

---

---

# 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 $rx$ .

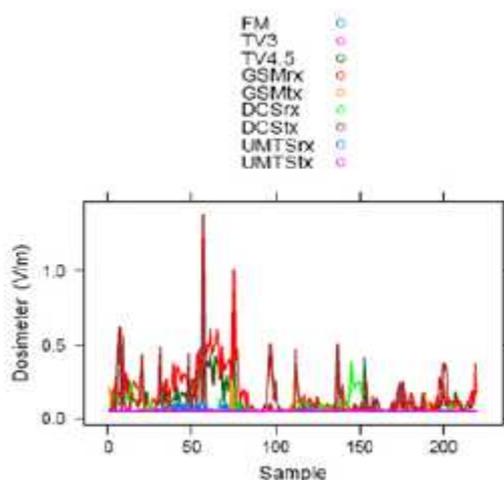


Figure 8.1 :L'exemple de 220 mesures (durée de prélèvement = 10s) prélevées avec le dosimètre le long des rues dans un Quartier à Paris.

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.

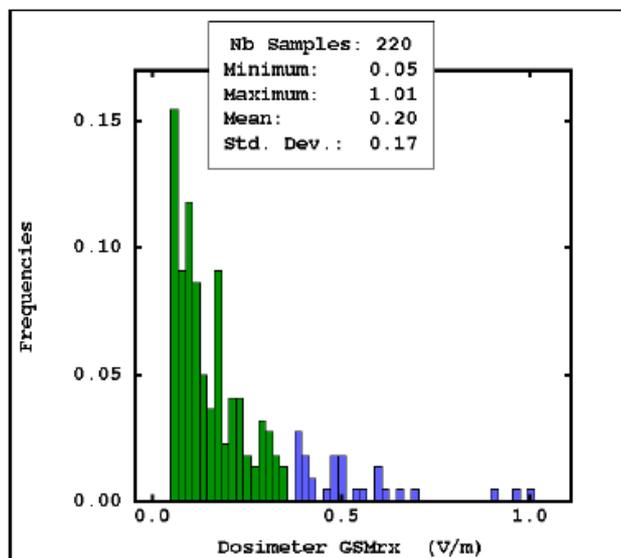


Figure 8.2 : Histogramme des données de GSM 900MHz de dosimètre ; la queue est colorée en bleu. Il y a 3 "outliers" du côté droit.

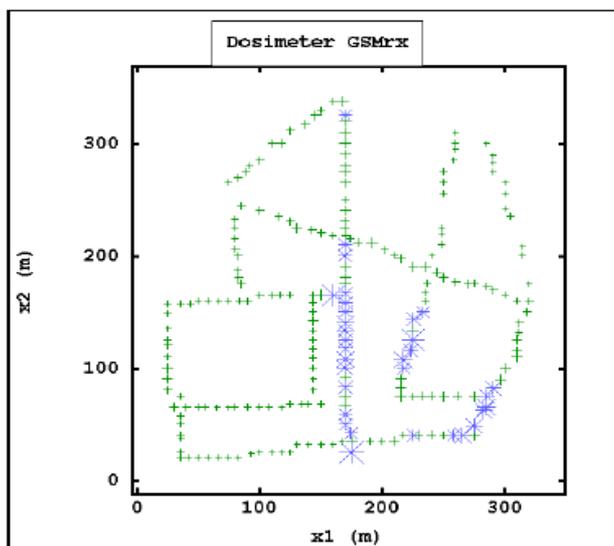


Figure 8.3 : Carte des endroits de prélèvement des données de GSM 900MHz de dosimètre dans le Quartier latin; Les endroits en bleu correspondent aux valeurs dans la queue de l'histogramme ; les tailles des symboles sont proportionnelles aux valeurs. Deux des 3 "outliers" sont à côté des valeurs basses.



