

Apport des méthodes géostatistiques à l'estimation de l'impact acoustique d'une source en environnement ouvert

Olivier Baume

Benoît Gauvreau

Michel Bérengier

LCPC

Section "Acoustique Routière et Urbaine"

Route de Bouaye

BP 4129

44341 Bouguenais CEDEX

Tél. : 02 40 84 58 98

E-mail : olivier.baume@lcpc.fr

Fabrice Junker

EDF R & D

1, avenue du Général de Gaulle

92141 Clamart CEDEX

Tél. : 01 47 65 51 03

E-mail : fabrice.junker@edf.fr

Hans Wackernagel

École de Mines de Paris

Centre de Géosciences/
Géostatistique

35, rue Saint-Honoré

77300 Fontainebleau

Tél. : 01 64 69 47 60

E-mail : hans.wackernagel@ensmp.fr

Résumé

Les conditions atmosphériques locales ont une influence prépondérante sur la propagation sonore hors des zones urbaines. Cela pose le problème de représentativité temporelle (niveau de sonore de long terme) et celui de représentativité spatiale (mesures ponctuelles réalisées lors d'une étude d'impact). Les applications de la géostatistique ont longtemps été réservées aux estimations minières et pétrolières. Plus récemment, ce domaine des statistiques a permis d'établir, sur des applications environnementales telles que la pollution atmosphérique dans les agglomérations, des cartes représentatives de l'exposition réelle qui puissent être communiquées au grand public. La prévision de l'impact acoustique est un domaine nouveau d'application de ces outils. Dans cet article nous nous attachons à faire un point sur les apports de la géostatistique dans l'estimation spatiale des propriétés acoustiques d'un sol homogène et du champ acoustique soumis à des conditions atmosphériques fluctuantes. Le projet du ministère de l'environnement concernant la classification des paramètres d'influence sur la propagation à grande distance en milieu atmosphérique a donné lieu à une campagne expérimentale de grande envergure pendant laquelle une série de sonomètres a été déployée sur un site afin de mesurer l'impact acoustique d'une source artificielle. Nous présentons ici les principes fondamentaux de la géostatistique et leur application au cas simple de la campagne expérimentale évoquée.

Abstract

Local atmospheric conditions have a relevant impact on long range sound propagation in non-urban areas. It appears to be a key issue when assessing the long term sound level away from the noise source or estimating the spatial representativeness of local noise measurements in engineering studies of road traffic and industrial plants. Geostatistics has long been applied in the mining or oil industries. But more recently it shows as the most rigorous tool to be applied in environmental studies when mapping air pollution for instance. Noise impact under micrometeorological conditions is a new topic of application in this branch of statistics. The present paper focuses on the benefits of geostatistics in the space estimation of the sound field. Some financial support brought from a project of the French Ministry of Environment gave the opportunity to carry out a huge experimental campaign. The case study is taken from this database.

A la différence des autres types de nuisance environnementale, la propagation acoustique en milieu semi-ouvert (on exclut pour l'instant le cas de la propagation en milieu urbain) est un phénomène à propagation rapide mais néanmoins influencé par les conditions micrométéorologiques. De plus, la structure spatiale du champ induit par une source dépend largement des caractéristiques à la limite du milieu atmosphérique: topographie du site, présence de bâtis, impédance du sol. Les modélisations numériques déterministes sont de plus en plus complexes et nécessitent des temps de calcul encore très importants. La géostatistique offre une alternative pour produire rapidement des cartes par la modélisation stochastique. Celle-ci prend le parti de modéliser le phénomène observé comme la réalisation d'un processus aléatoire. Ce processus est représenté par une fonction aléatoire $Z(x, y, z, t)$, où x , y et z sont les coordonnées dans l'espace géographique et où t est le temps. Dans un

premier temps, nous nous sommes intéressés à $Z(x, y, \Delta t)$ afin de modéliser à hauteur d'homme (≈ 2 mètres) un plan de propagation parallèle au sol pour des échantillons temporels de niveaux acoustiques intégrés sur 15 minutes (Leq_{15min}).

