation entre les porteuses pour éviter les interférences.

La méthode FDMA est essentiellement utilisée dans les réseaux analogiques tels que l'AMPS (Advanced Mobile Phone System), qui comportent 823 porteuses, avec une séparation de 30 kHz entre les porteuses adjacentes [61].

3.1.2) Le TDMA

La méthode TDMA, ou accès multiple par division temporelle, offre la totalité de la bande de fréquences à chaque utilisateur pendant une fraction de temps donnée, dénommée slot (intervalle). L'émetteur de la station mobile stocke les informations avant de les transmettre sur le slot, autrement dit dans la fenêtre temporelle qui lui a été consacrée. Les différents slots sont regroupés en une trame, le système offrant ainsi plusieurs voies de communication aux différents utilisateurs. La succession des slots dans les trames forme le canal physique de l'utilisateur. Le récepteur enregistre les informations à l'arrivée de chaque slot et reconstitue le signal à la vitesse du support de transmission.

Le TDMA s'applique principalement à la transmission de signaux numériques, contrairement au FDMA, conçu pour une transmission analogique.

3.1.3) Le CDMA

Troisième méthode, le CDMA, ou accès multiple par division de codes, autorise l'allocation de la totalité de la bande de fréquences, de manière simultanée, à tous les utilisateurs d'une même cellule. Pour ce faire, un code binaire spécifique est accordé à chaque utilisateur. L'utilisateur se sert de son code pour transmettre l'information qu'il désire communiquer en format binaire d'une manière orthogonale, c'est-à-dire sans interférence entre les signaux, aux autres communications. En CDMA, chaque utilisateur dispose de toute la largeur de la bande passante. L'attribution de différents codes permet une réutilisation de la même fréquence dans les cellules adjacentes.

Cela offre un avantage considérable à cette méthode par rapport aux deux autres, le TDMA et le FDMA. Toutefois, les codes étant seulement quasi orthogonaux à la réception, un problème d'auto-interférence entre en jeu, qui s'intensifie au fur et à mesure que le nombre de communications simultanées augmente. Excédant le nombre maximal de codes attribués, la surcharge de la cellule affecte en outre tous les autres utilisateurs par l'interférence provoquée sur leurs canaux, alors que, en comparaison, un seul utilisateur est brouillé en TDMA.

3.2) Canal de signalisation et canaux de trafic

En général, une station de base émet sur plusieurs fréquences fixes, chaque fréquence constitue un canal et chaque canal organise l'information qu'il doit transmettre en huit intervalles de temps TDMA. Dans chacun de ces intervalles de temps, des informations indépendantes les unes des autres peuvent être transmises. Sur une fréquence d'émission, il est donc possible de transmettre simultanément un maximum de huit conversations (ou autres données).

Pour chaque cellule de la station de base, il existe au moins un canal émettant à puissance constante. Il s'agit du canal appelé BCCH (canal de signalisation, Broadcast Control Channel). Celui-ci sert, entre autres, à indiquer au téléphone mobile les stations de base de la région qui sont actives. Il sert aussi à créer la liaison. Le niveau de réception des diverses fréquences BCCH permet au téléphone mobile de trouver la cellule la plus favorable à un endroit donné. Les signaux de commande n'utilisent toutefois pas les huit intervalles si bien que la fréquence BCCH peut également être utilisée pour des communications vocales. Si les intervalles de temps de la fréquence BCCH ne sont pas tous utilisés pour des signaux de commande ou des communications

Chapitre 1: Réseau cellulaire de téléphonie mobile

vocales, les intervalles libres sont comblés avec des signaux neutres. Ainsi, le canal de signalisation émet à puissance constante.

Il existe normalement, en plus du BCCH, une à plusieurs autres fréquences par lesquelles on transmet principalement des communications vocales. Un tel canal, appelé TCH (canal de trafic, traffic channel), n'émet de puissance que lorsque des communications vocales doivent être transmises. La puissance d'émission des TCH n'est donc pas constante, mais elle varie rapidement et parallèlement à la charge du réseau.

Chapitre 2 : Les normes d'exposition aux champs électromagnétiques

L'objectif des recommandations est de garantir que les expositions radioélectriques restent très en dessous des limites pour lesquelles les études biologiques démontrent un effet possible. Ces normes fixent des limites en prenant en compte des marges de sécurité entre ces limites et les seuils à partir desquels des effets sont démontrés. Dans ce chapitre, nous présenterons deux catégories de normes : les normes grand public et le milieu professionnel.

1) Introduction

Dans les années 1980, la commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants l'ICNIRP [23], a établi des limites d'exposition des ondes radioélectriques, les premières limites d'exposition ont été publiées en 1988 et ont été confirmées en 1998 [29].

En Europe, le conseil de l'union européenne a adopté, en 1999, une recommandation concernant les limites d'exposition radioélectrique du public en se basant sur les restrictions de l'ICNIRP [24]. Elle recommande aux Etats membres d'adopter une réglementation et de veiller au respect de ces restrictions. Des organismes comme le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) en Europe [55] et l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [28] sur l'échelle internationale complètent ces travaux et établissent des normes visant à définir les méthodes de mesures et les moyens permettant de vérifier le respect de ces limites.

2) Grandeurs physiques utilisées

- **Champ électrique** est une grandeur vectorielle **E** à l'origine des forces électriques (force de Coulomb). Elle est exprimée en volts par mètres (V/m).
- **Champ magnétique** est une grandeur vectorielle **H** qui définit un champ magnétique en tout point de l'espace. Elle est exprimée en ampères par mètres (A/m).
- **La densité de puissance S** est la grandeur appropriée utilisée pour des hyperfréquences lorsque la profondeur de pénétration dans le corps est faible. Il s'agit du quotient de la puissance rayonnée incidente perpendiculaire à une surface par l'aire de cette surface ; elle est exprimée en watt par mètres carrés (W/m²).

3) Le cadre réglementaire communautaire

La recommandation du conseil de l'union européenne [24] relative à l'exposition du public aux champs radioélectriques de 0 Hz à 300GHz définit les restrictions de base et les niveaux de référence qui assurent un niveau élevé de protection de la santé contre l'exposition aux champs électromagnétiques. Elle fixe également les critères qui doivent être appliqués en cas d'exposition à des sources de fréquences différentes. Nous citons les recommandations suivantes [56] :

- des mesures concernant les champs électromagnétiques devraient offrir à tous les citoyens de la Communauté un niveau élevé de protection ; les dispositions prises par les États membres dans ce domaine devraient être fondées sur un cadre convenu d'un commun accord de manière à contribuer à garantir la cohérence de la protection dans l'ensemble de la Communauté.
- les mesures visant à limiter l'exposition du public aux champs électromagnétiques doivent être mises en balance avec les avantages en matière de santé, de sûreté et de sécurité qu'apportent les dispositifs émettant des champs électromagnétiques en termes de qualité de vie dans des domaines tels que les télécommunications, l'énergie et la sécurité publique.
- pour renforcer la prise de conscience des risques et des mesures de protection contre les champs électromagnétiques, les États membres devraient promouvoir la diffusion d'informations et de règles d'utilisation dans ce domaine, en particulier pour ce qui concerne la conception, l'installation et l'utilisation

Chapitre 2 : Les normes d'exposition aux champs électromagnétiques

d'équipements, de façon à obtenir que les niveaux d'exposition ne dépassent pas les restrictions recommandées ;

- il conviendrait de veiller au caractère approprié de la communication et à la bonne compréhension concernant les risques liés aux champs électromagnétiques, en tenant compte de la façon dont ces risques sont perçus par le public ;
- les États membres devraient prendre note de l'évolution des connaissances scientifiques et de la technologie en matière de protection contre les rayonnements non ionisants, en tenant compte de l'élément de précaution, et ils devraient prévoir, à intervalles réguliers, des examens et des révisions dans des domaines comportant une évaluation à la lumière des orientations fournies par les organisations internationales compétentes, telles que l'ICNIRP.

Pour les fréquences utilisées par les équipements de téléphonie mobile, les restrictions de base suivantes doivent être respectées [23]: Débit d'absorption spécifique (DAS) corps entier = 0,08 W/kg, DAS local = 2 W/kg sur 10 g de tissus. Ces valeurs de DAS s'appliquent directement aux téléphones mobiles. En ce qui concerne les stations de base, le DAS n'est pas une valeur facilement mesurable [23]. Dans la plupart des cas, il est donc nécessaire de se conformer aux niveaux de référence, évalués sans personne exposée et qui garantissent le respect des restrictions de base. Les niveaux de référence sont exprimés en termes de champ électrique, champ magnétique et densité de puissance. Les valeurs limites sont rappelées dans le tableau ci-dessous [23].

Fréquence (f)	Champ E (V/m)	Champ H (A/m)	Densité de puissance (W/m ²)
1-10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f^{1/2}$	-
10-400 MHz	28	0.073	2
400-2000MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$f/200$
2 – 300 GHz	61	0.16	10

Tableau 2.1 : Niveaux de référence des champs radiofréquences pour le public.

Pour les stations de base GSM et UMTS :

Système mobile	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (A/m)	Densité de puissance (W/m ²)
GSM 900	41	0.11	4,6
GSM 1800	58	0.15	9
UMTS	61	0.16	10

Tableau 2.2 : Niveaux de référence pour le public (GSM, UMTS).

L'évaluation de la conformité des stations de base aux limites, nécessite de procéder à des vérifications de la conformité aux exigences essentielles. Les méthodes d'estimation du champ électrique doivent être adaptées à un environnement parfois complexe et à des niveaux qui peuvent être faibles et qui varient beaucoup dans l'espace et dans le temps. Les problèmes à résoudre sont relatifs aux mesures (niveaux faibles, variations dues au trafic) et à la simulation (environnement complexe, caractéristiques des sources difficiles à obtenir).

4) L'exposition des personnes en milieu professionnel

4.1) Le contexte européen

Les normes définies par l'ICNIRP [23] comportent deux catégories : le grand public, d'une part, et le milieu professionnel, d'autre part. D'une manière générale, les limites d'exposition du public sont 5 fois plus strictes qu'en milieu professionnel. La recommandation européenne [56], basée sur les recommandations de l'ICNIRP, concerne exclusivement l'exposition du public. Pour éviter les conflits avec cette recommandation, le CENELEC a abrogé en 1999 les prénormes ENV50166-1 et ENV50166-2 de 1995 qui proposaient des valeurs limites d'exposition du public et des travailleurs. Il n'y a donc pas de réglementation européenne spécifique au milieu professionnel. En septembre 2002 une nouvelle directive électromagnétique au travail a été proposée, qui se basent sur les recommandations de l'ICNIRP. Dans ce cadre on distingue deux catégories de travailleurs concernés par les valeurs limites en milieu professionnel. D'une part, les personnes dont le poste de travail les met régulièrement en présence de sources émettant des ondes électromagnétiques de forte puissance doivent faire l'objet d'une formation adaptée à leurs conditions de travail. D'autre part, les personnes pouvant être exposées de façon occasionnelle, comme par exemple un

employé du bâtiment qui intervient à proximité d'un émetteur radio, doit faire l'objet d'une information ciblée contenant notamment les instructions précises à suivre.

4.2) Le contexte Français

En France, l'INRS a publié plusieurs documents d'information concernant l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques, [47] [48]. La fédération des industries électriques, électroniques et de communication (FIEEC), qui a bénéficié de la contribution des experts des opérateurs mobiles, a abouti à recommandation concernant l'exposition électromagnétique en milieu professionnel qui a ensuite été approuvée par le comité de direction de l'UTE le 16 septembre 2002 [48]. Ces limites doivent être adaptées au niveau d'information des personnes. Ainsi, un employé qui utilise un téléphone mobile dans le cadre de son travail relève des limites d'exposition du public définies parallèlement par l'ICNIRP et la recommandation européenne. Par contre, un employé du bâtiment qui intervient au voisinage d'une station de base peut relever des valeurs limites en milieu professionnel s'il a reçu des informations adaptées à son poste de travail et des instructions concernant les moyens de prévention et de protection. A fortiori, des employés dont le poste de travail comprend une ou plusieurs sources de champs électromagnétiques de forte puissance doit bénéficier d'une formation adaptée à son poste de travail. Les zones d'accès au voisinage des sources de champs électromagnétiques doivent être balisées conformément à ces distinctions.

Fréquence (f)	Champ E (V/m)	Champ H (A/m)	Densité de puissance (W/m ²)
1-10 MHz	$610 / f$	$1.6 / f$	-
10-400 MHz	61	0.16	10
400-2000MHz	$3 f^{1/2}$	$0.008 f^{1/2}$	$f/40$
2 – 300 GHz	137	0.36	50

Tableau 2.3 : Niveaux de référence des champs radiofréquences pour le professionnel.

5) Conclusion

En France, le problème d'exposition électromagnétique se pose de plus en plus. Le public pose des questions sur le niveau d'exposition radioélectrique et sa conformité aux normes internationales.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre réglementaire européen et en particulier en France. Les normes exposées dans ce chapitre sont les normes définies par l'ICNIRP et publiées par la commission de juillet 1999. Deux catégories de normes sont présentées : des normes publiques et des normes professionnelles. D'une manière générale, les limites d'exposition du public sont cinq fois inférieures (plus strictes) qu'en milieu professionnel.

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons les équations physiques du rayonnement électromagnétique et le phénomène de propagation dans l'espace des ondes radioélectriques.

Chapitre 3 : Propagation des ondes radioélectriques

Dans le présent chapitre, nous exposons les équations de propagation des ondes et les calculs des grandeurs physiques utilisées dans la normalisation des expositions radioélectriques. Dans la première section, nous développons les équations de Maxwell et la propagation des ondes planes. Dans la seconde section, nous présentons les éléments théoriques du rayonnement des antennes et en particulier le cas d'un dipôle élémentaire, en se concentrant sur la zone de propagation de champ lointain.

1) Les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell permettent de décrire tous les phénomènes électromagnétiques classiques. Ces équations relient les vecteurs du champ électromagnétiques :

- \vec{E} : Champ électrique (exprimée en Volt/m)
- \vec{D} : L'induction électrique (exprimé en Coulomb/m³)
- \vec{H} : Champ magnétique (exprimée en Ampère/m)
- \vec{B} : L'induction magnétique (exprimé en Weber/m² ou Tesla)

Il existe deux représentations des équations de Maxwell, différentielle et intégrale [13]. Leurs expressions différentielles s'expriment dans le domaine temporel par :

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{J}(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (\text{Équation 3.1})$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0$$

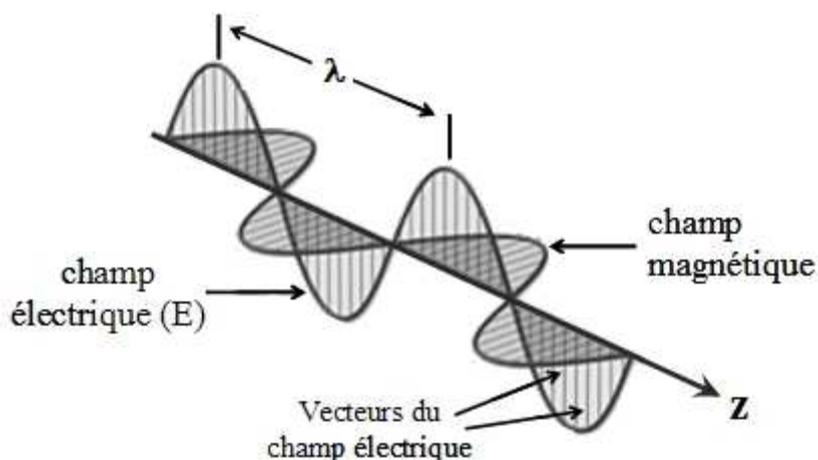


Figure 3.1 : Propagation d'une onde électromagnétique.

Et dans le domaine fréquentiel pour une dépendance temporelle en $e^{j\omega t}$ par :

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) = -j\omega \vec{B}(\vec{r}, \omega)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) = \vec{J}(\vec{r}, t) + j\omega \vec{D}(\vec{r}, \omega) \quad (\text{Équation 3.2})$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, \omega) = \rho(\vec{r}, \omega)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, \omega) = 0$$

Où :

\vec{r} : Le vecteur de position

t : Le temps

ω : La pulsation temporelle.

ρ : La densité de charge volumique (exprimée en *Coulomb/m³*)

\vec{J} : La densité de courant électrique (exprimée en *Ampère/m²*).

∇ est l'opérateur différentiel qui permet de représenter le gradient, le rotationnel et la divergence. $\nabla \times$ est l'opérateur rotationnel et $\nabla \cdot$ est l'opérateur de divergence. Leurs expressions dépendent du système de coordonnées utilisé pour représenter les vecteurs. Dans un milieu quelconque, les vecteurs du champ électrique et magnétique sont reliés à l'induction électrique et à l'induction magnétique à l'aide de la perméabilité μ et la permittivité ϵ .

$$\begin{aligned}\vec{D}(\vec{r}, \omega) &= \varepsilon(\vec{r}, \omega)\vec{E}(\vec{r}, \omega) \\ \vec{B}(\vec{r}, \omega) &= \mu(\vec{r}, \omega)\vec{H}(\vec{r}, \omega) \\ \vec{j}(\vec{r}, \omega) &= \sigma(\vec{r}, \omega)\vec{E}(\vec{r}, \omega)\end{aligned}\tag{Équation 3.3}$$

Où :

$\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2$: La permittivité (exprimée en *Farad/m*)

$\mu = \mu_1 - j\mu_2$: La perméabilité (exprimée en *Henry/m*)

$\sigma = \sigma_1 - j\sigma_2$: La conductivité (exprimée en *Siemens/m*).

Les propriétés réfractives du milieu sont définies par les parties réelles de la permittivité et de la perméabilité, alors que leurs parties imaginaires définissent les pertes. Ces pertes peuvent être de type diélectrique c'est-à-dire $\varepsilon_2 \neq 0$, de type magnétique $\mu_2 \neq 0$ ou de type conducteur $\sigma_2 \neq 0$.

1.1) Propagation dans le vide

Ce milieu est caractérisé par des valeurs de permittivité et perméabilité suivantes

$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Farad / m}$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry / m}$ et la conductivité est nulle.

La vitesse de lumière et l'impédance dans le vide s'expriment par

$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ et $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 377 \text{ ohm}$.

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E}\tag{Équation 3.4}$$

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H}$$

1.2) Propagation dans un milieu homogène isotrope

Il s'agit d'une idéalisation des milieux réels, avec les caractéristiques suivantes :

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E}\tag{Équation 3.5}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H}$$

La perméabilité du milieu parfait μ et sa permittivité ε , sont homogènes c'est-à-dire indépendants de \vec{r} , isotropes (μ et ε indépendants des directions de \vec{E} et \vec{H}), la réaction instantanée c'est-à-dire μ et ε sont indépendants de ω , et par l'absence de pertes.

1.3) Propagation dans un milieu avec perte

Dans cas, la conductivité varie en fonction du milieu (de 10^7 pour les métaux, à 10^{-2} pour un sol sec). Pour simplifier, on introduit ϵ_c la permittivité équivalente complexe, prenant en compte les pertes diélectriques et de conduction :

$$\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} = \epsilon_1 - j(\epsilon_2 + \frac{\sigma}{\omega}) \quad (\text{Équation 3.6})$$

Dans ces conditions, la deuxième équation de Maxwell devient :

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) &= \vec{J}(\vec{r}, \omega) + j\omega\vec{D} = \sigma\vec{E}(\vec{r}, \omega) + j\omega\epsilon\vec{E}(\vec{r}, \omega) \\ &= j\omega(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega})\vec{E}(\vec{r}, \omega) = j\omega\epsilon_c\vec{E}(\vec{r}, \omega) \end{aligned} \quad (\text{Équation 3.7})$$

2) Propagation d'onde plane

En combinant les équations de Maxwell en éliminant l'un de deux champs, et utilisant les propriétés du gradient, du rotationnel et de la divergence, on obtient l'équation d'onde.

Dans un milieu linéaire cette équation s'écrit :

$$\Delta\vec{E}(\vec{r}, \omega) + k^2\vec{E}(\vec{r}, \omega) = \vec{0} \quad (\text{Équation 3.8})$$

$$\Delta\vec{H}(\vec{r}, \omega) + k^2\vec{H}(\vec{r}, \omega) = \vec{0}$$

Où Δ est l'opérateur laplacien.

Selon le système de coordonnées utilisé, différentes formules sont à utiliser pour le laplacien. Le nombre d'onde k est défini par :

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon_c}$$

La solution élémentaire d'onde plane est largement utilisée dans le contexte de la propagation en espace libre. Physiquement, cette approximation est valable dans la zone de champ lointain [42].

Une onde plane est une onde dont les surfaces équi-phases forment des plans. La direction de propagation de l'onde en un point est définie par la direction perpendiculaire à la surface équi-phase autour de ce point. La direction de propagation d'une onde plane est donc identique en tout point. En pratique, on l'utilise lorsque l'hypothèse champ lointain est satisfaite.

Lorsque l'onde est plane, il est plus simple d'utiliser les coordonnées cartésiennes pour \vec{E} , ce qui permet de séparer les 3 composantes cartésiennes de \vec{E} et donc de résoudre les 3 équations correspondantes séparément en utilisant pour chaque composante :

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) E(x, y, z, t) + k^2 E(x, y, z, t) = 0 \quad (\text{Équation 3.9})$$

où $\frac{\partial}{\partial x}$ est l'opérateur de dérivation partielle par rapport à la variable x et E représente une des 3 composantes cartésiennes. Précisons que cette séparation n'est possible que pour les coordonnées cartésiennes mais pas pour les coordonnées sphériques ou cylindriques.

Une des solutions possibles, très utilisée, est l'onde monochromatique :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp(j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})) \quad (\text{Équation 3.10})$$

où \vec{E}_0 est un vecteur complexe constant, qui représente la polarisation et l'amplitude de l'onde plane. Le vecteur d'onde \vec{k} et le nombre d'onde k sont reliés par :

$$\vec{k} \cdot \vec{k} = k^2 \quad (\text{Équation 3.11})$$

3) Zones de propagation

Pour modéliser la propagation d'une onde, généralement, en s'éloignant de l'antenne, on distingue trois zones de propagation définies en fonction de la distance à l'antenne r (Figure 3.2), de la longueur d'onde d'émission λ et de la dimension D caractéristique de l'antenne :

- Pour $0 \leq r \leq \frac{D^2}{2\lambda}$, la zone de Rayleigh. Le champ émis est dans ce cas quasiment uniforme sur une zone de dimension D (pour une antenne GSM 900 MHz, $\frac{D^2}{2\lambda} = 1.5m$).

- Pour $\frac{D^2}{2\lambda} \leq r \leq \frac{2D^2}{\lambda}$, zone de Fresnel, dans laquelle l'état d'interférence disparaît progressivement.
- Pour $\frac{2D^2}{\lambda} \leq r$, zone de champ lointain, ou zone de Fraunhofer. A grande distance, toutes les sources secondaires semblent rayonner en phase.

Dans le cadre de notre étude, on s'intéresse seulement à la troisième zone: zone de champ lointain.

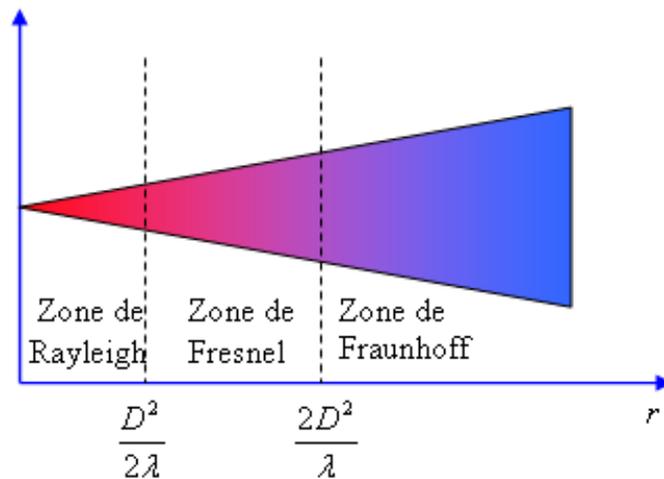


Figure 3.2 : Zones de propagation.

4) Antennes et rayonnement

Les antennes forment l'interface entre le champ vectoriel électromagnétique et le signal scalaire reçu (ou émis). Elles permettent de recevoir et de rayonner des signaux. Le rayonnement d'une antenne est classiquement caractérisé en champ lointain. Les antennes sont une composante indispensable à tout système de communications sans fil et leur caractérisation et leur modélisation sont très importantes.

4.1) Les dipôles

Les dipôles sont des exemples simples de source de rayonnement. Un dipôle électrique est constitué de deux charges ponctuelles $+q$ et $-q$, séparées d'une distance a . La charge q oscille avec le temps : $q = q_0 e^{j\omega t}$. Ils peuvent également être considérés comme un petit élément de courant \vec{J} .

Chapitre 3 : Propagation des ondes radioélectriques

Afin d'étudier le rayonnement dû à ce dipôle oscillant dans un milieu homogène, on munit l'espace d'un repère orthonormé $(Oxyz)$ tel que O soit au milieu des deux charges ponctuelles et que celles-ci soient situées sur l'axe (Oz) (Figure 3.3). Etant donné les symétries de ce problème, on se place en coordonnées sphériques. On repère donc le point P d'observation par ses coordonnées sphériques (r, θ, φ) dans le repère $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ et la direction d'observation (OP) par les "cosinus directeurs" (α, β, γ) du vecteur unitaire \vec{e}_r repérant le point P . On a en fait :

$$\begin{cases} \alpha = \sin \theta \cos \varphi \\ \beta = \sin \theta \sin \varphi \\ \gamma = \cos \theta \end{cases} \quad (\text{Équation 3.12})$$

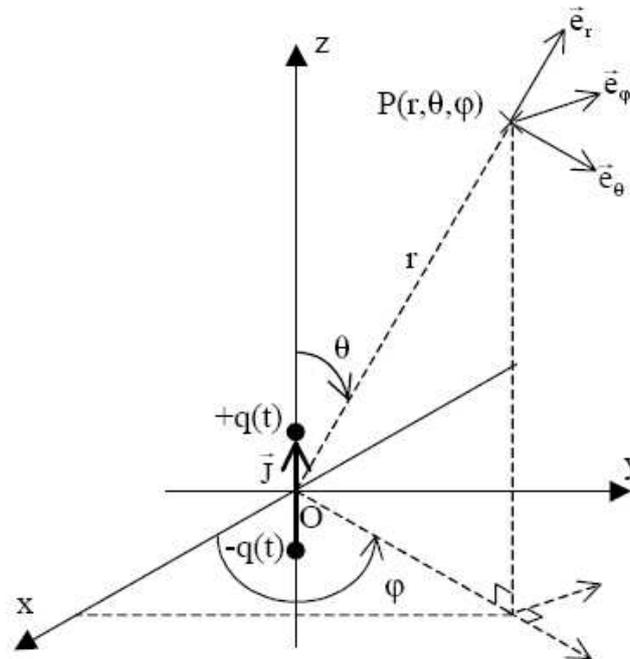


Figure 3.3 : Dipôle oscillant.

Pour des distances d'observation $r \gg a$, le calcul du champ rayonné (\vec{E}, \vec{H}) s'effectue à l'aide de la méthode des potentiels retardés. Pour cela, la densité volumique de courant \vec{J} liée aux variations temporelles de q est donnée par :

$$\vec{J} = J_0 \delta(x) \delta(y) \delta(z) \vec{e}_z \quad (\text{Équation 3.13})$$

où $J_0 = q_0 a \omega$. Le calcul du champ rayonné (\vec{E}, \vec{H}) est donc [42]:

$$\vec{E} = E_r \vec{e}_r + E_\theta \vec{e}_\theta \quad (\text{Équation 3.14})$$

$$\vec{H} = H_\varphi \vec{e}_\varphi$$

où :

$$\begin{aligned}
 E_r &= -\frac{j\omega\mu}{4\pi} \left(\frac{2j}{kr} + \frac{2}{(kr)^2} \right) J_0 \cos(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \\
 E_\theta &= -\frac{j\omega\mu}{4\pi} \left(-1 + \frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} \right) J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \\
 H_\varphi &= \frac{jk}{4\pi} \left(1 - \frac{j}{kr} \right) J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}
 \end{aligned}
 \tag{Équation 3.15}$$

Le champ électrique \vec{E} est donc un champ "méridien" (dans le plan vectoriel méridien $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$) et le champ magnétique \vec{H} un champ "azimutal" (suivant \vec{e}_φ).

Intéressons-nous à grande distance, soit pour $r \gg \lambda$, ou $kr \gg 1$, l'équation 3.15 se réduisent au premier ordre en $1/(kr)$ à :

$$\begin{aligned}
 E_r &\cong 0 \\
 E_\theta &= \frac{j\omega\mu}{4\pi} J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \\
 H_\varphi &= \frac{jk}{4\pi} J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r}
 \end{aligned}
 \tag{Équation 3.16}$$

L'amplitude complexe de \vec{E} et \vec{H} varie donc comme e^{-jkr}/r en fonction de la distance au dipôle. Les surfaces équiphasés sont des sphères, il s'agit donc d'une onde sphérique divergente (on aurait e^{jkr}/r pour une onde sphérique convergente). Cette variation en $1/r$ garantit la conservation de la puissance rayonnée dans des milieux sans pertes.

4.2) Puissance rayonnée

La densité de puissance rayonnée par unité de surface se déduit du vecteur de Poynting :

$$\begin{aligned}
 \vec{P}(\vec{r}) &= \frac{1}{2} \vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^*(\vec{r}) \\
 &= \frac{1}{2\eta} |\vec{E}(\vec{r})|^2 \vec{e}_r
 \end{aligned}
 \tag{Équation 3.17}$$

La densité de puissance est définie par la norme de ce vecteur :

$$w(\vec{r}) = \frac{\omega\mu k}{32\eta\pi^2} |J_0|^2 \frac{\sin^2(\theta)}{r^2}
 \tag{Équation 3.18}$$

4.3) Rayonnement d'antenne relais

On considère ici le réseau de la Figure 3.3, formé de N dipôles identiques disposés régulièrement le long d'un axe avec un espacement d .

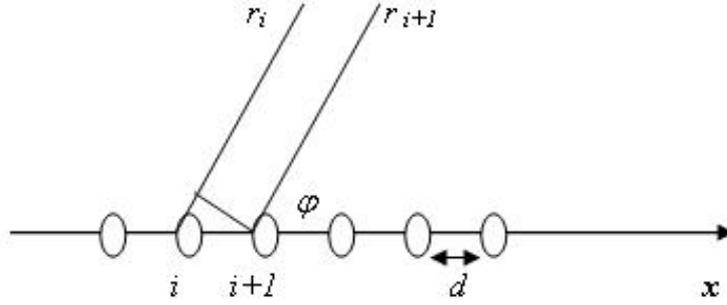


Figure 3.4 : Réseau des dipôles.

Dans le champ lointain d'un dipôle, le champ électrique est donné par l'équation 3.16 :

$$E_{\theta} = \frac{j\omega\mu}{4\pi} J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \quad (\text{Équation 3.19})$$

On constate par ailleurs que, à grande distance du réseau, la différence des distances à deux éléments adjacents est approximativement donnée par [13]:

$$|\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i| \cong d \cos(\varphi) \sin(\theta) \quad (\text{Équation 3.20})$$

Le champ produit par l'ensemble des dipôles est alors donné par :

$$\begin{aligned} E_{\theta} &= \sum_{i=1}^N \frac{j\omega\mu}{4\pi} J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \\ &\cong \frac{j\omega\mu}{4\pi} J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{i=1}^N e^{-jkd(i-1)\cos(\varphi)\sin(\theta)} \\ &= \frac{j\omega\mu}{4\pi} J_0 \sin(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\sin(kdN \sin(\theta) \cos(\varphi) / 2)}{\sin(kd \sin(\theta) \cos(\varphi) / 2)} e^{-jkd(N-1)\cos(\varphi)\sin(\theta) / 2} \end{aligned} \quad (\text{Équation 3.21})$$

5) Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons développé les équations de propagations des ondes radioélectriques. Les équations de Maxwell et leurs solutions en utilisant les ondes planes ont été exposées dans la première section de ce chapitre. Les zones de propagation et leurs caractéristiques physiques sont aussi présentées, l'accent ayant été mis sur la zone de champ lointain. Dans la seconde section, nous avons présenté les détails physiques de rayonnement des antennes, en particulier le cas du dipôle élémentaire comme un exemple des antennes isotropes.

Chapitre 4 : Simulation et mesures

Un logiciel de simulation électromagnétique est présenté dans ce chapitre avec la description des antennes de station de base. Dans un second temps, deux systèmes de mesure sont décrits : l'analyseur du spectre et le dosimètre personnel. Malgré sa portabilité et sa simplicité d'utilisation, le dosimètre personnel est moins précis par rapport à l'analyseur de spectre et le seuillage utilisé constitue un défaut quand le champ électrique est petit.

1) EMF Visual

EMF Visual est un logiciel de simulation permettant de simuler en 3D le niveau d'exposition de la personne aux champs électromagnétiques qui sont émis par des antennes. Cet outil de simulation nécessite quelques données d'entrée décrivant l'antenne et son environnement pour calculer les champs de propagation en volume de calcul déterminé. Les données nécessaires sont :

- la position cartésienne de l'antenne,
- le modèle synthétique d'antenne décrivant la cellule d'unité,
- le nombre de cellules,
- les inclinaisons électriques et mécaniques,
- l'azimut,
- le gain maximum,
- la puissance d'entrée,
- l'efficacité.

Chapitre 4 : Simulation et mesures

La Figure 4.1 montre un exemple dessiné par l'utilisateur parmi un ensemble d'objets décoratifs : bâtiments, arbres, voitures, être humain, routes...



Figure 4.1 : Caractéristiques visuelles de simulation.

La Figure 4.2 montre le champ électromagnétique obtenu en utilisant EMF Visual. Cette image illustre l'utilisation de ce simulateur pour modéliser les champs de propagation dans un secteur urbain enfermant des antennes et des bâtiments. La qualité de simulation de cet outil est prouvée en particulier dans un espace libre. Néanmoins, la simulation par cet outil est moins importante dans un milieu urbain réel, et ça s'explique par la complexité de la modélisation de la propagation dans ce milieu : les problèmes des réflexions et diffractions multiples sur les objets d'une part, et la modélisation de perméabilités μ et permittivités ϵ de ces objets, d'autre part.

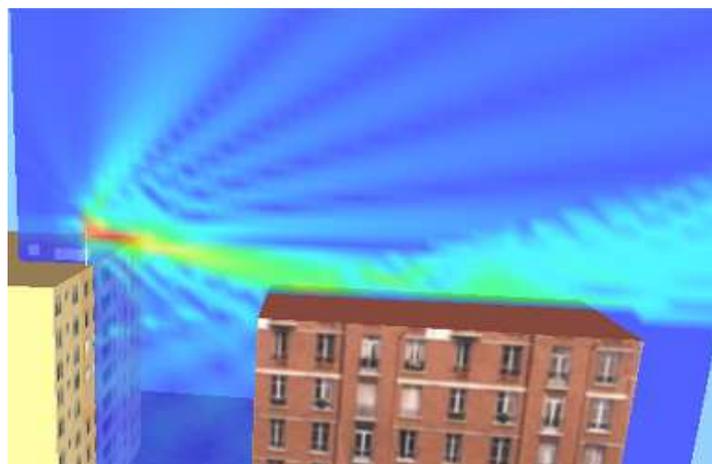


Figure 4.2 : Exemple de la simulation EMF Visual.

Considérons une antenne de station de base comportant une rangée de N éléments (Figure 4.3). Le Champ est alors exprimé comme suit [57]:

$$E(r, \theta, \varphi) = \sum_i^N \sqrt{30 P_e G_e(\theta, \varphi)} \frac{e^{jkr_i}}{r_i} \quad (\text{Équation 4.1})$$

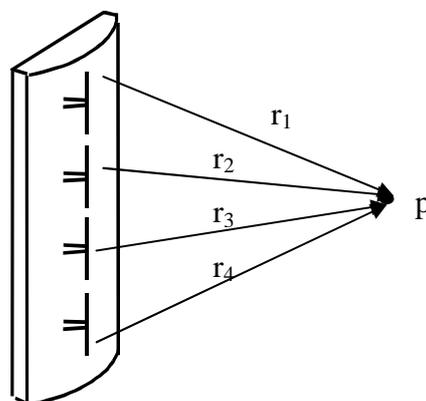


Figure 4.3: Technique de superposition

Sachant que la puissance d'entrée est uniformément distribuée sur les cellules de panneau, la puissance affectée à chaque cellule est alors donnée par :

$$P_{cell} = \frac{P_{in}}{N} \quad (\text{Équation 4.2})$$

L'expression donnée en (Équation 4.2) peut alors être écrite comme :

$$E(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_i^N \sqrt{30 P_{in} G_e(\theta, \varphi)} \frac{e^{jkr_i}}{r_i} \quad (\text{Équation 4.3})$$

2) Méthodes de mesure

Dans cette section, nous présenterons deux systèmes de mesures, le premier est l'analyseur de spectre, le second est un dosimètre individuel. Avec ce dernier on mesure l'intégralité du champ électrique en un point de l'espace dans une bande de fréquences relativement large. Le résultat est la somme des intensités de champ au point donné, toutes les fréquences du domaine de fréquence spécifié et toutes les polarisations étant additionnées automatiquement. Cette méthode donne certes une valeur mesurée clairement définie. Il faut donc balayer manuellement tout le plan de mesure avec le dosimètre. Lors du balayage, on suppose la stationnarité temporelle du champ radioélectrique. Une comparaison entre les deux dispositifs sera présentée à la fin de ce chapitre.