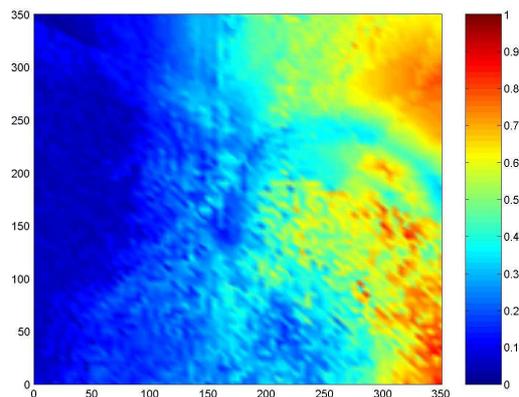


Figure 8.5 : Le champ produit avec EMF Visual à l'aide des positions connues des antennes et des réflecteurs, plaçant des valeurs probables pour leurs caractéristiques.

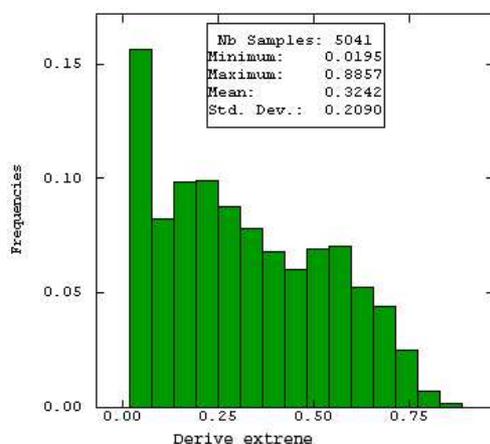


Figure 8.6 : Histogramme des valeurs GSM 900MHz simulées avec EMF Visual.

### 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.

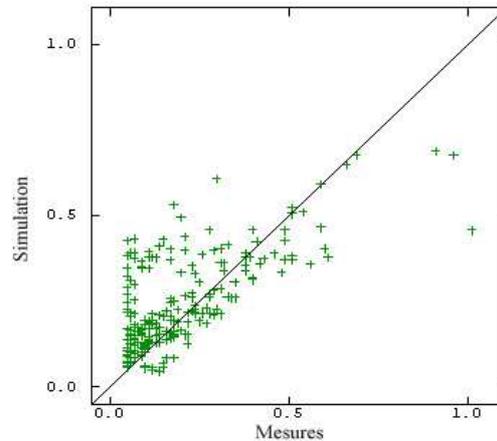


Figure 8.7 : Nuage de corrélation entre mesures et la variable auxiliaire (simulation).

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.

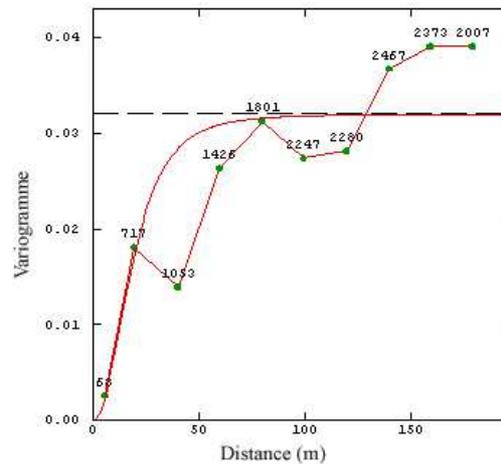


Figure 8.8 : Variogramme omnidirectionnel des résidus entre les échantillons et les données simulées avec EMF Visual, ajusté avec un modèle de variogramme isotrope : un Cauchy de portée 52m.

