
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).

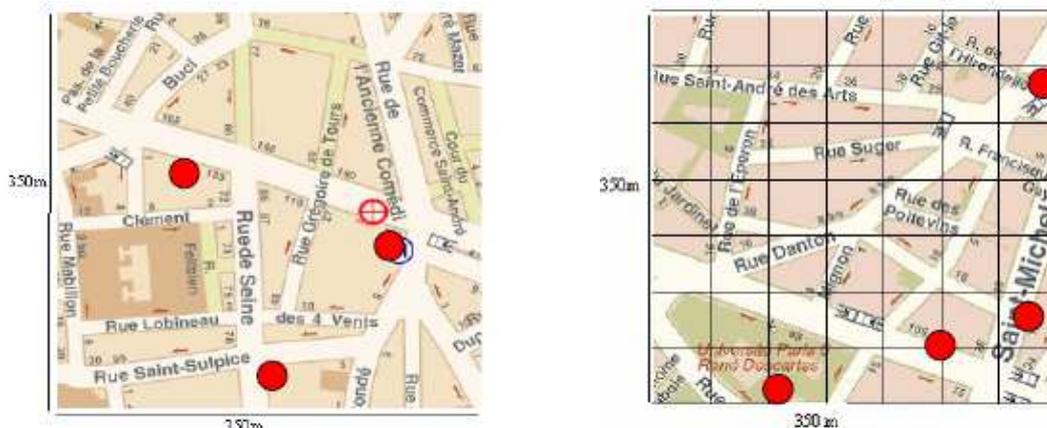


Figure 9.1: Plan de deux quartiers : à gauche le quartier Boulevard Saint Germain, à droite le quartier place Saint Michel.

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.

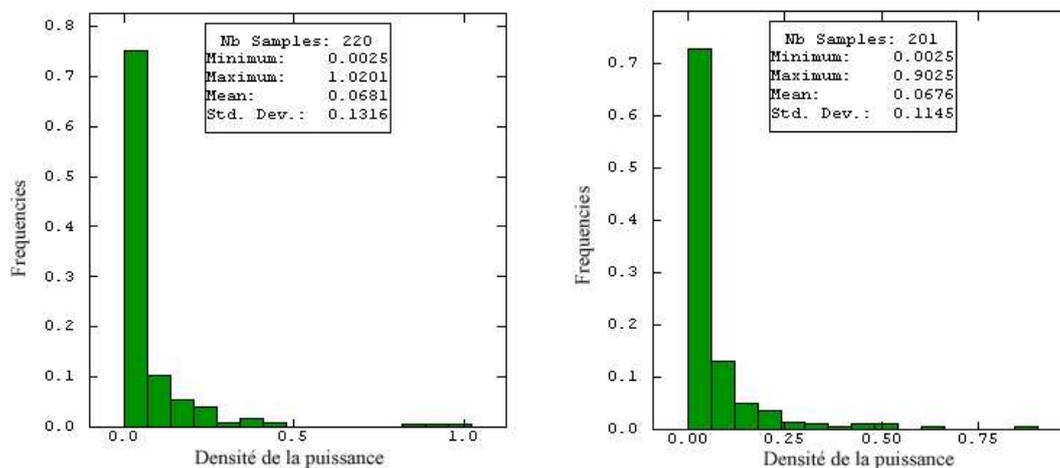


Figure 9.2 : Histogrammes de données : à gauche quartier Latin de Paris, à droite place Saint Michel.

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°.

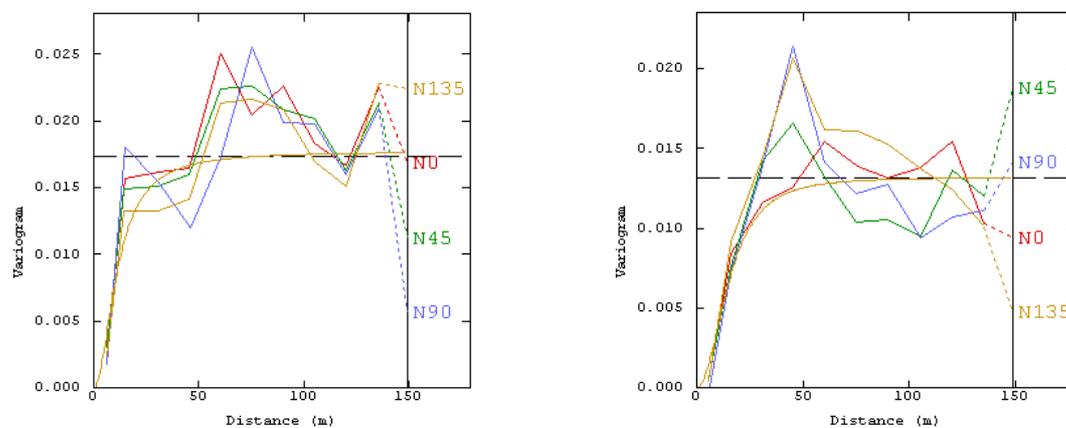


Figure 9.3 : Variogramme de données de densité de la puissance : à gauche quartier Bd Saint Germain, à droite place Saint Michel.

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.