Certaines méthodes d'interpolation des données issues de la géostatistique sont déjà appliquées (parfois sans précautions particulières) dans les outils SIG (systèmes d'informations géographiques) utilisés pour cartographier le bruit de trafic dans les agglomérations. Dans notre problématique où il est nécessaire de prendre en compte les effets micrométéorologiques, nous cherchons à bien spécifier les techniques géostatistiques auxquelles peut s'adresser l'acousticien de terrain lors d'une étude d'impact. D'emblée, le problème se posant généralement est celui de la représentativité des mesures effectuées dont le corollaire est celui de l'échantillonnage spatial. La fonction aléatoire qui

nous sert à modéliser le champ acoustique est précisée grâce aux observations (points de mesures répartis dans l'espace). Elle peut être encore spécifiée : nous supposons au départ que deux points de mesure dans l'espace sont corrélés. C'est l'étude de cette corrélation dans l'espace qui est au cœur de la démarche géostatistique.

Pour répondre notamment au besoin d'échantillonnage spatial, il a été nécessaire de regrouper autour d'un même projet plusieurs acteurs du domaine : le réseau des Ponts et chaussées, EDF, la SNCF et l'École centrale de Lyon sont les partenaires d'un projet financé par le ministère de l'environnement. Les compétences et les moyens matériels disponibles dans ces diverses institutions ainsi que des moyens supplémentaires issus du projet ont permis de mener une campagne expérimentale de référence [1].

Cas d'étude

L'exemple illustrant l'application de la géostatistique est extrait des mesures de cette campagne expérimentale. Celle-ci consistait à mettre en place une source artificielle omnidirectionnelle 2 mètres au-dessus d'un terrain plan et à distance d'obstacles ou d'autres sources de bruit. Autour de cette source et jusqu'à une distance de 225 mètres ont été placés 33 points de mesure à 2 ou 4 mètres de hauteur. En parallèle, 13 mesures de l'impédance de sol étaient effectuées quasi quotidiennement. La Figure 1 schématise la disposition choisie suivant 3 directions de propagation dessinant un angle de 90° autour de la source. Les sonomètres sont séparés de 25 mètres le long des lignes. Les mesures acoustiques par bandes de 1/3 d'octaves (100 Hz à 3 kHz) acquises sur une période de trois semaines à trois mois (suivant les points) ont été soumises à un long processus de validation puis rassemblées en une seule base de données. Afin de compléter ces mesures, et de mieux les interpréter en termes de conditions de propagation, des mesures des grandeurs micrométéorologiques ont également été menées en parallèle.

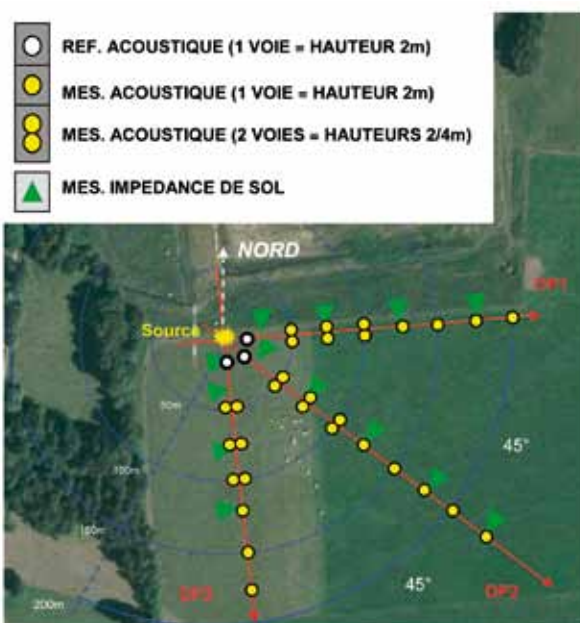


Fig. 1 : Campagne expérimentale de Lannemezan 2005 - disposition spatiale des mesures acoustiques (sonomètres) et des mesures d'impédance de sol

Nous nous intéressons ici aux échantillons dont les mesures dans l'espace ont été validées pour l'ensemble des points. Par exemple, la journée du 22 juin nous fournit un grand nombre de situations particulièrement intéressantes (spectres complets en tous les points). L'étude est complétée par une présentation du travail réalisé sur les mesures d'impédance du 20 juin.