2.1) Analyseur du spectre

L'utilisation d'analyseur du spectre nécessite l'emploi d'autres équipements, comme la sonde de mesure, le Switch, des câbles et un ordinateur portable pour le pilotage des données.

2.1.1) La sonde

La sonde de détection du champ se compose de trois monopôles orthogonaux. La forme de chaque monopôle optimise le fonctionnement et l'isotropie de la sonde.

$$\begin{aligned} E_x &= F_x V_x \\ E_y &= F_y V_y \\ E_z &= F_z V_z \end{aligned} \quad (\text{Équation 4.4})$$

E : Le champ mesuré dans la direction x , y et z

F : le facteur d'antenne pour la sonde de chaque dipôle x , y et z

V : La tension mesurée par l'analyseur de spectre

Le champ total est donné par : $E_{tot} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$



Figure 4.4 : Sonde de mesure

2.1.2) Le Switch

Le Switch permet de permuter entre les trois axes de la sonde manuellement ou par le logiciel. La boîte de Switch contient un amplificateur pour améliorer la sensibilité de la sonde aux basses fréquences (100kHz à 3 MHz).



Figure 4.5 : Switch

2.1.3) Analyseur de spectre

On utilise un analyseur de spectre qui permet de mesurer la densité spectrale du champ en fonction de la fréquence. L'appareil doit être étalonné pour les mesures de valeurs efficaces et leurs incertitudes de mesure doivent être connues.



Figure 4.6 : Analyseur du spectre.

2.2) Dosimètre personnel

Un dosimètre personnel permet de prendre en compte le niveau d'exposition d'une personne pendant un intervalle de temps précis (Figure 4.7), dans cet instrument les bandes de fréquence sont prédéterminées et comprennent les services principaux occupant le spectre, tel que la TV, FM, GSM, UMTS et WiFi. Ceci inclut le downlink de GSM 900, GSM 1800 et d'UMTS (c.-à-d. émis par des stations de base). La dynamique du dosimètre couvre l'intervalle 0.05 V/m à 5 V/m ; la résolution est 0.01 V/m. La mémoire du dosimètre peut enregistrer jusqu'à 7000 mesures avec une durée d'échantillon minimale de 3 secondes.

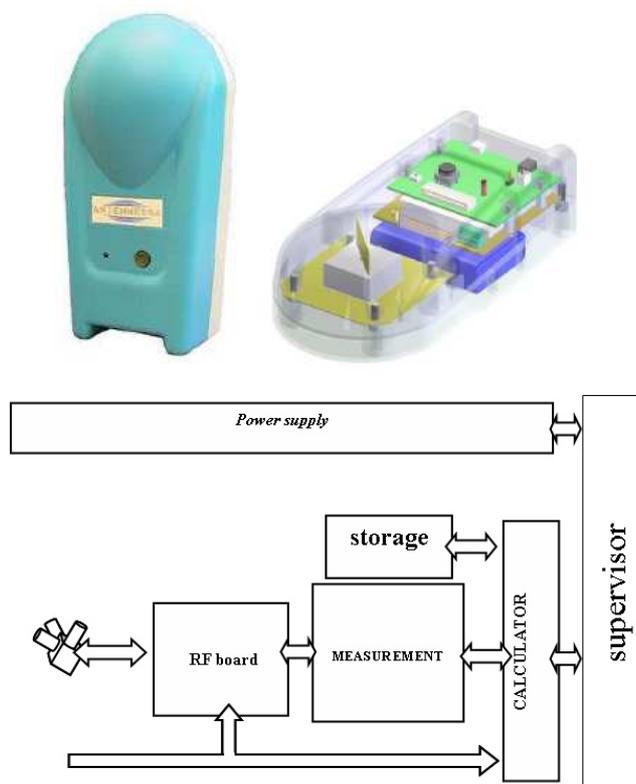


Figure 4.7 : Dosimètre utilisé dans cette étude et sa structure interne.

2.3) Comparaison entre les deux équipements

Puisque des mesures peuvent être effectuées avec les deux équipements, nous avons effectué une comparaison entre l'analyseur de spectre et les mesures de dosimètre. Cette étude a été réalisée dans le laboratoire et concentrée sur le GSM 900 downlink, nous avons placé les deux dispositifs l'un à côté de l'autre à un niveau de 1.5m pendant trois minutes. La Figure 4.8 indique un avantage à l'analyseur du spectre en terme de précision, cette précision est plus petite d'une unité de résolution de dosimètre (0.01 V/m) dans les plus part de mesures. Mais comme nous intéressons à la valeur moyenne de l'exposition, on peut dire que nous avons bonne concordance entre les mesures des deux dispositifs.

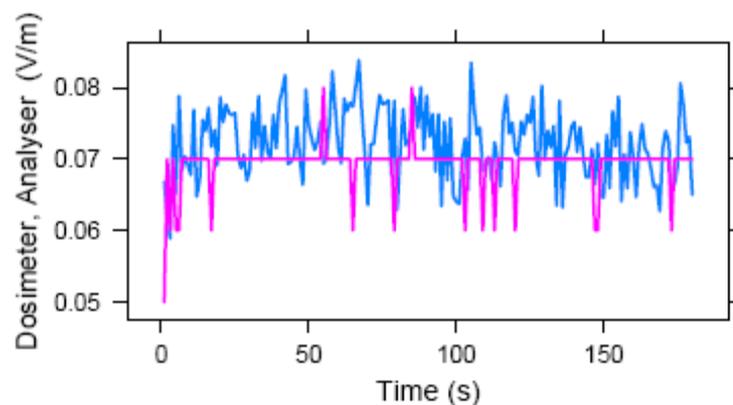


Figure 4.8 : Les comparaisons entre les mesures calculées dans le laboratoire, à 900MHz, avec un dosimètre (ligne rose) et un analyseur de spectre (ligne bleue).

3) Conclusion

Dans la première section, nous avons présenté l'outil de simulation EMF Visual. Une technique basée sur la décomposition des antennes de station de base dans des cellules d'unité est présentée. En remarquant que cet outil est moins performant dans le cas des simulations des milieux urbains réels. La deuxième section est consacrée aux systèmes de mesures, d'une part, l'analyseur du spectre avec l'antenne de mesure utilisée, et le dosimètre personnel, d'autre part. Une comparaison entre les deux dispositifs montre que l'analyseur de spectre est plus sensible et sa résolution est plus petite, mais l'équipement est moins portatif.

Chapitre 5 : Méthodes d'interpolation spatiales

Dans la première section de ce chapitre, nous définissons les notions de variable régionalisée et de valeurs régionalisées. Dans la deuxième section, nous présentons une revue des méthodes d'interpolation spatiale les plus courantes, comme la méthode des polygones de Thiessen, la méthode barycentrique et la méthode de régression. Dans la troisième section, nous décrivons la méthode du krigeage, en commençant par une étape préalable d'analyse variographique. Les détails mathématiques et les solutions des équations du krigeage sont aussi présentés. La méthode du krigeage avec dérive externe est exposée aussi à la fin de ce chapitre.

1) Notation

Les méthodes d'interpolation spatiale, sont un ensemble d'algorithmes pour le traitement de données réparties sur un domaine spatial, ce domaine étant appelé quartier et noté Q . Le problème étudié est caractérisé par un ensemble de mesures ou de données simulées, localisées sur le quartier. Par exemple, pour étudier l'exposition radioélectrique, on peut mesurer la densité de la puissance. Une telle mesure est considérée comme une variable régionalisée, c'est-à-dire une fonction définie sur le domaine Q . Dans cette étude elle sera notée $\{z(s), s \in Q\}$ où $s = (x, y)$ est un point du domaine Q , et la valeur de cette fonction en ce point porte le nom de valeur régionalisée [19].

En pratique, on ne peut pas mesurer l'exposition en tout point s du domaine Q . donc on réalise un ensemble de mesures, notons ces points de mesure s_i avec $i=1, \dots, N$. L'interpolation spatiale nous permet d'estimer l'exposition en tout point s_0 du quartier Q autre qu'un des points de mesures. Elle se définit par l'estimation de la valeur de la

variable régionalisée en un point où elle n'a pas été mesurée à partir des valeurs régionalisées mesurées $z(s_1)$ à $z(s_N)$ [49]. La valeur prédite en s_0 sera notée $\hat{z}(s_0)$.

Les méthodes d'interpolation qui s'appuient sur la variable régionalisée sont dites déterministes lorsqu'aucune notion probabiliste n'intervient dans la définition de cette entité mathématique. Un deuxième type de méthode d'interpolation sont dites probabilistes, lorsque la variable régionalisée est considérée comme une réalisation d'une fonction aléatoire $\{Z(s), s \in Q\}$, et la valeur régionalisée est interprétée comme une réalisation d'une variable aléatoire $Z(s_i)$ [15].

2) Méthodes d'interpolation spatiale

2.1) Méthodes d'interpolation déterministes

Dans cette section nous recensons des méthodes d'interpolation spatiale dites déterministes. Dans le premier exemple de ces méthodes, nous décrivons la méthode des polygones de Thiessen comme un exemple de méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace. La seconde méthode dans cette section est la méthode de l'inverse de la distance.

2.1.1) La méthode des polygones de Thiessen

Dans l'année 1911, Thiessen a proposé une méthode d'interpolation spatiale basée sur le principe du plus proche voisin, elle se base sur un partitionnement par polygones. Ce partitionnement est formé en définissant, pour chaque point d'observation s_i , un polygone d'influence de sorte que chaque point du polygone soit plus proche de s_i que de tout autre point d'observation. Les polygones s'obtiennent en dessinant les médiatrices des segments reliant les points de mesure. Le quartier d'étude est alors partitionné en polygones convexes. Le domaine d'étude présentera des polygones de petite surface pour les données groupées, au contraire des données isolées, qui produiront des polygones de grande superficie [43].

Ensuite, les polygones de Thiessen sont reformés en ajoutant au quartier le point s_0 pour lequel une estimation est demandée. Cette nouvelle mosaïque est finalement superposée aux polygones de Thiessen initiaux sans le point s_0 . Le poids de l'observation en s_i est alors l'aire A_i de l'intersection entre le polygone de s_0 et le polygone initial de s_i divisée par l'aire totale du polygone de s_0 .

2.1.2) La méthode de l'inverse des distances

La méthode des polygones de Thiessen, présentée dans le paragraphe précédent ne prend en compte que les points d'observation voisins pour estimer une valeur non mesurée. En conséquence, elle se prive d'une grande quantité d'information disponible [43]. La méthode de l'inverse des distances prend en compte un plus grand nombre de données, en affectant une pondération plus élevée aux valeurs proches qu'aux valeurs éloignées. Cette méthode présente en théorie plusieurs points faibles, car les valeurs interpolées sont toujours comprises entre la valeur minimale et la valeur maximale, et elle ne tient compte que de la distance entre les sites d'observation et le point à estimer, et non de la configuration géométrique des sites d'observation entre eux. Cela implique que la représentativité de l'interpolation est directement corrélée à la densité du réseau.

2.2) Méthodes d'interpolation statistiques

Dans cette section, nous présentons des méthodes d'interpolation lorsque la variable régionalisée est vue comme une réalisation d'une fonction aléatoire. Parmi ces méthodes, citons la régression classique. La méthode de régression classique est une méthode probabiliste, donc elle suppose que la variable régionalisée soit une fonction aléatoire qui se décompose comme suit [43]:

$$Z(s) = m(s) + \varepsilon(s), \quad s \in Q \quad (\text{Équation 5.1})$$

Où $m(\cdot)$ est la structure déterministe et $\varepsilon(\cdot)$ est un processus gaussien de bruit blanc représentant des erreurs de mesure indépendantes. La structure $m(s)$ peut tenir plusieurs formes. La plus utilisée est un polynôme de degré d des coordonnées :

$$m(s) = m(x, y) = \sum_{l+k \leq d} \beta_{lk} x^l y^k \quad (\text{Équation 5.2})$$

En interpolation spatiale, les coefficients du modèle sont ajustés par l'utilisation d'une des méthodes d'estimation. Par exemple, la méthode du maximum de vraisemblance ou celle des moindres carrés. Dans le cas de moindres carrés, les paramètres β_{lk} sont choisis de façon à minimiser la variance :

$$\sum_{i=1}^n [\hat{z}(s_i) - z(s_i)]^2$$

Où $\hat{z}(s_i) = \sum_{l+k \leq d} \hat{\beta}_{lk} x^l y^k$ est la valeur estimée par le modèle de régression au point de mesure s_i et $z(s_i)$ est la valeur régionalisée mesurée en ce point. Des variables

régionalisées auxiliaires peuvent être ajoutées dans la tendance $m(s)$. Ainsi, de l'interpolation spatiale multivariable peut être effectuée en exploitant la corrélation entre les variables auxiliaires et la variable à interpoler.

L'utilisation de la méthode des moindres carrés est accompagnée des hypothèses de normalité, d'indépendance et d'homoscédasticité des erreurs du modèle, elle permet de calculer des tests de significativité de la surface et des erreurs d'estimation.

Cependant, ces statistiques ne sont presque jamais fiables en interpolation spatiale car l'hypothèse d'indépendance est rarement vérifiée sur des données spatiales.

3) La méthode du Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui prend en compte la variation spatiale des données. Le nom de Krigeage a été choisi par Georges Matheron en hommage au géologue sud africain Daniel Gerhardus Krige. Néanmoins, la théorie de cette méthode a été développée par Georges Matheron, qui en a aussi assuré le développement au Centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris [16].

L'idée de base du krigeage est d'estimer la valeur de la variable régionalisée en un point s_0 par une combinaison linéaire des données :

$$\hat{z}(s_0) = a + \sum_{i \in V_0} \lambda_i z(s_i) \quad (\text{Équation 5.3})$$

Les poids, λ_i sont calculés de façon à obtenir une estimation non biaisée et de variance minimale. Ces poids dépendent de la localisation de données et de leur structure de dépendance spatiale. La différence entre le modèle de base du krigeage et celui de la régression classique, se situe au niveau des erreurs qui sont maintenant supposées dépendantes spatialement.

$$Z(s) = m(s) + \delta(s), \quad s \in Q \quad (\text{Équation 5.4})$$

où $m(\cdot)$ est la structure déterministe pour l'espérance de $Z(\cdot)$ et $\delta(\cdot)$ une fonction aléatoire stationnaire, d'espérance nulle et de structure de dépendance connue. Il existe trois types de krigeage suivant la structure $m(\cdot)$:

- Le krigeage simple : $m(s) = m_0$ est une constante connue.
- Le krigeage ordinaire : $m(s) = m$ est une constante inconnue.

- Le krigeage universel : $m(s) = \sum_{j=0}^p f_j(s)\beta_j$ est une combinaison linéaire de fonctions de la position s [16].

3.1) Stationnarité

La stationnarité est définie par l'invariante de la loi de probabilité de la fonction aléatoire pour toute translation. C'est-à-dire elle ne dépend que du vecteur qui relie deux points et non pas de l'origine du domaine d'étude [50]. Dans la méthode de krigeage, nous n'avons besoin que d'une stationnarité de second ordre des accroissements dite "intrinsèque" de la fonction $\delta(\cdot)$ [15]. Ce type de stationnarité se définit par :

$$1. E(Z(s+h) - Z(s)) = 0 \quad \forall s \in Q : \quad (\text{Équation 5.5})$$

La moyenne de tout accroissement $Z(s+h) - Z(s)$ est nulle.

$$2. Var(Z(s+h) - Z(s)) = 2\gamma(h) \quad \forall s, s+h \in Q : \quad (\text{Équation 5.6})$$

La variance de tout accroissement $Z(s+h) - Z(s)$ existe et dépend uniquement de h , le vecteur qui sépare ces points. La moitié de cette fonction de variance est appelée « variogramme ».

Dans le cadre de la stationnarité de second ordre, on peut définir la fonction de variogramme à partir de la fonction covariance comme suit :

$$2\gamma(h) = 2(C(0) - C(h)) \quad (\text{Équation 5.7})$$

où $C(h)$ est la fonction de covariance entre deux points séparés par le vecteur h . Donc l'existence de cette fonction implique l'existence de la fonction variogramme, et l'inverse n'est vrai que si le variogramme est borné.

3.2) Variogramme

Les fonctions qui peuvent être des variogrammes, sont des fonctions négatives conditionnelles, c'est-à-dire que pour tout ensemble fini de points, $\{s_i : i = 1, \dots, l\}$, et tout ensemble de nombres réels $\{a_i : i = 1, \dots, l\}$ tel que $\sum_{i=1}^l a_i = 0$, on a [43] :

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l a_i a_j \gamma(s_i - s_j) \leq 0 \quad (\text{Équation 5.8})$$

A partir de cette caractéristique on peut déduire les deux propriétés suivantes :

- C'est une fonction paire
- Nulle pour $h = 0$, et positive partout ailleurs.

Effet de pépite

L'Effet de pépite est défini par la valeur de variogramme au voisinage de l'origine, c'est la limite de cette fonction quand h tend vers 0. Il mesure les erreurs de mesure et les variations à petite échelle [43].

Portée et palier

Dans l'étude de la variation spatiale, il est important d'examiner le comportement du variogramme à grande distance. La fonction variogramme peut atteindre une limite à partir d'une certaine distance appelée portée; à partir de cette distance il n'y a plus de corrélation spatiale entre les données. Cette limite est nommée palier et désigne la variance totale [43]. Dans la pratique, la portée est définie par la distance à laquelle le variogramme atteint 95% de la valeur de son palier. Et si un variogramme est non borné, il ne possède ni portée, ni palier, et la variance de la fonction aléatoire n'est pas définie pour un tel variogramme [20].

Isotropie

Tel qu'il est définie le variogramme ne dépend que du vecteur h qui relie les points s et $s + h$. La norme de ce vecteur mesure la distance entre ces deux points. Dans le cas où le variogramme ne dépend pas de l'orientation de ce vecteur, il est dit isotrope. Dans le cas contraire, il est alors anisotrope [43]. Rappelons que la norme euclidienne d'un vecteur $h = (x_h, y_h)$ est $r = |h| = \sqrt{x_h^2 + y_h^2}$.

3.2.1) Variogrammes expérimentaux

Dans ce paragraphe, on cherche une estimation de la fonction de variogramme à partir des données disponibles. Nous rappelons la définition du variogramme :

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= \frac{1}{2} \text{Var}[Z(s) - Z(s+h)] && \text{(Équation 5.9)} \\ &= \frac{1}{2} E\{[Z(s) - Z(s+h)]^2\} - \frac{1}{2} E[Z(s) - Z(s+h)]^2 \\ &= \frac{1}{2} E\{[Z(s) - Z(s+h)]^2\} - \frac{1}{2} \{m(s) - m(s+h)\}^2\end{aligned}$$

Si $m(\cdot)$ est constante, le deuxième terme s'annule et le variogramme peut être estimé à partir des $Z(s_i)$, c'est le cadre du krigeage ordinaire. Dans le cas contraire tel qu'en krigeage avec dérive externe, l'estimation doit se baser sur la fonction $\delta(\cdot)$ [20].

L'estimateur de variogramme est déduit du nuage variographique qui représente la variance entre chaque paire de points des mesures [43]. Il s'écrit :

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{s_i - s_j = |h|} [Z(s_i) - Z(s_j)]^2 \quad (\text{Équation 5.10})$$

N_h : nombre de couples de points distants de h

$Z(s_i)$: niveau de l'exposition au point de mesure s_i

Il s'obtient en pratique en faisant la moyenne des points du nuage par classe de distance.

3.2.2) Modélisation du variogramme

L'estimateur de variogramme présenté dans le paragraphe précédent, n'est calculable que pour un nombre des distances fini (les distances entre les couples des points de mesures). De plus, il ne vérifie pas forcément les caractéristiques d'une fonction de variogramme, c'est-à-dire d'être une fonction conditionnellement définie négative. Pour l'application du krigeage, nous ajustons le variogramme expérimental par une fonction qui vérifie cette caractéristique. Tester le caractère négatif conditionnel d'une fonction est un travail difficile. Une procédure a été développée par [18] pour le résoudre.

Néanmoins, en pratique, l'ajustement du variogramme expérimental est fait par l'utilisation d'un des modèles théoriques validés [20]. Parmi ces modèles nous citons les exemples suivants :

- Modèle pépétique de palier c_0 :

$$\gamma(r) = \begin{cases} 0 & \text{pour } r = 0 \\ c_0 & \text{pour } r > 0 \end{cases} \quad (\text{Équation 5.11})$$

- Modèle cubique de palier c et de portée a :

$$\gamma(r) = \begin{cases} c - c \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \left[7 - \frac{r}{a} \left[\frac{35}{4} - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \left[\frac{7}{2} - \frac{3}{4} \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \right] \right] \right) & \text{si } 0 \leq r \leq a \\ c & \text{si } r > a \end{cases} \quad (\text{Équation 5.12})$$

- Modèle sphérique de palier c et de portée a :

$$\gamma(r) = \begin{cases} c\left(\frac{3}{2}\frac{r}{a} - \frac{1}{2}\frac{r^3}{a^3}\right) & \text{pour } 0 \leq r \leq a \\ c & \text{pour } r > a \end{cases} \quad (\text{Équation 5.13})$$

- Modèle de Cauchy, de portée a et de puissance p :

$$\gamma(h) = 1 - \left(1 + \frac{|h|^2}{a^2}\right)^{-p} \quad a > 0; p > 0; \quad (\text{Équation 5.14})$$

3.3) Méthode de krigeage

Dans cette section, nous détaillons les calculs mathématiques de la méthode de krigeage. Dans le premier paragraphe, nous commençons par décrire la procédure à suivre pour réaliser une estimation par krigeage. Dans le second paragraphe nous présentons la méthode de krigeage ordinaire et la méthode de krigeage avec dérive externe.

3.3.1) Procédure de krigeage

Dans ce paragraphe, nous rappelons que l'objectif d'interpolation par krigeage est d'estimer la variable régionalisée $z(\cdot)$ en un point non échantillonné s_0 . Pour la réalisation de cette estimation, il est nécessaire de choisir un voisinage de krigeage [47], ce voisinage se définit par le domaine du quartier Q contenant s_0 , et le sous-ensemble des observations utilisées pour l'estimation de $z(s_0)$. Dans le reste de ce chapitre nous utilisons un voisinage unique c'est-à-dire, nous estimons $z(s_0)$ à partir de l'ensemble des échantillons total et on note N leur nombre. Pour la formulation de la méthode, nous suivons les démarches proposées par [50]. Ces démarches consistent à écrire les contraintes du krigeage que voici :

1) Contrainte de linéarité

L'estimateur de krigeage en un point s_0 , est défini comme la combinaison linéaire des données, il s'écrit alors :

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (\text{Équation 5.15})$$

Les poids λ_i sont les inconnues du problème.

2) Contrainte de non-biais

L'estimateur du krigeage est un estimateur sans biais. C'est-à-dire :

$$E[\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)] = 0$$

3) Contrainte d'autorisation

Il faut garantir l'existence des moments d'ordres 1 et 2 pour l'erreur d'estimation $\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)$.

4. Contrainte d'optimalité

Les poids λ_i et la constante a sont déterminés de façon à minimiser $Var[\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)]$ sous les contraintes précédentes.

Notons que la prévision $\hat{Z}(s_0)$ obtenue est une variable aléatoire. Sa valeur numérique est calculée en remplaçant les variables aléatoires $Z(s_i)$ par les valeurs régionalisées observées $z(s_i)$.

3.3.2) Krigeage ordinaire

La méthode de krigeage a été développée par [17]. Dans cette méthode la moyenne est supposée inconnue mais invariante sur le voisinage utilisé dans l'estimation. Cette méthode ne réclame que l'hypothèse de stationnarité intrinsèque. Grâce à cette hypothèse la technique de krigeage ordinaire est devenue la plus utilisée selon [60]. Le modèle de base de cette méthode s'énonce comme suit :

$$Z(s) = \mu + \delta(s), \quad s \in Q \quad (\text{Équation 5.16})$$

Avec μ invariante inconnue et $\delta(\cdot)$ une fonction aléatoire stationnaire intrinsèque d'espérance nulle et de structure de dépendance connue. Pour calculer l'estimateur en un point s_0 , la résolution des équations du krigeage ordinaire se fonde sur les étapes suivantes :

1. Contrainte de linéarité

L'estimateur $\hat{Z}(s_0)$ doit être une combinaison linéaire des variables aléatoires $Z(s_1)$ à $Z(s_N)$. Elle s'exprime donc sous la forme :

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

2. Contrainte de non-biais

La contrainte de non biais s'écrit sous la forme :

$$E[\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)] = E\left[\sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) - Z(s_0)\right] = \mu\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1\right) = 0$$

Donc l'estimateur en un point s_0 prend la forme suivante :

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (\text{Équation 5.17})$$

3. Contrainte d'optimalité

Cherchons maintenant les poids λ_i qui minimisent la variance d'estimation. Pour ce faire, cette variance est définie par :

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)] &= E[(\hat{Z}(s_0) - Z(s_0))^2] \\ &= \left[E \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) - Z(s_0) \right)^2 \right] \\ &= E \left[\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \right)^2 - 2Z(s_0) \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) + Z(s_0)^2 \right] \\ &= E \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j Z(s_i) Z(s_j) - 2Z(s_0) \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) + Z(s_0)^2 \right] \\ &= E \left[\underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j Z(s_i) Z(s_j)}_1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)^2 + \right. \\ &\quad \left. \underbrace{\sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)^2 - 2Z(s_0) \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) + Z(s_0)^2}_2 \right] \end{aligned} \quad (\text{Équation 5.18})$$

Le terme 1 de l'équation 5.18 peut être réécrit de la façon suivante :

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j Z(s_i) Z(s_j) - \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)^2 = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j (Z(s_i) - Z(s_j))^2 \quad (\text{Équation 5.19})$$

Le terme 2 peut être réécrit de la façon suivante :

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)^2 - 2Z(s_0) \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) + Z(s_0)^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i (Z(s_0) - Z(s_i))^2 \quad (\text{Équation 5.20})$$

Donc

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)] &= E \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j (Z(s_i) - Z(s_j))^2 \right] + E \left[\sum_{i=1}^N \lambda_i (Z(s_0) - Z(s_i))^2 \right] \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j E (Z(s_i) - Z(s_j))^2 + \sum_{i=1}^N \lambda_i E (Z(s_0) - Z(s_i))^2 \\ &= -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(s_i - s_j) + 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(s_0 - s_i) \end{aligned} \quad (\text{Équation 5.21})$$

Chapitre 5 : Méthodes d'interpolation spatiales

On cherche à minimiser cette expression (équation 5.21) sous la contrainte $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$.

Cette étape sera effectuée à l'aide de la fonction de Lagrange. La fonction Lagrangienne à minimiser est:

$$L(\lambda, \alpha) = -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(s_i - s_j) + 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(s_0 - s_i) - 2\alpha \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1 \right) \quad (\text{Équation 5.22})$$

Les dérivées partielles de cette fonction par rapport aux λ_i sont :

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} L(\lambda, \alpha) = -2 \sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(s_i - s_j) + 2\gamma(s_0 - s_i) - 2\alpha$$

La fonction $L(\lambda, \alpha)$ admet un point critique lorsque $\frac{\partial}{\partial \lambda} L(\lambda, \alpha) = 0$:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(s_i - s_j) + \alpha = \gamma(s_0 - s_i) \quad \forall i = 1 \dots N \quad (\text{Équation 5.23})$$

Pour faciliter cette formule nous utilisons la notation matricielle suivante :

- K_0 le matrice de taille $(N+1, N+1)$ définie par les variogrammes :

$$K_0 = \begin{bmatrix} \gamma(s_1 - s_1) & \gamma(s_1 - s_2) & \cdot & \gamma(s_1 - s_N) & 1 \\ \gamma(s_2 - s_1) & \gamma(s_2 - s_2) & \cdot & \gamma(s_2 - s_N) & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma(s_N - s_1) & \gamma(s_N - s_2) & \cdot & \gamma(s_N - s_N) & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- k_0 et λ_0 deux vecteurs de taille $(N+1, 1)$:

-

$$k_0 = \begin{bmatrix} \gamma(s_1 - s_0) \\ \gamma(s_2 - s_0) \\ \cdot \\ \gamma(s_N - s_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad \lambda_0 = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_N \\ \alpha \end{bmatrix}$$

La solution de l'équation précédente s'écrit alors sous la forme :

$$\hat{\lambda}_0 = K_0^{-1} k_0 \quad (\text{Équation 5.24})$$

3.3.3) Le krigeage avec dérive externe

L'hypothèse d'espérance quasi-constante sur laquelle repose le krigeage ordinaire, n'est pas toujours vérifiée. En krigeage avec dérive externe l'espérance est une fonction de variables régionalisées auxiliaires connues exhaustivement [20]. Soit :

$$Z(s) = \alpha + \beta V(s) + \delta(s) \text{ tel que} \quad (\text{Équation 5.25})$$

$$E(Z(s)) = \alpha + \beta V(s)$$

où α et β sont constantes, $V(s)$ la variable auxiliaire, est connue à tous les nœuds de la grille d'interpolation, et $\delta(s)$ est supposée être un résidu intrinsèque de moyenne $E(\delta(s)) = 0$.

L'estimateur en un point s_0 est une combinaison linéaire des $Z(s_i)$:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Pour que l'estimateur soit sans biais :

$$\begin{aligned} E[\hat{Z}(s_0)] &= E[Z(s_0)] \\ &= \sum_{i=1}^N \lambda_i E[Z(s_i)] = \alpha + \sum_{i=1}^N \beta \lambda_i V(s_i) \\ &= \alpha + \beta V(s_0) \end{aligned} \quad (\text{Équation 5.26})$$

Cette dernière équation impose la contrainte suivante :

$$V(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i V(s_i)$$

L'objectif recherché est de minimiser la variance d'estimation sous deux contraintes :

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \text{ et } V(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i V(s_i) . \text{ En suivant la démarche présentée dans le krigeage}$$

ordinaire, nous trouvons le système d'équations suivant :

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma_r(s_i - s_j) - \omega_0 - \omega_1 V(s_i) = \gamma_r(s_i - s_0) \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (\text{Équation 5.27})$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i V(s_i) = V(s_0)$$

Avec γ_r le variogramme des résidus δ .

4) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue de méthodes d'interpolation spatiale. Après la comparaison entre ces méthodes, il semble que le krigeage soit la méthode la plus intéressante pour notre application. A l'instar des autres méthodes, le Krigeage permet un choix entre une estimation globale ou locale. De plus, le krigeage permet en plus d'estimer des erreurs d'estimation.

Le krigeage se distingue des autres méthodes d'interpolation citées dans ce chapitre par le fait qu'il est le seul à tenir compte de la variation spatiale des données. Ainsi, le krigeage génère non seulement des prévisions spatiales, mais en plus l'estimation des erreurs qu'il produit est plus fiable que celles produites par la régression classique, car les postulats de base du krigeage modélisent mieux la réalité pour des données à référence spatiale. Le krigeage ressort donc favorablement de la comparaison théorique avec d'autres méthodes d'interpolation. Ses fondements théoriques sont approfondis dans le chapitre suivant.

Chapitre 6: Géostatistique non linéaire

Les méthodes géostatistiques dites «non linéaires» telles que le conditionnement uniforme et les simulations conditionnelles, ont été développées non pas dans le but d'estimer une valeur vraie inconnue mais afin de calculer la probabilité avec laquelle cette valeur inconnue est supérieure ou inférieure à un seuil déterminé.

Dans ce chapitre, nous présentons le cadre théorique des ces méthodes et leurs applications dans le contexte de notre étude. L'objectif recherché est d'obtenir une cartographie de cette probabilité. La première section est réservée à l'introduction des méthodes de conditionnement uniforme et la simulation conditionnelle. Dans la seconde section, nous présentons les traitements et applications de ces méthodes sur les mesures de la densité de la puissance pour le service GSM 900. Enfin, nous terminons par des discussions et conclusions.

1) Anamorphose gaussienne

1.1) Définition

Les méthodes de la géostatistique non linéaire exposées dans ce chapitre, supposent que la distribution de fréquences de la variable étudiée peut être modélisée par un modèle gaussien [32]. Il convient de rappeler que la fonction de répartition d'une variable gaussienne centrée réduite Z (moyenne nulle et variance égale à 1) est donnée par l'équation 6.1 :

$$G(x) = P[Z \leq x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (\text{Équation 6.1})$$

Cette fonction n'a pas d'expression analytique simple. En pratique on se sert soit de tables, soit de formules d'approximation, calculées numériquement [36]. Dans le contexte de notre étude, des mesures in situ de champ électrique ont été réalisées dans un contexte urbain, le plus souvent l'histogramme de ces mesures est asymétrique avec quelques valeurs élevées et il est très rare de rencontrer des distributions parfaitement

gaussiennes [58]. Ces valeurs représentent l'exposition dans certains endroits du domaine où l'exposition est plus forte.

Par conséquent, il est intéressant de procéder à une transformation de la variable réelle en variable gaussienne. Le processus consiste à déformer l'histogramme de données réelles en un histogramme gaussien réduit ; sur les histogrammes cumulés (fonctions de répartition $F(z)$ et $G(y)$) elle consiste à associer à chaque valeur de « z », la valeur « y » (gaussienne) correspondant à la même fréquence cumulée.

1.2) Polynômes d'Hermite

La fonction reliant « y » et « z » est appelée fonction d'anamorphose ou tout simplement anamorphose φ . En réalité, on a seulement accès à des observations de Z, on peut donc estimer cette fonction par une anamorphose empirique :

$$\hat{\varphi}(y) = \sum_{k=1}^N z_k I_{G^{-1}(\frac{(k-1)}{N}) \leq y \leq G^{-1}(\frac{k}{N})} \quad (\text{Équation 6.2})$$

Avec I la fonction indicatrice
$$I(y) = \begin{cases} 1 & G^{-1}(\frac{(k-1)}{N}) \leq y \leq G^{-1}(\frac{k}{N}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La fonction φ enregistre toutes les irrégularités que peut présenter la distribution expérimentale d'exposition; pour une variable gaussienne, l'anamorphose est linéaire [36]. Les fonctions utilisées en géostatistique pour interpoler l'anamorphose empirique par une fonction continue sont les «polynômes d'Hermite». Ces polynômes sont définis à partir de la densité de probabilité gaussienne réduite [32]:

$$H_k(y) = \frac{1}{\sqrt{k!g(y)}} \frac{d^k g(y)}{dy^k} \quad k \geq 0 \quad (\text{Équation 6.3})$$

Où g c'est la distribution d'une variable gaussienne centrée et réduite :

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (\text{Équation 6.4})$$

A partir de cette équation, les trois premiers polynômes sont donnés par les fonctions suivantes :

$$H_0(y) = 1; H_1(y) = -y; H_2(y) = \frac{(y^2 - 1)}{\sqrt{2}} \quad (\text{Équation 6.5})$$

Ensuite ces polynômes son calculables par une relation de récurrence :

$$H_{k+1}(y) = -\frac{1}{\sqrt{k+1}} y H_k(y) - \sqrt{\frac{k}{k+1}} H_{k-1}(y) \text{ où } k > 0 \quad (\text{Équation 6.6})$$

Le principal avantage de ce type de polynômes est que n'importe quelle fonction de carré intégrable peut être développée en polynômes d'Hermite [36], par exemple, pour l'anamorphose gaussienne on obtient :

$$z = \varphi(y) = \varphi_0 + \varphi_1 H_1(y) + \varphi_2 H_2(y) + \dots \quad (\text{Équation 6.7})$$

$$z = \sum_{k=0}^{+\infty} \varphi_k H_k(y)$$

y : valeur gaussienne centrée réduite

φ_k : k ème coefficient

$H_k(y)$: k ème polynôme d'Hermite

Le nombre n de coefficients φ_n calculés indique l'ordre de troncature. Ces coefficients restent constants et ne dépendent pas de l'ordre de troncature. En pratique, on calcule un nombre déterminé de polynômes à partir des valeurs gaussiennes (Y) d'exposition, ensuite on calcule les coefficients de chaque polynôme à l'aide de la formule [36] :

$$\varphi_k = \int z H_k(y) g(y) dy \quad (\text{Équation 6.8})$$

Y : valeur gaussienne centrée réduite

z : valeur réelle

φ_k : k ème coefficient

$H_k(Y)$: k ème polynôme d'Hermite

$g(y)$: fonction de densité d'une loi gaussienne centrée réduite

On peut valider ce calcul par les deux expressions ci-après [36]:

$$E(Z) = \varphi_0 \quad \text{et} \quad \text{Var}(Z) = \sum_{k=1}^{+\infty} \varphi_k^2 \quad (\text{Équation 6.9})$$

On vérifie donc que le premier coefficient est égal à la moyenne expérimentale des données et que la somme du carré de tous les coefficients (sauf le premier) est égale à la variance expérimentale de la variable réelle.