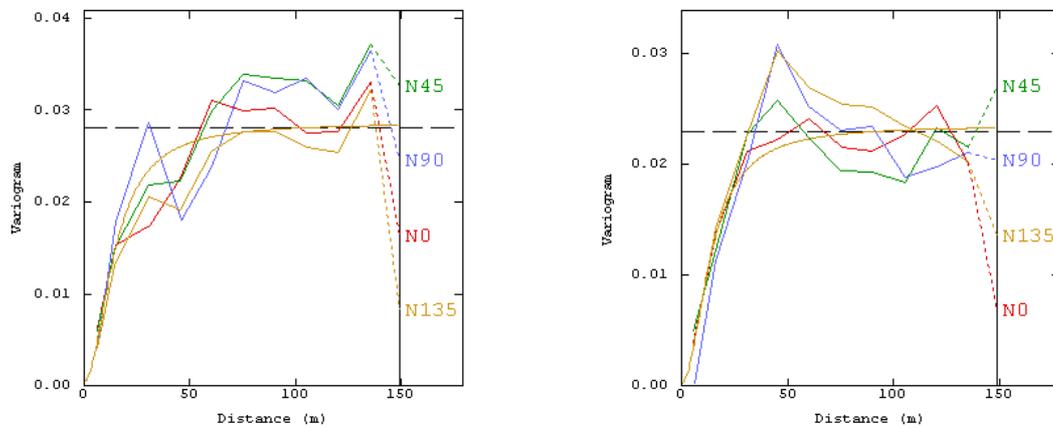


Figure 9.4 : Variogramme de données de champ électrique: à gauche quartier Bd Saint Germain, à droite place Saint Michel.

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.

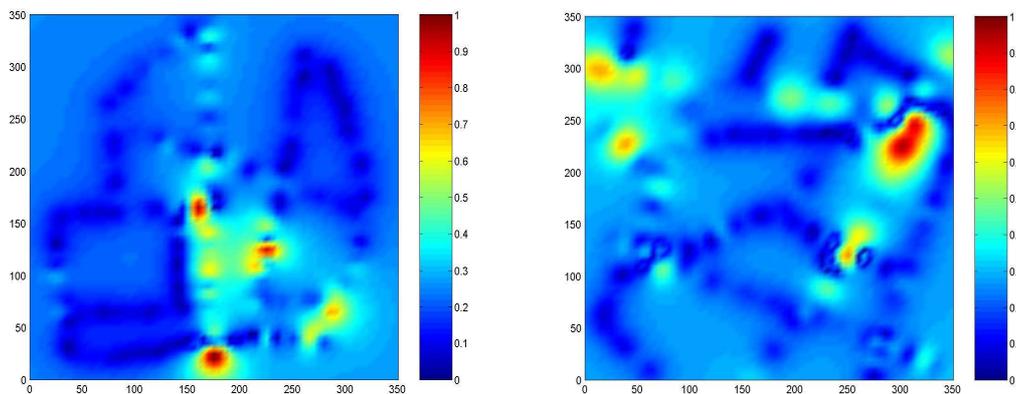


Figure 9.5 : Champ radioélectrique calculé à partir de la densité de puissance estimée (V/m) : à gauche quartier Latin de Paris, à droite place Saint Michel.

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.

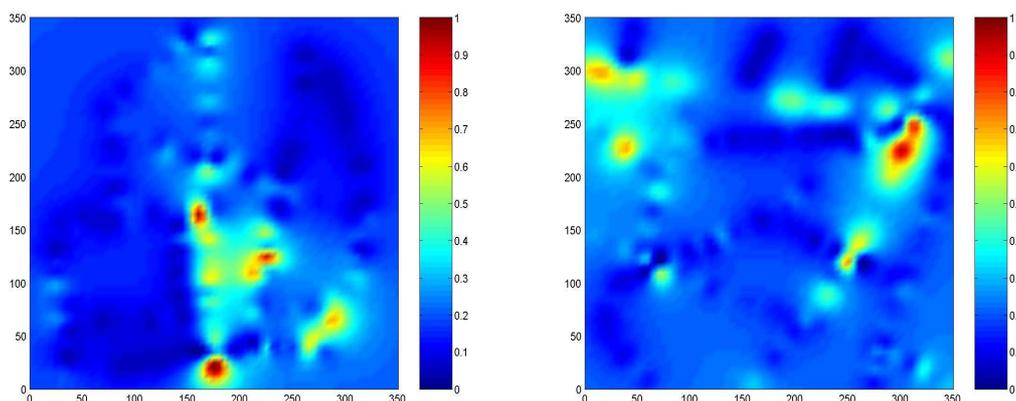


Figure 9.6: Résultat du krigeage sur le champ radioélectrique : à gauche quartier Latin de Paris, à droite place Saint Michel (V/m).

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.

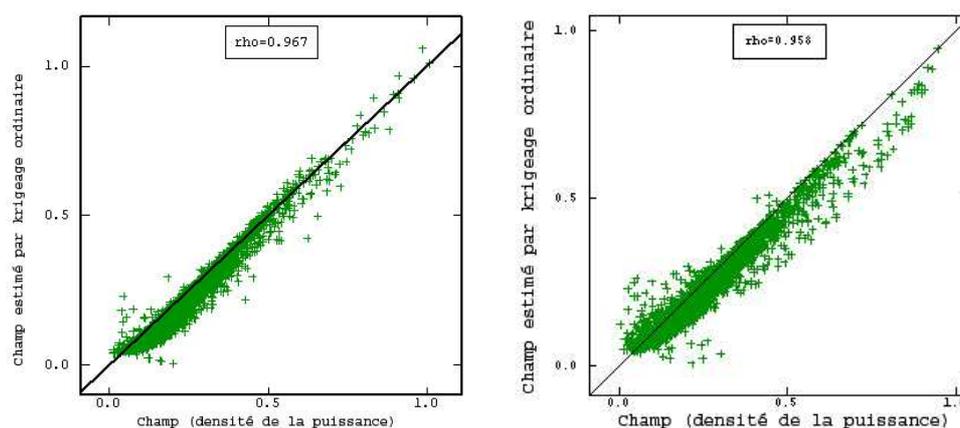


Figure 9.7 : Comparaison entre champ estimé par krigeage ordinaire et le champ calculé à l'aide de densité de la puissance estimée à gauche quartier BD Saint Germain et à droite quartier place Saint Michel.