Éléments de géostatistique

Il existe un grand nombre de méthodes d'interpolation simples comme celle qui consiste par exemple à pondérer les mesures par l'inverse d'une puissance de la distance au point d'interpolation. Le choix de la puissance est cependant fait de manière arbitraire. La Figure 2 présente le résultat obtenu pour une puissance de 2 (inverse du carré de la distance) à partir des Leq_{15min} du 22 juin à 23h45.

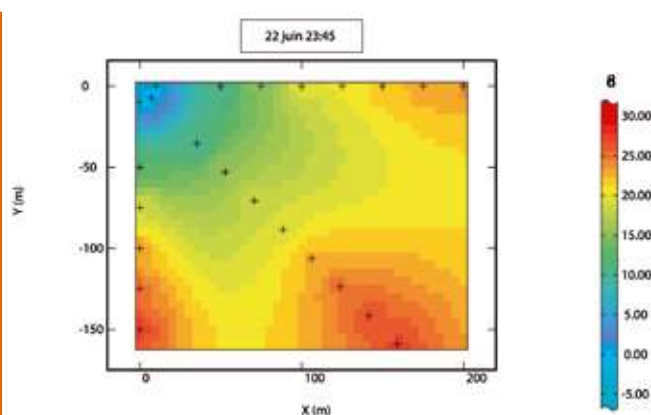


Fig. 2 : Carte d'atténuation sonore de Leq_{15min} à 1 kHz (bande de 1/3 d'octave) par rapport aux mesures de référence situées à 10 mètres de la source (en haut à gauche) obtenue par interpolation par inverse du carré des distances - les points de mesure sont indiqués par des croix

Le parti pris de la géostatistique d'utiliser la corrélation entre les points de mesures lui apporte deux avantages : non seulement elle prend en compte les caractéristiques intrinsèques du phénomène étudié mais en plus elle n'a pas le caractère arbitraire des méthodes plus classiques puisqu'elle parvient à définir des critères de qualité pour l'interpolation faits sur une modélisation stochastique des données. Par ailleurs, et c'est là un point crucial dans notre problématique de propagation sonore, l'interpolation géostatistique peut également prendre en compte des modèles physiques analytiques ou numériques donnant une indication de tendance générale sur le phénomène physique.

Structure des données

Pour calculer le degré de corrélation entre 2 points de l'espace pour la variable z étudiée, on considère l'écartement spatial entre deux points de mesure, puis il suffit de construire le demi-écart quadratique pour chaque paire :

$$\bar{a}(\bar{h}) = \frac{1}{2} \left(z(\bar{x} + \bar{h}) - z(\bar{x}) \right)^2$$

Reportant tous les couples $(\bar{h}, \bar{a}(\bar{h}))$ sur un graphe et en effectuant la moyenne sur des valeurs régulières de \bar{h} ,

on obtient le variogramme expérimental. Pour obtenir une expression analytique facilement utilisable, ce variogramme est ensuite approché par une fonction mathématique. Cette fonction décrit la structure de corrélation de la fonction aléatoire Z qui modélise d'un point de vue probabiliste notre variable d'étude z .

Le variogramme est une fonction croissante avec \bar{h} jusqu'à une distance limite appelée portée à partir de laquelle il se stabilise à un niveau de palier. La portée caractérise la distance d'influence des points de mesure. Au-delà de cette distance les mesures ne sont plus corrélées.