2) Conditionnement uniforme

On s'intéressera souvent non seulement à des valeurs définies sur des points, mais également à des valeurs moyennes sur des éléments de surface. Un support ponctuel n'a pas beaucoup de sens car l'exposition peut varier fortement d'un point à un autre, immédiatement voisin. Le problème que nous étudions comporte donc trois supports : le support ponctuel des points de mesure, le support des cellules et un support de bloc.

Le modèle Gaussien discret, va nous servir à aborder un problème à trois supports tel qu'il est représenté schématiquement sur la Figure 6.1, où nous avons des mesures en des points, des valeurs de modèle numérique pour des cellules elles-mêmes partitionnées en des blocs.

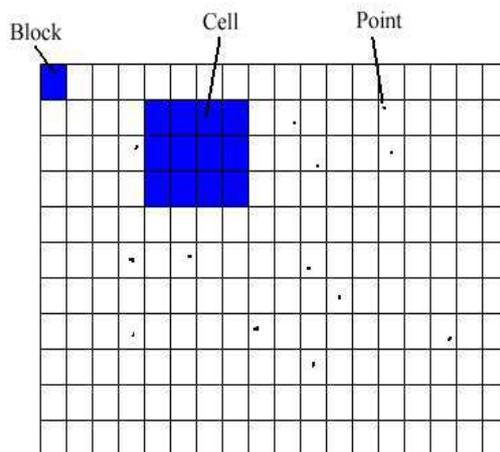


Figure 6.1 : Trois supports : points de mesure à l'intérieur de cellules partitionnées en blocs.

Soit Z une fonction aléatoire, et $z(x)$ une réalisation de cette fonction connue dans un bloc v . La valeur moyenne de z sur v :

$$z_v = \frac{1}{|v|} \int_v z(x) dx \text{ est une réalisation de la variable aléatoire } Z_v = \frac{1}{|v|} \int_v Z(x) dx.$$

Comme nous connaissons les observations de Z , alors il y a équivalence entre l'information portée par $Z(x)$ et celle portée par $Y(x)$. D'où :

$$E[Z(x) | Z_v] = E[\varphi(Y(x)) | Y_v] \quad (\text{Équation 6.10})$$

On considère que x est un point aléatoire dans le bloc v . D'après la relation de *Cartier* [6] l'espérance de $Z(x)$ conditionnellement à la valeur du bloc v est égale à la moyenne de Z sur le bloc :

$$\begin{aligned} E[Z(x) | Z_v] &= \frac{1}{|v|} \int_v E[Z(x) | Z_v] dx && (\text{Équation 6.11}) \\ &= E\left[\frac{1}{|v|} \int_v Z(x) | Z_v dx\right] = E[Z_v | Z_v] = Z_v \end{aligned}$$

Avec l'anamorphose de bloc $\varphi_v(Y(v))$ correspondante, la relation se réécrit

$$E[\varphi(Y(x)) | Z(v)] = E[\varphi(Y(x)) | \varphi_v(Y(v))] = \varphi_v(Y(v)) \quad (\text{Équation 6.12})$$

L'anamorphose Gaussienne des blocs peut être exprimée avec les coefficients φ_k (ajustés aux données) de l'anamorphose ponctuelle en introduisant un coefficient positif ρ de corrélation point-bloc [39]:

$$\begin{aligned}\varphi_v(Y(v)) &= E[\varphi(Y(x))|Y(v)] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\varphi_k}{k!} E(H_k(Y(v))|Y(v)) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\varphi_k}{k!} \rho^k H_k(Y(v))\end{aligned}\quad (\text{Équation 6.13})$$

La corrélation point-bloc est déterminée à partir de la variance de dispersion des blocs, qui est elle-même calculée avec le modèle de variogramme [20].

$$\text{var}(Z(v)) = \text{var}(\varphi_v(Y(v))) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\varphi_k^2}{k!} \rho^{2k}\quad (\text{Équation 6.14})$$

De la même manière on peut calculer un coefficient ρ' de corrélation point-cellule et l'on obtient également un coefficient bloc-cellule en formant le rapport $\rho_{vV} = \rho'/\rho$.

3) Simulation conditionnelles

Les techniques de krigeage [20], permettent d'estimer localement les valeurs prises par une variable régionalisée à partir d'un échantillonnage de cette dernière.

Cependant, la propriété de lissage induite par le krigeage empêche d'apprécier la variabilité des valeurs inconnues (non mesurées) : ainsi, l'histogramme des valeurs estimées est moins dispersé que celui des valeurs réelles ; le variogramme des valeurs estimées n'est pas non plus représentatif de la réalité.

Le but des simulations est de reproduire la variabilité spatiale de la variable régionalisée tout en respectant ses propriétés statistiques (histogramme, variogramme, etc.), chaque simulation est alors considérée comme une réalisation possible de la réalité [41]. De même une simulation conditionnelle est une simulation restituant aux points de mesures les valeurs qui y sont connues.

La construction de simulations est particulièrement simple dans le cadre des fonctions aléatoires de loi spatiale multigaussienne, c'est-à-dire telles que toute combinaison linéaire de valeurs suive une distribution gaussienne.

3.1) Post-conditionnement

De nombreux algorithmes existent pour obtenir des simulations non conditionnelles des fonctions aléatoires de loi spatiale multigaussienne: bandes tournantes, décomposition

matricielle, moyennes mobiles discrètes, méthodes spectrales, méthode séquentielle, etc [6].

Le conditionnement à un ensemble de données se résout à l'aide d'un krigeage; en effet, on a en tout point x :

$$Y(x) = Y^k(x) + [Y(x) - Y^k(x)], \quad Y^k = \text{Krigeage de la gaussienne} \quad (\text{Équation 6.15})$$

Dans le cas d'une fonction aléatoire multigaussienne, le résidu en tout point $[Y(x) - Y^k(x)]$ est indépendant des valeurs aux points de données [6].

L'idée est alors de substituer à ce résidu indépendant mais inconnu un résidu simulé ayant exactement la même structure. Pour ce faire, on fabrique une simulation non conditionnelle de la variable, soit $Y_s(x)$, sur le domaine considéré, puis on calcule en tout point x , le résidu de son krigeage à partir des valeurs prises par Y_s aux points de données [6] :

$$[Y(x) - Y^k(x)]$$

La recombinaison:

$$Y_s(x) = Y^k(x) + [Y_s(x) - Y_s^k(x)] \quad (\text{Équation 6.16})$$

Donne alors une autre simulation de la fonction aléatoire, mais qui est maintenant conditionnelle, en un point de donnée on retrouve bien la valeur continue :

$$Y_s(x_i)_{SC} = Y^k(x_i) + [Y_s(x_i) - Y_s^k(x_i)] = Y_s(x_i) \quad (\text{Équation 6.17})$$

-
1. Effectuer une simulation non conditionnelle de la variable gaussienne, aux points désirés pour la simulation et aux points échantillons.
 2. Effectuer deux krigeages: le premier sur la variable gaussienne, le second sur les valeurs de la simulation non conditionnelle aux points des données.
 3. Former: $Y_s(x_i)_{SC} = Y^k(x_i) + [Y_s(x_i) - Y_s^k(x_i)]$
-

Algorithme de Simulation conditionnelle

3.2) Méthode de bandes tournantes

La technique des bandes tournantes est une des méthodes les plus utilisées et a prouvé son efficacité dans le domaine minier. La simulation non conditionnelle par bandes tournantes consiste à simuler une variable aléatoire y de covariance $c(s)$ le long d'un

nombre théoriquement infini de lignes passant par une origine O et uniformément orientées dans toutes les directions de l'espace. La variable aléatoire Y définie en tout point x de l'espace IR^2 comme la somme des projetés y de Y sur chacune des lignes a une covariance $C(h)$ liée à la covariance $c(s)$ par la relation suivante:

$$C(h) = \frac{1}{h} \int_0^h c(s) ds \quad (\text{Équation 6.18})$$

Le calcul numérique de Y passe par une approximation-discrète et le nombre de lignes réellement simulées est limité à N lignes. La variable aléatoire Y définie sur l'ensemble de l'espace devient la somme des valeurs y , des projetés de Y sur chacune des lignes, divisée par \sqrt{N} :

$$Y(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N y_i \quad (\text{Équation 6.19})$$

4) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé des méthodes pour calculer les probabilités de dépassement des seuils par deux méthodes de la géostatistique non-linéaire. Le conditionnement uniforme offre une mise en œuvre rapide. Cette méthode permet de plus la prise en compte de variables auxiliaires grâce au krigeage avec la dérive externe (il est possible donc de prendre en compte une composante non stationnaire).

Les simulations conditionnelles par bandes tournantes permettent aussi la prise en compte des variables auxiliaires et la modélisation de non stationnarités, mais leur mise en œuvre est plus lourde et nécessite un plus grand temps de calcul.

Partie pratique

Dans cette partie, nous présentons les applications des méthodes géostatistiques sur des données électromagnétiques. Dans le chapitre 7, nous décrivons des simulations électromagnétiques avec le logiciel EMF Visual. Aussi, un traitement géostatistique des données simulées est présenté. Une première application de la méthode du krigeage est montrée dans la première section. Dans la deuxième section, nous montrons l'application de cette méthode sur des échantillons de données sélectionnées à partir des résultats de simulation en espace libre. Enfin, nous appliquons le krigeage sur des nouveaux jeux de données cette fois-ci obtenus à partir de simulations en présence des réflecteurs.

Une deuxième application, sur des mesures réelles est présentée dans le chapitre 8. Dans la première section, nous décrivons la campagne de mesures. Une simulation avec EMF Visual de ce quartier est présentée dans la deuxième section. Enfin, nous combinons les mesures et les simulations à l'aide du krigeage avec dérive externe dans la troisième section.

Le chapitre 9 est consacré à l'étude de la validité du modèle du variogramme. Des comparaisons sont faites entre les modèles dans deux quartiers voisins d'une part, et deux quartiers éloignés d'autre part.

Une troisième application des méthodes géostatistiques non linéaires est réalisée dans le chapitre 10. Dans ce chapitre nous présentons des applications de ces méthodes pour l'évaluation des probabilités de dépassement de seuil.

Dans les différentes applications, nous travaillons sur la densité de la puissance comme variable d'étude, ce choix est basé sur la forme de l'estimateur de krigeage (combinaison linéaire).

Chapitre 7 : Application 1: Simulation en espace libre

Dans le présent chapitre, nous présentons une application du krigeage sur des données simulées en espace libre. Dans la première section, nous décrivons les données d'exposition radioélectrique, générées à l'aide d'EMF Visual et on calcule les variogrammes expérimentaux. Par la suite, une étude géostatistique concernant les corrélations spatiales des données et les comportements des variogrammes à grandes distances et à l'origine est réalisée.

Dans la seconde section, nous présentons des techniques d'échantillonnage. Dans la troisième section, on présente une application de la méthode du krigeage ordinaire sur les données sélectionnées à partir de données d'espace libre (données simulées par EMF Visual). Enfin, nous montrons les résultats d'application de cette méthode sur des nouveaux jeux de données: échantillons à partir des simulations électromagnétiques en prenant en compte les propriétés diélectriques des réflecteurs.

1) Simulation avec EMF Visual

1.1) Description des données

Pour générer des données, nous avons réalisé des simulations avec le logiciel *EMF Visual* pour deux types de fréquences utilisées par le système GSM : 900MHz et 1800MHz. Pour effectuer ces simulations, on a défini un volume de calcul de taille (400*400*50 m³), et installé dix-huit antennes omnidirectionnelles à des altitudes différentes (entre 14-28m). Le positionnement de ces antennes a été effectué de sorte que l'on trouve une distribution des antennes similaire à une distribution réelle. La simulation est réalisée en espace libre. La Figure 7.1 montre la scène de simulation où les points roses présentes les positions des antennes; les objets (bâtiments, voiture,...) sont des objets décoratifs et leurs propriétés diélectriques ne sont pas prises en compte dans cette simulation, seul le sol a été pris en compte. La quantité obtenue est la densité de puissance exprimée en (W/m²).



Figure 7.1 : Scène de simulation

Sur la Figure 7.3, nous présentons les résultats des simulations pour les deux fréquences 900 MHz et 1800MHz. Ces résultats représentent la densité de puissance calculée sur un plan (xoy) avec $z = 2m$. Ce plan est partitionné en grille régulière de taille $(81*81)$ avec un pas de 5 m (Figure 7.2). La densité de la puissance est évaluée à chaque sommet de la grille.

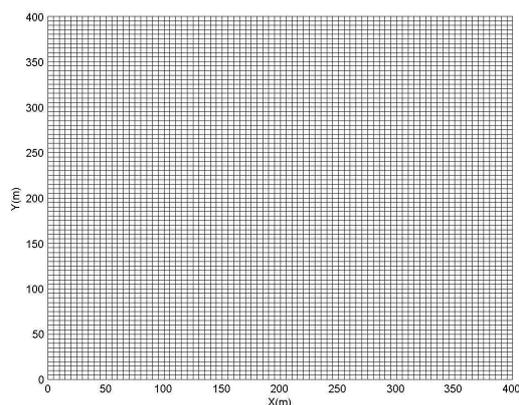


Figure 7.2 : Grille régulière de taille $(81*81)$

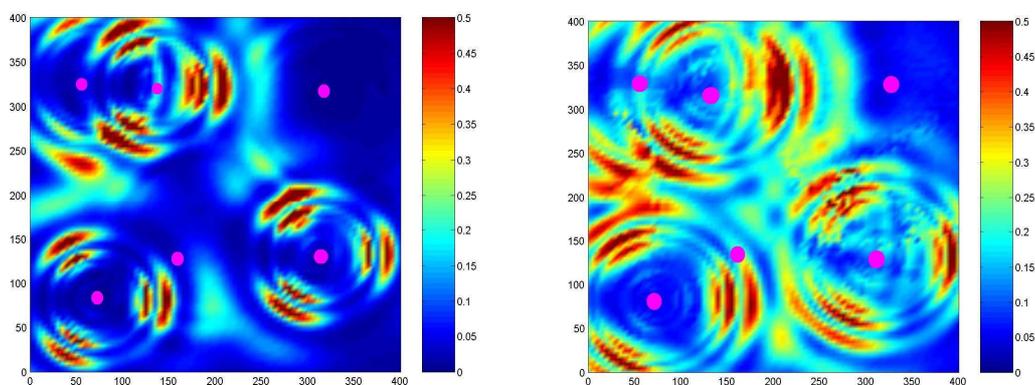


Figure 7.3 : Résultats des simulations avec EMF Visual (W/m^2), à gauche GSM 900MHz et à droite GSM 1800MHz.

1.2) Etude de la corrélation des données

Pour étudier la corrélation des données, la géostatistique utilise la fonction de variogramme qui quantifie la corrélation entre les données par classes des distances. Sur la Figure 7.4, nous avons calculé le variogramme expérimental des données pour chaque fréquence. Les valeurs du variogramme expérimental se stabilisent autour de valeurs de 0.014 et de 0.0125 pour les deux fréquences de respectivement 900 MHz et 1800 MHz. L'existence de ce palier permet de conclure que l'intégralité de la variabilité spatiale a été observée.

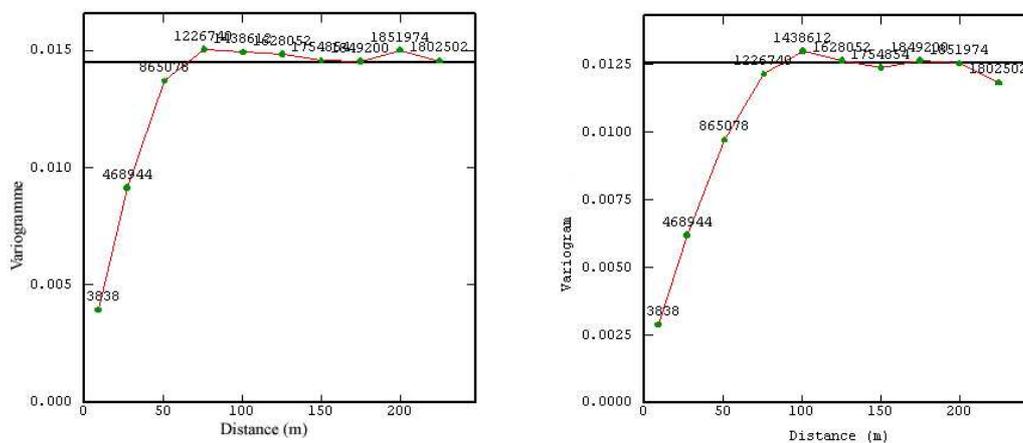


Figure 7.4 : Variogramme à grande distance à gauche 900MHz et à droite 1800MHz

1.2.1) Comportement à l'origine

Nous venons d'examiner le comportement du variogramme à grande distance. Il est également très utile d'étudier son comportement pour de petites valeurs de h , puisqu'il est relié à la continuité et à la régularité spatiale de la variable. La Figure 7.5 illustre les comportements des variogrammes 900MHz et 1800MHz au voisinage de l'origine. Pour les deux fréquences, nous extrapolons vers l'origine en supposant un comportement parabolique, tel qu'il est donné par le modèle de Cauchy de paramètre $p=2$, avec la présence d'une petite structure de portée 15m pour 900MHz et de 18 m pour 1800MHz.

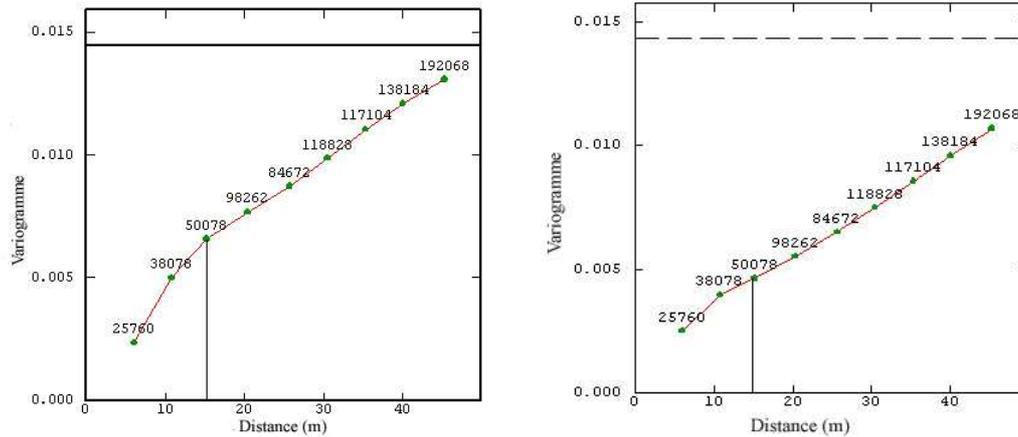


Figure 7.5 : Variogrammes expérimentaux au voisinage de l'origine (à gauche 900MHz et à droite 1800MHz)

1.2.2) Ajustement du variogramme

Pour ajuster ces variogrammes expérimentaux, nous avons utilisé le modèle de variogramme de Cauchy (5.14), ce modèle a été développé par [35] pour les données de magnétisme et de gravimétrie, un autre modèle de variogramme est calculé par [52] pour des données d'électromagnétisme dans un environnement fermé (chambre réverbérante). Sur la Figure 7.6, nous présentons l'ajustement des variogrammes au voisinage de l'origine.

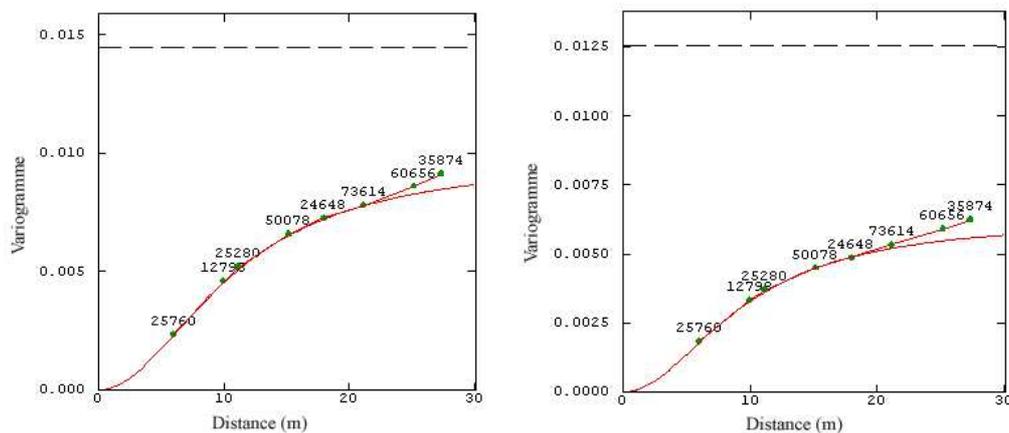


Figure 7.6 : Ajustement du variogramme au voisinage de l'origine : à gauche 900MHz et à droite 1800 MHz.

Dans le deux cas étudiés, nous avons ajusté chaque variogramme expérimental par un modèle de Cauchy. Pour les deux fréquences, nous avons un comportement particulier de la densité de la puissance sur un voisinage local, qui peut être représenté par un

disque de rayon 20m. Dans ce disque nous avons des petites variations d'exposition, qui peuvent s'expliquer par les présences des petites zones homogènes dues à l'interférence d'exposition des antennes. Ces zones homogènes normalement seront plus larges dans le cas de la présence d'obstacles à cause des phénomènes de réflexions et diffractions multiples sur ces obstacles, ce qui sera examiné dans la dernière section de ce chapitre. Sur la Figure 7.7, nous présentons l'ajustement des variogrammes à grande distance. Chacun des modèles à été ajusté par un double structure de Cauchy; une petite structure pour la modélisation de la variation à petite distance, la portée de cette petite structure étant de 15 m et 22 m respectivement pour 900 MHz et 1800MHz, et une structure de Cauchy de longue portée, de 116m et 153m respectivement pour les deux fréquences. Nous avons fait varier la puissance p du modèle pour bien ajuster les modèles expérimentaux; dans les deux cas, nous arrivons à un ajustement avec une puissance $p = 2$.

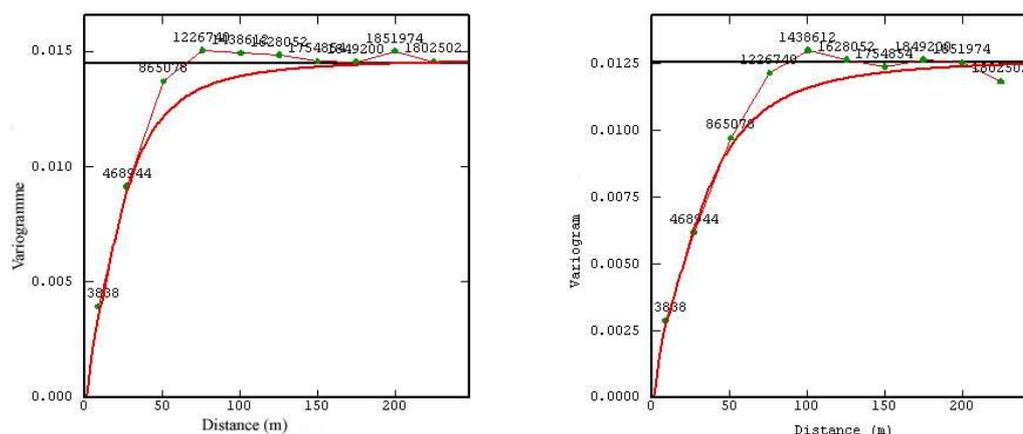


Figure 7.7 : Ajustement du variogramme par deux modèles de Cauchy (à gauche GSM 900MHz et à droite GSM 1800MHz).

Fréquences	Modèle	Portée	Palier
GSM 900MHz	Modèle 1	116 m	0.0120
	Modèle 2	15 m	0.0026
GSM 1800MHz	Modèle 1	153 m	0.0102
	Modèle 2	21 m	0.0026

Tableau 7.1 : Paramètres des modèles d'ajustements avec une puissance $p = 2$.

2) Techniques d'échantillonnage

Dans cette section, nous présentons des techniques d'échantillonnage dans le plan. Celles-ci consistent à sélectionner N points dans IR^2 . Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage possibles, parmi ces méthodes nous considérons uniquement celles qui font intervenir les trois dispositifs fondamentaux suivants :

- Echantillonnage aléatoire simple,
- Echantillonnage systématique,
- Echantillonnage aléatoire stratifié.

Nous décrivons ces trois dispositifs en considérant un carré Q d'origine O , de côtés parallèles aux axes (O, x) et (O, y) , de largeur L .

2.1) Echantillonnage aléatoire pur

L'échantillonnage aléatoire simple (EAS) consiste à prélever au hasard et de façon indépendante N points dans Q , chaque point ayant la même probabilité d'inclusion dans l'échantillon, et chaque échantillon de taille N ayant la même probabilité de sélection. En pratique, il suffit de tirer deux nombres aléatoires U_i et U'_i uniformément répartis dans $[0, 1]$, puis de sélectionner le point (x_i, y_i) tel que $x_i = U_i L$ et $y_i = U'_i L$, en répétant cette procédure pour $i=1, \dots, N$. Le dispositif aléatoire simple présente l'inconvénient de sur-échantillonner ou de sous échantillonner certaines régions de Q puisque les points ne sont pas répartis de façon régulière (Figure 7.8).

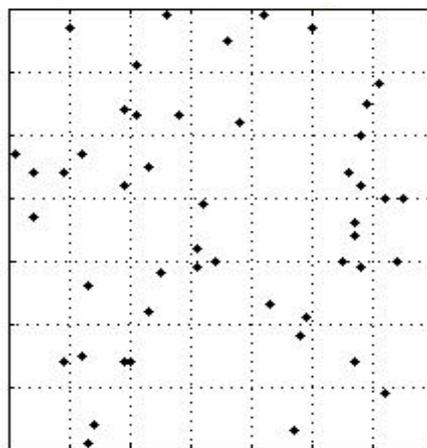


Figure 7.8 : Echantillonnage aléatoire simple

2.2) Echantillonnage systématique

L'échantillonnage systématique (ES) consiste à tirer au hasard un point origine (x_1, y_1) dans un sous domaine de Q (Figure 7.9), puis à tirer de façon systématique tous les autres points à partir de (x_1, y_1) . Considérons l'ES de taille N constitué par une grille de maille d'origine O de côté $\alpha = L/\sqrt{N}$. Le point (x_1, y_1) est tiré au hasard dans la maille d'origine O de côté α selon la procédure de l'EAS, puis les points (x_i, y_i) sont obtenus de façon non indépendante en prenant $x_i = x_1 + (i-1)\alpha$ et $y_j = y_1 + (j-1)\alpha$ pour $i, j = 1, \dots, \sqrt{N}$.

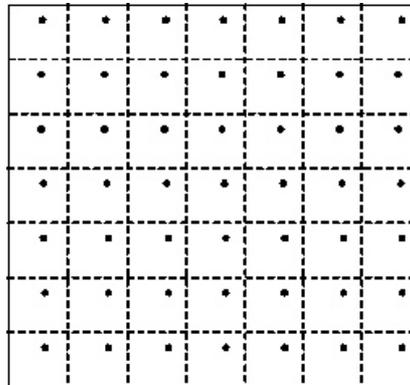


Figure 7.9 : Echantillonnage systématique.

2.3) Echantillonnage stratifié

L'intention de la stratification est de combiner les avantages respectifs de l'ES et de l'EAS en assurant à la fois une répartition assez régulière des points dans Q , afin d'éviter les agrégats, et un bon échantillonnage de la distribution des distances entre les points. La théorie de l'échantillonnage stratifié (STR) est légèrement plus compliquée que celle de l'EAS. Il existe deux critères pour définir les strates :

1. le découpage géométrique de l'espace en polygones contigus, éventuellement de même taille,
2. le découpage fondé sur une connaissance préalable des données.

L'échantillonnage stratifié consiste alors à partitionner Q en strates et à tirer un EAS, indépendamment au sein de chaque strate. Le découpage régulier de Q peut s'effectuer

dans IR^2 , i.e. par des hexagones, des carrés ou des triangles équilatéraux. Pour simplifier, nous considérons uniquement le découpage par des carrés parce qu'il est utilisé de façon quasi-universelle. Dans le cas particulier d'un STR à un point par strate, il suffit de découper Q en N mailles carrées de côtés $\alpha = L/\sqrt{N}$ et de tirer les n points de l'échantillon selon la procédure de l'EAS appliquée indépendamment à chaque maille. Les points (x_{ij}, y_{ij}) sont donc tels que $x_{ij} = [(i-1) + U_{ij}] \alpha$ et $y_{ij} = [(j-1) + U'_{ij}] \alpha$ pour $i, j = 1, \dots, \sqrt{N}$, avec U_{ij} et U'_{ij} deux nombres aléatoires uniformément répartis dans $[0,1]$ (Figure 7.10).

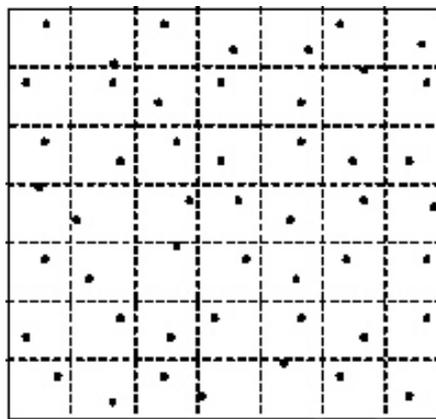


Figure 7.10 : Echantillonnage aléatoire stratifié.

3) Krigeage en espace libre

3.1) Description des données

A partir des données exhaustives de GSM 900 et 1800MHz, présentées dans la section précédente, nous avons réalisé un échantillonnage stratifié. Deux échantillons ont été sélectionnés pour chacune de ces fréquences. Le premier échantillon est de taille 400 points en utilisant un pas d'échantillonnage $\alpha = 20m$.

3.2) Ajustement du variogramme

Une fois que le variogramme expérimental des données sélectionnées a été construit, nous avons ajusté ce variogramme par un modèle de Cauchy dans les deux cas étudiés (Figure 7.11), le Tableau 7.2 résume les paramètres d'ajustement.

Fréquences	Modèle	Portée	Palier
GSM 900MHz	Cauchy 1	89 m	0.0125
	Cauchy 2	16 m	0.0013
GSM 1800MHz	Cauchy 1	96 m	0.0120
	Cauchy 2	23 m	0.0006

Tableau 7.2 : Paramètres des modèles en espace libre, avec $p = 2$.

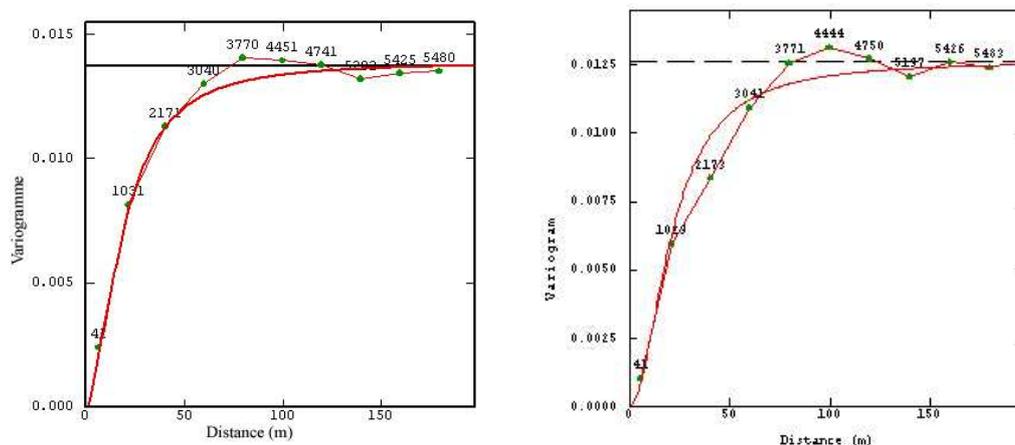


Figure 7.11 : Variogrammes omnidirectionnels, à gauche 900MHz et à droite 1800MHz.

On remarque que les deux variogrammes se stabilisent autour d'une valeur voisine de 0.0138 et 0.0126 pour les deux fréquences (900 et 1800MHz). Ces valeurs sont proches des paliers des variogrammes des données exhaustives présentés dans la section précédente.

3.3) Validation du modèle de variogramme

Une fois le modèle de variogramme déterminé, la procédure de validation croisée permet de comparer l'impact du choix du modèle sur les résultats de l'estimation. La validation croisée consiste à supprimer successivement chacune des données pour l'estimer ensuite par krigeage à partir des autres. Cette technique permet notamment :

- D'étudier la sensibilité des estimations aux paramètres du modèle;
- D'évaluer l'ordre de grandeur des erreurs pour l'estimation ponctuelle. En effet, la variance de krigeage fournie par le modèle n'est pas directement transposable en intervalle de confiance, et sa validité dépend de la qualité de l'ajustement pour la

zone estimée. L'histogramme expérimental des erreurs standardisées (erreur divisée par l'écart-type de krigeage) peut permettre de valider l'hypothèse de normalité des erreurs d'estimation.

Cette opération, menée pour tous les points pris un à un, permet de comparer l'erreur d'estimation expérimentale (différence entre la valeur ré-estimée par krigeage et la valeur réelle mesurée) et l'erreur d'estimation due au modèle de variogramme à travers le calcul des expressions suivantes :

- Moyenne de l'erreur : $m_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z^*(s_i) - Z(s_i))$
- Variance de l'erreur : $\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z^*(s_i) - Z(s_i))^2$
- Moyenne de l'erreur standardisée : $\hat{m}_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Z^*(s_i) - Z(s_i)}{\hat{\sigma}_i} \right)$
- Variance de l'erreur standardisée : $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Z^*(s_i) - Z(s_i)}{\hat{\sigma}_i} \right)^2$

La moyenne de l'erreur, qui doit être voisine de zéro, permet de vérifier si le krigeage est effectivement non-biaisé. La variance de l'erreur standardisée, qui doit se rapprocher de 1, correspond au rapport entre les variances expérimentale et théorique de krigeage. Elle permet de vérifier que les erreurs de krigeage sont cohérentes avec la variance calculée. Les points s_i pour lesquels l'erreur standardisée $\frac{(Z^*(s_i) - Z(s_i))}{\hat{\sigma}_i}$ est comprise dans l'intervalle [-2.5 ; 2.5] (par analogie au cas de la loi normale centrée réduite, où cet intervalle contient 95% des valeurs) sont dits «robustes» (par abus de langage).

Dans cette partie, nous comparons par validation croisée la qualité de l'estimation pour les deux fréquences. Les résultats de la validation croisée sont donc présentés dans la Figure 7.12; l'erreur est calculée comme la différence entre le niveau de l'exposition mesurée et son estimation.

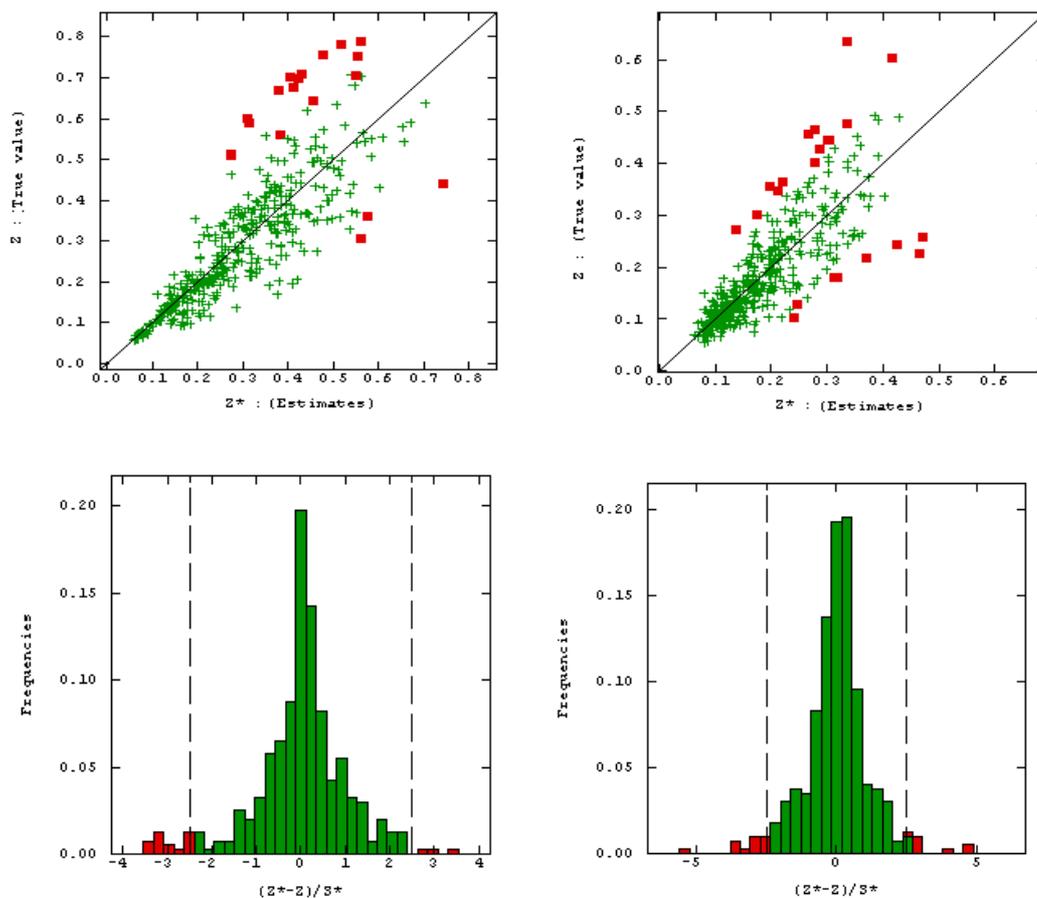


Figure 7.12 : Résultats de validation croisées : à gauche $f=900\text{MHz}$, à droite $f=1800\text{MHz}$.