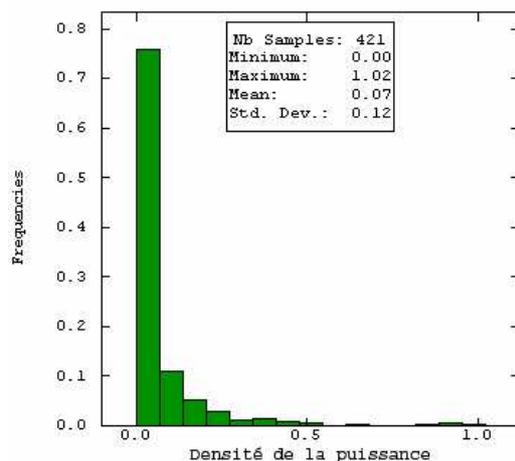


Figure 9.9: Histogramme de données total GSM 900MHz (en W/m²)

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.

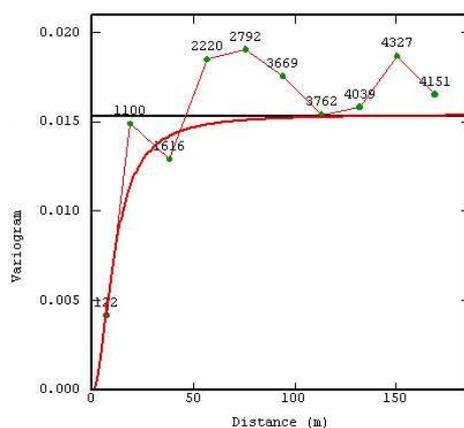


Figure 9.10 : Variogramme de données de densité de la puissance GSM 900MHz.

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.

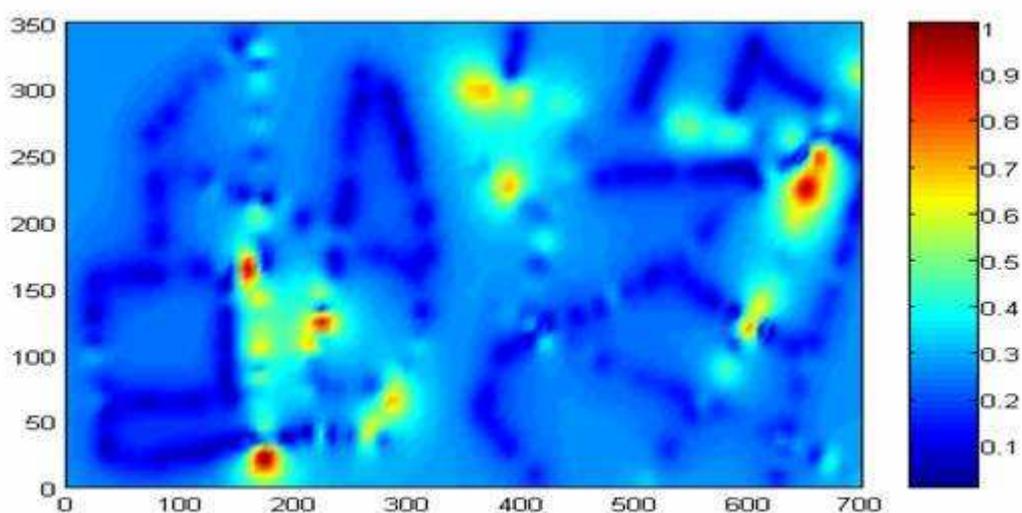


Figure 9.11 : Résultat du krigeage ordinaire sur les données de deux quartiers (V/m).

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.