Krigeage

La méthode d'interpolation en géostatistique est le krigeage (appelé ainsi en hommage au Docteur Donald Krige pour ses travaux sur les gisements d'or en Afrique du Sud). Il se définit comme le meilleur estimateur linéaire et sans biais de la fonction aléatoire Z . Il est une combinaison linéaire des données. Son critère de qualité (ou d'optimalité) est la minimisation de la variance de l'erreur d'estimation. Cette variance se calcule avec le variogramme. Les pondérateurs dépendent ainsi de la forme de la fonction mathématique ajustée au variogramme expérimental.

Application au champ des propriétés de sol

Le krigeage a été tout d'abord appliqué au cas plus simple où l'on peut supposer que la variable est stationnaire d'ordre 2, c'est-à-dire que sa moyenne et sa variance ne dépendent pas de la position dans l'espace. Le champ acoustique n'a pas de telles propriétés puisqu'il dépend largement de l'expansion du front d'onde. Par contre, les mesures dans le cadre de la campagne de 2005 avaient été effectuées au-dessus d'un terrain plan homogène dont les propriétés acoustiques semblaient *a priori* stationnaires. La Figure 3 présente le variogramme expérimental et la fonction mathématique ajustée pour les mesures d'impédance du 20 juin à 14 heures traduites en paramètres phénoménologiques : la résistance spécifique au passage de l'air du modèle de Delany et Bazley ([2] et [3]). Tout d'abord nous nous sommes imposés de prendre en compte les incertitudes expérimentales évaluées à 20 cgs pour ce type de sol. Celles-ci correspondent à un bruit blanc traduit sur un variogramme par une discontinuité à l'origine. Le variogramme expérimental est ensuite ajusté selon une fonction dont la portée est de 186 mètres. L'ajustement peut sembler approximatif, néanmoins le faible nombre de points de mesures rend nécessairement le variogramme erratique et sa modélisation quelque peu arbitraire.

Après modélisation de l'autocorrélation des données de résistivité, nous avons réalisé une interpolation par krigeage aboutissant à la carte de la Figure 4. Le sens d'une carte de krigeage est de montrer les valeurs d'interpolation ayant la plus forte probabilité d'être proche de la vraie valeur. Les contraintes imposées dans le système de calcul du krigeage lui donnent cet aspect lissé. La lecture d'une telle carte est complétée par l'information de l'écart-type de krigeage. Cet écart-type nous informe sur l'erreur d'estimation des valeurs en chaque point de la maille interpolée. Le résultat que l'on peut observer satisfait l'idée selon laquelle les propriétés du sol sont plutôt continues mais avec des zones plus absorbantes que d'autres.

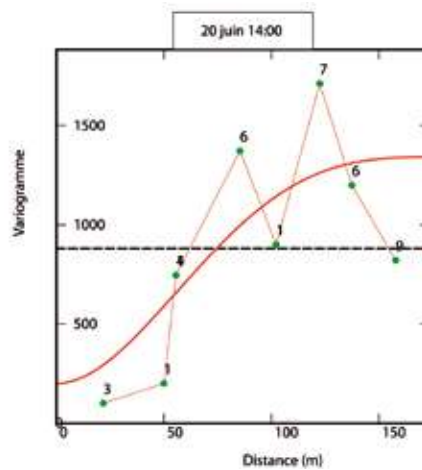


Fig. 3: Variogramme expérimental et modèle ajusté d'autocorrélation (courbe en gras) pour les mesures de résistivité spécifique au passage du site de mesures de Lannemezan – le nombre de paires de points utilisés pour le calcul est rappelé pour chacune des classes de distance. La ligne horizontale indique la demie-variance des données