Dans le Figure 7.13, nous présentons en rouge les points pour lesquels l'erreur d'estimation est supérieure à 5%. Nous remarquons que ces points se trouvent aux endroits des valeurs élevées de la densité de la puissance.

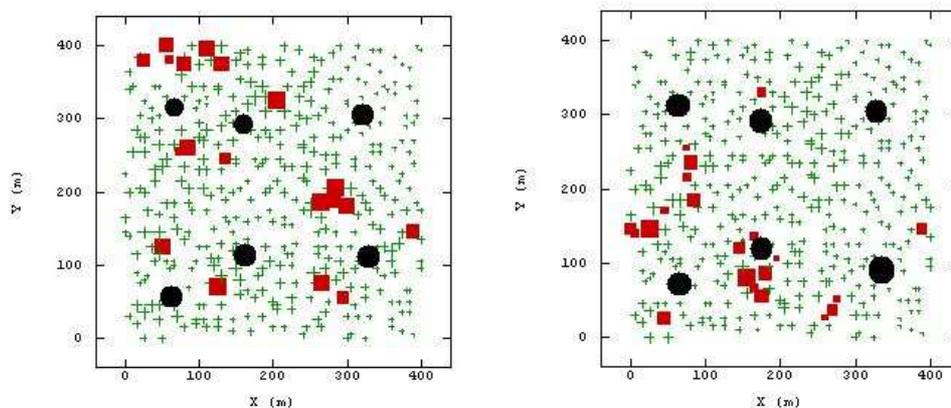


Figure 7.13 : Les endroits d'erreurs de validation croisée, à gauche $f=900\text{MHz}$, à droite $f=1800\text{MHz}$.

3.3.1) Comparaison entre modèle de Cauchy et modèle cubique

Une comparaison entre l'ajustement par modèle de Cauchy et l'ajustement par modèle cubique a été réalisée. Le Tableau 7.3 reprend les valeurs des expressions précédentes obtenues par validation croisée sur la densité de la puissance pour les deux modèles.

Modèle	Fréquence	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Données Robustes
Modèle de Cauchy	900 MHz	0.0056	1.078	0.0064	381 / 400
	1800 MHz	-0.00098	1.281	0.0058	374 / 400
Modèle cubique	900 MHz	0.0048	1.118	0.0069	377 / 400
	1800 MHz	-0.00108	1.373	0.0062	367 / 400

Tableau 7.3 : Comparaison des résultats statistiques de la validation croisée pour les deux modèles de variogrammes.

Ces résultats statistiques montrent que pour les deux modèles la condition de non-biais semble vérifiée puisque la moyenne des erreurs standardisée est faible (pour le GSM 900MHz) elle est égale à 0.0056 dans le cas du modèle de Cauchy et à 0.0048 pour le modèle cubique. Pour le modèle de Cauchy, l'écart type de l'erreur standardisée est de 1.078 pour la fréquence 900MHz et de 1.281 pour 1800MHz, signe que l'erreur de krigeage expérimentale est presque identique à l'erreur théorique pour le service 900MHz et avec un écart plus important entre les deux erreurs dans le cas de GSM 1800 MHz. Pour le modèle cubique, les écarts types de l'erreur standardisée, plus élevés, montrent une erreur de krigeage plus importante que prévue. En terme d'erreur quadratique moyenne, nous avons une erreur quasi-nulle pour les deux modèle et pour les deux fréquences, avec une petite différence à l'avantage du modèle de Cauchy. De plus, sur 400 points krigés, 381 pour 900MHz et 373 pour 1800MHz sont robustes pour le modèle de Cauchy contre 368 pour 900 MHz et 360 pour 1800 MHz pour le modèle cubique. Cette procédure de validation croisée indique une bonne adéquation entre le modèle de variogramme de Cauchy et les valeurs expérimentales de densité de la puissance, et une bonne qualité d'estimation avec le modèle cubique. Cette qualité d'estimation des deux modèles est due au comportement parabolique similaire des deux modèles au voisinage de l'origine.

3.3.2) Évaluation de la performance du modèle

Pour évaluer l'effet de la taille du jeu de données sur cette adéquation du modèle, nous avons réalisé une comparaison entre les deux modèles sur un échantillon de taille 64. Les résultats de cette comparaison sont montrés dans le Tableau 7.4. Pour le modèle de Cauchy, les moyennes standardisées restent très faibles (0.005), pour les écarts types

nous avons toujours une erreur de krigeage expérimentale presque identique à l'erreur théorique pour le service 900MHz et l'écart devient plus important entre les deux erreurs dans le cas du GSM 1800 MHz (1.459).

Pour le modèle cubique, la moyenne d'erreur standardisée est devenue trois fois plus grande pour le service 900MHz (0.0107 contre 0.0048 pour l'échantillon de taille 400) et une croissance importante est détectée aussi pour le 1800MHz (0.0197 contre - 0.0018 pour l'échantillon de taille 400). Nous remarquons une augmentation d'écarts types de l'erreur standardisée, ce que signifie une erreur de krigeage plus importante que prévue par le modèle. Alors que pour l'erreur quadratique moyenne reste très faible en particulier pour le modèle de Cauchy. Ces résultats confirment l'adéquation du modèle de Cauchy, et qu'il est moins sensible à la taille de l'échantillon de données.

Modèle	Fréquence	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Données robustes
Modèle de Cauchy	900 MHz	0.0055	1.071	0.0156	60 / 64
	1800 MHz	0.0059	1.459	0.0169	60 / 64
Modèle Cubique	900 MHz	0.0107	1.157	0.0164	60 / 64
	1800 MHz	0.0197	1.848	0.0192	60 / 64

Tableau 7.4 : Comparaison des résultats statistiques de la validation croisée pour les deux modèles de variogrammes.

3.4) Résultats du krigeage

Les résultats d'interpolation à partir des 400 données de niveau d'exposition (plan $Z = 2m$) obtenus à l'aide du krigeage ordinaire sont présentés dans la Figure 7.14. On constate que cette méthode d'interpolation débouche sur une représentation réaliste du niveau d'exposition radioélectrique. Cela se remarque sur le rehaussement des niveaux d'exposition au voisinage des antennes.

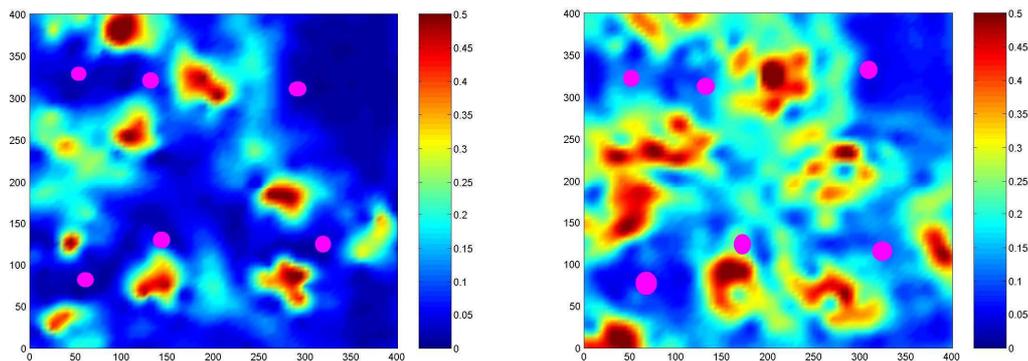


Figure 7.14 : Résultats de krigeage : à gauche $f = 900MHz$, à droite $f = 1800 MHz$.

Les cartes d'écart-types de krigeage permettent de quantifier l'incertitude associée à chaque carte en plus de l'analyse de validation croisée présentée dans le paragraphe précédent.

Un écart type de krigeage élevé indiquera une valeur interpolée incertaine (Figure 7.15). A l'inverse, un écart type de krigeage faible indiquera une valeur interpolée en moyenne proche des observations et une bonne précision de la cartographie.

Dans la Figure 7.16, nous présentons les cartes d'erreur expérimentale, les résultats de calcul de la différence entre les données réelles (Figure 7.3) et les résultats d'estimation par krigeage (Figure 7.14). Nous remarquons que la méthode du krigeage est sensible au voisinage des antennes, ce qui s'explique par la variabilité rapide du niveau d'exposition.

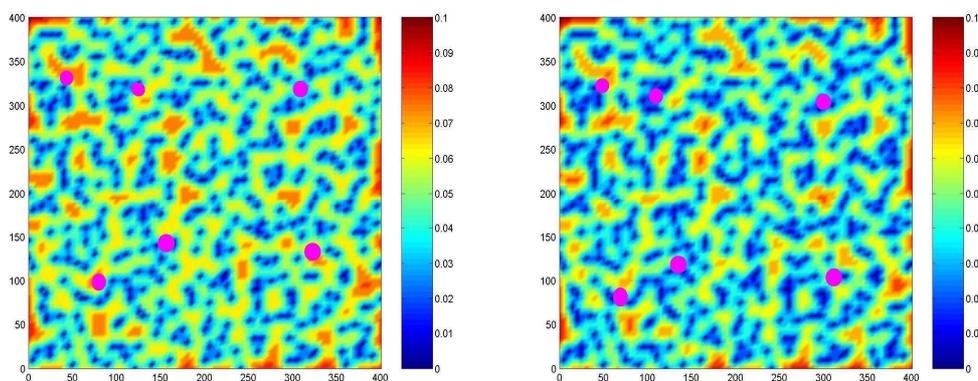


Figure 7.15: Ecarts-types du krigeage : à gauche $f = 900MHz$, à droite $f = 1800 MHz$.

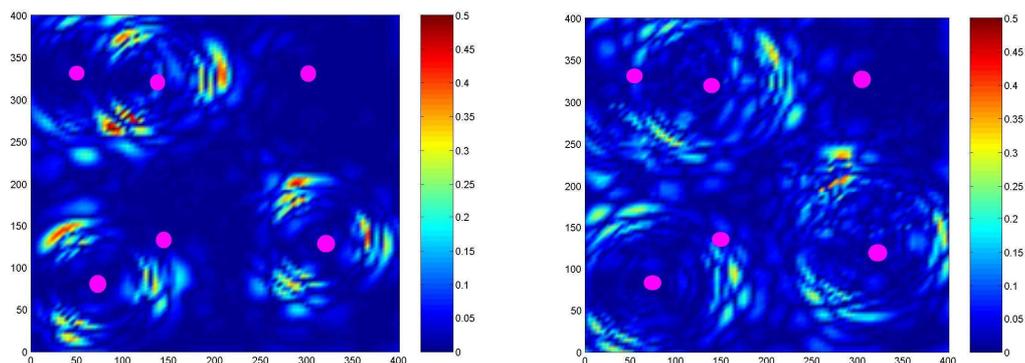


Figure 7.16 : Cartes des différences : à gauche $f = 900\text{MHz}$, à droite $f = 1800\text{MHz}$.

4) Krigeage en présence de réflecteurs

Dans cette section, nous avons ajouté dans notre volume de calcul des obstacles, pour avoir l'effet des bâtiments sur la corrélation spatiale de données. Nous avons installé 32 réflecteurs avec des directions différentes dans le volume de calcul précédent. Pour tous ces réflecteurs nous avons utilisé des constants diélectriques différents (entre 2.3-3). La Figure 7.17 montre les résultats de ces simulations.

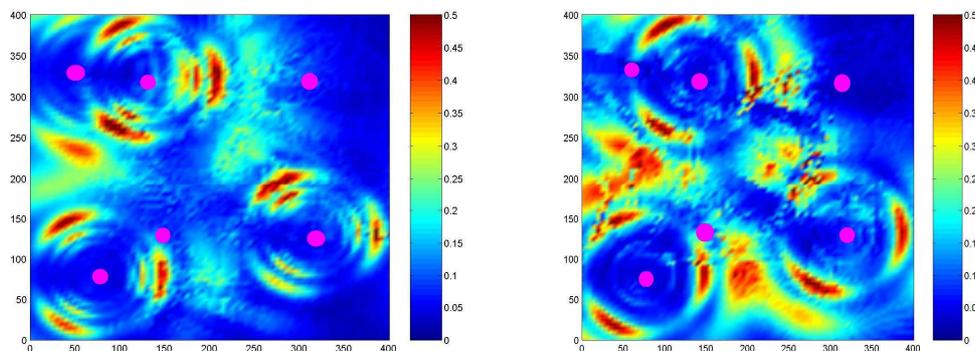


Figure 7.17 : Résultats des simulations avec réflecteurs à gauche $f = 900\text{MHz}$ et à droite $f = 1800\text{MHz}$

4.1) Variogramme à l'origine

Sur la Figure 7.18, nous montrons le variogramme pour le deux services 900MHz et 18000MHz. On constate la présence de petites structures de taille 31 m et 25 m respectivement pour 900 MHz et 1800 MHz, contre 15 m et 12 m dans le cas d'espace libre. Ce qui confirme le lien entre cette petite structure avec les variations locales des données dues à la présence des zones homogènes.

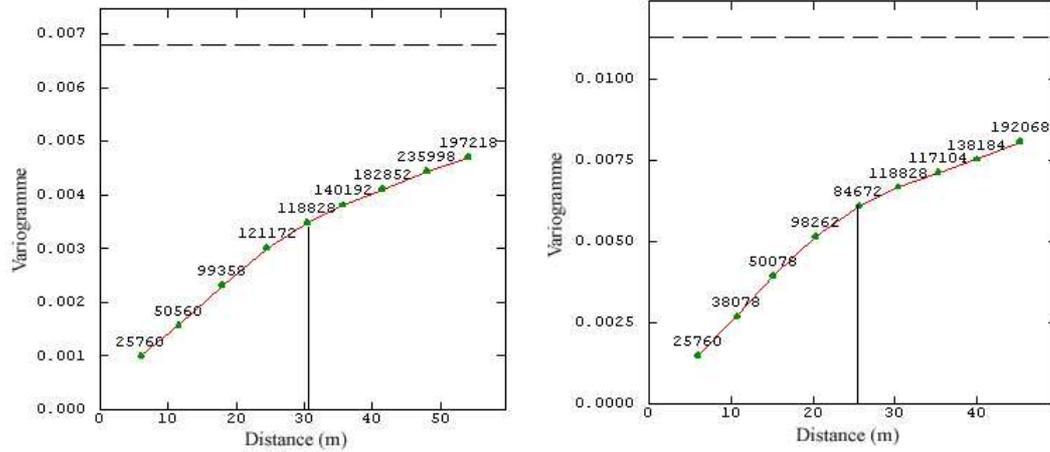


Figure 7.18 : Variogramme a l'origine en présence des réflecteurs, à gauche 900MHz et à droite 1800MHz

4.2) Ajustement du variogramme

Après avoir réalisé des simulations, nous avons sélectionné des échantillons de taille 400 observations. Une étude géostatistique a été effectuée sur ces données, sur la Figure 7.19, nous avons calculé les variogrammes expérimentaux et nous avons ajusté ces variogrammes expérimentaux par des modèles de Cauchy, les paramètres de ces modèles ont présentés dans le Tableau 7.5.

Fréquence	Modèle	Portée (m)	Palier
900 MHz	Modèle de Cauchy 1	116	0.0078
	Modèle de Cauchy 2	23	0.0013
1800 MHz	Modèle de Cauchy 1	102	0.0116
	Modèle de Cauchy 2	26	0.0005

Tableau 7.5 : Paramètres des modèles en présence de réflecteurs

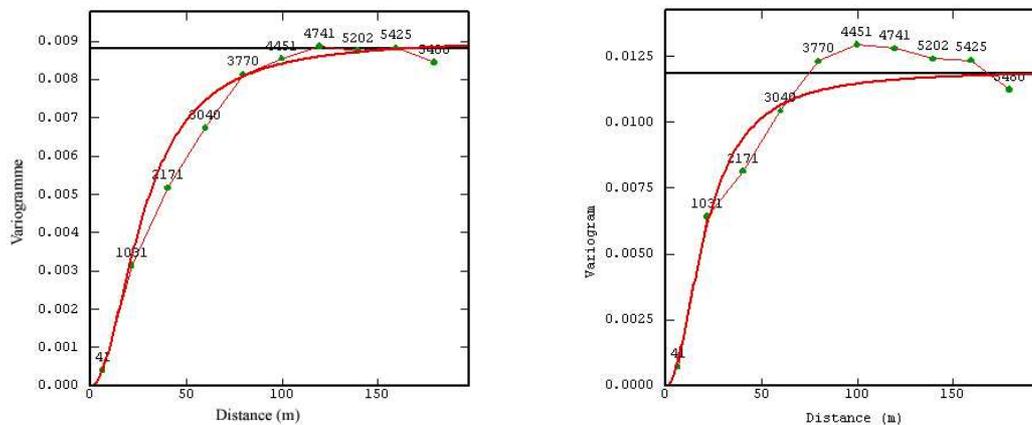


Figure 7.19 : Variogrammes omnidirectionnels, (à gauche $f = 900$ MHz, à droite $f = 1800$ MHz).

Par comparaison entre ces modèles et ceux en espace libre (Figure 7.11), on peut remarquer que les paliers des modèles en présence des réflecteurs sont inférieurs à ceux en espace libre (0.0138 en espace libre contre 0.0088 en présence des réflecteurs). Ceci s'explique par la présence des zones homogènes dans les résultats de simulations liées aux phénomènes de diffraction et réflexion des ondes.

4.3) Validation du modèle

Dans la section précédente, nous avons montré que le modèle de Cauchy arrive à bien ajuster les variogrammes expérimentaux. Nous avons évalué l'impact de ce modèle sur les résultats d'estimation de la densité de la puissance en présence des réflecteurs, en utilisant la procédure de validation croisée. Sur la Figure 7.20, nous montrons les résultats de cette procédure pour les deux fréquences.

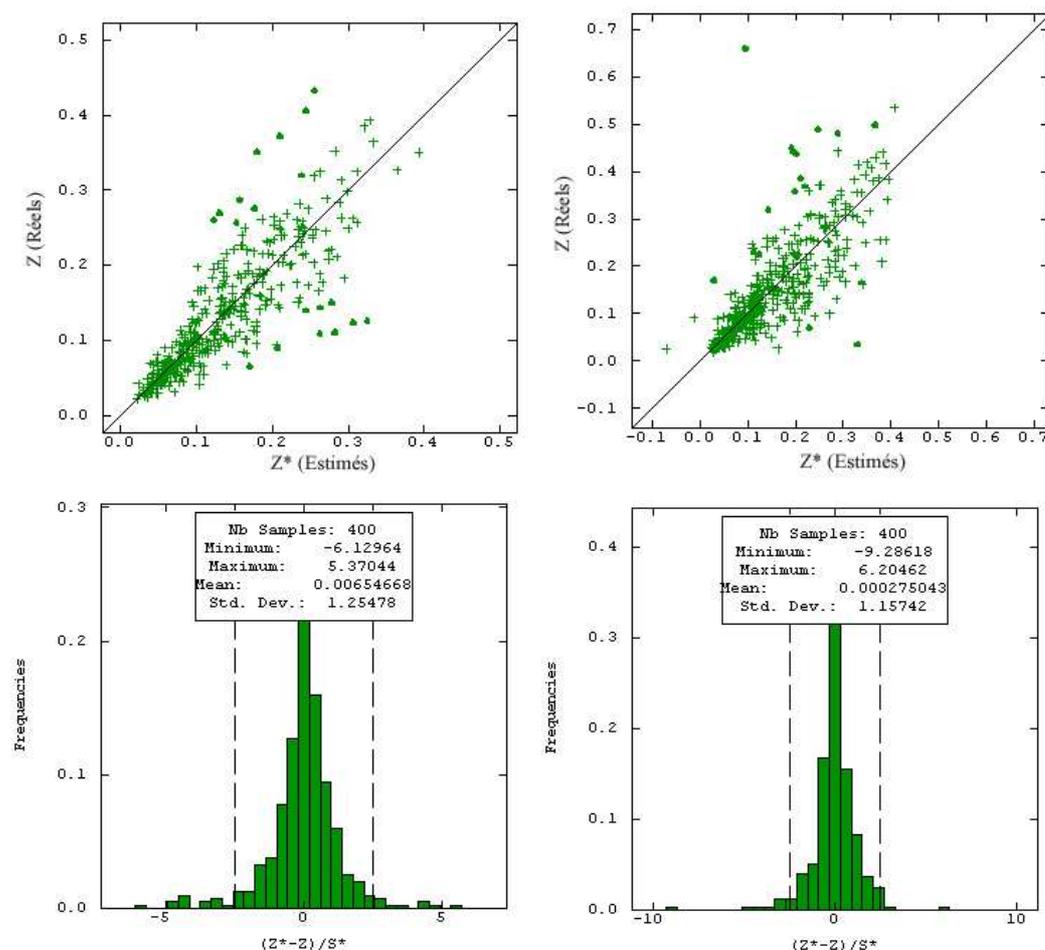


Figure 7.20 : Résultats de validation croisée en présence des réflecteurs, (à gauche $f = 900\text{MHz}$ et à droite $f = 1800\text{MHz}$).

Modèle	Fréquence	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Données robustes
Modèle de Cauchy	900 MHz	0.0065	1.2547	0.0023	380 / 400
	1800 MHz	0.0002	1.1574	0.0048	385 / 400

Tableau 7.6 : Statistiques de validation croisée en présence des réflecteurs. Ces résultats statistiques montrent que la condition de non-biais semble vérifiée puisque la moyenne des erreurs standardisée est faible égale à 0.0065 pour le GSM 900MHz et 0.0002 pour 1800MHz. Au niveau d'écart type de l'erreur standardisée, nous avons un écart entre l'erreur expérimentale et l'erreur théorique de l'ordre 1.25 pour le 900MHz et 1.15 pour 1800 MHz, cette écart n'a pas une grande influence sur la robustesse du modèle, en effet, sur les 400 observations, nous avons 380 points robustes et l'erreur ne dépasse pas 5% pour le service 900 MHz et 385 pour le 1800MHz. Pour l'erreur quadratique moyenne, nous avons des valeurs plus petites que ceux d'espace libre, ce qui est expliqué par les phénomènes physiques (diffraction et réflexion) produites par la présence de réflecteurs.

4.5) Résultats du krigeage

La Figure 7.21 illustre le résultat de l'estimation du niveau d'exposition par krigeage ordinaire et toutes les estimations des niveaux d'exposition sont données en W/m^2 . Pour évaluer l'erreur d'estimation, nous avons calculé la différence entre les résultats du krigeage et les données de simulations (Figure 7.17). Nous constatons que l'erreur d'estimation quasi-nulle dans 80% des données (Figure 7.22). Seules des erreurs de l'ordre de $0.2 W/m^2$ apparaissent dans les zones de forte densité de puissance.

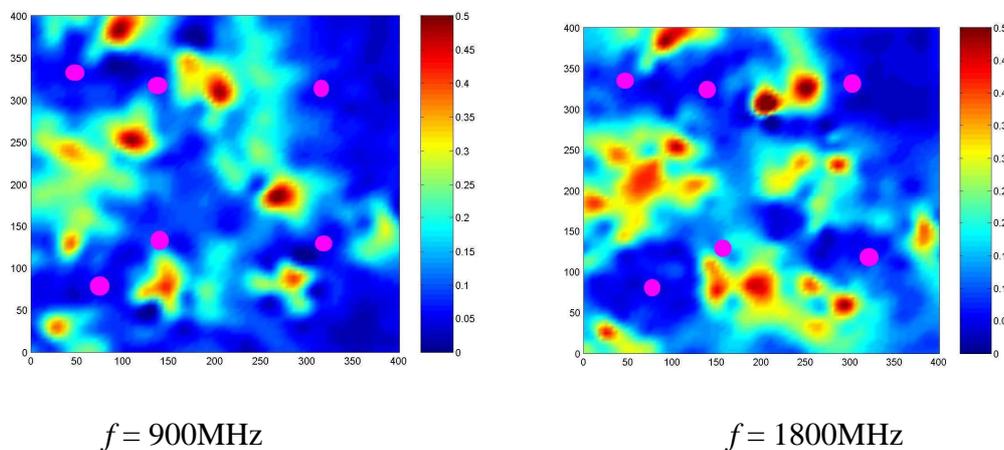


Figure 7.21 : Résultats de krigeage avec réflecteurs

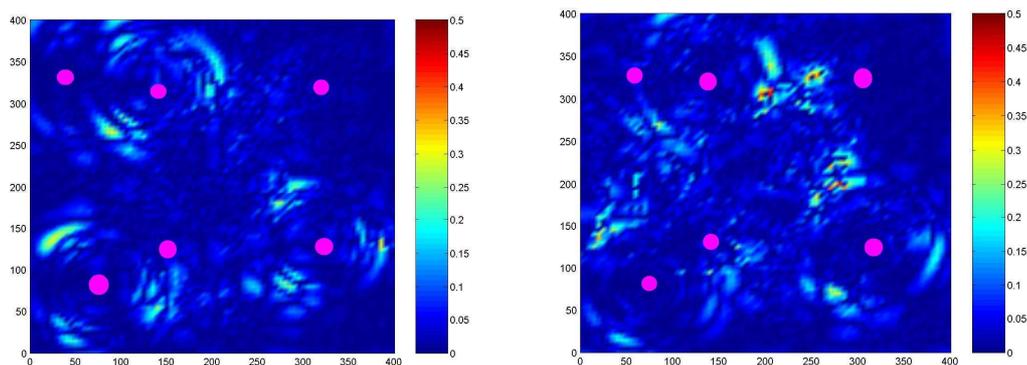


Figure 7.22: Cartes de différences entre résultats du krigeage avec réflecteurs et les résultats des simulations, (à gauche $f = 900\text{MHz}$, à droite $f = 1800\text{MHz}$).

5) Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les données des simulations en espace libre avec le logiciel d'EMF Visual. La première section est consacrée au calcul du variogramme expérimental des données exhaustives, et à l'étude du comportement à grande distance, en remarquant une stabilité de ce variogramme autour de son palier, avec une régularité au voisinage de l'origine. Dans la deuxième section, nous avons étudié la corrélation spatiale des données radioélectriques pour les deux fréquences 900MHz et 1800MHz, sur un ensemble de données sélectionnées par un échantillonnage stratifié à partir de données exhaustives.

L'ajustement des variogrammes a été fait par une double structure de Cauchy. Dans le deux cas étudiés, ce modèle arrive à bien ajusté le variogramme expérimental. En termes d'erreur, on peut remarquer que l'erreur inférieure à 5% pour 90% des données. L'ajustement par modèle Cubique prouve aussi une bonne qualité d'estimation, ce qui nous permet de dire que finalement ce qui compte est le comportement du variogramme au voisinage de l'origine et à grande distance (car ces deux modèles ont le même comportement au voisinage de l'origine et à grande distance). Les points où l'erreur dépasse 5% ont été enregistrés dans des zones de fortes valeurs de densité de puissance ; ceci est dû à un effet de lissage du krigeage. En termes de variance, on constate que le palier de données de simulation avec réflecteurs est inférieur à celles d'espace libre, ceci est dû aux diffractions des ondes par ces réflecteurs de sorte que nous avons des zones homogènes.

Chapitre 8 : Application 2 : Mesures d'exposition à l'extérieur des bâtiments

Dans le présent chapitre, nous montrons une application de la méthode du krigeage avec dérive externe sur des données réelles. Dans la première section, nous présentons deux campagnes de mesures réalisées dans le quartier Latin de Paris. Une simulation avec EMF Visual de ce quartier sera présentée dans la seconde section. Les coefficients diélectriques des obstacles de ce quartier sont affectés d'une manière aléatoire. Dans la troisième section, nous montrons une combinaison des mesures et les simulations obtenues par EMF. La combinaison est faite par krigeage avec dérive externe, où les simulations sont utilisées comme dérive externe.

1) Mesures

1.1) Première campagne

Nous avons choisi un quartier de Paris (boulevard Saint Germain) pour réaliser des campagnes de mesures. La première campagne a été réalisée en utilisant le premier système de mesure présenté dans le chapitre 4. Dans l'annexe, nous décrivons cette campagne de mesures et les méthodes utilisées. Dans cette campagne, nous avons réalisé 43 points de mesures avec deux méthodes différentes.

Pour la première méthode, nous mesurons vingt valeurs du champ électrique en chaque point, pour les deux bandes de fréquences (900/1800MHz) et pour les trois voies de l'antenne de mesures en même temps. Le temps nécessaire pour faire ces vingt mesures en moyenne était 1min25s. Pour avoir une idée de la variation spatio-temporelle du champ et pour calculer les moyennes en chaque position, on réalise des mesures en deux points voisins (distants de 50 cm). Le temps de mesure pour chaque point était 6 minutes en moyenne. En suivant cette démarche, nous avons réalisé des mesures en 23 points distincts. Le nombre de mesures a été contraint par le blocage de la circulation automobile et les temps de mesure longs qui caractérisent cette méthode.

Pour pouvoir réaliser plus de mesures, nous avons utilisé une deuxième méthode. Elle consiste à sélectionner un trajet sur lequel réaliser des mesures instantanées. Le trajet est subdivisé en dix étapes ; en chaque point de fin d'étape on a récupéré le temps de passage à ce point et les niveaux du champ électrique. Nous avons réalisé six parcours du trajet (un parcours pour chaque voie de l'antenne de mesure et trois parcours pour chaque service 900MHz et 1800MHz) (Annexe A, Figure A.4). Ce mécanisme nous a permis de sélectionner vingt points de mesure complémentaires avec une incertitude sur les positions de ces mesures.

1.2) Deuxième campagne

A cause des incertitudes sur les mesures de la première campagne de mesure et les contraintes du matériel utilisé, empêchant un bon échantillonnage des petites ruelles, une deuxième campagne de mesure a été réalisée dans le même quartier avec le dosimètre personnel. L'ordre des 220 mesures réalisées pour les différentes bandes de fréquence est montré sur la Figure 8.1. Sur cette figure, nous présentons les niveaux du champ électrique pour les services FM, TV, GSM, DCS et UMTS ou l'indice rx signifie le champ émis par des stations de base et l'indice tx les niveaux du champ émis par les téléphones. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'exposition radioélectrique liée aux émissions des stations de base de GSM dans la bande des 900 MHz, c'est-à-dire GSM rx .

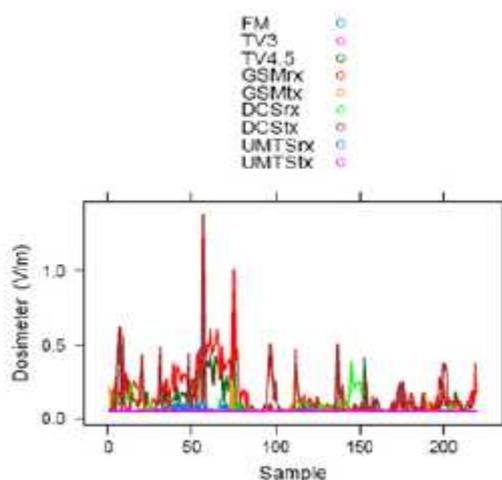


Figure 8.1 :L'exemple de 220 mesures (durée de prélèvement = 10s) prélevées avec le dosimètre le long des rues dans un Quartier à Paris.

L'histogramme des 220 valeurs de la densité de la puissance est montré sur la Figure 8.2. La queue a été colorée en bleu et on peut noter trois valeurs du côté droit, que nous pouvons qualifier d'outliers. La localisation géographique des 220 échantillons peut être

vus sur la Figure 8.3. Les symboles sont proportionnels en taille aux valeurs de l'exposition de GSM 900MHz mesurées à chaque endroit. Les endroits correspondant aux valeurs qui se situent dans la queue de l'histogramme sont représentés en bleu.

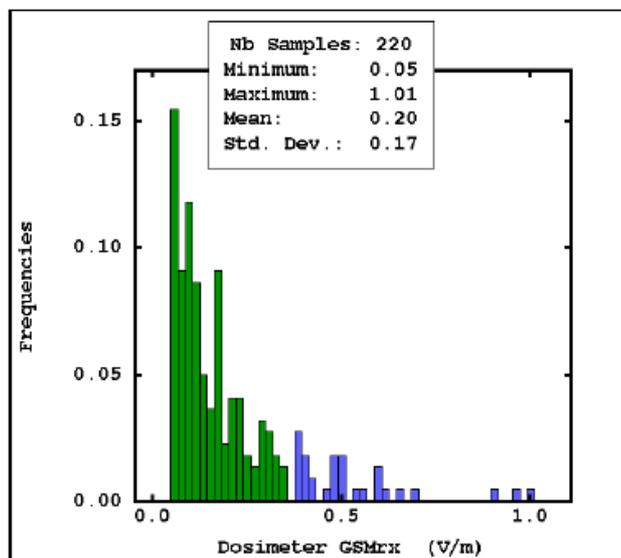


Figure 8.2 : Histogramme des données de GSM 900MHz de dosimètre ; la queue est colorée en bleu. Il y a 3 "outliers" du côté droit.

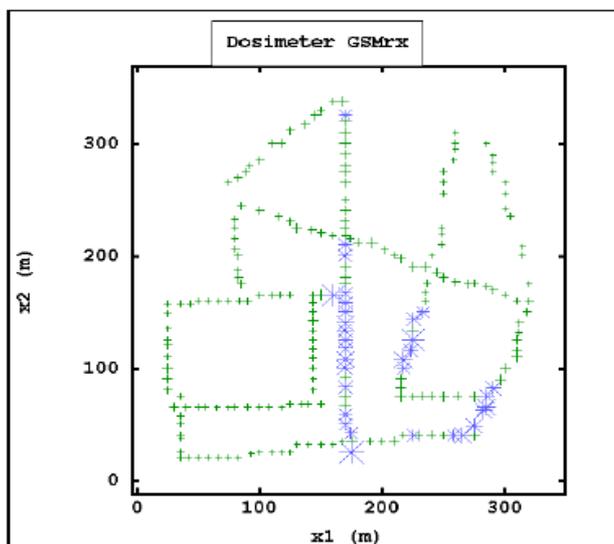


Figure 8.3 : Carte des endroits de prélèvement des données de GSM 900MHz de dosimètre dans le Quartier latin; Les endroits en bleu correspondent aux valeurs dans la queue de l'histogramme ; les tailles des symboles sont proportionnelles aux valeurs. Deux des 3 "outliers" sont à côté des valeurs basses.

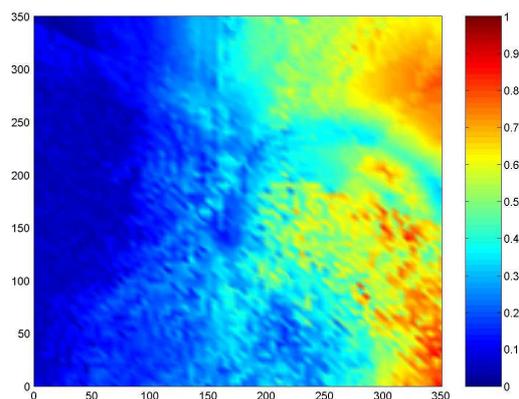


Figure 8.5 : Le champ produit avec EMF Visual à l'aide des positions connues des antennes et des réflecteurs, plaçant des valeurs probables pour leurs caractéristiques.

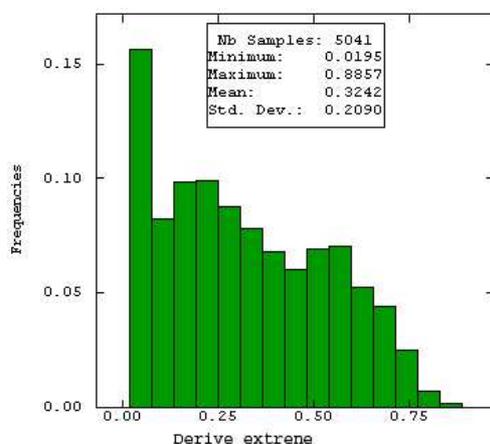


Figure 8.6 : Histogramme des valeurs GSM 900MHz simulées avec EMF Visual.

3) Combinaison des mesures et simulation

Si une variable auxiliaire est connue en tout point de la grille d'interpolation, elle peut être utilisée en géostatistique non stationnaire, comme un descripteur de la tendance générale que peut suivre le comportement de la densité de la puissance. La modélisation non stationnaire, sur laquelle est basée le krigeage avec dérive externe, suppose que la moyenne de la densité de puissance est localement une fonction linéaire de la dérive externe. Cette dérive étant variable dans l'espace, la moyenne n'est pas constante dans l'espace ; on modélise donc notre simulation comme une variable non stationnaire.

La validation d'une relation entre les mesures et la simulation passe par l'analyse de nuages de corrélation et par des statistiques bivariées (Figure 8.7). La prise en compte de cette variable auxiliaire nous est apparue plus restrictive. Le nuage de corrélation

obtenu entre les mesures et la simulation montre que ces deux variables sont linéairement et positivement liées.