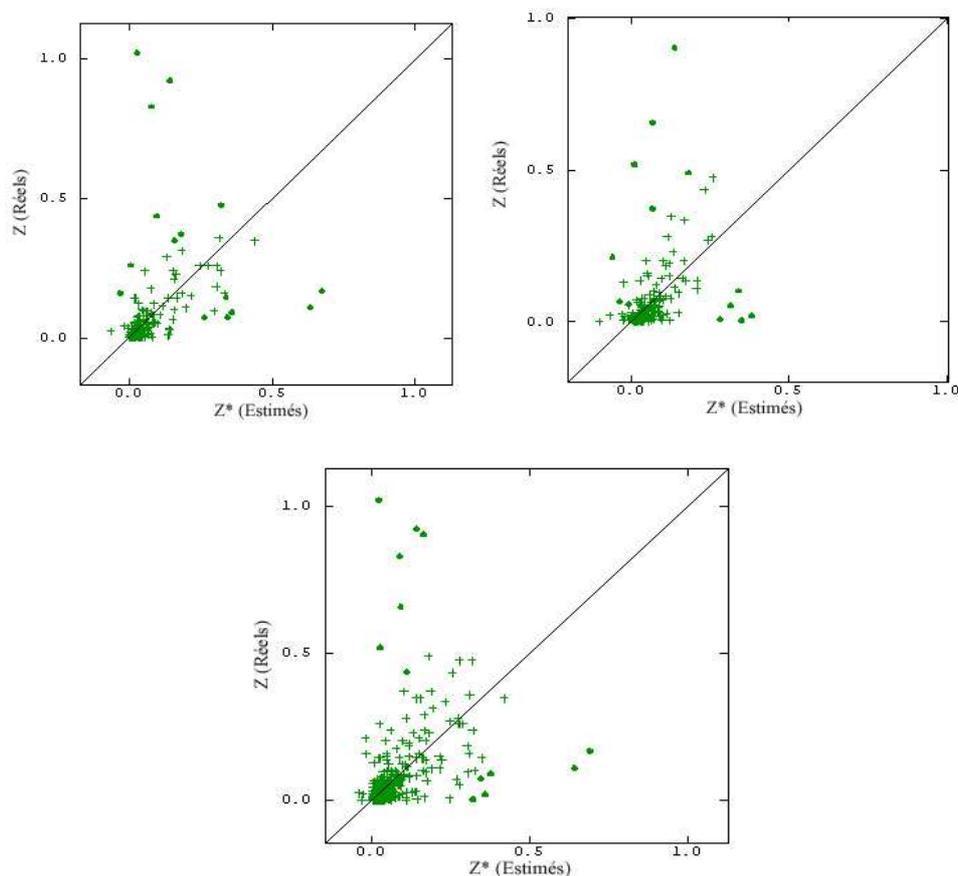


Figure 9.12 : Résultats de validation croisée du krigeage ordinaire : en haut, à gauche quartier Boulevard Saint Germain et à droite quartier Place Saint Michel, et en bas le quartier total.

	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.

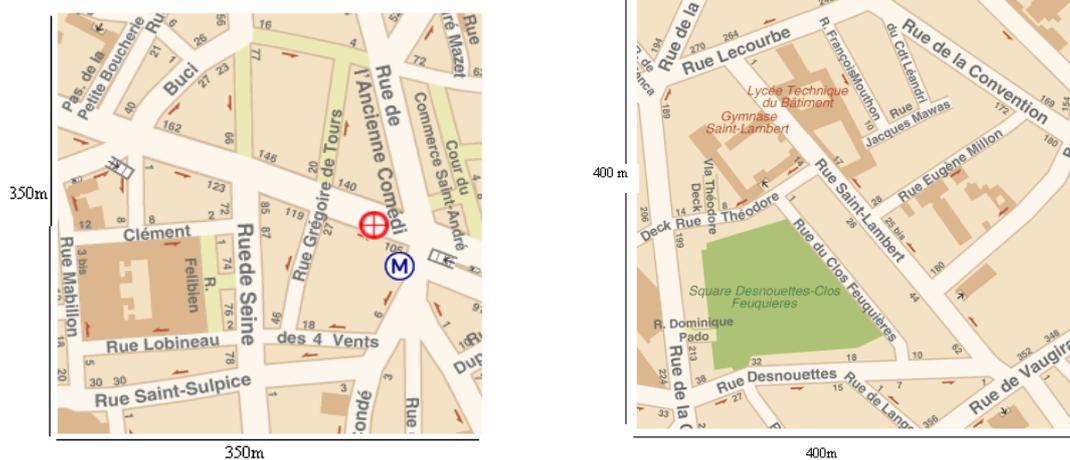


Figure 9.13 : A gauche le quartier de Boulevard Saint Germain ; à droite le quartier de Paris 15 à côté de la station métro Convention.

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.

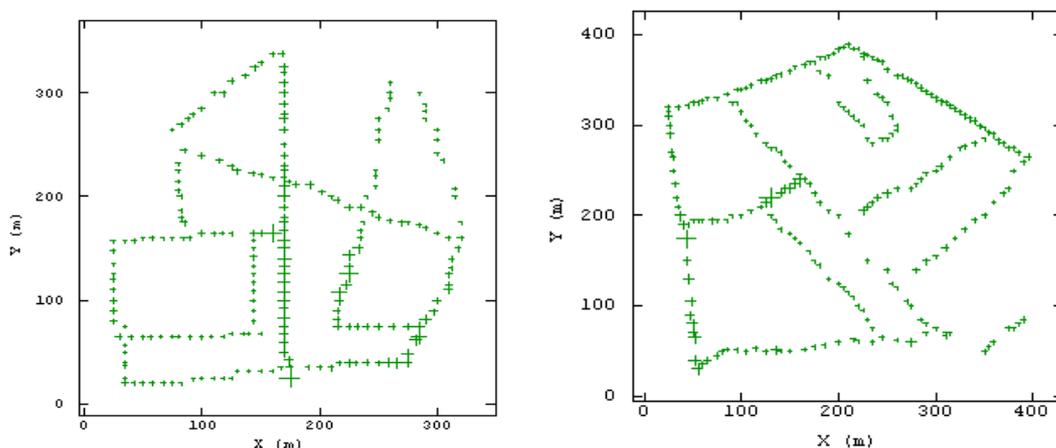


Figure 9.14 : Cartes des endroits de prélèvement des données de GSM 900MHz.