### 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.

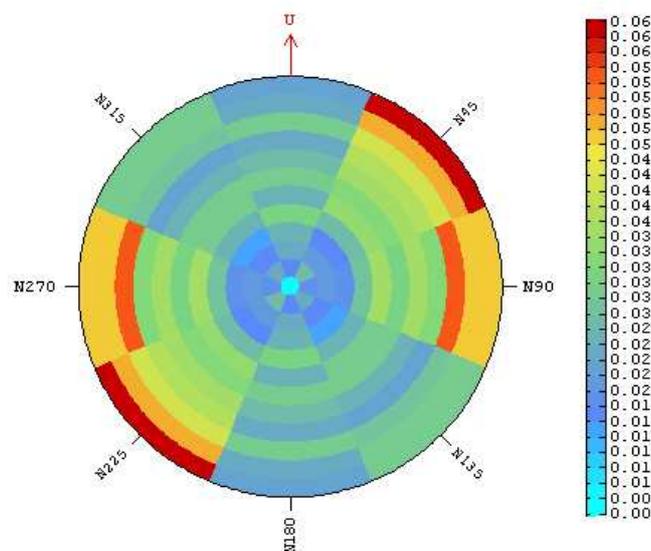


Figure 8.9 : Carte du variogramme.

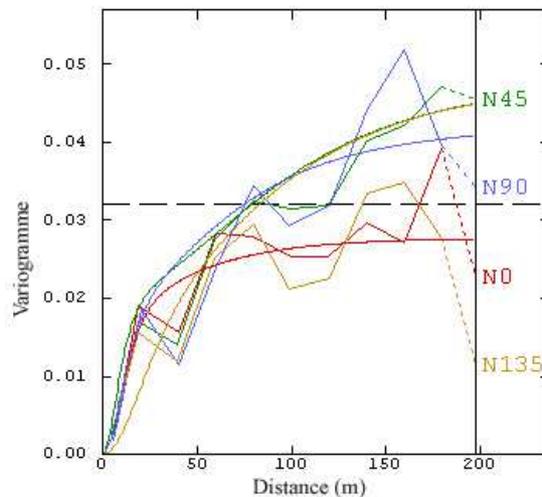


Figure 8.10 : Variogramme des résidus entre les échantillons et les données simulées avec EMF Visual. Le trait horizontal représente la variance. Les lignes  $N_0$ ,  $N_{45}$ ,  $N_{90}$  et  $N_{135}$  sont les variogrammes expérimentaux calculés dans quatre directions.

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  $45^\circ$ . Ces variogrammes ont mis en évidence que la variation des données de simulation est à l'origine de cette anisotropie.

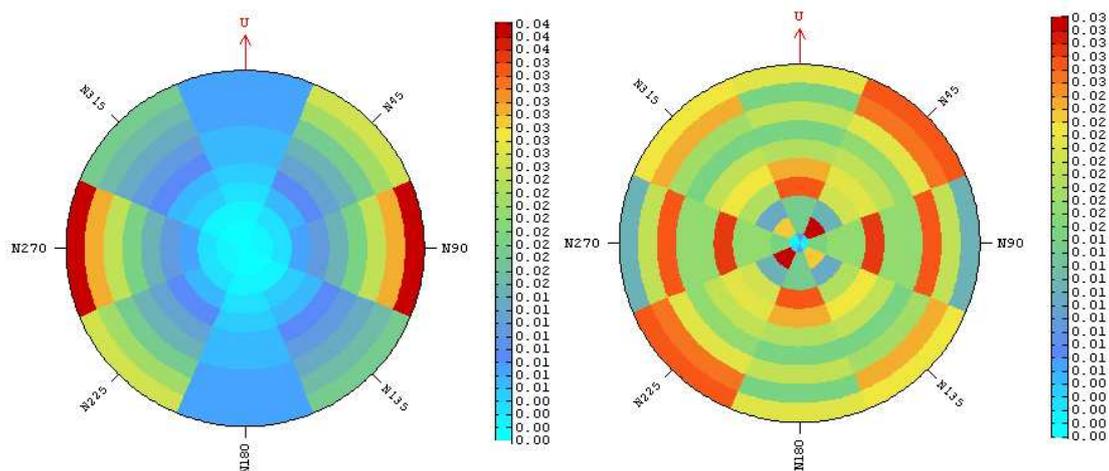


Figure 8.11 : Cartes des variogrammes des simulations (à gauche) et des mesures (à droite) calculés dans quatre directions avec un angle de tolérance de  $45^\circ$ .