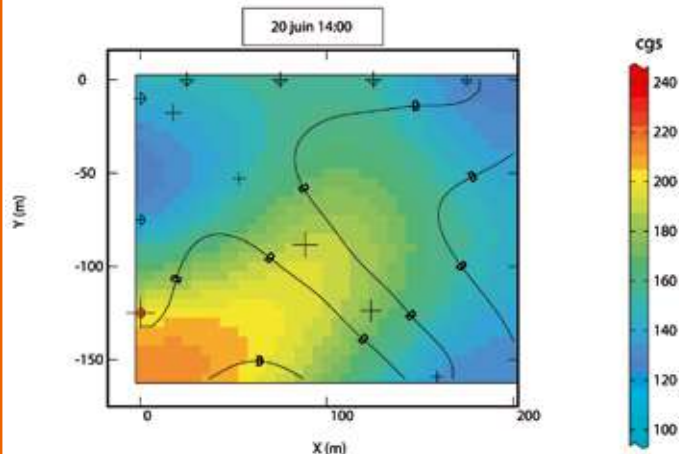


Fig. 4: Carte de résistivité spécifique au passage de l'air obtenue par krigeage et isolignes de l'écart-type d'erreur d'estimation. Les points de mesure sont indiqués par des croix

Application au champ acoustique

Nous avons également appliqué les méthodes géostatistiques aux données acoustiques. Afin de nous affranchir des effets liés à la directivité de la source et aux fluctuations de puissance d'émission, nous avons réalisé une transformation du niveau brut mesuré en niveau d'atténuation par rapport aux microphones de référence placés à 10 mètres de la source pour chacune des directions de propagation (Figure 1). Dans le cas du champ acoustique, le phénomène étudié présente une forte tendance non-stationnaire due principalement à la divergence géométrique. Une méthode géostatistique permettant de prendre en compte ce type de phénomènes est appelée krigeage universel.

Cette méthode introduit une fonction de dérive $m(\vec{x})$ modélisant la tendance de non stationnarité. La fonction aléatoire $Z(\vec{x})$ que l'on cherche à estimer est alors une superposition de la dérive et d'une composante aléatoire de

stationnarité dite sous-jacente, le résidu $Y(\bar{x})$. C'est alors l'autocorrélation du résidu qui est modélisée. Une application d'un tel modèle au transport de polluants dans l'atmosphère est présentée dans Wackernagel et al. [4]. Dans nos travaux, le choix de la dérive s'est porté sur le modèle de Embleton [5] tenant compte d'un effet de sol moyen calculé à partir des mesures. Ce modèle ne tient pas compte des conditions atmosphériques de propagation. Afin d'améliorer la méthode, en particulier de rendre le résidu stationnaire sur le domaine spatial d'étude, une technique simple à mettre en œuvre consiste à ajuster par moindres carrés la dérive aux points de mesure. Dans notre cas, limité en 2D à la propagation dans le plan horizontal à 2 mètres de hauteur, il en résulte le calcul d'un plan de réajustement des valeurs de la dérive du type:

$$a_0 + a_1x + a_2y$$

Prenant l'exemple du 22 juin à 23 heures 45, la Figure 5 montre le variogramme du résidu après réajustement de la dérive. Nous pouvons clairement observer que la portée est réduite en deçà de la centaine de mètres. Ceci justifie la méthode avec réajustement: le modèle de variogramme est un modèle stationnaire. De plus, le palier reste également à des valeurs faibles réduisant ainsi la variance de l'erreur

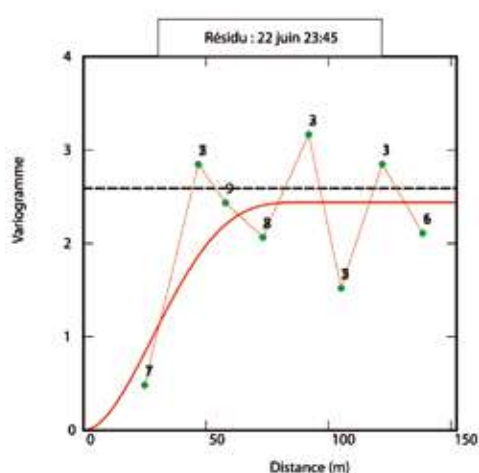


Fig. 5: Variogramme expérimental du résidu et modèle ajusté d'autocorrélation (courbe en gras) pour les mesures de Leq_{15min} du site de mesures de Lannemezan. Le nombre de paires de points utilisés pour le calcul est rappelé pour chacune des classes de distance. La ligne horizontale indique la demi-variance des données

d'estimation. Finalement, la carte correspondante obtenue par krigeage universel est présentée à la Figure 6. Outre ses propriétés statistiques, son interprétation physique semble cohérente avec l'image d'un champ acoustique à 1 kHz (bande de 1/3 d'octave) soumis à un vent soufflant du Nord vers le Sud durant une nuit d'été sans couvert nuageux. Comparé à la carte de la Figure 2 résultant d'une méthode classique mais bien subjective, le krigeage universel permet d'obtenir une représentation clairement anisotrope – et plus réaliste – du champ acoustique.