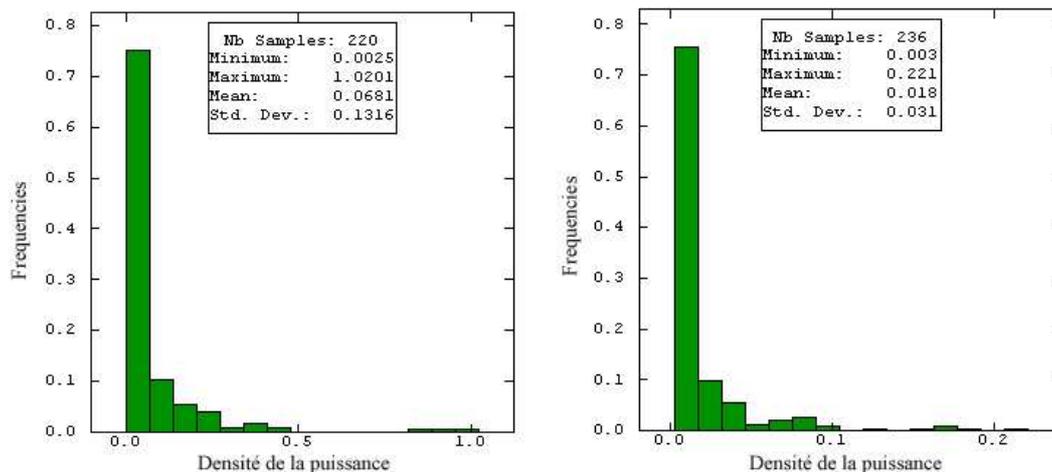


Figure 9.15 : Histogrammes de données GSM 900MHz : pour le quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite (W/m^2).

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.

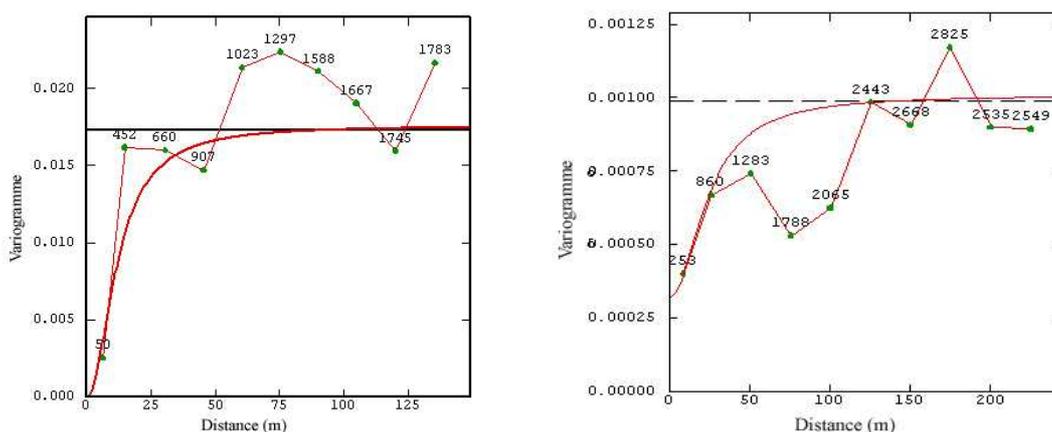


Figure 9.16 : Variogrammes de données GSM 900 MHz, pour les deux quartiers, ajustés avec le modèle de Cauchy de portée (51 m) pour le quartier Latin et (105 m) pour le quartier de Paris 15.

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

Tableau 9.4: Paramètres des modèles

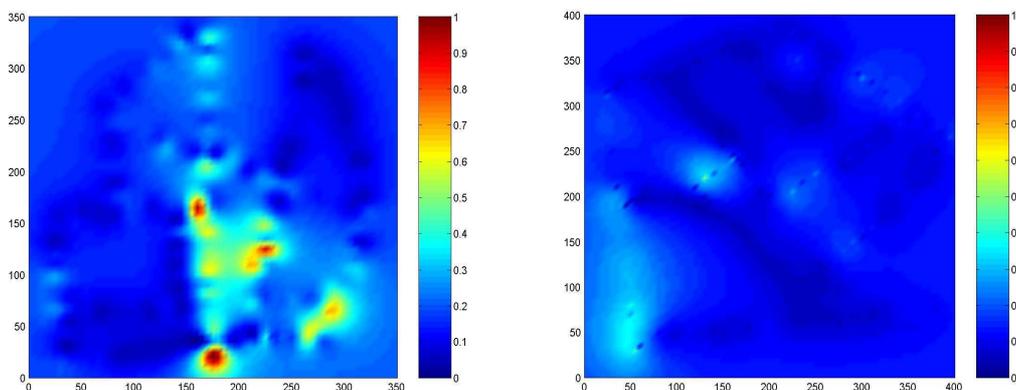


Figure 9.17 : Résultats du krigeage ordinaire pour la fréquence 900MHz (V/m), à gauche quartier Latin de Paris et à droite quartier de Paris 15.

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).