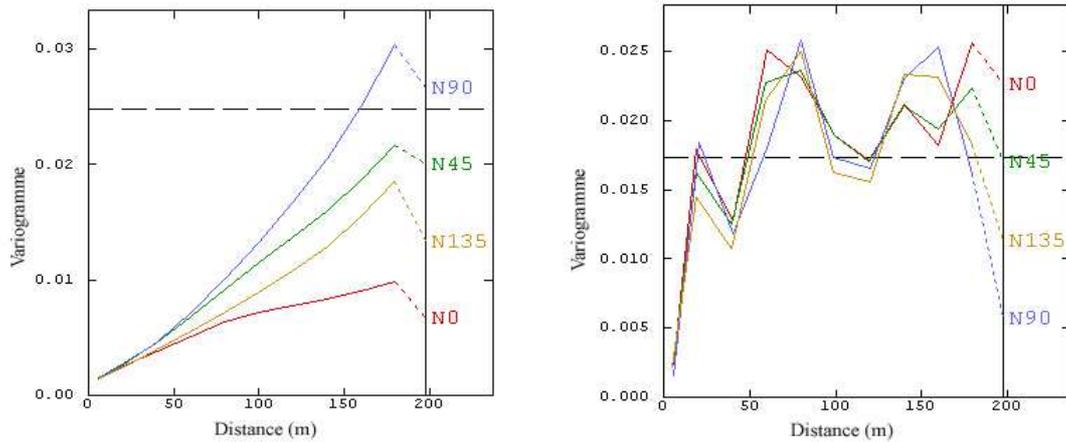


Figure 8.12 : Variogrammes expérimentaux des simulations (à gauche) et des mesures (à droite) calculés dans quatre directions avec un angle de tolérance de 45°.

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)

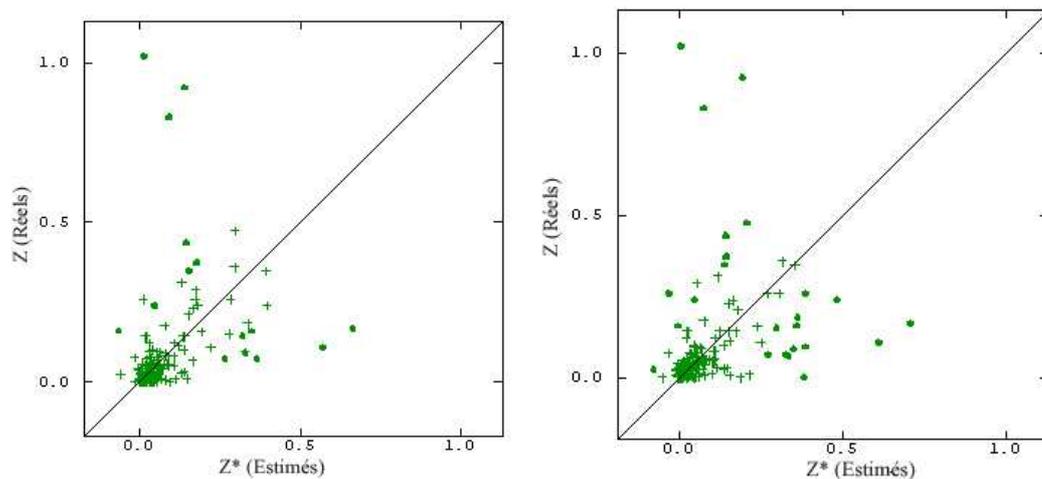


Figure 8.13 : Résultats de validations croisées : à gauche modèle isotrope et à droite modèle anisotrope.

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.