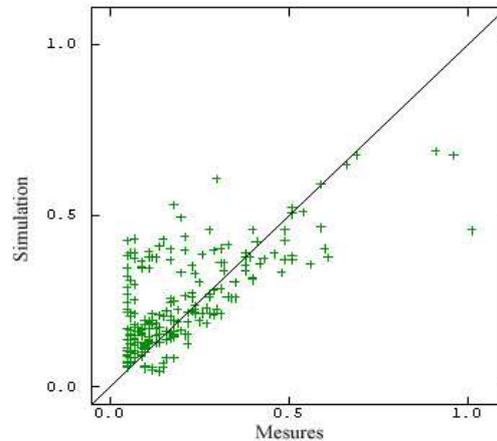


Figure 8.7 : Nuage de corrélation entre mesures et la variable auxiliaire (simulation).

La méthode que nous appliquons est le krigeage avec dérive externe (KED) que nous avons présenté à la fin du chapitre 5. La mise en application de cette méthode passe par les étapes suivantes :

-
- adapter les données simulées aux mesures par une régression linéaire.
 - calculer les différences (résidus) entre les mesures et les simulations correspondantes.
 - calculer le variogramme de résidus.
 - estimation finale par KED basé sur le modèle de variogramme des résidus et la régression linéaire en tant que dérive externe.
-

Algorithme du krigeage avec dérive externe

3.1) Variogramme isotrope

Après exécution des deux premières étapes de cet algorithme, qui sont élémentaires, nous souhaitons caractériser la corrélation spatiale des résidus. La Figure 8.8 présente la variogramme omnidirectionnel des résidus ajusté avec un modèle de Cauchy de portée 52 m et de palier 0.031.

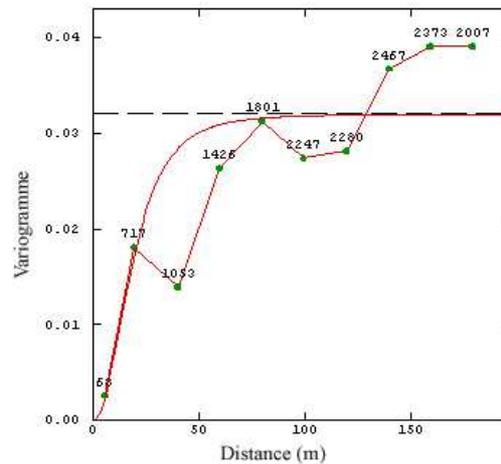


Figure 8.8 : Variogramme omnidirectionnel des résidus entre les échantillons et les données simulées avec EMF Visual, ajusté avec un modèle de variogramme isotrope : un Cauchy de portée 52m.

3.2) Analyse de l'anisotropie

Cette étape de l'analyse variographique a pour but de découvrir d'éventuelles directions d'anisotropie. La carte variographique (Figure 8.9), représentation plane du variogramme expérimental, constitue aussi un outil commode pour détecter les anisotropies géométriques. La recherche des anisotropies est ensuite affinée en calculant le variogramme expérimental dans plusieurs directions et en étudiant si une direction se différencie d'une autre (Figure 8.10). Dans notre cas, les anisotropies sont mises en évidence pour les directions N45 et N90.

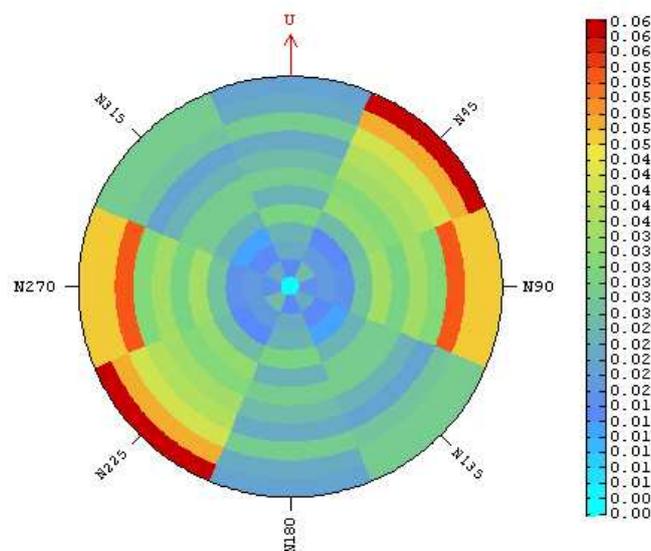


Figure 8.9 : Carte du variogramme.

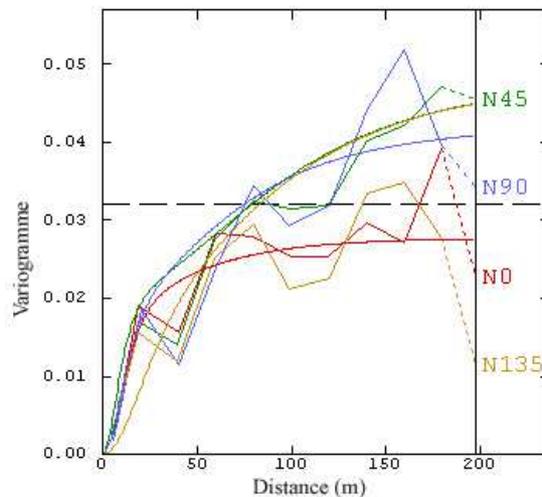


Figure 8.10 : Variogramme des résidus entre les échantillons et les données simulées avec EMF Visual. Le trait horizontal représente la variance. Les lignes N_0 , N_{45} , N_{90} et N_{135} sont les variogrammes expérimentaux calculés dans quatre directions.

Une étude sur l'origine de ces anisotropies serait en outre nécessaire. Dans ce cadre, nous avons calculé les variogrammes de la simulation, d'une part, et des mesures, d'autre part. Dans la Figure 8.12, nous présentons ces variogrammes calculés dans quatre directions avec un angle de tolérance de 45° . Ces variogrammes ont mis en évidence que la variation des données de simulation est à l'origine de cette anisotropie.

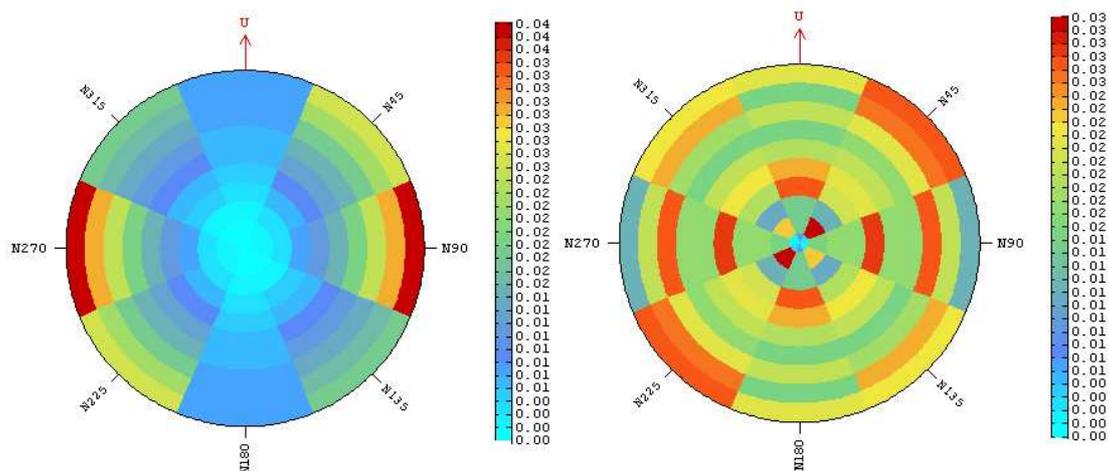


Figure 8.11 : Cartes des variogrammes des simulations (à gauche) et des mesures (à droite) calculés dans quatre directions avec un angle de tolérance de 45° .

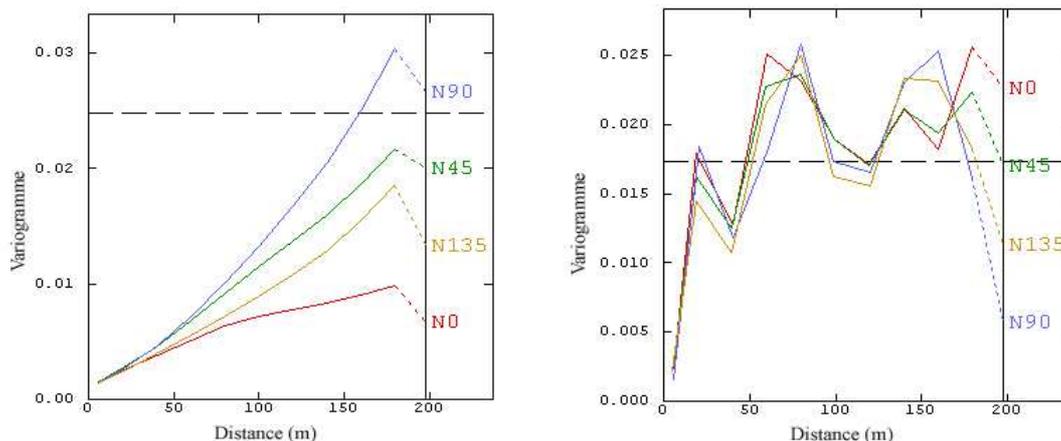


Figure 8.12 : Variogrammes expérimentaux des simulations (à gauche) et des mesures (à droite) calculés dans quatre directions avec un angle de tolérance de 45°.

Pour évaluer l'utilité de la modélisation de cette anisotropie, nous avons réalisé une comparaison entre les résultats d'estimation du krigeage avec dérive externe avec un modèle isotrope d'une part, et anisotrope, d'autre part, en utilisant la procédure de validation croisée, le Tableau 8.1 montre les statistiques de cette procédure.

	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Données robustes
Modèle isotrope	-0.0154	1.315	0.014	205
Modèle anisotrope	-0.0137	1.736	0.018	197

Tableau 8.1 : Validation croisée (220 mesures)

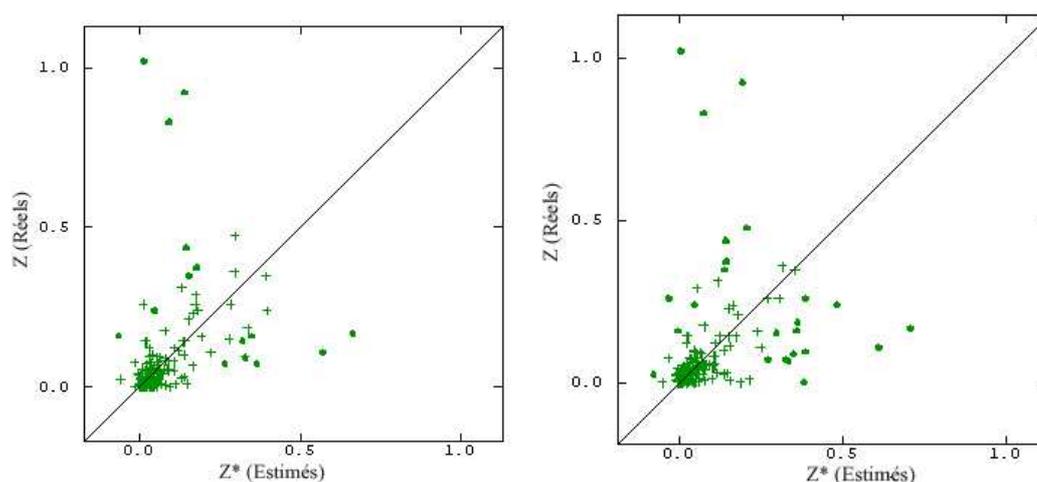


Figure 8.13 : Résultats de validations croisées : à gauche modèle isotrope et à droite modèle anisotrope.

Cette comparaison entre l'erreur expérimentale et l'erreur théorique est de l'ordre de 1.73 dans le cas d'une modélisation anisotrope, contre 1.315 dans le cas du modèle isotrope. En termes d'erreur quadratique moyenne, nous avons une erreur de l'ordre de 0.014 pour le modèle isotrope contre 0.018 pour le cas de modélisation anisotrope. Ce

qui donne l'avantage à l'utilisation du modèle isotrope, cet avantage est plus clair sur le nombre des points robustes où l'erreur ne dépasse pas 5% (197 points robustes pour le modèle anisotrope contre 205 dans le cas modèle isotrope). Cet avantage peut être expliqué par une incertitude de modélisation des modèles de variogrammes dans le cas anisotrope en particulier le variogramme N135 (Figure 8.10).

3.3) Résultat du krigeage

La carte du krigeage de la densité de la puissance de GSM 900MHz réalisées avec le modèle isotrope est présentée sur la Figure 8.14. L'influence des trois outliers de dosimètre est importante et mène à trois « points chauds » de petite taille sur la carte. Nous remarquons une dégradation du niveau de champ dès que l'on s'éloigne des stations de base. Le fort niveau du champ dans la zone sud-est s'explique par la présence des antennes dans cet endroit du quartier. Ceci est confirmé par des niveaux plus élevés des mesures et de la simulation dans cet endroit. Par comparaison entre le résultat du krigeage et la carte de simulation, nous remarquons une forte correction apportée par les mesures, en particulier dans la zone nord-est nous avons des niveaux élevés du champ sur la carte de simulation.

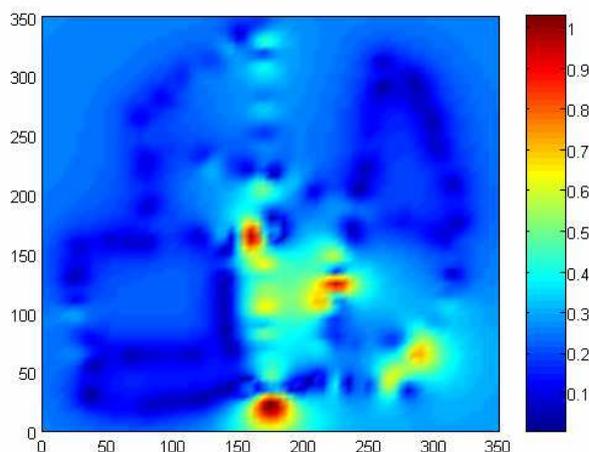


Figure 8.14 : Carte de krigeage d'exposition de GSM 900 : champ radioélectrique calculé à partir de densité de la puissance estimée. « Les points chauds » (dans le rouge) sont dus aux 3 outliers.

Sur la Figure 8.15, nous présentons les résultats du krigeage avec dérive externe en utilisant les modèles anisotropes. Les anisotropies modélisées sont visibles sur la carte de krigeage qui par ailleurs ressemble aux représentations, isotropes précédemment obtenue, avec la présence des variations suivant l'axe d'anisotropie N 45.

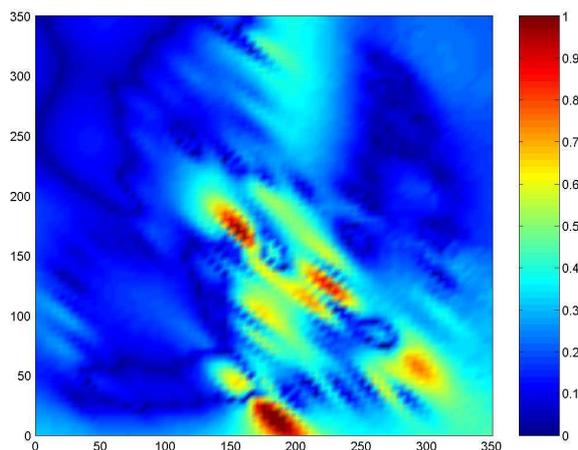


Figure 8.15 : Carte de krigeage d'exposition de GSM 900 avec modèle anisotrope.

4) Comparaison entre krigeage ordinaire et krigeage avec dérive externe

Pour évaluer la quantité d'information apportée par l'utilisation de simulations électromagnétiques, une comparaison des résultats par le test de validation croisée pour l'estimation avec et sans dérive externe montre que la prise en compte des informations indirectes améliore la précision des valeurs de la densité de la puissance. Pour les deux méthodes il semble que la contrainte de non biais soit vérifiée, car nous avons une moyenne de l'erreur standardisée égale (-0.0127) pour le krigeage ordinaire et (-0.0154) pour le krigeage avec dérive externe. Le (Tableau 8.2) montre que l'erreur quadratique moyenne ne sont pas nécessairement très différents entre krigeage ordinaire et krigeage avec dérive externe (une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 0.014 pour le krigeage avec dérive externe contre une erreur de 0.016 pour le krigeage ordinaire), mais que, en revanche, l'écart-type de l'erreur standardisé de la technique du krigeage avec dérive externe indique une valeur de 1.315 contre 1.499 pour celle du krigeage ordinaire ce qui indique une performance légèrement meilleure de la technique du krigeage avec dérive externe. La qualité de l'estimation dépend de la qualité des informations apportées par la simulation électromagnétique. Sur la Figure 8.16, nous présentons les résultats de ces validations croisées, il est important de signaler que pour les deux méthodes nous avons 205 points réputés robustes, ce qui signifie une bonne qualité d'estimation. Cependant, on note peu de différences entre le krigeage ordinaire et le krigeage avec dérive externe.

	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Données robustes
Krigeage ordinaire	-0.0127	1.499	0.016	205
Krigeage avec dérive externe	-0.0154	1.315	0.014	205

Tableau 8.2 : Comparaison krigeage ordinaire et avec dérive externe

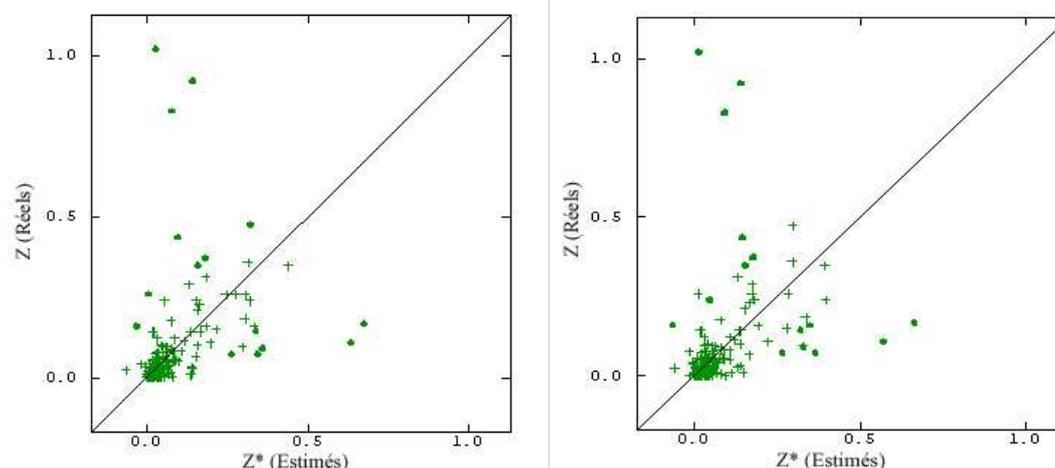


Figure 8.16 : Résultats de la validation croisée : à gauche krigeage ordinaire et à droite krigeage avec dérive externe.

5) Evaluation d'incertitude en fonction de la taille d'échantillon

En réalité on ne peut pas réaliser un nombre de points mesures important pour chaque site, et dans l'objectif d'évaluer l'exposition sur une échelle plus grande et avec un nombre de mesures plus petit, peut-on réduire le nombre des points de mesure et espérer néanmoins obtenir une estimation acceptable de la densité de la puissance ? Pour répondre à cette question, nous avons appliqué le krigeage avec dérive externe sur trois jeux d'échantillons des tailles 25, 75 et 220. Pour éviter le problème de sous échantillonnage, nous avons suivi une procédure d'échantillonnage stratifié pour sélectionner ces échantillons parmi les points de mesures que nous avons. Pour chacun de ces échantillons, nous calculons le pourcentage des données robustes sur les 220 points de mesure et l'erreur quadratique moyenne. Dans le Tableau 8.3, nous présentons ces statistiques pour les trois jeux d'échantillons.

Taille de l'échantillon	25	125	220
Pourcentage de données robustes	92.7%	92.8%	93.1%
Erreur quadratique moyenne	0.019	0.015	0.014

Tableau 8.3 : Résultats validation croisée par taille d'échantillon

Les résultats de ce tableau montrent qu'avec 25 points de mesure nous avons 92% de points robustes, le passage de 25 à 220 nous fait gagner 0.5% de données robustes. Pour l'erreur quadratique moyenne, nous passons de 0.019 à 0.014. Donc on peut dire que la méthode est sensible plus à la représentativité des échantillons qu'à leur taille.

6) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux campagnes de mesure réalisées dans le quartier Latin de Paris. Dans la première, des mesures ont été réalisées avec l'analyseur du spectre et des problèmes techniques ont été rencontrés dans la récupération des positions des mesures. La deuxième campagne de mesures a été effectuée dans le même quartier, mais avec le dosimètre. Une combinaison entre les mesures et une simulation électromagnétique dans ce quartier a été faite à l'aide de méthode du krigeage avec dérive externe. Nous avons montré qu'avec la modélisation du variogramme par un modèle de Cauchy isotrope nous arrivons à 93% des données avec une erreur inférieure à 5%, cette qualité d'estimation du krigeage persiste sur un échantillon de données plus réduit. Avec l'utilisation de la dérive externe nous avons diminué l'erreur quadratique moyenne à 0.014 contre 0. pour le krigeage ordinaire.

La comparaison entre les niveaux du champ dans ce quartier avec les normes décrites dans le chapitre 2 (41 V/m pour le service 900 MHz), nous permet de confirmer le constat [1] du niveau faible du champ radioélectrique émis par les stations de base.

Dans cette application le modèle montre une bonne adéquation avec la variation de la densité de la puissance, cette qualité d'estimation a été démontrée dans le chapitre précédent sur les données de simulation et confirmée par cette application sur des mesures réelles dans le quartier Latin de Paris. Dans le chapitre suivant, nous étudions la généralisation de ce modèle sur une échelle plus large.

Chapitre 9 : Etude du modèle de variogramme

Le présent chapitre a pour objectif d'étudier la validation du modèle de Cauchy sur une échelle plus large. Dans la première section, nous étudions le modèle de variogramme dans un quartier voisin au quartier Latin, dans lequel nous avons réalisé une deuxième campagne de mesure. Cette étude a pour objectif d'évaluer la validité du modèle de Cauchy sur un domaine plus large. Dans la seconde section, nous montrons les résultats de krigeage ordinaire sur les données de deux quartiers ensemble. Enfin, nous réalisons une étude sur la qualité d'estimation de ce modèle sur une campagne de mesure réalisée dans un quartier à Paris 15, les résultats de cette étude sont présentés par bande de fréquence.

1) Deux quartiers voisins

Pour étudier la validité du choix du modèle de variogramme, on va examiner dans un premier temps le comportement du variogramme dans deux quartiers voisins. Le premier, est le quartier d'étude du chapitre précédent (quartier du Boulevard Saint Germain) et le second est un quartier voisin, le quartier de la place Saint Michel. Sur la Figure 9.1 nous montrons le plan de deux quartiers et les positions des stations de base de GSM 900 MHz dans ces quartiers (les points rouges représentent les projections des positions dans le plan du quartier).

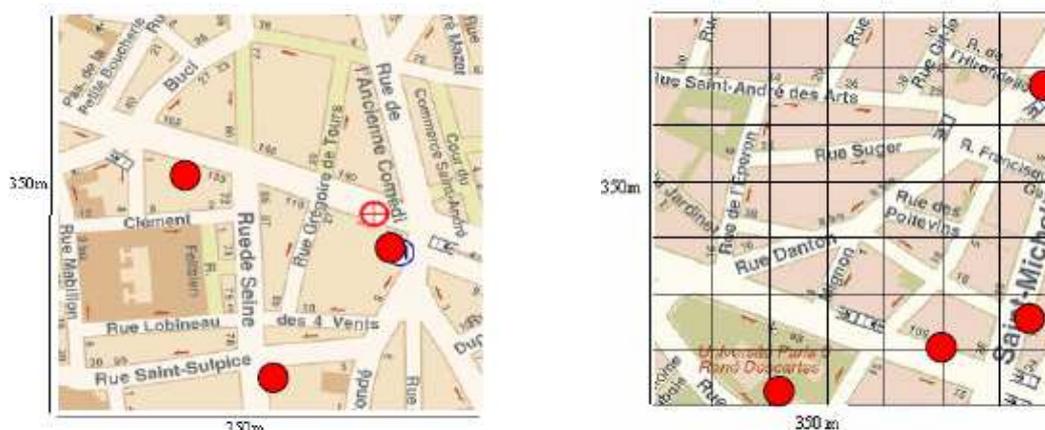


Figure 9.1: Plan de deux quartiers : à gauche le quartier Boulevard Saint Germain, à droite le quartier place Saint Michel.

Une deuxième campagne de mesure a été réalisée avec le dosimètre personnel, dans le quartier de la place Saint Michel. Dans ce quartier, nous avons réalisé 201 points de mesure, sur la Figure 9.2, nous présentons les distributions des histogrammes de densité de la puissance du service GSM 900MHz dans les deux quartiers. Les deux histogrammes sont semblables, étirés sur la droite.

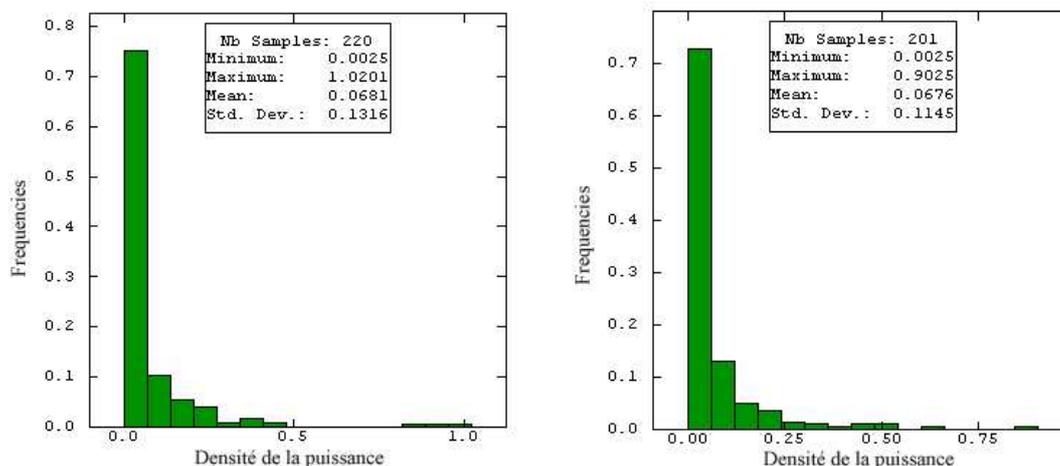


Figure 9.2 : Histogrammes de données : à gauche quartier Latin de Paris, à droite place Saint Michel.

Dans le Tableau 9.1, nous présentons les statistiques élémentaires des deux quartiers, les moyennes, les écarts-types et les valeurs maximums. Par comparaison de ces statistiques, nous remarquons que nous avons les mêmes ordres de grandeur de la moyenne dans les deux quartiers, ce qui est expliqué par un nombre d'antennes similaire et la même configuration des obstacles dans les deux quartiers. En termes d'écart-type, nous remarquons qu'il est plus important dans le quartier du boulevard Saint Germain, 0.131, par rapport à 0.114 dans le quartier de la Place Saint Michel, ce qui est dû à la présence des trois valeurs extrêmes.

	Moyenne	Ecart-type	Maximum
Quartier Latin	0.068	0.131	1.01
Place Saint Michel	0.067	0.114	0.95

Tableau 9.1: Statistiques élémentaires pour les deux campagnes de données.

1.1) Variogrammes de densité de la puissance

Dans ce paragraphe, nous étudions le comportement du variogramme de la densité de puissance dans les deux quartiers, sur la Figure 9.3, nous avons calculé les

variogrammes expérimentaux des mesures GSM 900MHz dans les quatre directions avec un angle de tolérance de 45°.

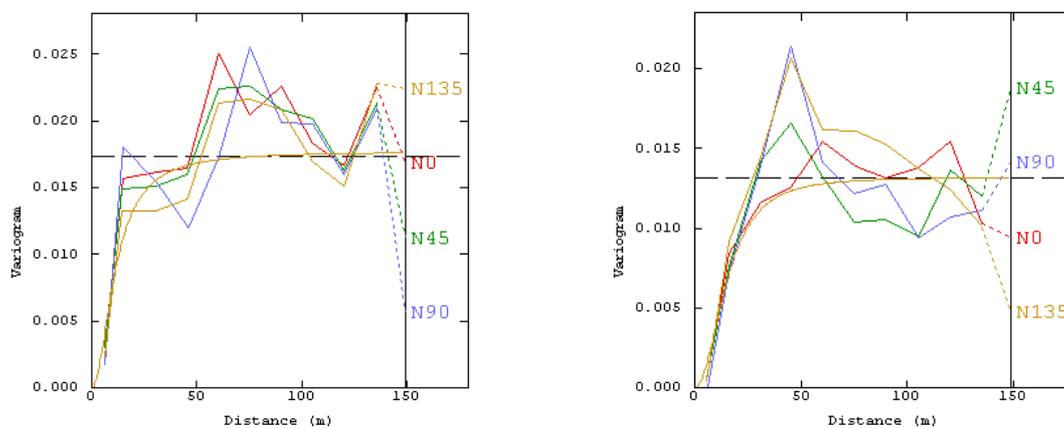


Figure 9.3 : Variogramme de données de densité de la puissance : à gauche quartier Bd Saint Germain, à droite place Saint Michel.

Les paramètres de calcul de ces variogrammes sont ajustés de sorte que ceux-ci apparaissent le plus structuré possible, c'est-à-dire qu'ils présentent une croissance jusqu'à un éventuel palier. Dans les deux quartiers, nous remarquons une isotropie dans les quatre directions, ce qui nous amène dans le reste de ce chapitre à calculer seulement les variogrammes omnidirectionnels de densité de la puissance. Le calcul des variogrammes omnidirectionnels permet d'avoir une première connaissance de la structure spatiale des données et de l'effet de pépite, connaissance qui pourra être affinée au fur et à mesure que l'on avance dans l'analyse. Pour les deux variogrammes (Figure 9.3), les modèles d'ajustement employés sont des modèles de Cauchy de portées respectives 51m et 52 m, et des puissances $p = 2$.

1.2) Variogrammes de champ radioélectrique

Dans ce paragraphe, nous étudions le comportement du variogramme des données de champ électrique dans les deux quartiers dans l'objectif d'examiner la variabilité du niveau champ et de réaliser un krigeage ordinaire sur ces données. Une comparaison entre ces résultats et le champ électrique calculé à partir de la densité de puissance estimée par les modèles précédents sera présentée dans ce paragraphe. La Figure 9.4 présente les variogrammes expérimentaux des mesures du champ électrique de service GSM 900MHz calculés dans quatre directions avec un angle de tolérance de 45°. L'examen de ces variogrammes montre que nous avons une isotropie pour les deux

quartiers, ces modèles sont ajustés avec deux modèles de Cauchy. Les résultats de comparaison sont montrés dans le paragraphe suivant.

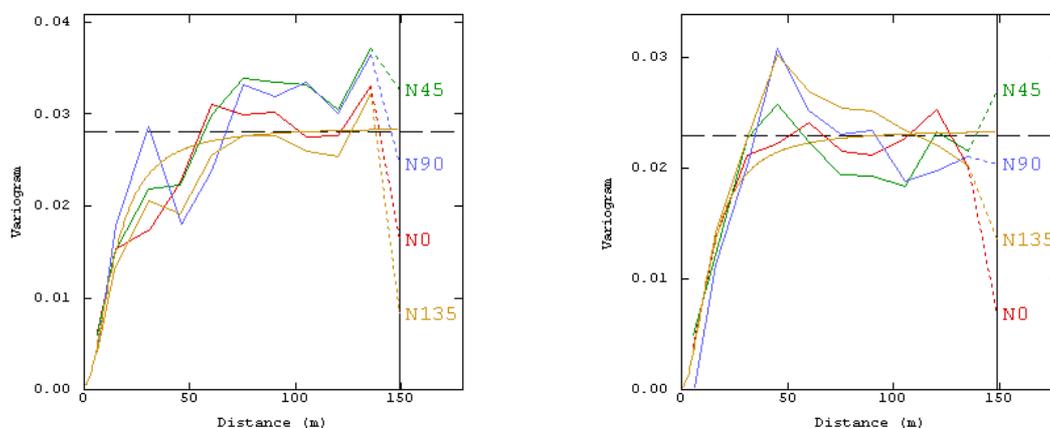


Figure 9.4 : Variogramme de données de champ électrique: à gauche quartier Bd Saint Germain, à droite place Saint Michel.

1.3) Résultat du krigeage

Nous présentons les résultats du krigeage ordinaire pour les deux quartiers, ce krigeage est appliqué sur les données de densité de la puissance et en utilisant les modèles de variogrammes de la densité de la puissance (Figure 9.3). À partir de ces résultats d'estimation, nous avons calculé le champ radioélectrique pour chaque quartier. Sur la Figure 9.5, nous montrons les cartes du champ radioélectrique. Sur la carte d'estimation du quartier Place Saint Michel (Figure 9.5 à droite), on constate la présence d'un niveau du champ élevé dans une petite zone proche d'une station de base.

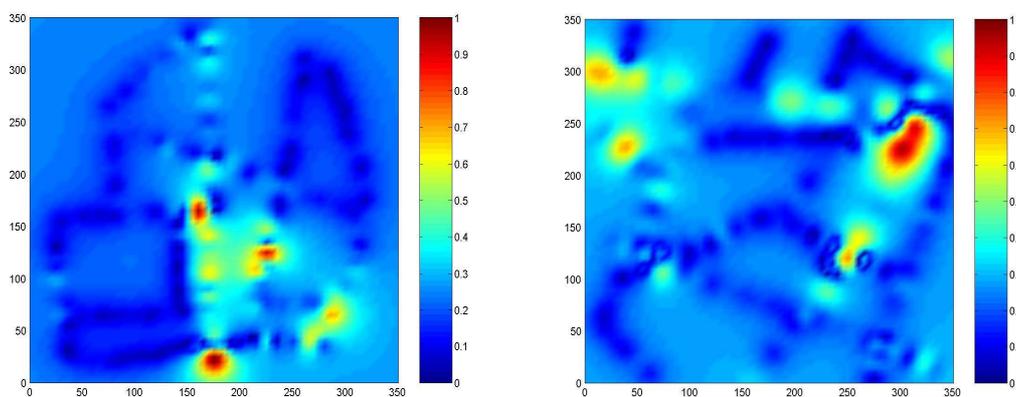


Figure 9.5 : Champ radioélectrique calculé à partir de la densité de puissance estimée (V/m) : à gauche quartier Latin de Paris, à droite place Saint Michel.

La Figure 9.6, présente les résultats du krigeage ordinaire sur les données de champ radioélectrique, en utilisant les modèles de variogramme du champ (Figure 9.4). Par comparaison entre les deux résultats, nous remarquons un effet de lissage plus important dans l'application du krigeage sur le champ directement, sachant que la forme de combinaison linéaire de l'estimateur du krigeage n'est pas compatible avec la variable de champ radioélectrique car cette variable physiquement n'est pas additive.

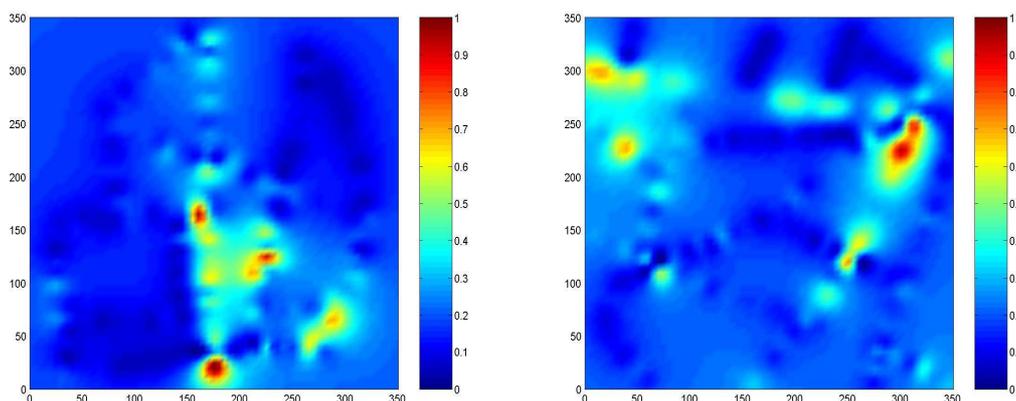


Figure 9.6: Résultat du krigeage sur le champ radioélectrique : à gauche quartier Latin de Paris, à droite place Saint Michel (V/m).

Sur la Figure 9.7, nous montrons une comparaison entre les deux résultats, dans les deux quartiers. Sur l'axe des abscisses on présente les valeurs du champ radioélectrique calculées après une estimation de densité de la puissance par un krigeage ordinaire et sur l'axe des ordonnées le niveau de champ estimé par krigeage ordinaire.