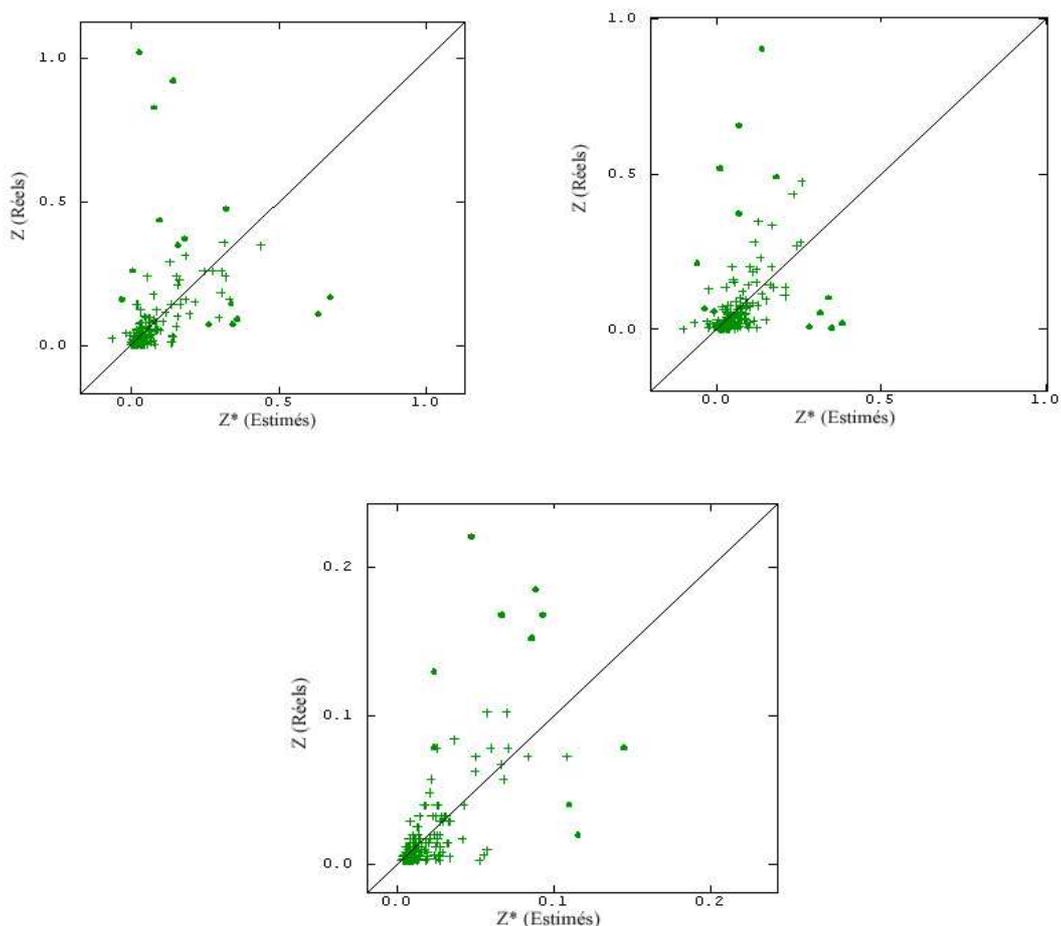


Figure 9.18 : Résultats de validation croisée pour les trois quartiers, en haut, à gauche quartier Boulevard Saint Germain et à droite Place Saint Michel, et en bas le quartier de Paris 15.

	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/m^2 pour le quartier Latin et 0.102 W/m^2 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.

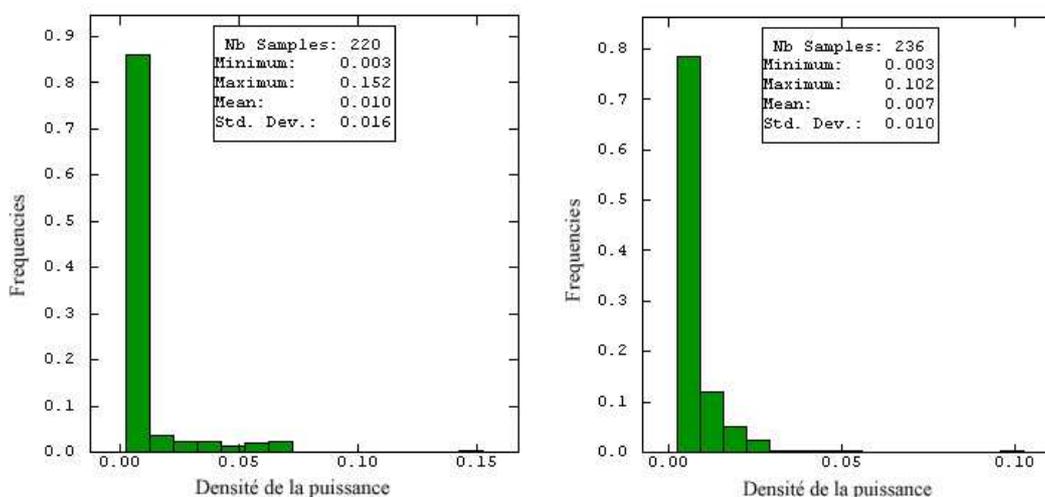


Figure 9.19 : Histogrammes de données DCS (1800MHz) : pour le quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite.

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.