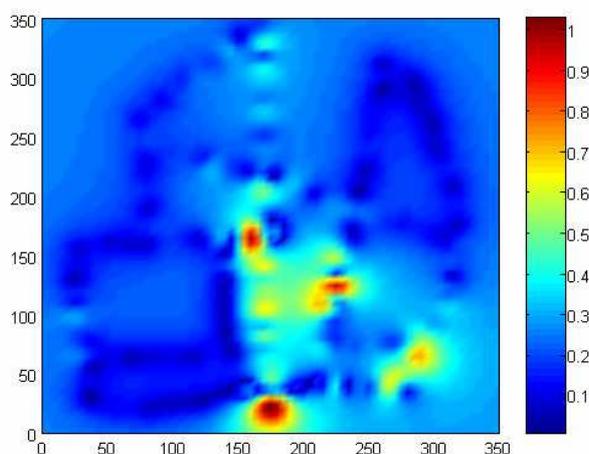


Figure 8.14 : Carte de krigeage d'exposition de GSM 900 : champ radioélectrique calculé à partir de densité de la puissance estimée. « Les points chauds » (dans le rouge) sont dus aux 3 outliers.

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.

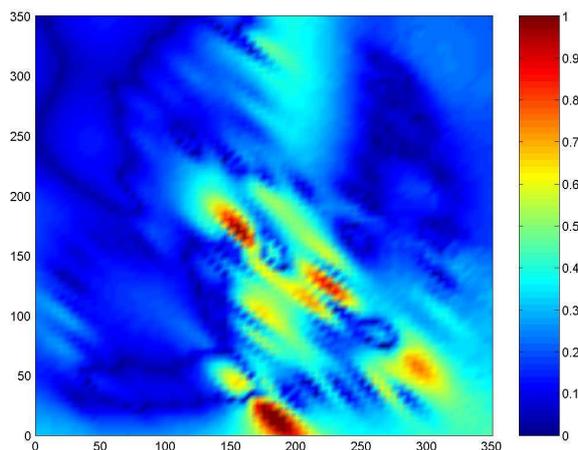


Figure 8.15 : Carte de krigeage d'exposition de GSM 900 avec modèle anisotrope.

#### 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

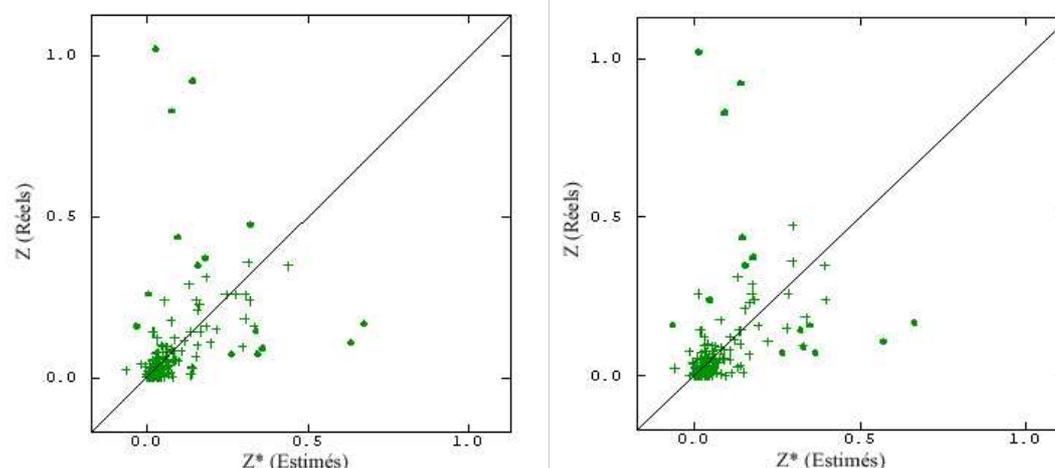


Figure 8.16 : Résultats de la validation croisée : à gauche krigeage ordinaire et à droite krigeage avec dérive externe.

## 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.