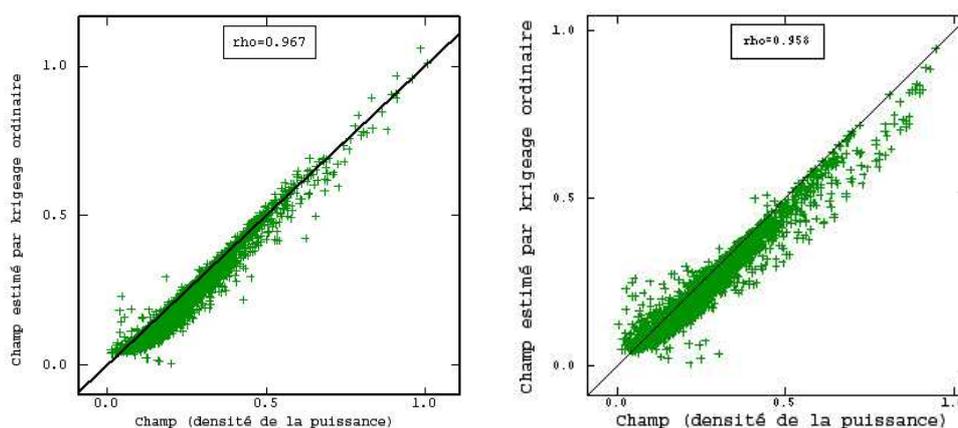


Figure 9.7 : Comparaison entre champ estimé par krigeage ordinaire et le champ calculé à l'aide de densité de la puissance estimée à gauche quartier BD Saint Germain et à droite quartier place Saint Michel.

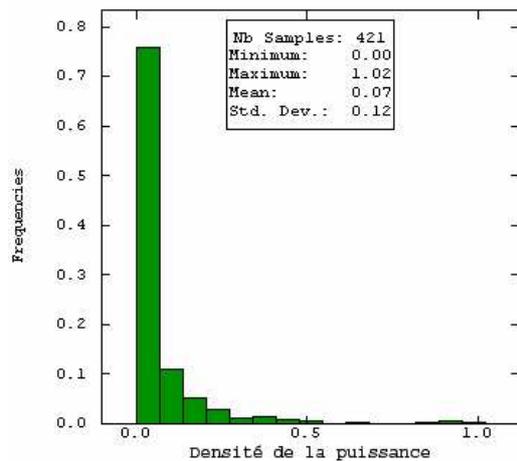


Figure 9.9: Histogramme de données total GSM 900MHz (en W/m²)

Dans cette étape de l'analyse variographique nous nous concentrons sur le variogramme omnidirectionnel de données du quartier total, sur la Figure 9.10, nous présentons le variogramme des 421 mesures que nous avons ajusté avec un modèle de Cauchy de portée 53 m et de palier 0.016. Le Tableau 9.2 présente une comparaison entre les paramètres des modèles des trois quartiers.

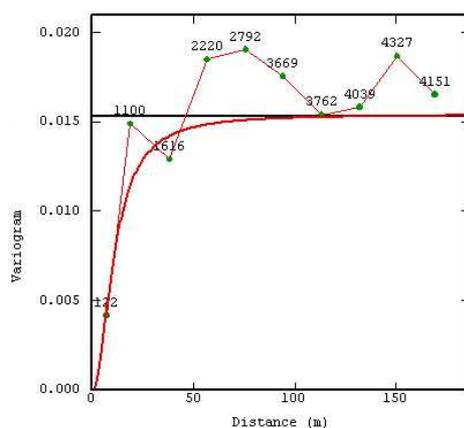


Figure 9.10 : Variogramme de données de densité de la puissance GSM 900MHz.

Le carte du champ radioélectrique obtenu à l'aide du krigeage ordinaire sur la densité de la puissance est présenté sur le Figure 9.11, l'échelle des valeurs correspond au niveau d'exposition V/m. Le niveau du champ le plus fort se retrouve localisé sur les endroits des valeurs extrêmes près des stations des bases et vont en décroissant à mesure que l'on s'en éloigne. Sur la Figure 9.11, on observe une bonne concordance entre les résultats du krigeage sur les données totales en utilisant le modèle de variogramme de ces données (Figure 9.10), et les résultats des deux quartiers chacun pris individuellement.

	Portée	Palier
Quartier BD Saint Germain (1)	51 m	0.017
Place Saint Michel (2)	52 m	0.014
Quartier Latin (1) + (2)	53 m	0.016

Tableau 9.2 : Comparaison entre les trois modèles de 900MHz.

La comparaison entre les paramètres des trois quartiers montre des valeurs proches des portées, et des paliers. Ces valeurs quasi-égales sont expliquées par le nombre des antennes et leur distribution dans ces quartiers, ce qui mène à une variabilité de la densité de la puissance proche dans ces quartiers.

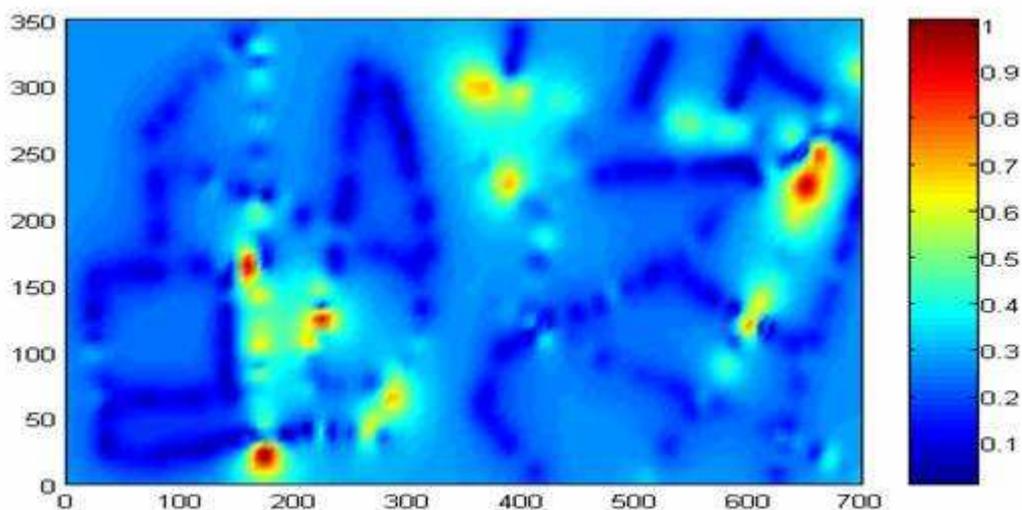


Figure 9.11 : Résultat du krigeage ordinaire sur les données de deux quartiers (V/m).

1.5) Validation croisée des modèles

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats de validation croisée dans les deux quartiers. La Figure 9.12 présente la comparaison entre les mesures et les valeurs estimées dans les deux quartiers, et les statistiques de validation croisée sont présentées dans le Tableau 9.3. Pour les deux quartiers la contrainte de non biais est vérifiée, car nous avons une moyenne de l'erreur standardisée proche de zéro égale à -0.0127 pour le quartier Latin de Paris et -0.0368 pour le quartier de Place Saint Michel. Alors que pour l'écart entre l'erreur expérimentale et l'erreur du modèle est de l'ordre de 1.499 pour le quartier Latin et 1.366 pour le Place Saint Michel. Il est important de signaler que cet écart n'a pas influencé beaucoup la qualité d'estimation car nous avons une

Chapitre 9 : Etude du modèle de variogramme

erreur quadratique moyenne du modèle est de l'ordre de 0.0165 pour le quartier Latin et 0.0116 pour le Place Saint Michel, et sur 220 mesures de quartier Latin 205 où l'erreur est inférieur de 5%, et pour le quartier de Place Saint Michel, nous avons 190 sur 201.

L'ajustement du variogramme des données du quartier total par un modèle de Cauchy, abouti à une bonne qualité d'estimation. En effet, la moyenne d'erreur standardisée est presque nulle (-0.015) et l'écart type de cette erreur égale à 1.108, ce qui signifie que l'estimateur sur le quartier total est sans biais et que la distribution d'histogramme de l'erreur standardisée est presque gaussienne centrée réduite avec une erreur quadratique moyenne très faible (0.0141), ce qui prouve la meilleure qualité d'estimation.

Cette procédure de validation croisée indique une bonne adéquation entre le modèle de variogramme de Cauchy et les valeurs expérimentales de densité de la puissance dans les deux quartiers et pour l'estimation des deux quartiers ensemble.

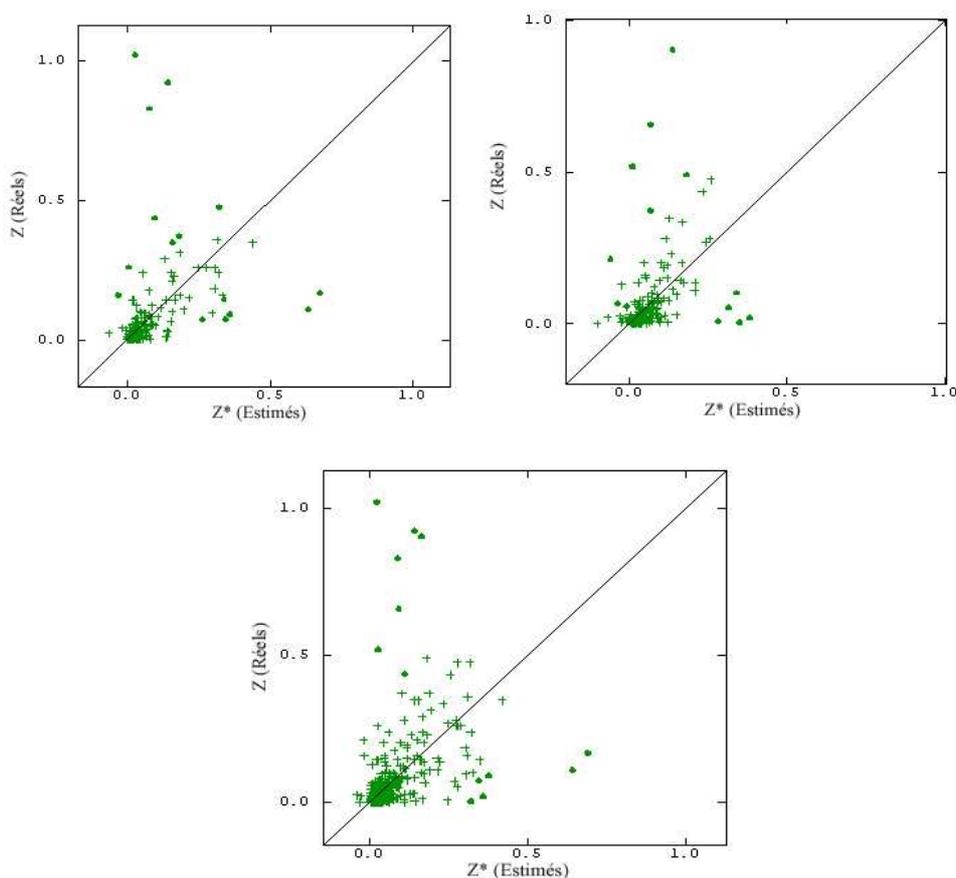


Figure 9.12 : Résultats de validation croisée du krigeage ordinaire : en haut, à gauche quartier Boulevard Saint Germain et à droite quartier Place Saint Michel, et en bas le quartier total.

	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Points robustes
Quartier Latin	-0.0127	1.499	0.0165	205/220
Quartier place Saint Michel	-0.0368	1.366	0.0116	190/201
Quartier total	-0.0151	1.108	0.0141	408/421

Tableau 9.3 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers.

La comparaison entre les paramètres des modèles dans les trois quartiers et les résultats de test de validation croisée montre une bonne robustesse du modèle de Cauchy sur des quartiers voisins. Il est important d'étudier la qualité d'estimation de ce modèle sur un autre jeu des données avec des configurations différentes et des distributions des antennes différentes. Dans ce cadre, nous avons choisi un quartier de Paris 15, pour la réalisation de cette étude. Dans la section suivante, nous montrons une comparaison entre les résultats de cette étude dans le quartier de Paris 15 et le quartier Latin. Les résultats de cette comparaison sont présentés par bande de fréquence.

2) Comparaison entre deux campagnes de mesures

Dans cette section, nous étudions le modèle de variogramme dans deux quartiers éloignés. La Figure 9.13 représente les plans de deux quartiers : le quartier Latin de Paris et un quartier se trouvant à Paris 15 (proche de station convention de métro 12). Dans le nouveau quartier, nous avons réalisé une campagne de mesure avec le dosimètre personnel. Les mesures des champs radioélectriques que nous traitons dans cette section sont les mesures de trois bandes de fréquences : GSM 900MHz, GSM 1800MHz et FM. Dans cette section, nous présentons une comparaison entre les résultats d'application du krigeage sur les deux quartiers. Les résultats sont présentés par bande de fréquence.

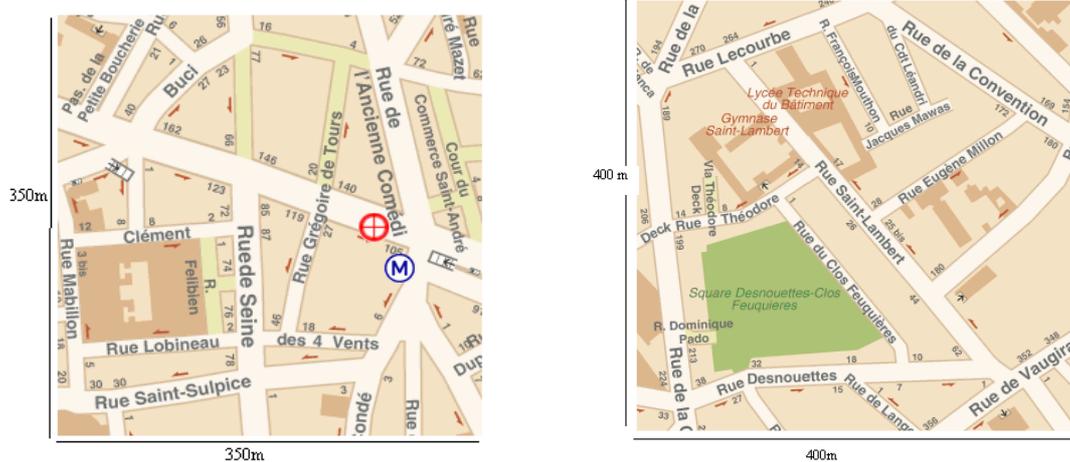


Figure 9.13 : A gauche le quartier de Boulevard Saint Germain ; à droite le quartier de Paris 15 à côté de la station métro Convention.

2.1) GSM 900MHz

Avec le dosimètre personnel, nous avons réalisé 236 points de mesures dans le quartier de Paris 15, les endroits de ces points de mesure sont présentés sur la Figure 9.14, et les histogrammes des mesures 900 MHz sont présentés sur le Figure 9.15, nous remarquons que la valeur moyenne des données associée au quartier de Boulevard Saint Germain est trois fois plus que celle de Paris 15 (0.068 W/m^2 , 0.018 W/m^2). Ceci s'explique par la faible densité des antennes GSM 900MHz dans le quartier de Paris 15. Au niveau de la variance on peut constater une importante influence de trois "outliers" dans les données quartier du Latin (écart type 0.131) par rapport à une valeur moins faible dans le quartier de Paris 15 (0.031), sachant que la distribution des émetteurs dans les deux quartiers joue un rôle important sur la variabilité des données.

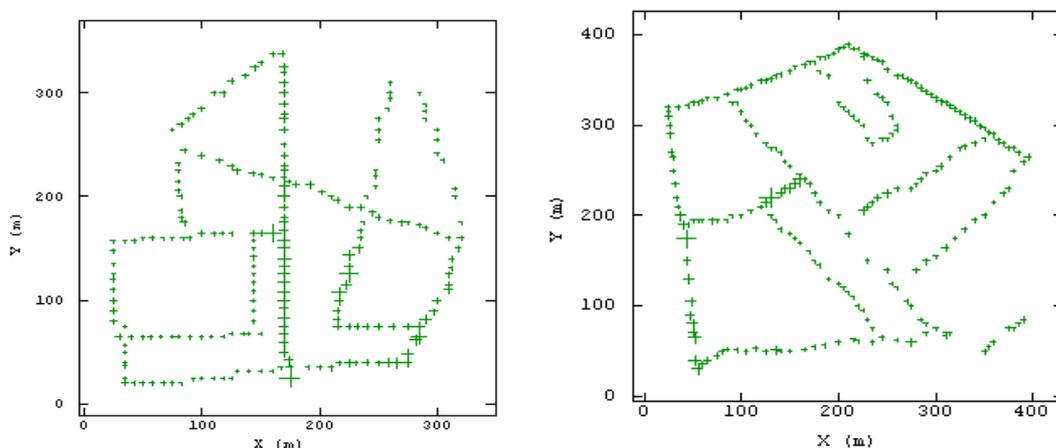


Figure 9.14 : Cartes des endroits de prélèvement des données de GSM 900MHz.

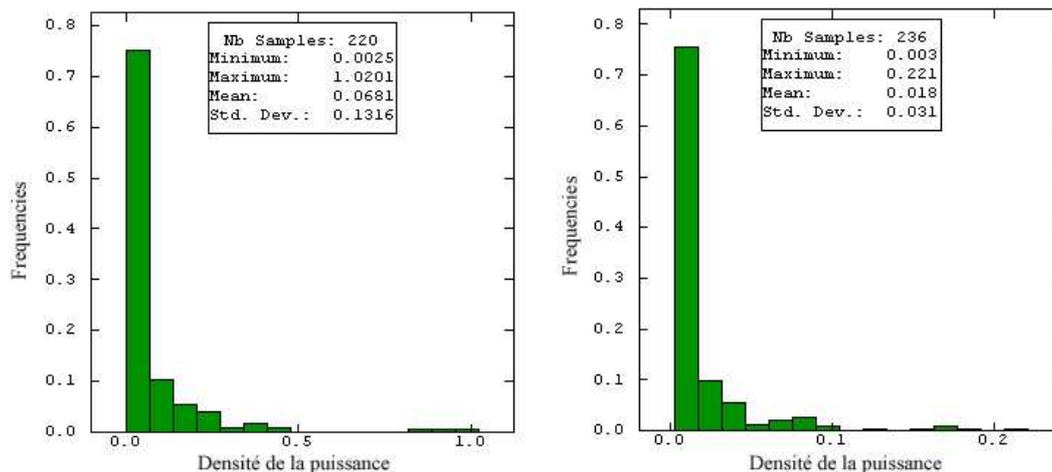


Figure 9.15 : Histogrammes de données GSM 900MHz : pour le quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite (W/m^2).

Les variogrammes expérimentaux de densité de la puissance sont modélisés par un modèle de Cauchy de portée 51 m et de palier 0.017 pour le quartier Latin et un modèle de Cauchy de portée 105 m et de palier 0.0007, et un effet de pépite (0.0003) pour Paris 15. Dans les deux cas, nous avons utilisé $p = 2$ comme puissance du modèle de Cauchy. La Figure 9.16, présente les modèles de variogramme ajustés graphiquement aux variogrammes expérimentaux. La présence d'effet de pépite peut s'expliquer par des erreurs de mesure et surtout par une variabilité à petite échelle. Dans le Tableau 9.3, nous résumons les paramètres de ces modèles.

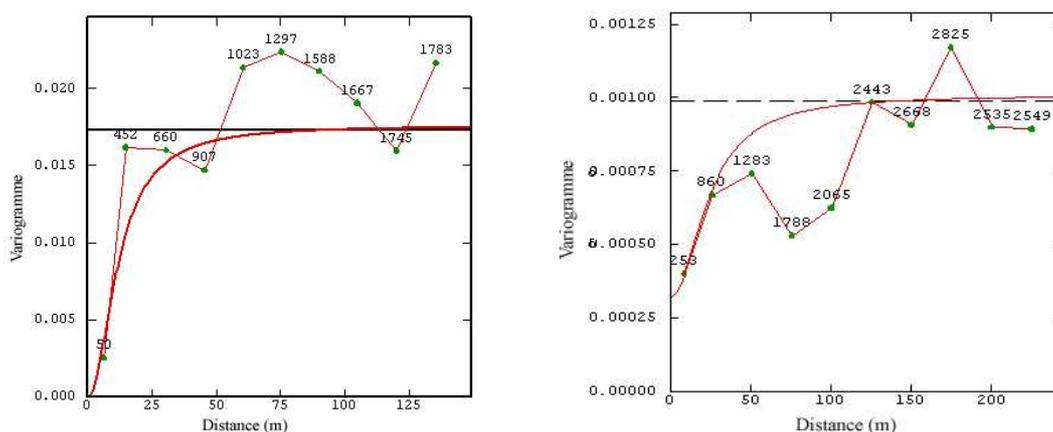


Figure 9.16 : Variogrammes de données GSM 900 MHz, pour les deux quartiers, ajustés avec le modèle de Cauchy de portée (51 m) pour le quartier Latin et (105 m) pour le quartier de Paris 15.

	Modèle	Portée	Palier
Quartier Latin de Paris	Cauchy	51 m	0.016
Quartier Paris 15	Cauchy	105 m	0.0007
	Effet de pépite		0.0003

Tableau 9.4: Paramètres des modèles

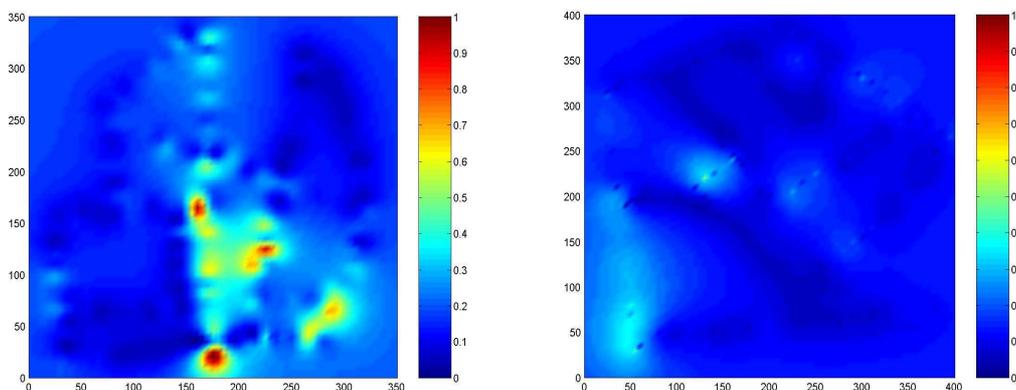


Figure 9.17 : Résultats du krigeage ordinaire pour la fréquence 900MHz (V/m), à gauche quartier Latin de Paris et à droite quartier de Paris 15.

Sur la carte du quartier Latin les points chauds correspondent au trois outliers des données. Sur la seconde carte, nous remarquons un faible niveau du champ sur l'ensemble du quartier.

Les résultats de validation croisée du quartier de Paris 15 confirment la qualité d'estimation du modèle de Cauchy et l'adéquation de ce modèle avec les données électromagnétiques. Dans les trois quartiers la contrainte de non biais est vérifiée, en effet, la moyenne d'erreur standardisée est presque nulle pour les trois quartiers (-0.0127 pour le quartier Latin de Paris et -0.0368 pour le quartier de Place Saint Michel et -0.006 pour le quartier de Paris 15), avec une erreur quadratique moyenne proche de zéro (0.0005) pour le quartier de Paris 15. La Figure 9.18 présente la comparaison entre les mesures et les valeurs estimées dans les trois quartiers, et les statistiques de validation croisée sont présentées dans le Tableau 9.3. Pour les trois quartiers, nous avons un écart entre l'erreur expérimentale et l'erreur du modèle de l'ordre de 1.499 pour le quartier Latin, 1.366 de Place Saint Michel et 1.029 pour le quartier de Paris 15. Le nombre des points robustes où l'erreur est inférieur à 5% est plus de 93% dans les trois quartiers, (sur les 220 mesures du quartier Latin 205, 190 sur 201 pour le quartier de Place Saint Michel et 226 sur 236 pour le quartier de Paris 15).

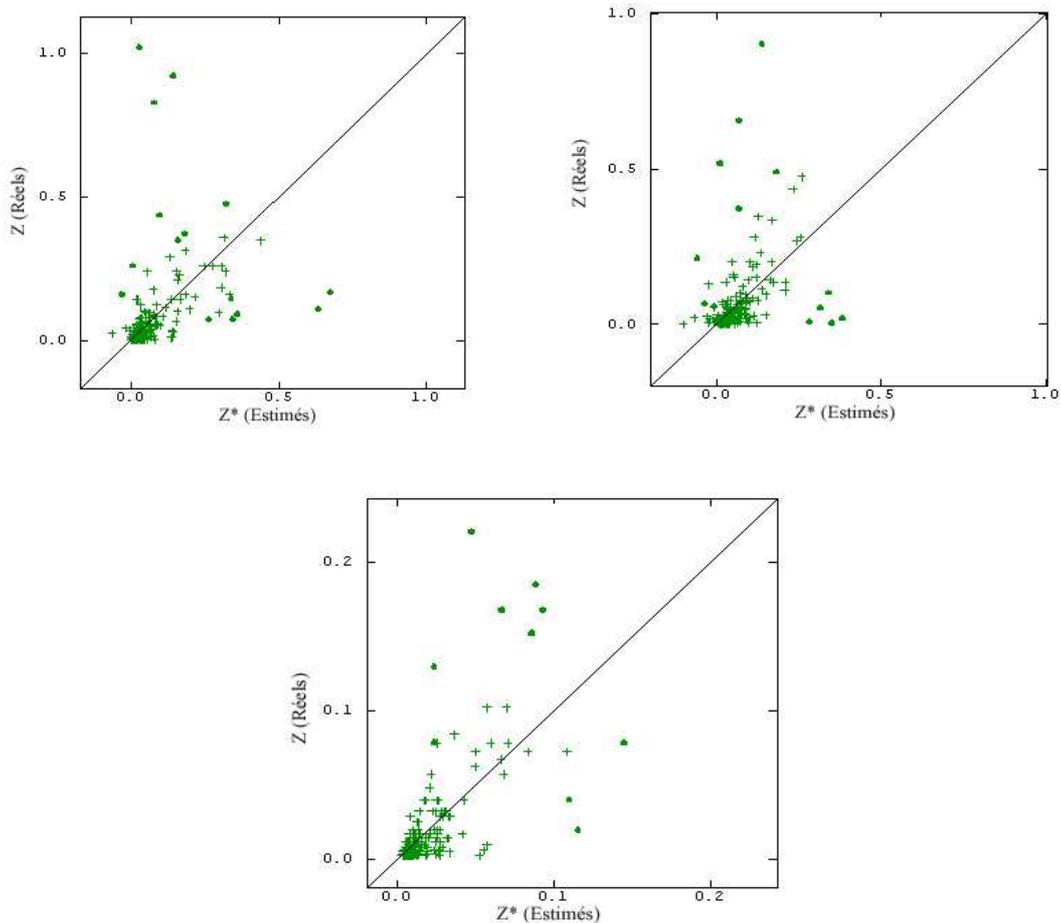


Figure 9.18 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers, en haut, à gauche quartier Boulevard Saint Germain et à droite Place Saint Michel, et en bas le quartier de Paris 15.

	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Points robustes
Quartier Latin	-0.0127	1.499	0.0165	205/220
Quartier place Saint Michel	-0.0368	1.366	0.0116	190/201
Quartier Paris 15	-0.0067	1.029	0.0005	226/236

Tableau 9.5 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers.

Sur les trois jeux des données, le modèle de Cauchy s'ajuste aux variogrammes expérimentaux, l'application du modèle de Cauchy sur ces trois campagnes de mesures réalisées dans des environnements différents montre une bonne qualité d'estimation et une bonne adéquation avec les données de densité de la puissance.

Cette performance du modèle de Cauchy a été éclaircie pour les données de GSM 900MHz, il est important de l'évaluer pour les autres fréquences. Dans les deux paragraphes suivants, nous étudions la qualité d'estimation de ce modèle pour les fréquences 1800MH et FM.

2.2) GSM 1800 MHz

Dans ce paragraphe, nous avons réalisé une étude sur données GSM 1800MHz, à chaque point de mesures des campagnes précédentes, nous avons mesuré les niveaux de la densité de la puissance pour les fréquences 900 MHz, 1800 MHz, FM, TV et UMTS. Sur la Figure 9.19 nous présentons les histogrammes de données des deux quartiers précédents pour le service GSM 1800 MHz. Les distributions de données des deux quartiers sont très semblables tous les deux étirés sur la droite, dans les deux quartiers, les niveaux de densité de puissance sont très faibles la valeur maximum est 0.152 W/m² pour le quartier Latin et 0.102 W/m² pour le quartier de Paris 15. Ces niveaux faibles sont expliqués par le nombre limité des antennes GSM 1800 MHz dans ces quartiers. La présence des valeurs isolées amène à des écarts types plus importants que les moyennes 0.016 pour le quartier Latin et 0.01 pour le quartier de Paris 15.

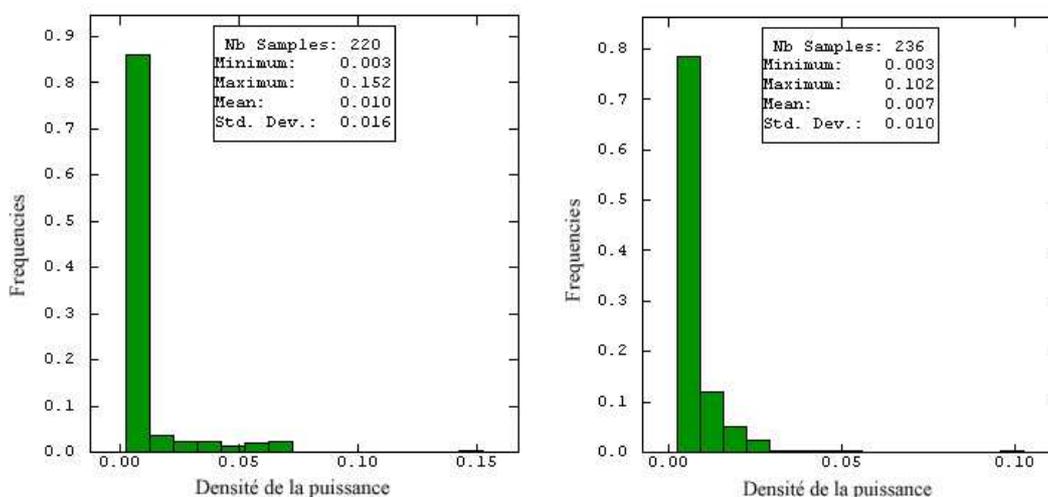


Figure 9.19 : Histogrammes de données DCS (1800MHz) : pour le quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite.

Pour étudier la variabilité des données GSM 1800 MHz, nous avons calculé les variogrammes omnidirectionnels des deux quartiers. La Figure 9.20 montre les variogrammes expérimentaux, pour les deux quartiers on peut constater que les deux modèles convergent vers des paliers très faibles pour le quartier de Paris 15. Chacun

Chapitre 9 : Etude du modèle de variogramme

des modèles est ajusté avec une structure de Cauchy et un effet de pépite. Le Tableau 9.6 résume les valeurs prises par les paramètres de ces modèles.

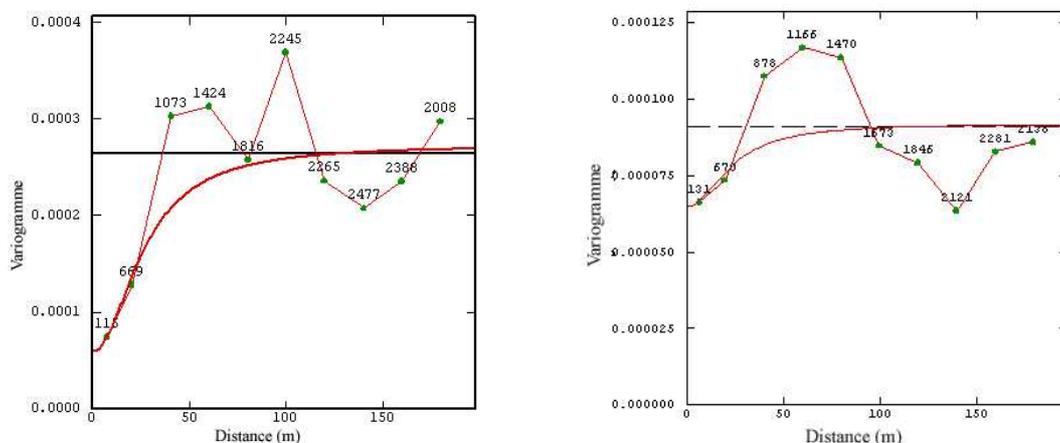


Figure 9.20 : Variogrammes de données DCS pour les deux quartiers ajustés avec une structure de Cauchy et un effet de pépite.

	Modèle	Portée	Palier
Quartier Latin de Paris	Cauchy	84.63 m	0.00022
	Effet de pépite		0.00005
Quartier Paris 15	Cauchy	103 m	0.000027
	Effet de pépite		0.000006

Tableau 9.6 : Paramètres des modèles de variogrammes pour 1800 MHz.

Les résultats du krigeage ordinaire sont montrés sur la Figure 9.21, ces résultats sont montrés en termes du champ électrique calculé à partir de la densité de la puissance estimée. On remarque la présence de zones chaudes dans les deux cartes, sachant que ces zones sont plus homogènes dans le quartier Latin de Paris. Dans le quartier de Paris 15, nous avons des points chauds isolés que l'on peut l'expliquer par des erreurs de mesures ou des variations à petite échelle (micro-structures).

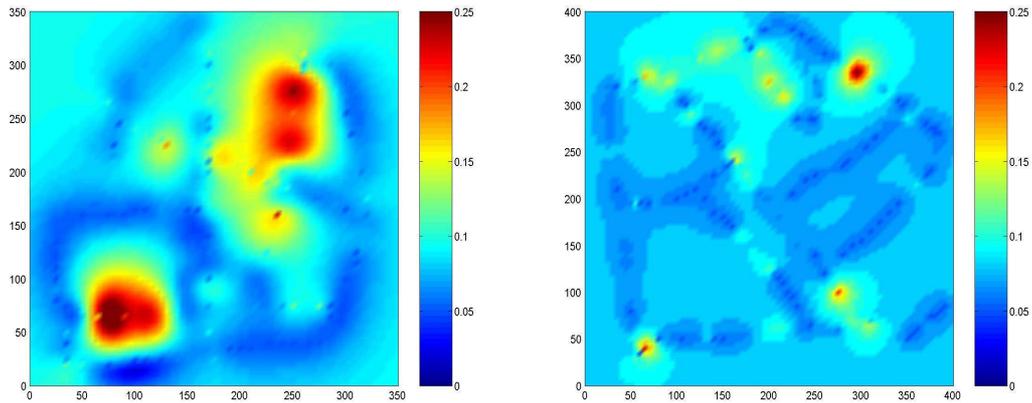


Figure 9.21 : Résultats du krigeage ordinaire pour la fréquence GSM 1800MHz (V/m).

Dans le chapitre 7, nous avons montré que pour l'estimation du modèle de Cauchy sur les données simulées de fréquence 1800MHz, il est important d'évaluer cette adéquation du modèle de Cauchy avec les mesures réelles. Sur la Figure 9.22 nous montrons la comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs réelles des deux quartiers, et les histogrammes des erreurs standardisées sont présentés sur la Figure 9.23. Pour le quartier de Paris 15, on remarque que les valeurs fortes sont systématiquement sous-estimées, cela s'explique par l'utilisation d'un voisinage unique et les faibles niveaux des mesures dans ce quartier.

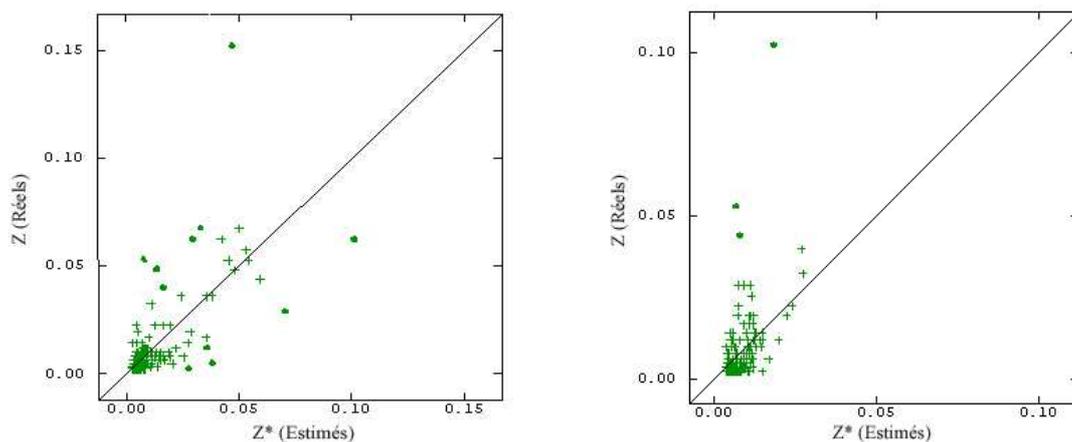


Figure 9.22 : Comparaison entre les mesures et l'estimation, à gauche le quartier Latin et à droite le quartier de Paris 15.