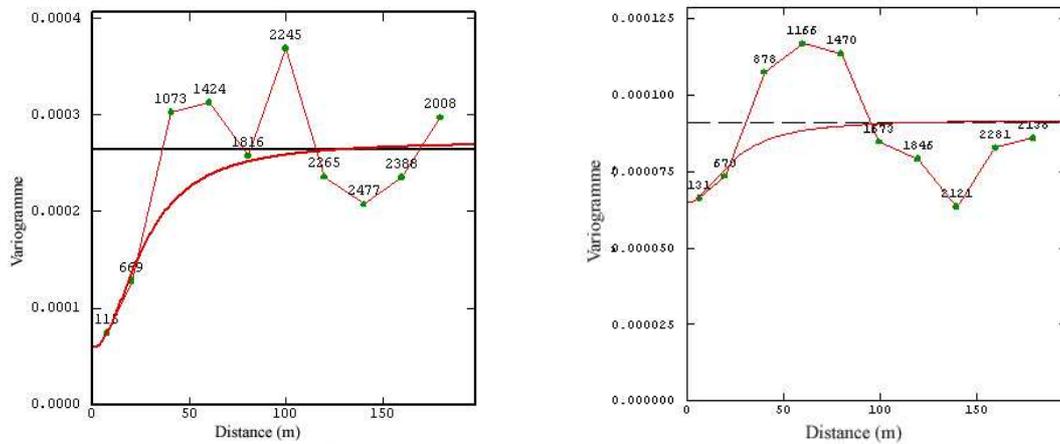


Figure 9.20 : Variogrammes de données DCS pour les deux quartiers ajustés avec une structure de Cauchy et un effet de pépite.

	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).

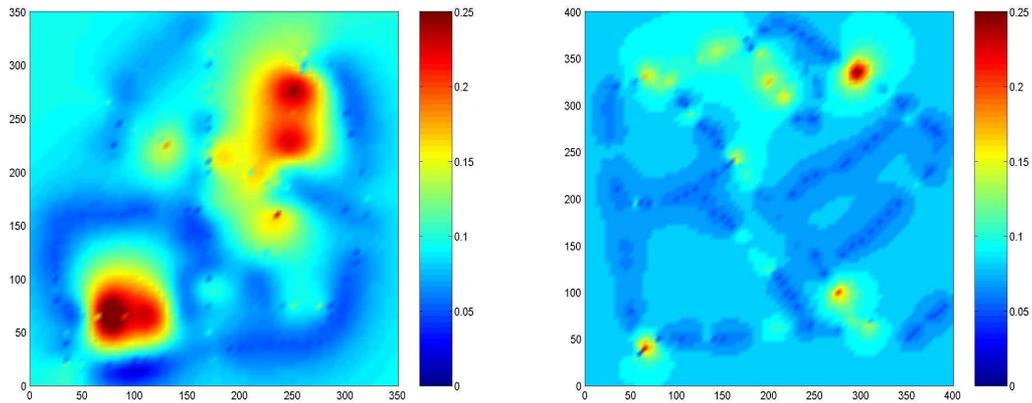


Figure 9.21 : Résultats du krigeage ordinaire pour la fréquence GSM 1800MHz (V/m).

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.

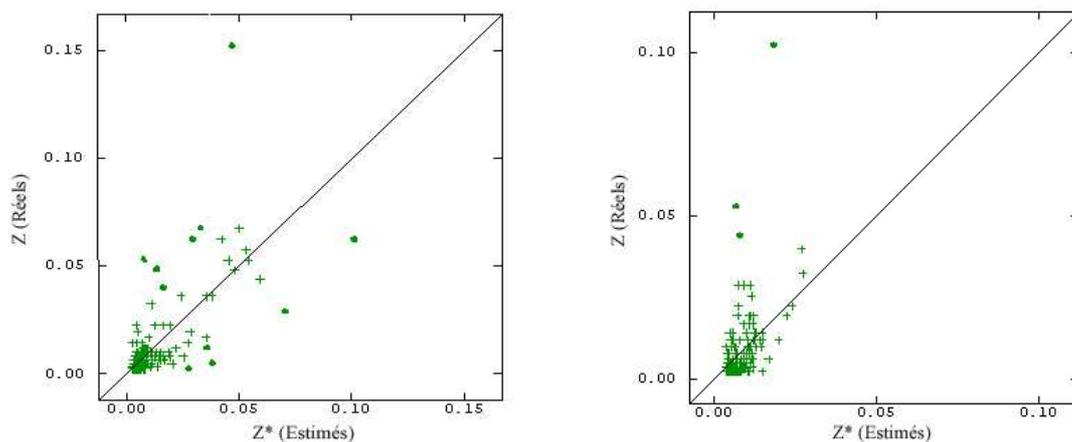


Figure 9.22 : Comparaison entre les mesures et l'estimation, à gauche le quartier Latin et à droite le quartier de Paris 15.

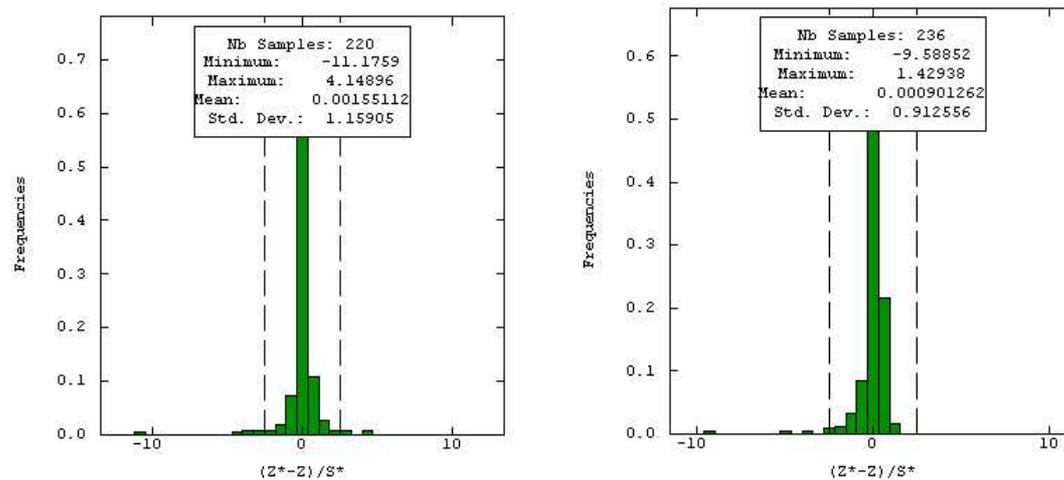


Figure 9.23 : Histogrammes des erreurs standardisées, à gauche quartier Latin et à droite quartier de Paris 15.