Simulations du champ acoustique

Les cartes tirées des calculs par krigeage sont optimisées (au sens de la variance de l'erreur d'estimation) mais n'ont pas le même caractère de variabilité que la réalité. Parallèlement au krigeage, la géostatistique a développé des techniques de simulations de type Monte-Carlo qui prennent en compte la structure du phénomène étudié et permettent d'obtenir des images réalistes correspondant à des réalisations de la fonction aléatoire alors que le krigeage ne représente que la moyenne de ces réalisations.

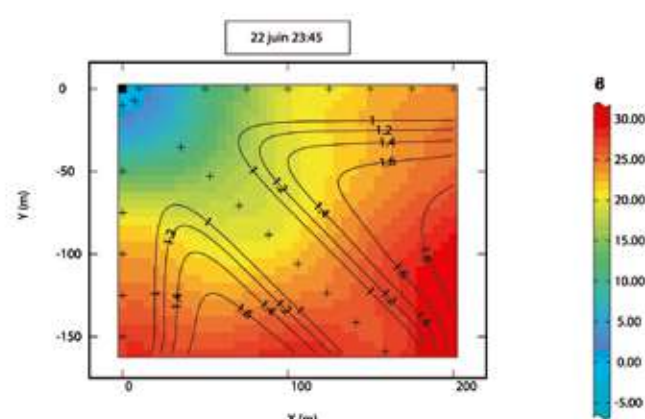


Figure 6: Carte d'atténuation sonore de Leq_{15min} à 1 kHz (bande de 1/3 d'octave) par rapport aux mesures de référence situées à 10 mètres de la source (en haut à gauche) obtenue par krigeage universel et isolignes de l'écart-type d'erreur d'estimation – les points de mesure sont indiqués par des croix

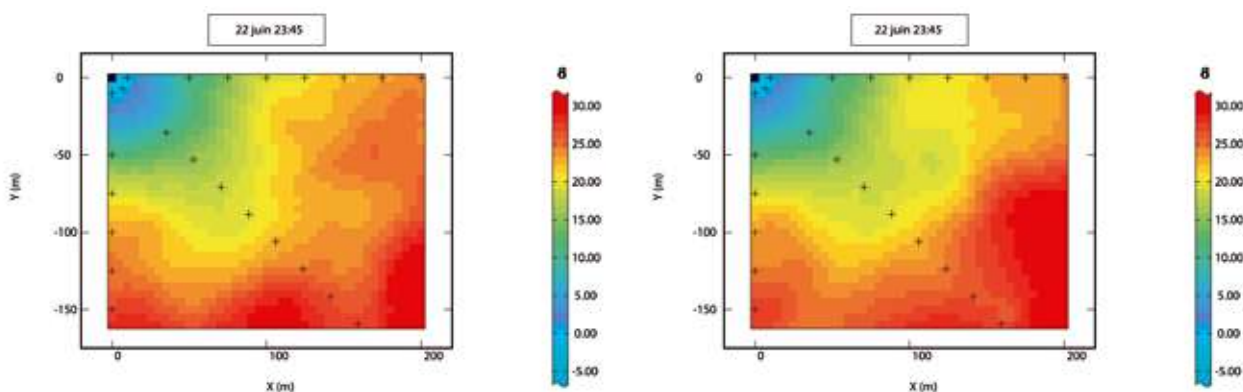


Fig. 7: Simulations de l'atténuation sonore à 1 kHz (bande de 1/3 d'octave) par rapport aux mesures de référence situées à 10 mètres de la source (en haut à gauche). Les points de mesure sont indiqués par des croix