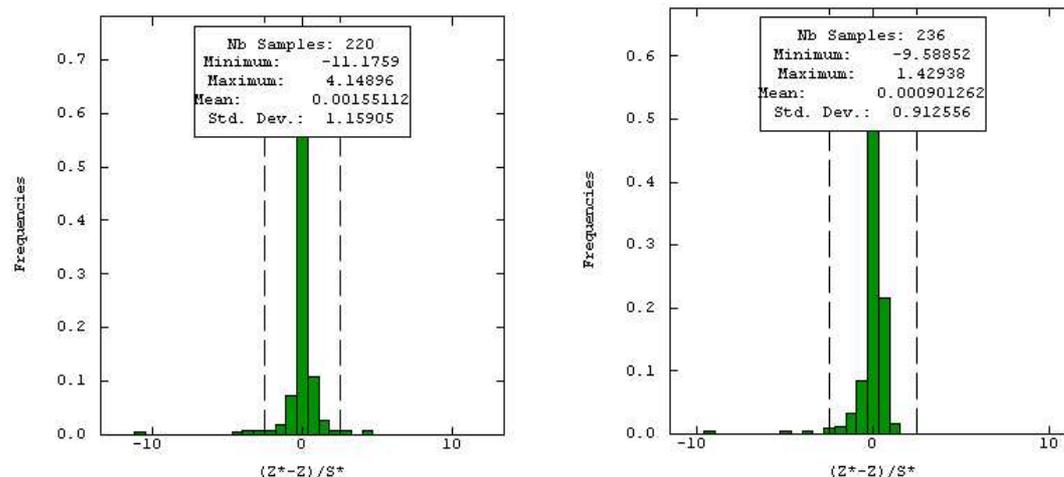


Figure 9.23 : Histogrammes des erreurs standardisées, à gauche quartier Latin et à droite quartier de Paris 15.

Dans les deux quartiers l'estimateur du krigeage est sans biais, En effet, la moyenne d'erreur standardisée est quasi-nulle pour les deux quartiers (0.0015 pour le quartier Latin de Paris et 0.0009 pour le quartier de Paris 15). Les statistiques de validation croisée sont présentées dans le Tableau 9.7. Pour les deux quartiers, nous avons aussi une erreur quadratique moyenne très faible; 0.0001 pour le quartier Latin et 0.00005 pour le quartier de Paris 15 avec un écart entre l'erreur expérimentale et l'erreur du modèle est de l'ordre de 1.159 pour le quartier Latin, 0.912 pour le quartier de Paris 15. Le nombre des points robustes où l'erreur standardisée est inférieure à 5% est plus de 95% dans les trois quartiers, (sur les 220 mesures de quartier Latin 209 et 233 sur 236 pour le quartier de Paris 15).

	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Points robustes
Quartier Latin	0.0015	1.159	0.0001	209/220
Quartier Paris 15	0.0009	0.912	0.00005	233/236

Tableau 9.7 : Résultat de validation croisée pour DCS.

2.3) FM

Sur la Figure 9.24, nous présentons les histogrammes des données FM dans le deux quartiers précédents, dans l'histogramme de quartier Latin nous avons des valeurs assez faibles. Ces niveaux assez faibles sont expliqués par le fait que l'émetteur principal de service FM se trouve sur la tour Eiffel, cet émetteur se trouve à une distance de 3.5Km de ce quartier et à 2 Km du quartier Paris 15, et comme la densité de la puissance est

inversement proportionnelle au carré de la distance, cela explique le faible niveau du champ dans le quartier Latin de Paris.

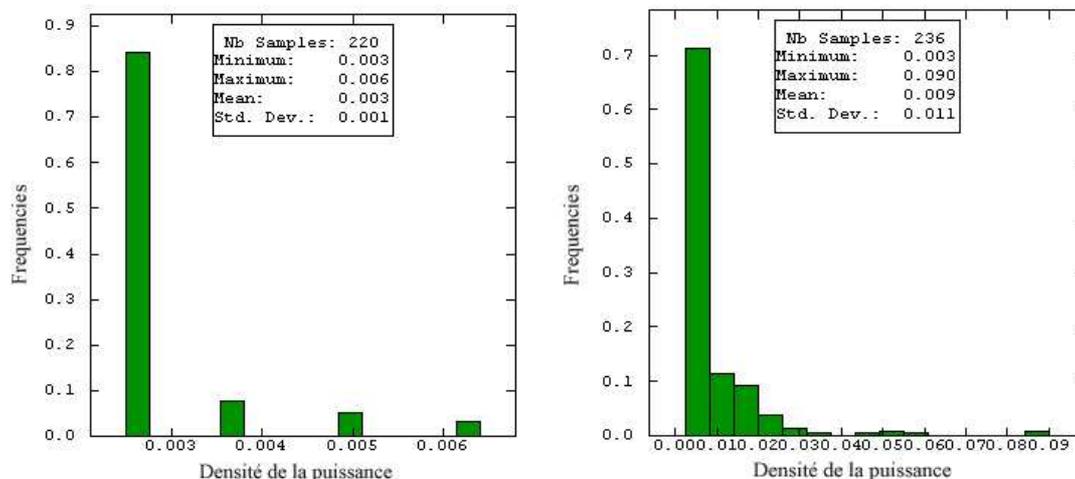


Figure 9.24 : Histogrammes de données FM : quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite.

A partir des deux campagnes de mesures FM, nous présentons les variogrammes expérimentaux sur le Figure 9.25. On peut remarquer que la variabilité des données du quartier Latin est quasi-nulle: cette faible variation de fonction de variogramme est expliquée par des niveaux de densité de la puissance quasi-constants, donc on peut modéliser ce variogramme par un effet de pépite égale à la variance totale des données. Pour les données de quartier de Paris 15, nous avons ajusté le modèle par un effet de pépite et un modèle de Cauchy de portée 54 m et de palier 0.00013.

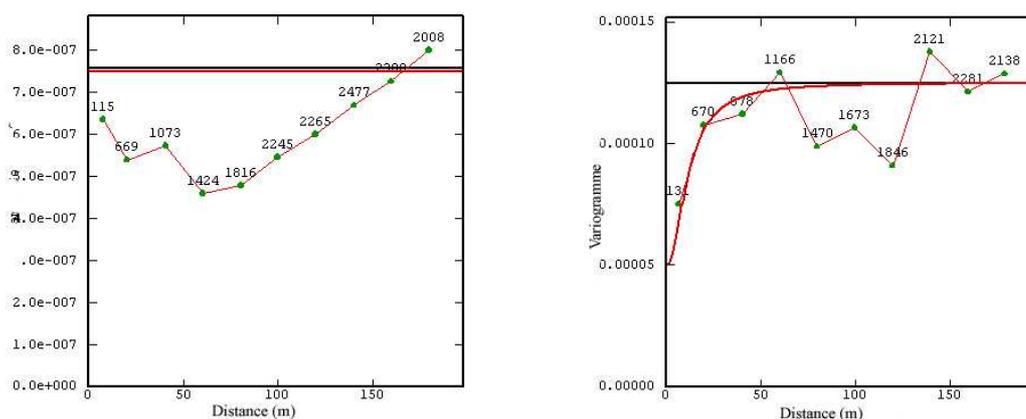


Figure 9.25 : Variogrammes de données FM : quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite.

En utilisant les modèles de variogrammes ajustés de densité de la puissance, nous avons exécuté un krigeage ordinaire et calculé la carte du champ électrique. La Figure 9.26

présente l'estimation du champ de deux quartiers. Les deux cartes mettent en évidence les faibles niveaux du champ électrique dans le quartier Latin de Paris, on peut constater la présence de points isolés où les niveaux de champ sont élevés, ces points correspondent aux valeurs de la densité 0.09 dans l'histogramme des données. Avec un modèle d'effet de pépite pour le krigeage ordinaire on estime uniquement la moyenne locale; c'est pourquoi la carte du quartier Latin n'a pas de contraste.

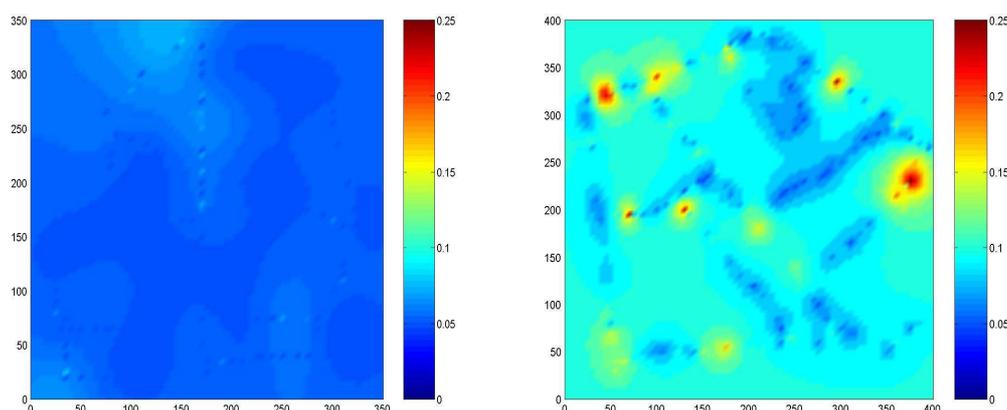


Figure 9.26 : Résultats du krigeage ordinaire pour les données FM, à gauche quartier Latin de Paris et à droite, quartier Paris 15.

Le test de validation croisée montre la qualité d'estimation de modèle de Cauchy sur les données FM, pour les deux quartiers l'estimateur du krigeage est sans biais, et nous avons des erreurs expérimentales presque identiques aux erreurs du modèle (Tableau 9.8). En effet, la moyenne d'erreur standardisée est presque nulle pour les deux quartiers (-0.0002 pour le quartier Latin de Paris et -0.001 pour le quartier de Paris 15), et l'écart type de l'erreur standardisée est de l'ordre de 1.035 pour le quartier Latin, 1.037 pour le quartier de Paris 15, c'est qui signifie une bonne cohérence entre l'erreur expérimental et l'erreur théorique du modèle. Cette qualité d'estimation du modèle est prouvé par une erreur quadratique moyenne quasi-nulle dans les deux quartiers. Le nombre des points robustes où l'erreur standardisée est inférieur à 5% est de 210 mesures dans le quartier Latin et 230 pour le quartier de Paris 15.

	Moyenne de l'erreur standardisée	Ecart-type de l'erreur standardisée	Erreur quadratique moyenne	Points robustes
Quartier Latin	-0.0002	1.035	0.0008	210/220
Quartier Paris 15	-0.0010	1.037	0.0023	230/236

Tableau 9.8 : Résultat de validation croisée pour les données FM.

3) Conclusion

Une étude du comportement du krigeage en fonction du modèle de variogramme a été réalisée dans ce chapitre. Dans la première section, nous avons étudié les modèles de variogramme dans deux quartiers voisins pour les données du GSM 900MHz. Dans la seconde section, nous avons étudié deux quartiers éloignés, le premier quartier est le quartier Latin de Paris et le second un quartier à Paris 15. Cette étude montre une bonne robustesse du krigeage, à moyenne échelle. Nous avons remarqué que la localisation des antennes joue un rôle important sur la robustesse de l'estimation.

Nous avons montré qu'avec la modélisation du variogramme par un modèle de Cauchy isotrope nous arrivons à 93% des données où l'erreur est inférieur à 5%, cette qualité d'estimation du modèle est prouvée dans différents jeux des données. Nous avons montré que l'application du krigeage sur les données du champ électrique mène à un biais d'estimation plus fort que la densité de puissance. Il faut donc travailler avec la quantité additive.

Dans cette application, nous avons appliqué le modèle de Cauchy sur différents jeux des données avec des configurations différentes, ce qui a montré une bonne adéquation de ce modèle pour la densité de la puissance. Cette qualité d'estimation a été vue dans les deux chapitres précédents sur les données de simulation et confirmé par application sur des mesures réelles.

Chapitre 10 : Probabilité de dépassement de seuil

Dans ce chapitre, nous calculons les probabilités avec lesquelles les niveaux d'exposition sont supérieurs à un seuil donné, dans le but d'offrir des informations sur la conformité d'exposition avec les normes d'ICNIRP, dont l'objectif recherché est d'obtenir une cartographie de cette probabilité. La première section est réservée à l'application de la méthode de conditionnement uniforme sur les mesures de la densité de puissance pour le service 900 MHz du quartier du boulevard Saint Germain. Dans la seconde section, nous présentons les traitements de ces mesures avec la méthode de simulation conditionnelle. Enfin, nous terminons par des discussions et conclusions

1) Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'évaluation de la probabilité avec laquelle le niveau d'exposition est supérieur à un seuil déterminé ; par exemple, la norme définie par la commission de protection contre les rayonnements non-ionisants. Dans ce cadre, les résultats obtenus par krigeage ne sont pas adaptés pour calculer des risques de dépassement de seuil. En effet, ces techniques d'estimation ont pour but de minimiser l'erreur, ce qui leur confère une propriété de lissage. En utilisant les résultats du krigeage pour estimer des dépassements de seuil, le risque est de sous-estimer ou sur-estimer le pourcentage réel des valeurs qui sont susceptibles de dépasser le seuil.

Afin d'étudier les dépassements de seuil, il est nécessaire de recourir aux techniques de la géostatistique non linéaire telles celles présentées dans le chapitre 6. Ces méthodes sont appliquées sur les mesures réalisées dans le quartier Latin de Paris. Les résultats d'application de la méthode de conditionnement uniforme sont présentés dans la première section de ce chapitre. La seconde section de ce chapitre, présente les résultats de simulation conditionnelle, le principe consiste à effectuer des simulations, représentant chacune une réalisation possible de la variable en chaque point.

Comme il est mentionné dans le chapitre 6, ces méthodes supposent que la distribution de la variable est gaussienne. Or, cette hypothèse n'est pas vérifiée dans notre cas (voir les histogrammes des mesures des différents quartiers dans le chapitre précédent). La première étape à effectuer consiste donc à transformer la distribution réelle de densité de la puissance en une variable gaussienne. Cette transformation déforme artificiellement la distribution des valeurs. L'ajustement d'une fonction d'anamorphose permet d'obtenir les résultats sur la variable brute à partir des résultats de la variable gaussienne.

2) Conditionnement uniforme

Dans le cas d'étude du quartier Latin de Paris, l'anamorphose ponctuelle a été tronquée en conservant les 30 premiers polynômes d'Hermite. Le coefficient de corrélation point-bloc vaut 0.95 comparé à la valeur de 0.74 du coefficient point-cellule. La Figure 10.1 montre les courbes (en gras) des anamorphoses des blocs (à gauche) et des cellules (à droite). on distingue sur ces graphiques également l'anamorphose empirique ponctuelle (Courbe plus fine) avec son développement en 30 polynômes d'Hermite (Point). Nous remarquons un écart entre l'anamorphose des cellules (en gras) et l'anamorphose ponctuelle (fine). Cet écart est devenu plus important pour les fortes valeurs de densité de puissance et est dû à un effet de support important.

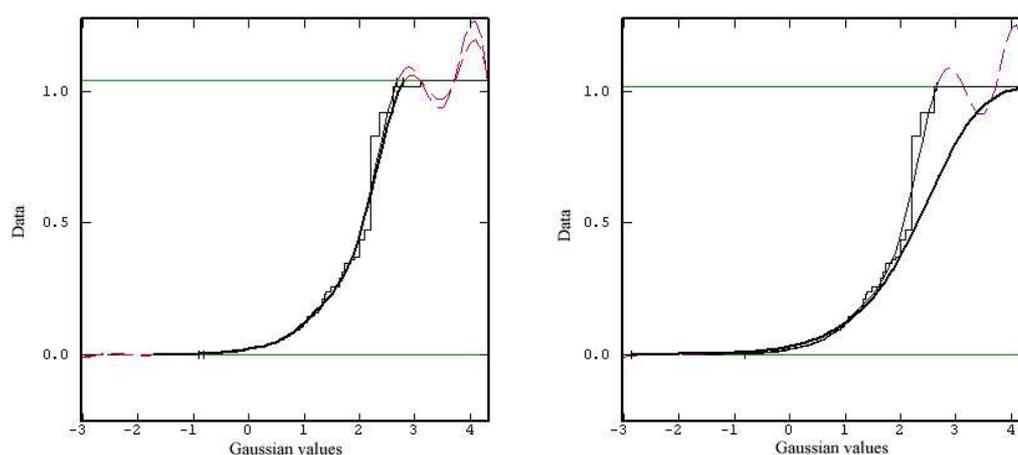


Figure 10.1 : A gauche : anamorphose ponctuelle (trait fin) et anamorphose des blocs (gras), à droite : anamorphose ponctuelle (fin) et anamorphose des cellules (gras).

Sur la Figure 10.2, on peut voir les histogrammes des blocs (en bleu) et des cellules (en rouge) tels qu'ils sont calculés par le modèle de changement de support, présenté dans la méthode de conditionnement uniforme.

Le modèle point-bloc-cellule étant pleinement spécifié, on peut appliquer des techniques d'estimation de la géostatistique non-linéaire pour calculer des statistiques de blocs localement à l'échelle des cellules. Nous utiliserons le conditionnement uniforme qui consiste à estimer l'espérance conditionnelle d'une fonction non-linéaire des blocs par rapport à des valeurs de cellule connues [19].

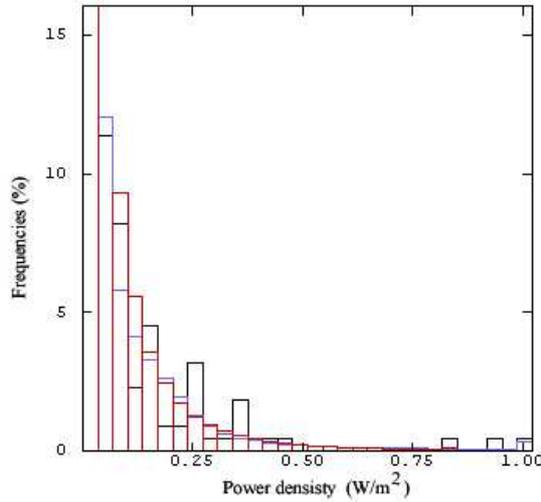


Figure 10.2 : Histogrammes des blocs (en bleu) et des cellules (en rouge).

Par exemple, on pourra calculer la proportion de blocs au-dessus d'un seuil z_c connaissant la valeur $z(V_0)$ d'une cellule V_0 donnée :

$$E[\mathbf{1}_{Z(v) \geq z_c} | Z(V_0) = z(V_0)] = P(\mathbf{1}_{Y(v) \geq y_c} | Y(V_0) = y(V_0))$$

$$= 1 - G\left(\frac{y_c - \rho_{vV} y(V_0)}{\sqrt{1 - \rho_{vV}^2}}\right)$$

où la variable conditionnelle $Y(v)/y(V_0)$ suit une distribution normale de moyenne $\rho_{vV}(V_0)$ et de variance $1 - \rho_{vV}^2$. G est la fonction de répartition gaussienne [19]. Le modèle de changement de support et en particulier le graphique de la Figure 10.2 fournit une appréciation globale sans tenir compte de l'information spatiale détaillée fournit par l'estimation de l'exposition. Le conditionnement uniforme nous permet de les introduire pour conditionner localement la statistique à estimer, en l'occurrence la proportion de blocs. Nous avons appliqué la technique du conditionnement uniforme en conditionnant par les valeurs moyennes de cellules obtenues par un krigeage avec dérive externe en utilisant le résultat de simulation avec EMF Visual comme dérive externe (Figure 10.3).

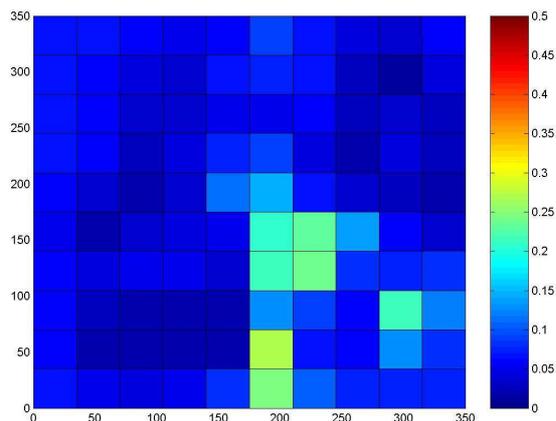


Figure 10.3 : Résultat du krigeage avec dérive externe sur des cellules de taille $(35*35 \text{ m}^2)$.

La probabilité de dépasser le seuil de 0.1 W/m^2 en densité de la puissance est presque nulle sur la grande majorité du quartier. Certaines zones comme les zones des stations de bases ont une probabilité faible de dépassement, comprise entre 0 et 0.3. La Figure 10.4 présente les résultats obtenus. Elle quantifie le risque de dépassement de seuil : sur la base du seuil 0.1 W/m^2 , on alerterait trois zones dans le quartier Latin de Paris.

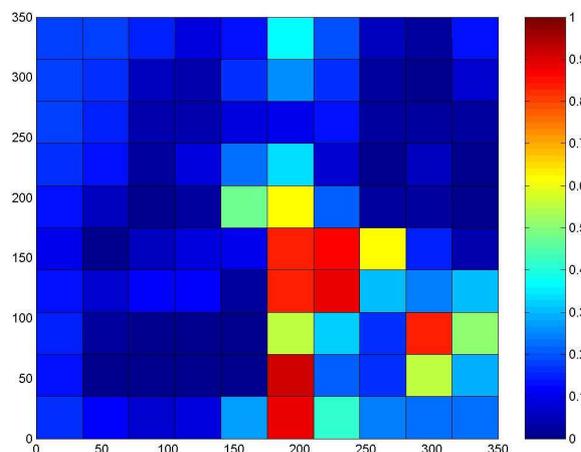


Figure 10.4 : Probabilité de dépassement de 0.1 W/m^2 .

3) Simulations conditionnelles

Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé 30 simulations conditionnelles, en utilisant l'algorithme présenté dans le chapitre 6, c'est-à-dire la méthode des bandes tournantes. Sur la Figure 10.5, nous montrons les résultats de la 5^e et de la 10^e

simulation conditionnelle de la densité de la puissance dans le quartier Latin de Paris. Ces simulations sont réalisées sur des cellules de tailles de 35m*35m.

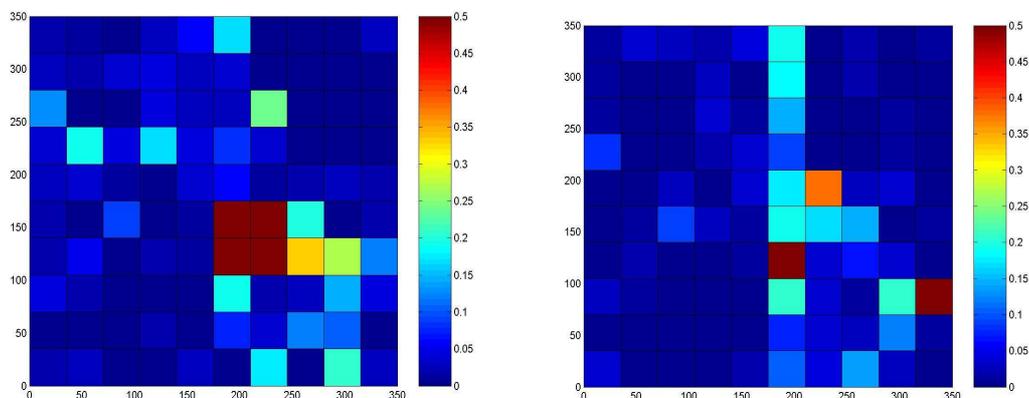


Figure 10.5 : Deux simulations conditionnelles de densité de la puissance sur des cellules 35x35 m², (à gauche) 5^{ème} simulation et (à droite) la 10^{ème} simulation.

Sur la Figure 10.6, nous présentons les cartes de probabilités de dépassement de seuil de 0.1W/m², calculées par méthode des simulations conditionnelles en utilisant 30, 50 et 100 bandes tournantes. Les allures des deux cartes de probabilité (Figure 10.4 et Figure 10.6) sont très proches. En théorie, les résultats devraient être les mêmes car les deux méthodes s'appuient sur la même hypothèse multigaussienne. Nous remarquons qu'avec l'augmentation du nombre de bandes tournantes, l'écart entre les résultats des deux méthodes s'affaiblit et la corrélation entre les deux résultats augmente. En effet, pour 30 bandes le coefficient de corrélation est égal à 0.810, 0.819 pour 50 bandes et 0.830 pour 100 bandes (Figure 10.7). Les quelques écarts constatés peuvent être imputés au calcul des anamorphoses des blocs lors de la mise en œuvre du conditionnement uniforme.

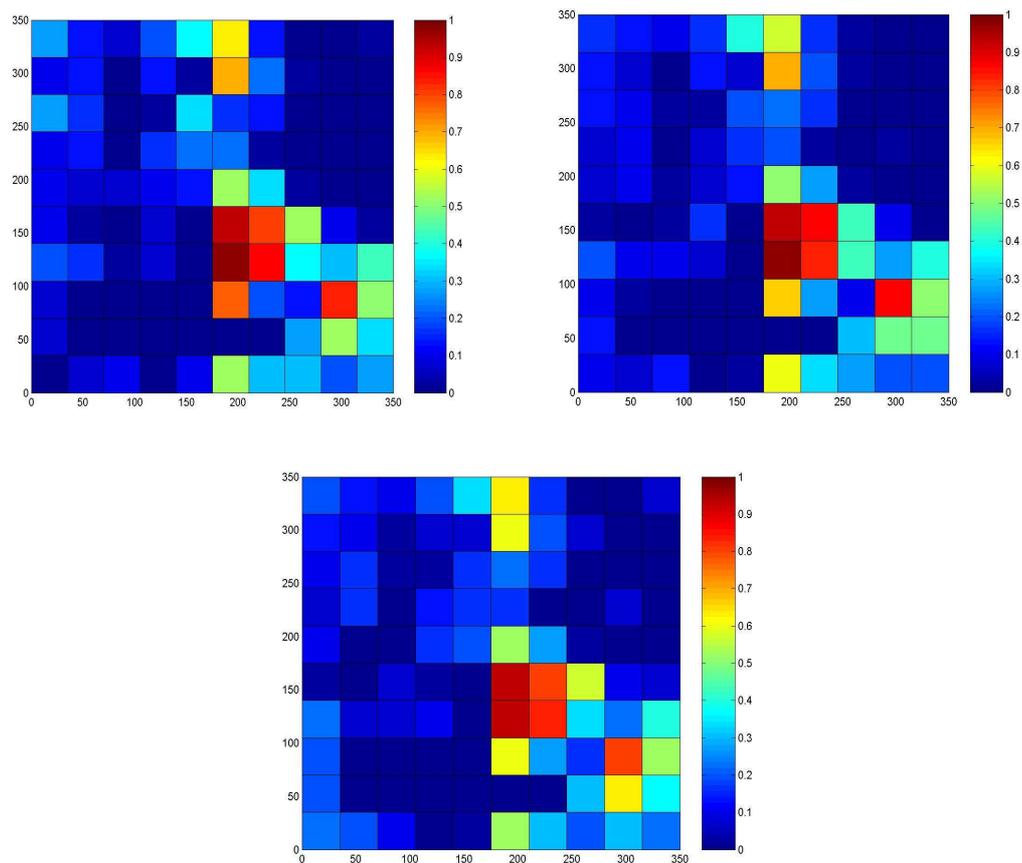


Figure 10.6 : Carte de probabilité de dépassement de seuil obtenu par simulations conditionnelles.

L'application des deux méthodes précédentes sur les données de la densité de puissance, a mis en évidence que les niveaux d'exposition radioélectrique émis par les stations de bases, sont très faibles, et que la probabilité de dépasser un seuil de 0.1W/m^2 est faible. Ce qui confirme la conformité d'exposition émise par les stations de base avec les normes définies par la commission de protection contre les rayonnements non ionisant tels qu'ils sont présentés dans le chapitre 2 dans ce quartier. La première partie de ce constat a déjà été signalée dans d'autres travaux menés sur ce sujet [2]. De plus, les résultats montrent une concordance dans l'estimation des probabilités pour les faibles valeurs de la densité de puissance, et des écarts plus importants entre les estimations par les deux méthodes, pour les plus fortes valeurs. Malgré cela, la comparaison entre les deux résultats montre l'absence d'un grand biais, une symétrie par rapport à la bissectrice, et une assez bonne corrélation dans les nuages de la Figure 10.7 est constatée.

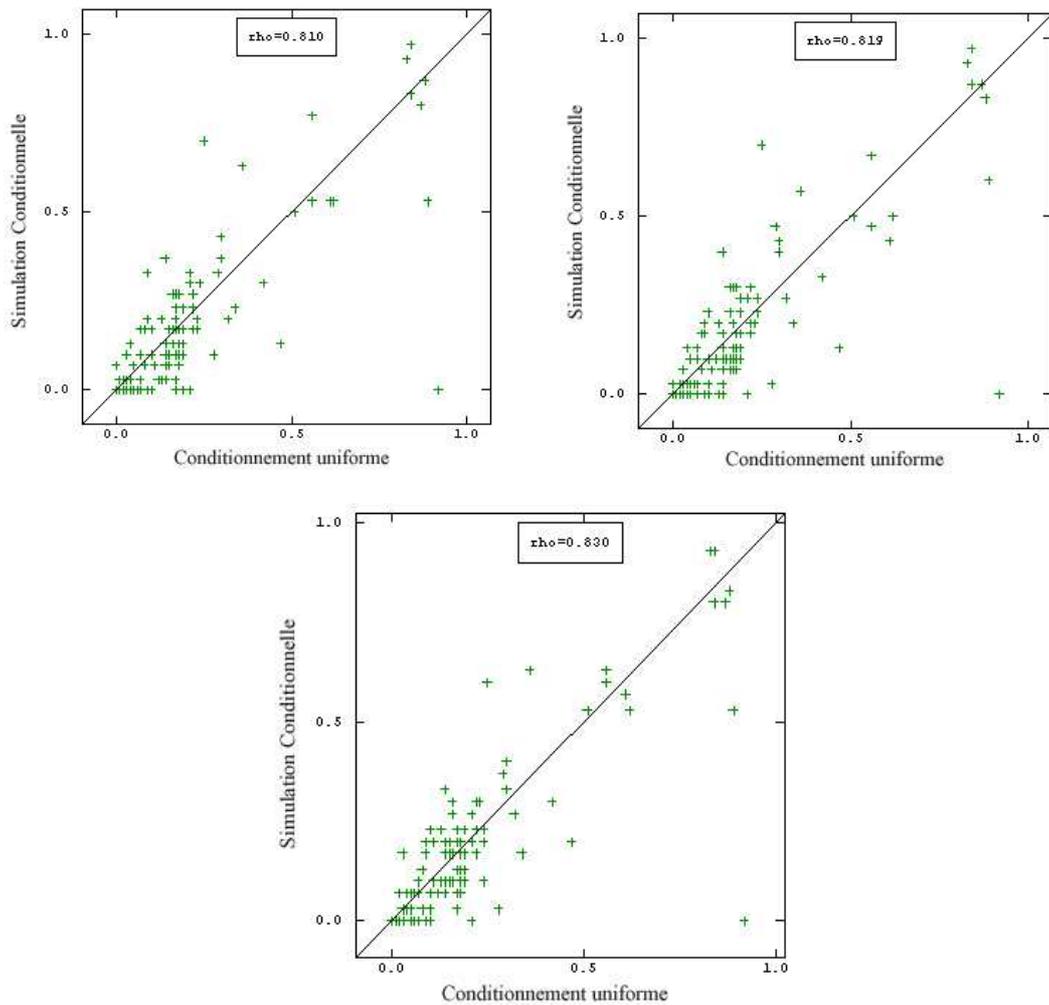


Figure 10.7 : Comparaison entre les deux méthodes.

4) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'application de deux méthodes pour l'évaluation de probabilité de dépassement de seuil. Ces applications confirment les faibles niveaux d'expositions et que les probabilités de dépasser les normes sont également faibles. Nous remarquons qu'avec l'augmentation du nombre de bandes tournantes, l'écart entre les résultats des deux méthodes diminue et la corrélation entre les deux résultats augmente.

Conclusion

L'objectif de ce travail est de présenter une méthodologie géostatistique d'évaluation de l'exposition radioélectrique qui permet d'étudier la conformité de cette exposition avec les normes recommandées par l'ICNIRP. Dans cette thèse, nous avons appliqué des méthodes de géostatistiques linéaires pour l'évaluation des niveaux d'exposition radioélectriques et deux méthodes de géostatistiques non-linéaires pour l'estimation de probabilités de dépassement de seuil.

Dans la première application, nous avons étudié la corrélation spatiale des données radioélectriques pour les deux fréquences 900MHz et 1800MHz, sur un ensemble de données sélectionnées par un échantillonnage stratifié à partir de données simulées en espace libre avec le logiciel d'EMF Visual. L'ajustement des variogrammes a été fait par une double structure de Cauchy. Ce modèle est adapté dans les deux cas étudiés. En termes d'erreur, on peut remarquer une erreur inférieure à 5% pour 90% des données.

La comparaison avec un autre modèle nous permet de dire que finalement ce qui compte c'est le comportement du variogramme au voisinage de l'origine et à grande distance. Les points où l'erreur dépasse 5% ont été enregistrés dans des zones de fortes valeurs de densité de puissance ; ceci est dû à un effet de lissage du krigeage. En termes de variance, on constate que le palier de données de simulation avec réflecteurs est inférieur à celui de l'espace libre, ceci est dû aux diffractions des ondes par ces réflecteurs de sorte que nous avons des zones homogènes.

Une deuxième application sur des mesures réelles réalisées à l'extérieur des bâtiments est présentée dans le chapitre huit. Dans cette application, nous avons présenté deux campagnes de mesure réalisées dans le quartier Latin de Paris.

La première a été réalisée avec l'analyseur du spectre. Quelques problèmes techniques ont été rencontrés dans la récupération des positions des mesures.

La deuxième campagne de mesures a été effectuée dans le même quartier, mais avec le dosimètre. Une combinaison entre les mesures et une simulation électromagnétique

Conclusion

dans ce quartier a été faite à l'aide de la méthode du krigeage avec dérive externe. Nous avons montré qu'avec la modélisation du variogramme par un modèle de Cauchy isotrope nous arrivons à 93% des données avec une erreur inférieure à 5%. Cette qualité d'estimation du krigeage est retrouvée sur un échantillon de données plus réduit. Avec l'utilisation de la dérive externe, nous avons diminué l'écart entre l'erreur expérimentale et l'erreur théorique à 1.351 contre 1.499 pour le krigeage ordinaire. D'un autre côté, la comparaison entre les niveaux du champ dans ce quartier avec les normes décrites dans le chapitre 2 (41 V/m pour le service 900 MHz), nous permet de confirmer le constat [2] du faible niveau du champ radioélectrique émis par les stations de bases.

Dans cette application le modèle de Cauchy montre une bonne adéquation avec la variation de la densité de la puissance. Cette qualité d'estimation a été montrée dans la première application sur les données de simulation et confirmée par cette application sur des mesures réelles dans le quartier Latin de Paris et avec un échantillon de taille plus petite et sur différents jeux de données avec des configurations différentes ; ce qui prouve une bonne adéquation de ce modèle avec la densité de la puissance. Il est important de signaler que l'application du krigeage sur les données du champ électrique mène à un biais d'estimation plus fort qu'en utilisant la densité de puissance.

Une troisième application de géostatistiques non linéaire sur les mesures de quartier Latin est montrée dans l'objectif d'offrir des informations sur la probabilité avec laquelle les niveaux d'exposition peuvent dépasser un seuil déterminé. Cette application confirme les faibles niveaux d'exposition et que les probabilités de dépasser les normes sont faibles aussi.

On notera que la méthode du krigeage, reste imprécise dans les zones de variations rapides. En effet, une erreur d'estimation est plus importante pour les plus fortes valeurs d'exposition. L'utilisation d'une dérive externe permet d'améliorer le résultat du krigeage. L'avantage de l'utilisation de la dérive externe se résume dans l'utilisation d'information locale sur l'exposition radioélectrique. Le modèle de variogramme de Cauchy est bien adapté aux fonctions de variogramme dans le plan XOY . Une persistance des paramètres de ce modèle est montrée pour les quartiers où nous avons des densités des émetteurs comparables.

Conclusion

Afin de poursuivre les travaux de recherche présentés dans cette thèse, une troisième application sur les mesures à l'intérieur des bâtiments pourrait être réalisée. Dans cette application, on s'intéressera aux rayonnements des antennes WiFi. Dans ce sens des campagnes des mesures ont déjà été réalisées dans différents sites de France Télécom dans le cadre d'un projet France Télécom R&D pour l'évaluation de l'exposition radioélectrique dans ces sites.

L'une des perspectives de ce travail, serait aussi d'étudier la variabilité de la densité de la puissance sur l'axe (oz) pour l'estimation d'exposition en trois dimensions. Par ailleurs, le calcul d'une fonction de covariance spécifique aux phénomènes électromagnétiques pourrait être réalisé. Il est cependant fort possible qu'elle fasse partie de la famille des fonctions de covariance de Cauchy.

Bibliographie

- [1] A. David and J. Ladbury, Spatial-Correlation Functions of Fields and Energy Density in a Reverberation Chamber. IEEE TRANS. VOL. 44, NO. 1, FEBRUARY 2002.
- [2] ANFR. Panorama du rayonnement électromagnétique en France. Technical report, Agence Nationale des Fréquences, Maisons-Alfort, 2004.
- [3] A. Mantoglou and J.L. Wilson, the Turning Bands Method for Simulation of Random Fields Using Line Generation by a Spectral Method. Water Resources Research 18 (5): 1379–1394, 1982.
- [4] A Spector and F S Grant. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. Geophysics, 35:293–302, 1970.
- [5] C. Demoulin, M.-Van Drooghenbroeck, Principes de base du fonctionnement du réseau GSM. Revue de l'AIM, pages 3.18, N04, 2004.
- [6] C. Lantuéjoul, Geostatistical simulation: models and algorithms. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [7] C99-111 Recommandations concernant l'exposition des personnes aux champs. électromagnétiques en milieu professionnel – UTE.
- [8] D. Marcotte, An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. Mathematical Geology, 27(5):659-672. 1995.
- [9] EN 50492:2006, Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations dea: 2007-01-19.
- [10] EN50366:2003, Household and similar electrical appliances - Electromagnetic fields - Methods for evaluation and measurement. CENELEC, 2003.
- [11] EN 50383, Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz – 40 GHz).