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.

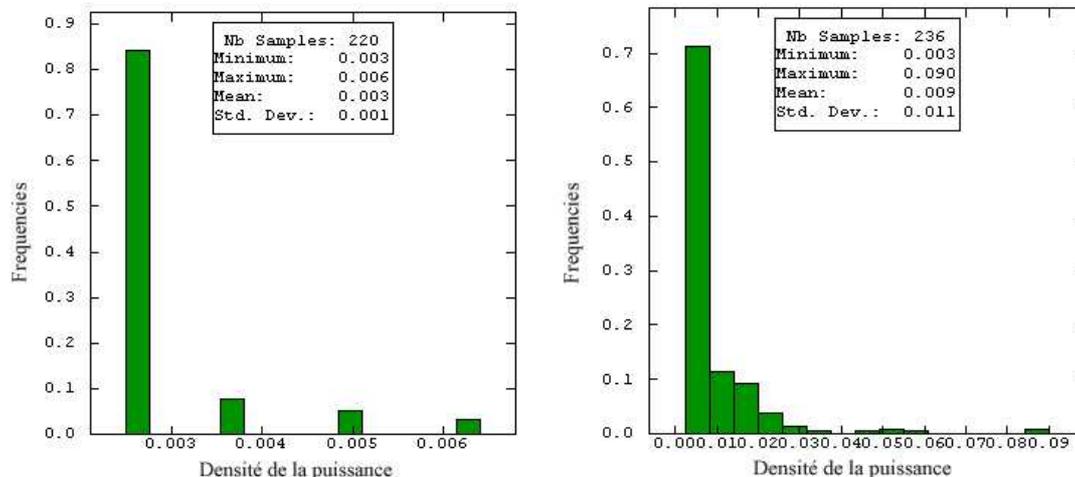


Figure 9.24 : Histogrammes de données FM : quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite.

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.

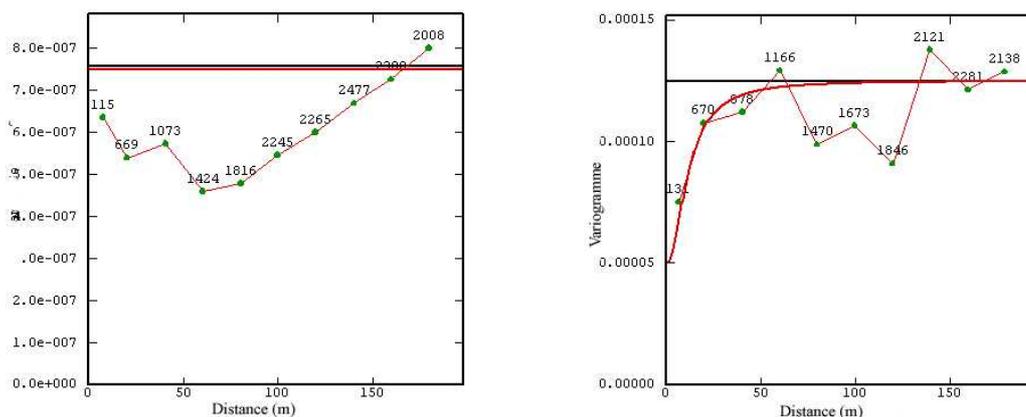


Figure 9.25 : Variogrammes de données FM : quartier boulevard Saint Germain à gauche et Paris 15 à droite.

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.

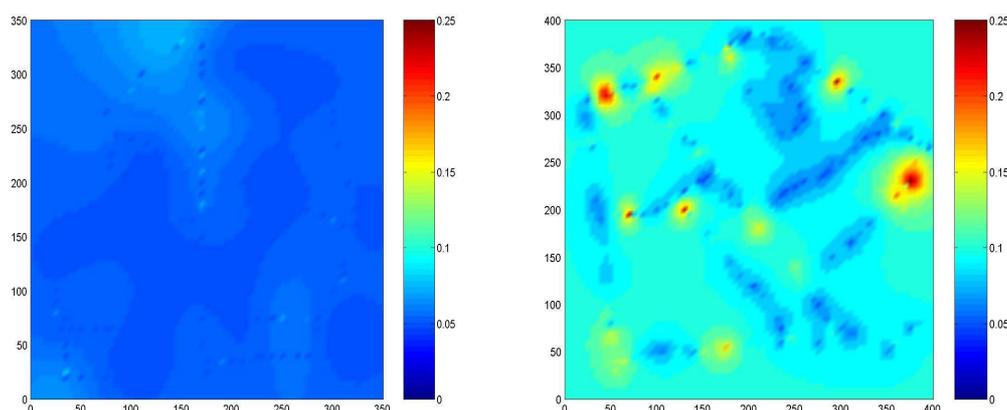


Figure 9.26 : Résultats du krigeage ordinaire pour les données FM, à gauche quartier Latin de Paris et à droite, quartier Paris 15.

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 inférieure 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.