Nous avons tracé à la Figure 7 deux simulations du champ acoustique d'après l'exemple du 22 juin à 23 heures 45. Celles-ci sont très proches de la carte obtenue par krigeage universel. C'est là l'intérêt d'un résidu dont le palier est minimisé par ajustement du modèle analytique de Embleton initialement utilisé. Sans cet ajustement la simulation n'aurait que peu de sens physique. Les simulations ont des propriétés intéressantes mais doivent être manipulées avec précaution. Elles doivent être vues, au sens du modèle statistique, comme des réalisations potentielles de la variable étudiée mais non comme la réalité. Les écarts entre deux simulations d'un même problème peuvent même être étonnants mais sont représentatifs de la variabilité du phénomène.

Elles sont justifiées d'un point de vue théorique grâce au cadre probabiliste dans lequel est placé le problème de l'interpolation. De plus, d'un point de vue pratique, elles permettent de confronter l'interprétation physique des cartes obtenues à la modélisation de la structure expérimentale du phénomène par le variogramme.

Les applications des méthodes géostatistiques à la propagation acoustique sont potentiellement nombreuses. Il est envisagé de les généraliser à des cas plus complexes comme celui de la Station de Long Terme à Saint-Berthevin équipé par le Laboratoire de Ponts et Chaussées dont la topographie est vallonnée et la source principale de bruit une autoroute (voir [6] et [7]).

Conclusion et perspectives méthodologiques

L'étude des propriétés du sol permet de simuler un champ réaliste de résistance spécifique au passage de l'air. Une étude doit être menée sur la sensibilité des codes numériques de calcul acoustique aux différentes simulations obtenues. Concernant le champ acoustique lui-même, la technique du krigeage universel permet de prendre en compte une tendance générale (la non-stationnarité due à l'expansion des fronts d'onde) par un modèle analytique calculé en conditions homogènes de propagation. Finalement, le résidu, différence entre les mesures et le modèle acoustique en conditions homogènes, correspond à l'influence des variations spatiales des caractéristiques du milieu de propagation (sol et micrométéorologie). Il est considéré comme la partie stochastique du champ. Le faible niveau du résidu rend les simulations très semblables au résultat du krigeage. C'est finalement ce dernier que nous retiendrons comme carte de référence des $Leq_{1,5min}$ car il correspond à l'estimation optimale de l'atténuation conditionnellement aux mesures.

Les méthodes géostatistiques sont d'un grand intérêt dès lors que l'on considère un phénomène variable dans l'espace.

Références bibliographiques

- [1] F. Junker B. Gauvreau C. Cremezi-Charlet C. Gérault D. Ecotière P. Blanc-Benon et B. Cotté, Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance: campagne expérimentale de Lannemezan 2005, Congrès Français d'Acoustique 2006, Tours (F).
- [2] M.E. Delany and E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics* 3, 105-116 (1970).
- [3] K.B. Rasmussen, Sound propagation over grass covered ground, *Journal of Sound and Vibration* 78 (2), 247-255 (1981).
- [4] H. Wackernagel C. Lajaunie N. Blond C. Roth et R. Vautard, Geostatistical risk mapping with chemical transport model output and ozone station data, *Ecological Modelling* 179, 177-185 (2004).
- [5] T.F.W. Embleton, Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements, *Journal of the Acoustical Society of America* 74 (4), 1239-1244 (1983).
- [6] B. Gauvreau B. Bonhomme H. Lefèvre et F. Lauzin, (2006), Un outil expérimental pour l'analyse statistique et la validation des modèles numériques: la Station de Long-Terme du LCPC à Saint-Berthevin (France-53), Congrès Français d'Acoustique 2006, Tours (F), avril 2006.
- [7] Page web du site expérimental: <http://www.lcpc.fr/fr/presentation/moyens/sit/index.dml>