Bibliographie

- [12] E. Larchevêque, Christian Dale, Man-Fai Wong, and Joe Wiart. Analysis of electric field averaging for in situ radiofrequency exposure assessment. *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 54(4), July 2005.
- [13] F. Gardiol, *Electromagnétisme*, volume 3, Presse Polytechniques et Universitaire Romandes, 1996.
- [14] G. Matheron, *Traité de géostatistique appliquée*, Tome I. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.14. Editions Technip, Paris. 1962.
- [15] G. Matheron, *Les variables régionalisées et leur estimation*. Masson, Paris. 1965.
- [16] G. Matheron, *Le krigeage universel*. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 1. Ecole de Mines de Paris, Fontainebleau. 1969.
- [17] G. Matheron, *La théorie des variables régionalisées, et ses applications*. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5. Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau. 1970.
- [18] G. Christakos, On the problem of permissible covariance and variogram models. *Water Resources Research*, 20(2):251-265. 1984.
- [19] H. Wackernagel. Geostatistical normalization of air pollution transport model output and station data using Isatis. CG-ENSMP, December 2002.
- [20] H. Wackernagel, *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*, Springer- Verlag, Berlin, 3rd edition, 2003.
- [21] H. Wackernagel. *Géostatistique et assimilation séquentielle de données*, Habilitation à diriger des recherches, 25 mai 2004.
- [22] H Wackernagel, C Lajaunie, N Blond, C Roth, and R Vautard. Geostatistical risk mapping with chemical transport model output and ozone station data. *Ecological Modelling*, 179:177–185, 2004.
- [23] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4):494–522, 1998.
- [24] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.* 66:100 –106; 1994.
- [25] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.* 70:587–593; 1996.

Bibliographie

- [26] International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 66; 1994.
- [27] Institute of Electrical and Electronic Engineers. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE C95.1-1991; 1992.
- [28] International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva: International Labour Office; Occupational Safety and Health Series, No. 69; 1994.
- [29] International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54:115–123; 1988.
- [30] International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. Health Phys. 58:113–121; 1990.
- [31] J-G. Remy, J. Cueugnet et C. Siben, Systèmes de radiocommunications avec les mobiles, Eyrolles, 1988.
- [32] J. Rivoirard, Introduction to Disjunctive Kriging and Non-linear Geostatistics. Oxford University Press, Oxford. 1994.
- [33] J. Rivoirard, "Concepts et méthodes de la géostatistique", centre de géostatistique, Fontainebleau. 1995.
- [34] J.-P. Chilès, P. Delfiner; "Geostatistics modelling spatial uncertainty", A Wiley-Interscience Publication.
- [35] J-P. Chilès et A. Guillen, Variogrammes et krigeages pour la gravimétrie et magnétisme, Sciences de la terre, 1984.
- [36] J. Deraisme, Complément d'étude de la probabilité de dépassement de seuil et d'exposition de la population à la pollution. Geovariances. Février 2003.
- [37] J. Wiart, "Propagation des ondes radioélectriques en milieu urbain dans un contexte microcellulaire analyse par le GTD et validation expérimentale". 1995.

Bibliographie

- [38] J. Wiart, Christian Dale, Ada Victoria Bosisio, and Alain Le Cornec. Analysis of the influence of the power control and discontinuous transmission on RF exposure with GSM mobile phones. *IEEE Trans. on EMC*, 42(4):376–385, 2000.
- [39] L. Bertino, and H. Wackernagel, Case studies of change-of-support problems. Tech. Rep. N–21/02/G, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- [40] L. Drabeau, "Statistiques et interpolations dans le système d'information Géographique", Centre I.RD Montpellier.
- [41] M. Bobbia, Investigations en vue d'une approche géostatistique de la qualité de l'air – Analyse du risque : Les simulations Conditionnelles, Air normand. Juillet 2001.
- [42] M. Helier, Techniques micro-ondes structures de guidage, dispositifs passifs et tubes micro-ondes, ellipses, 2001.
- [43] M. Arnaud et X. Emery, Estimation et interpolation spatiale. Hermes Science Publications, Paris. (2000).
- [44] M. Lambert, Obstacles et cibles note des cours, 2001.
- [45] N. Blaunstein, J.B. Andersen, "Multipath phenomena in cellular networks"; Arech House Publishers.
- [46] N. Blaunstein, "Radio propagation in cellular networks"; Arech House Publishers.
- [47] ND 1887, Guide pour l'établissement de valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquences comprises 100KHz et 300 GHz. INRS, 2001.
- [48] ND 1886. Valeurs limites d'exposition aux agents physiques en ambiance de travail.
- [49] N. A. C. Cressie, *Statistics for spatial data*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics. John Wiley & Sons Inc., New York. Revised reprint of the 1991 edition, A Wiley-Interscience Publication. 1993.
- [50] P. Chauvet, Aide mémoire de la géostatistique linéaire. Cahiers de Géostatistique, Fascicule 2. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre de Géostatistique, Fontainebleau. 1999.

Bibliographie

- [51] P. De Doncker, J M Dricot, R Meys, M Hélier, and W Tabbara. Electromagnetic fields estimation using spatial statistics. *Electromagnetics*, 26:111–122, 2006.
- [52] P. De Doncker, Spatial correlation functions for fields in three-dimensional Rayleigh channels. *Electromagnetics*, 40, 55–69, 2003.
- [53] R. Vincent, M. Grzebyk, H. Wackernagel, C. Lajaunie (1999); "Application de la géostatistique à l'hygiène industrielle : Evaluation d'un cas d'exposition professionnelle au trichloréthylène". INRS, ND 2094-174-99.
- [54] R. Daley. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [55] U. Bergqvist and al, Mobile telecommunication base stations exposure to electromagnetic fields, Report of a Short Term Mission within COST 244bis.
- [56] 1999/519/CE: Recommandation du conseil, relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz), 12 juillet 1999.
- [57] Y. Adnane, "Caractérisation inverse de sources pour l'évaluation de l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques émises par les antennes de station de base", p 10. 2004.
- [58] Y. Ould Isselmou, H.Wackernagel, W. Tabbara, and J. Wiart "Geostatistical interpolation for mapping radio-electric exposure levels", EuCAP 2006, Nice, France.
- [59] Y. Ould Isselmou, H.Wackernagel, W. Tabbara, and J. Wiart " Geostatistical estimation of electromagnetic exposure", CD-ROM 12 pages, GeoENV 2006 , Rhodes (Grèce)
- [60] Y. Gratton, *Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale*. Les Articles de l'Institut d'Analyse Géographique. 2002.
- [61] W. Pirard, *Principe de fonctionnement des réseaux de téléphonie mobile GSM*, Institut Scientifique de Service Public, 2003.

Glossaire

1) Abréviations:

	Explications	Interprétations des sigles en anglais
BCCH	Canal de signalisation	Broadcast Control Channel
BSC	Contrôleur de station de base	Base Station Controller
BSS	Sous-système radio	Base Station Subsystem
BTS	Station de base	Base Transceiver Station
CDMA	Accès multiple par division de codes	Code Division Multiple Access
CEI	Commission électrotechnique internationale	European Committee for Electrotechnical Standardization
CEPT	Conférence européenne des postes et télécommunications	
DAS	Débit d'absorption spécifique	Specific Absorption Rate
FDMA	Accès multiple par division de fréquences	Frequency Division Multiple Access
GSM	Groupe Spécial Mobile	Global System for Mobile
IEEE	Institut des ingénieurs en électricité et en électronique	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KED	Krigeage avec dérive externe	Kriging with External Drift
MSC	Commutateur de réseau numérique	Mobile services Switching Center
TCH	Canal de trafic	Traffic Channel
TDMA	Accès multiple par division temporelle	Time Division Multiple Access

2) Définitions:

Canaux de contrôle	Canaux de signalisation transportant des informations systèmes
Canaux de trafic	Canaux utilisés pour les informations usagers (voix, données) (data chanel)
Canaux descendants	Canaux portant les communications de la station de base vers le mobile
Canaux montants	Canaux portant les communications du mobile vers la station de base (Reverse link ou uplink)
Handover	Passage d'une cellule à une autre sans interrompre la communication
Modulation	Transformation du signal de données de façon à pouvoir l'envoyer en limitant les interférences
Porteuse	Fréquence à laquelle une information usager/système va être transmise

Annexe A: Campagne des mesures avec l'analyseur du spectre

1) Plan de mesures

Pour réaliser cette campagne de mesures, nous avons sélectionné un quartier sur le Boulevard Saint Germain. Ce choix est basé sur le nombre de stations de base dans ce quartier (figure A.1). Après avoir choisi ce quartier nous avons localisé les 43 points de mesure. Ces différents sites sont repérés soit en rouge pour les points de mesure, soit en bleu pour les antennes sur le plan qui suit.

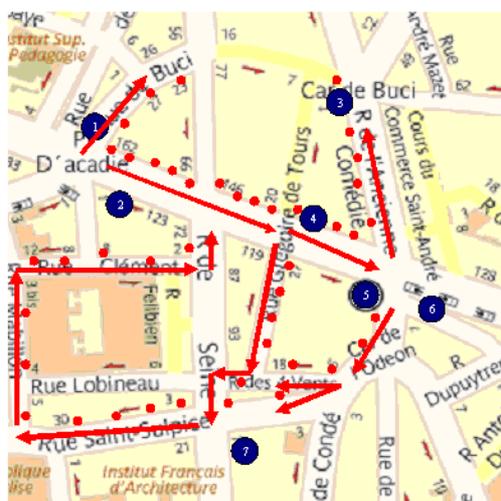


Figure A.1 : Quartier de mesures

2) Mesures effectuées

La procédure pour les mesures d'exposition électromagnétique sur le quartier retenu est basée sur leur réalisation dans les bandes des fréquences 900 et 1800MHz. La bande de résolution (RBW) sur l'analyseur de spectre a été choisie à 300KHz. Concernant l'accessibilité aux points de mesure, nous disposons d'un camion laboratoire, et nous utilisons l'antenne de mesure étalonnée; celle-ci est fixée sur le mât télescopique situé au centre du camion (hauteur d'antenne = environ 1mètre).

Annexe A: Campagne des mesures avec l'analyseur du spectre

Le synoptique illustré par la figure 2 représente la chaîne de mesure utilisée sur les différents sites.

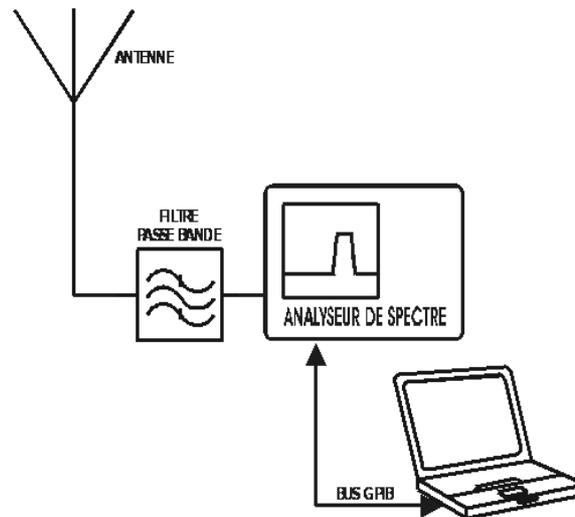


Figure A.2 : Synoptique de la chaîne de mesure

Les principaux paramètres de l'analyseur de spectre sont les suivants :

- Bande de résolution : 10 kHz
- Atténuation : 0 dB

Le matériel suivant a été utilisé pour effectuer ces contrôles :

- analyseur de spectre (9KHz-6.7GHz)
- filtre passe-bande
- câbles coaxiaux faibles pertes.

Annexe A: Campagne des mesures avec l'analyseur du spectre

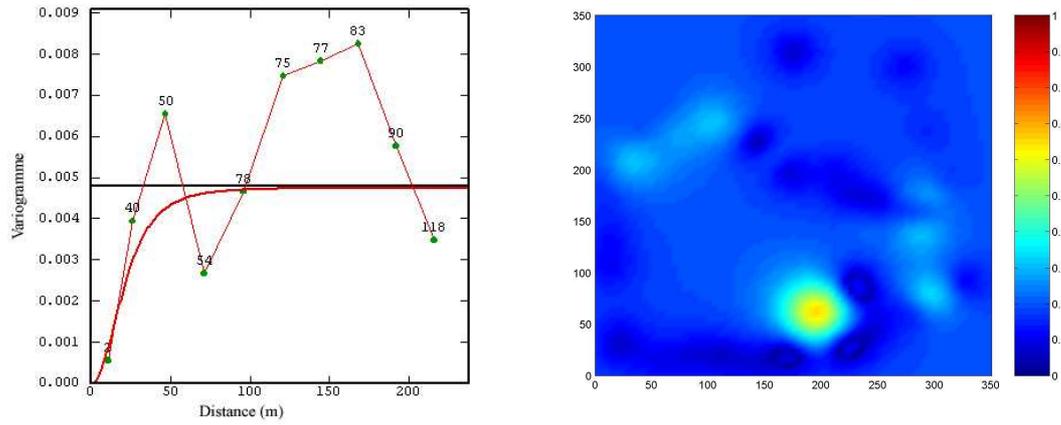


Figure A. 6 : à gauche variogramme, à droite résultat du krigeage (W/m^2).

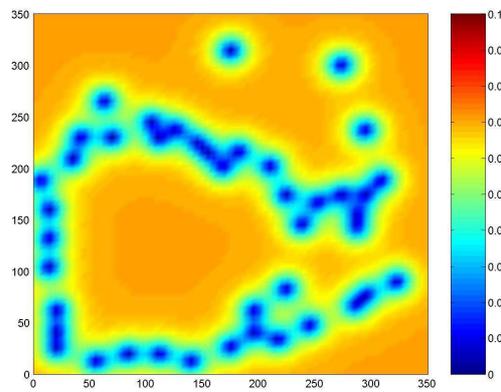


Figure A.7 : Carte d'écart-type.

Annexe B

GEOSTATISTICAL INTERPOLATION FOR MAPPING RADIO-ELECTRIC EXPOSURE LEVELS

Y. Ould Isselmou^{1,2}, H.Wackernagel², W. Tabbara³, and J. Wiart¹

¹France Télécom R&D, RESA/FACE, 38 rue du Général Leclerc, 92794 Issy-les-Moulineaux cedex 9, France,

yahya.ouldisselmou@orange-ft.com, joe.wiart@orange-ft.com

²Ecole des Mines de Paris, CG-Géostatistique, 35 rue Saint Honoré, F-77305 Fontainebleau, France, hans.wackernagel@ensmp.fr

³Supélec, DRE-LSS, 3 rue Joliot Curie, 91192 Gif-sur-Yvette, France, tabbara@lss.supelec.fr

ABSTRACT

The electromagnetic environment in urban areas is growing increasingly complex. Sources of electromagnetic exposure like TV, FM, GSM, Wifi and others are spreading continuously and in the case of Wifi their geographical locations cannot be cataloged exhaustively anymore. Furthermore, the complexity of any highly urbanized environment and the lack of information about the dielectric properties of buildings lead to complex configuration so that a precise deterministic modeling of the electromagnetic exposure at any a given location of interest is probably out-of-reach.

On the other hand there is a growing demand to assess the human exposure induced by these wireless communications. In a project between France Télécom R & D, Ecole des Mines and Supélec the application of geostatistical methods in this context is being explored.

Geostatistics provides the right framework for setting such exposure maps and its spatial statistical models elds an estimate of exposure as well as an associated error [4].

The project consists of three phases: geostatistical evaluation of data generated by the numerical model EMF Visual (both in free space and with the addition of obstacles), statistical analysis of measurements performed in the area of the Quartier Latin in Paris and, finally, joint evaluation of an urban area both by statistical and deterministic numerical modeling.

The paper reports about the third phase of this ongoing project, in which the spatial variation is modeled using the *variogram*, followed by a spatial regression known as *kriging*. The paper presents results about using a kriging algorithm that integrates numerical model output as an *external drift*.

Key words: Geostatistics; electromagnetic exposure; GSM base stations.

1. INTRODUCTION

The wireless communication systems and cellular handset are nowadays intensively used worldwide. To support these equipments thousand of base stations or access points operating at different frequencies and using different communication protocol have been implemented. These antennas have induced a public concern about exposure to electromagnetic fields. To check the compliance with the relevant limits such as those of ICNIRP [5] international bodies such as CENELEC, IEC, CEPT or IEEE have developed accurate methods to assess exposure. The exposure to the electromagnetic field induced by TV, GSM, FM. . . is weak as shown in [1], yet the public is looking for the exposure assessment and not only for the compliance. Numerical tools such as EMF Visual have been developed, but even if the locations of the antennas are public (e.g. www.cartoradio.fr or www.sitefinder.radio.gov.uk) the characteristics of emission (type of antenna, tilt, azimuth, power emitted) are considered as quite sensitive data. Because of that, simulations are not always possible, and an exposure assessment based on field measurements is needed. A frequency selective "in situ" exposure assessment can be carried out using either a personal dosimeter or a monitoring station (e.g. EME SPY and INSITE Station by Antennessa), but tools have to be developed to spatially interpolate the data.

In this paper we propose a new approach to mapping electromagnetic exposure which resembles methods that are common practice in numerical weather forecasting [3]. The approach is subdivided into two main steps.

First, a guess of the electromagnetic field is constructed by a numerical model, using the known antenna positions as well as likely parameters for their emission characteristics. This provides a possible, yet inaccurate first picture of the propagation of the electromagnetic signal in the field.

Second, the surface generated with the numerical model, the *guess field*, is combined with the measurements of

Annexe B

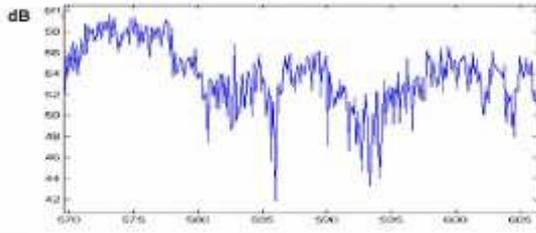


Figure 1. Electric field strength (dBµV/m) along a line.

radio-electric exposure to base station emissions in order to provide a corrected picture of the electromagnetic field. The combination of the data with the numerical model output is performed using the geostatistical method of *kriging*, which is preceded by a statistical analysis and modeling of the residual between the guess field and the observations.

2. ELECTROMAGNETIC FIELD STRENGTH ASSESSMENT

The wireless communications services operate at different frequencies, for instance the frequency band used by FM, TV3, GSM 900 downlink, GSM 1800 downlink, UMTS downlink and WIFI are respectively in the MHZ [88 108], [174 223], [925 960], [1805 1880], [2110 2170], [2400 2500] bands. The wireless systems use also different communication protocols and techniques [10] such as Time Division Multiplex Access (TDMA), Discontinuous Transmission (DTX), Code Division Multiplex Access (CDMA) and Adaptive Power Control (APC), therefore the power emitted by these systems are variable. Moreover, the signal emitted by an antenna operating at a given frequency is reflected and diffracted by walls and edges of buildings. Therefore the field received is a combination in phase and in counterphase of these contributions, which create fading (cf Figure 1)

The exposure assessment has to take into account such variations [6] and measurements performed at different locations cannot be compared point to point.

3. MEASUREMENT SYSTEM

Different frequency-selective measurement systems exist: on the one hand, integrated equipments based on hard filters such as the *personal dosimeter*, on the other hand, the classical *spectrum analyzer*. These equipments are in either case connected to an antenna. In the case of a personal dosimeter the frequency bands under test are predetermined and consist of the main services occupying the spectrum, such as TV, FM, GSM, UMTS, WIFI. The dosimeter made available for this



Figure 2. View of the dosimeter used in this study and its internal structure.

study (see Figure 2) uses hardware filters and was able to measure 9 bands (a newer version will be able to analyze 12 bands). This included GSM 900, GSM 1800 and UMTS downlink (i.e emitted by base stations). The axial isotropy of the device is greater than 1 dB at 66% and greater than 2 dB at 95%; the minimum and maximum detection is respectively 0.05 V/m and 5 V/m; the resolution is 0.01 V/m.

The spectrum analyzer is a versatile equipment: its output consists in a trace that represents the spectrum sampled at N points in a frequency interval (*fstart*, *fstop*) that can be defined as needed. The spectrum analyzer is more sensitive and its resolution is smaller, but the equipment is less portable.

The memory of the dosimeter is able to record up to 7000 measurements with a minimum sampling duration of 3 seconds. Figure 3 shows a set of 220 measurements performed along streets in Paris with a sampling duration of 10 seconds. Since the sensitivity of the equipment is 0.05 V/m, the field strength below or equal to this limit is recorded at 0.05 and is not significant.

Since measurements can be performed with both methods we have carried out a comparison between spectrum analyzer and dosimeter measurements. This study has been performed in laboratory and has been focused on GSM 900 downlink, known as *GSM900rx*, since this will be the frequency of interest in this study. The Figure 4 reveals that there is a good agreement between the measurements from the two devices. As explained previously, the measurements performed using a spectrum analyzer are more precise, so the measurements exhibit only a small fading. The measurements from the dosimeter have a limited resolution as compared to the spectrum analyzer. The comparison further shows that measurements performed with a dosimeter match well those stemming from the spectrum analyzer.

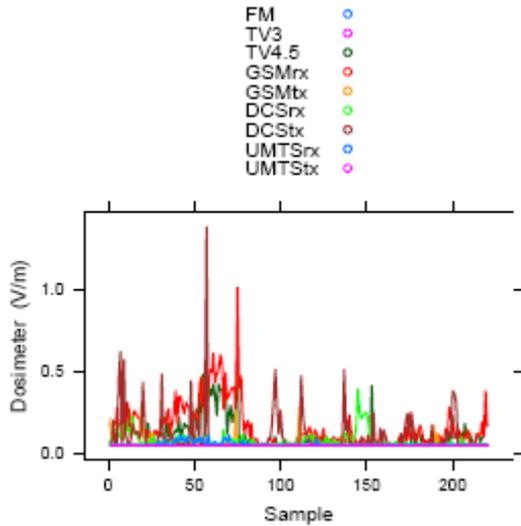


Figure 3. Example of 220 measurements (sampling duration 10s) performed with the dosimeter along streets in the Quartier Latin in Paris.

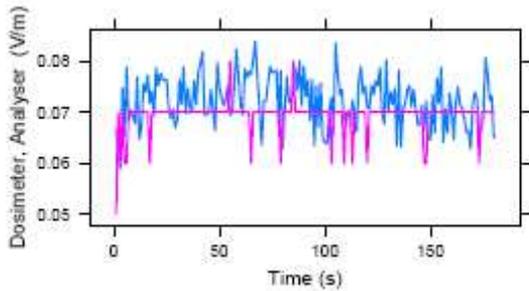


Figure 4. Comparisons between measurement performed in laboratory, at 900 MHz, with a dosimeter (red line) and a spectrum analyzer (blue line).

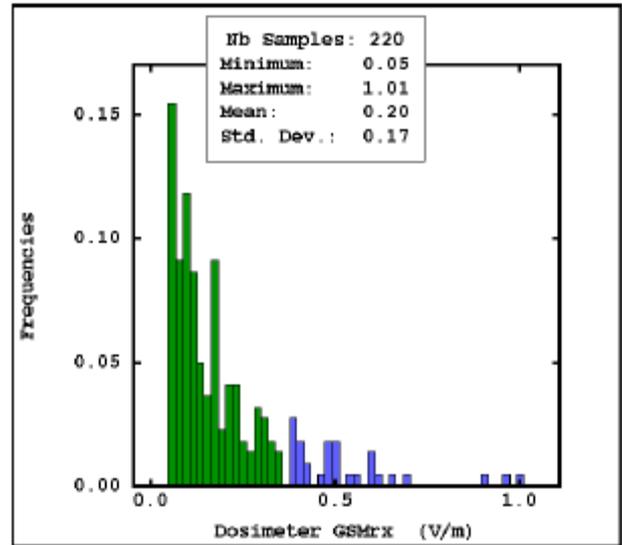


Figure 5. Histogram of dosimeter GSMrx data; the tail is colored in blue. There are 3 outliers on the right.

4. DATA FROM THE QUARTIER LATIN AND EMF VISUAL SIMULATION

The first author took sample dosimeter measurements in the Quartier Latin area of Paris. The sequence of the measurements for the different frequency bands was displayed on Figure 3. We will concentrate on the GSMrx band, which corresponds to the radio-electric exposure related to emissions from GSM base stations.

The histogram of the 220 GSMrx values is displayed on Figure 5 and it has a typical right-skew shape. The tail has been colored in blue and it can be noted that three values single out on the right, which we may qualify as *outliers*.

The geographical locations of the 220 samples can be seen on Figure 6. The symbols are proportional in size to the values of GSMrx exposure measured at each location and those locations corresponding to values that lie in the tail of the histogram are shown in blue.

Taking account of the base station locations and of the reflectors (buildings) in that section of Paris, as displayed on Figure 7, a simulation of electromagnetic propagation was performed with the software EMF Visual. The geographical map of the output is shown on Figure 8 and the corresponding histogram on Figure 9. As the characteristics of the antennas were not disclosed to us, the parameters were set to likely values and we therefore qualify the result as a *guess field* (like in meteorological applications [2]).

The histograms of the data and the model output are both right-skewas they reflect/reproduce the same type of physical phenomenon. However, one cannot expect them to be perfectly compatible due to the qualitatively different sources of error, to the non-stationarity of the field

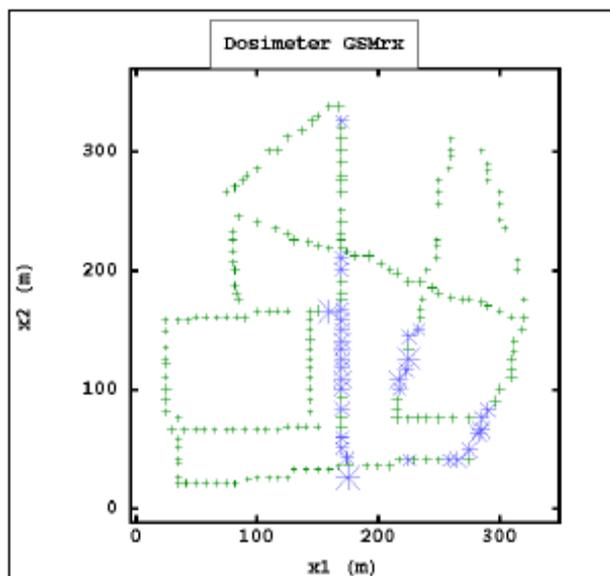


Figure 6. Map of sampling locations of dosimeter GSMrx data in the Quartier Latin; the diagonal line of samples was taken along boulevard Saint Germain. The locations in blue correspond to values in the tail of the histogram; the symbol sizes are proportional to the values.

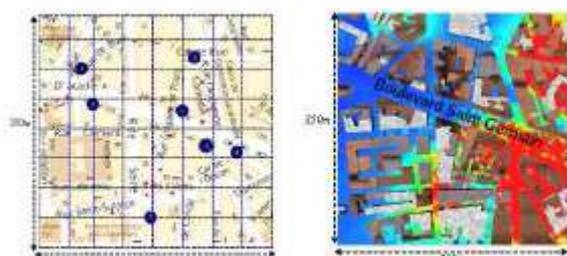


Figure 7. The EMF Visual simulation is taking account of the position of the base stations (blue dots on the left) and of the reflectors (buildings).

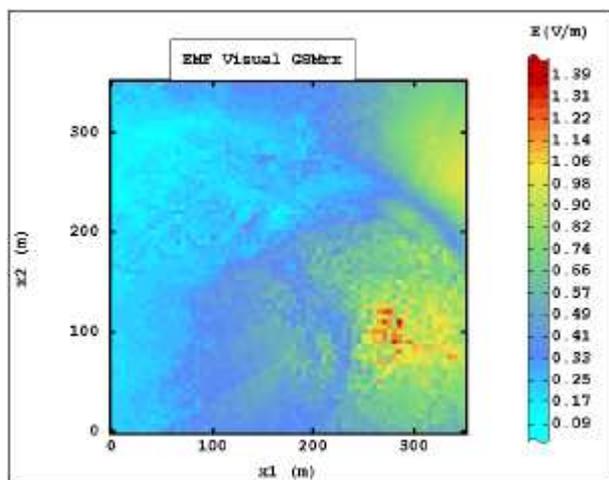


Figure 8. Guess field generated with EMF visual using known antenna positions and reflectors, setting likely values for their characteristics.

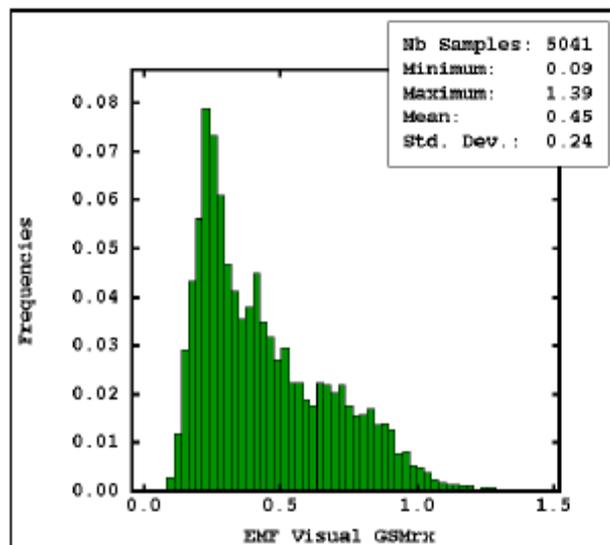


Figure 9. Histogram of EMF Visual GSMrx values.

and, in particular, to the sampling design of the dosimeter data with samples arranged along lines.

The EMF Visual guess field provides an inaccurate sketch of the electromagnetic propagation from known point source locations and with known obstacles. This needs to be corrected with the help of the measurements. Conversely, the measurements do not include explicit information about the location of the sources and the reflectors, so the inclusion of the EMF Visual output is a way of bringing that information into the interpolation problem.

A balance has to be found between the data and the model output: this will result from the statistical analysis and modeling of the spatial variation of the *residuals*, i.e. the differences between the measurements and the numerical model output.

5. COMBINING DATA AND GUESS FIELD BY KRIGING

The method we apply is known in geostatistics as *kriging with external drift* (KED) [8, 2] and has been applied to many problems. Kriging is a spatial regression based on a statistical model of the spatial variation. The use of numerical model output as external drift is fairly recent in geostatistics [9], but is common practice in meteorology and oceanography. KED is implemented in the following steps:

1. fit the numerical model output to data by least-squares (LS-FIT),
2. compute the differences (residuals) between data values and corresponding LS-FIT values,

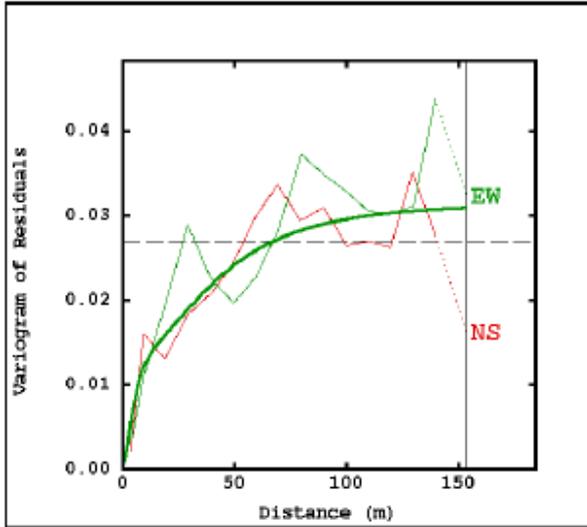


Figure 10. Variogram of residuals between samples and EMF Visual model output. The dashed horizontal line represents the variance. The thin green and red lines are respectively the experimental variograms computed in the North-South (NS) and East-West (EW) directions. The thick green line represents the isotropic variogram model consisting of: a small measurement-variance term, a short-range (16m) and a long-range (140m) Cauchy type variogram structure.

3. compute and model the auto-correlation of the residuals using the *variogram*,
4. final KED estimate based on the residuals' variogram model and the LS-FIT as external drift.

After performing the first two steps, which are elementary, we wish to characterize the spatial correlation of the residuals. This is performed in geostatistics with the variogram $\gamma(h)$, ie the expectation of the squared differences of values Y that are h apart,

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Y(x+h) - Y(x))^2]$$

where x and $x+h$ are two locations in geographical space. In practice, the variogram can be computed for different directions by calculating mean-squared differences of data values for pairs of points belonging to given distance and angle classes.

The variogram of GSMrx dosimeter measurements was computed into perpendicular directions of space and is displayed on Figure 10 for the NS and EW directions. The directional variograms obviously overlay, so that we could fit an *isotropic* variogram model. We use a nested variogram model consisting of the sum of a term corresponding to the variance of measurement-error and of two Cauchy-type variogram terms, which are commonly used in exploration geophysics to model the spatial variation of magnetic and gravimetric data [7, 2].

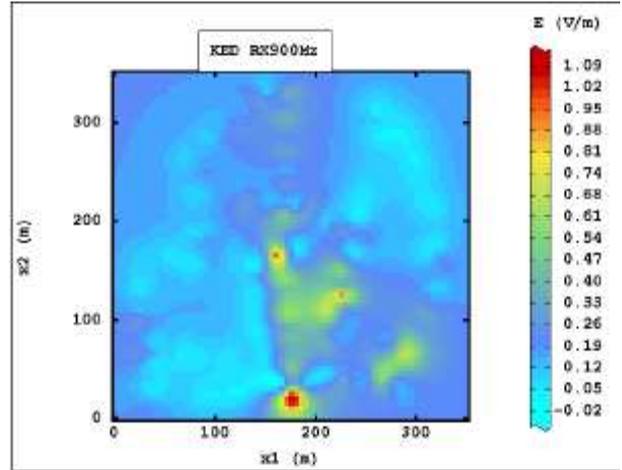


Figure 11. Kriged map of GSMrx exposure: the “hot spots” (in red) are due to the 3 outliers.

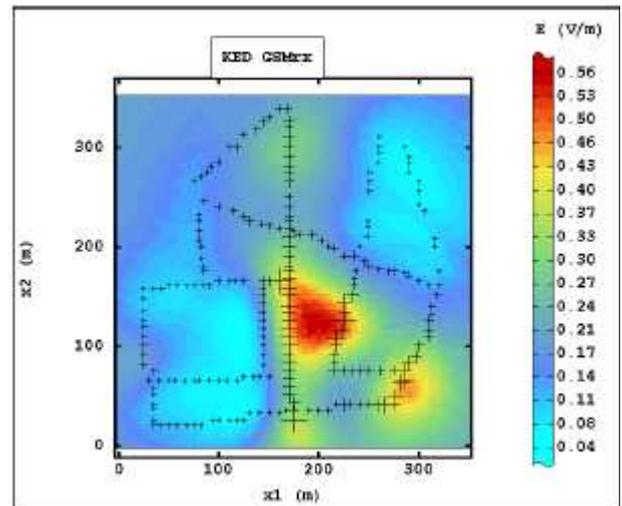


Figure 12. Kriged map of GSMrx exposure, filtering small-scale variation: large-scale phenomena are emphasized.

The map of the GSMrx values estimated by KED is shown on Figure 11. The influence of the three dosimeter outliers is quite important and leads to three “hot spots” on the map, which are eventually due to fading.

As an alternative, we propose to filter small-scale variation (see [8] for details on methodology) by removing the variation associated both with the measurement variance and the short-range Cauchy-type structure. The resulting map is displayed on Figure 12: it emphasizes large-scale phenomena and in particular the areas of higher exposure.

Annexe B

ACKNOWLEDGMENTS

Geostatistical calculations were performed with the software package Isatis (www.geovariances.fr).

REFERENCES

- [1] ANFR. Panorama du rayonnement électromagnétique en France. Technical report, Agence Nationale des Fréquences, Maisons-Alfort, 2004. Available on: www.anfr.fr.
- [2] J P Chilès and P Delfiner. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York, 1999.
- [3] R Daley. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [4] P De Doncker, J M Dricot, R Meys, M Hélier, and W. Tabbara. Electromagnetic fields estimation using spatial statistics. *Electromagnetics*, 26:111–122, 2006.
- [5] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to timevarying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4):494–522, 1998.
- [6] Emmanuel Larchevêque, Christian Dale, Man-Fai Wong, and Joe Wiart. Analysis of electric field averaging for in situ radiofrequency exposure assessment. *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 54(4), July 2005.
- [7] A Spector and F S Grant. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35:293–302, 1970.
- [8] H Wackernagel. *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin, 3rd edition, 2003.
- [9] H Wackernagel, C Lajaunie, N Blond, C Roth, and R Vautard. Geostatistical risk mapping with chemical transport model output and ozone station data. *Ecological Modelling*, 179:177–185, 2004.
- [10] Joe Wiart, Christian Dale, Ada Victoria Bosisio, and Alain Le Cornec. Analysis of the influence of the power control and discontinuous transmission on RF exposure with GSM mobile phones. *IEEE Trans. on EMC*, 42(4):376–385, 2000.