

Estimation de l'impact acoustique des infrastructures routières : la géostatistique appliquée à la propagation sonore à grande distance

Olivier Baume

LCPC – Section Acoustique Routière et Urbaine – Route de Bouaye 44341 Bouguenais
Cedex

RESUME. Le bruit des transports représentent la nuisance issue du réseau routier la plus mal perçue par le grand public. Ainsi, l'impact acoustique d'une infrastructure routière est étudié quotidiennement par les bureaux d'ingénierie. Ces derniers sont missionnés par les acteurs publics ou privés, eux-mêmes soumis à la législation nationale et européenne en vigueur. Cependant, ces documents normatifs, élaborés dans un souci de compromis entre rigueur scientifique et applicabilité opérationnelle, restent trop réducteurs quant à la prise en compte des phénomènes physiques rencontrés in situ. Dans le domaine de la propagation acoustique en milieu semi-ouvert et dégagé, ces phénomènes sont essentiellement liés aux caractéristiques de sol et aux conditions micrométéorologiques. La complexité et l'interdépendance de ces phénomènes apportent une incertitude sur la représentativité d'une mesure acoustique. L'utilisation de méthodes géostatistiques doit contribuer à ouvrir de nouvelles voies d'exploration dans ce domaine.

MOTS-CLÉS : propagation acoustique à grande distance, paramètres d'influence, géostatistique.

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 estimating the spatial representativeness of local noise measurements in engineering studies of road traffic. 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 mapping 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 Ecology and Sustainable Development gave the opportunity to carry out a huge experimental campaign. The case study is taken from this database.

KEYWORDS: long range sound propagation, influencing parameters, geostatistics.

1. INTRODUCTION

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. La construction des indicateurs objectifs de gêne (via une transformation logarithmique) donne beaucoup de poids aux valeurs fortes, il est donc important d'optimiser l'estimation de ces forts niveaux dans l'espace. 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 et ce, de manière optimisée. Celle-ci

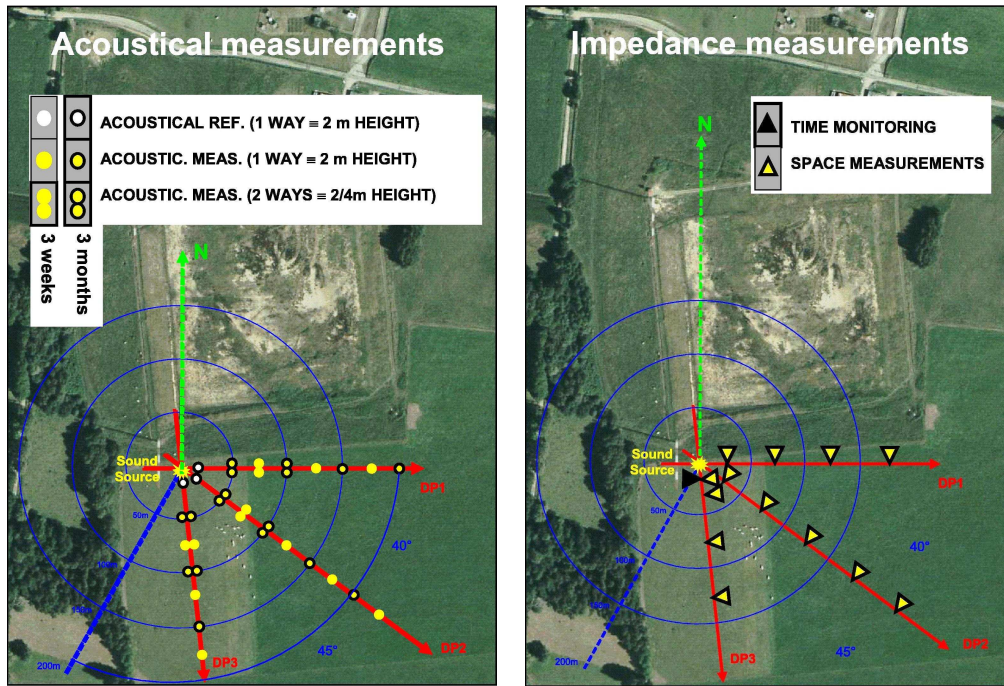
prend le parti de modéliser le phénomène observé comme la réalisation d'un processus aléatoire. Ce processus est représenté par une fonction aléatoire $Z(x, y, z, t)$, où x , y et z sont les coordonnées dans l'espace géographique et où t est le temps. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à $Z(x, y, 2, t_i)$ afin de modéliser à hauteur d'homme (à 2 mètres) un plan de propagation parallèle au sol pour des échantillons temporels de niveaux acoustiques intégrés sur 15 minutes ($L_{eq,15min}$).

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'Ecole 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 divers institutions ainsi que des moyens supplémentaires issus du projet ont permis de mener une campagne expérimentale de référence (Junker *et al.*, 2006).

2. CAS D'ETUDE DE LA CAMPAGNE EXPERIMENTALE

La campagne expérimentale menée en 2005 consistait à prendre en considération un cas d'étude très général en mettant en place une source omnidirectionnelle artificielle (et donc maîtrisée) à 2 mètres au-dessus d'un terrain plan et à distance d'obstacles ou d'autres sources de bruit. La Figure 1 schématise la disposition choisie de capteurs et mesures suivant 3 directions de propagation dessinant un angle de 90° autour de la source. Autour de cette source et jusqu'à une distance de 225 mètres ont été placés 33 points de mesure (sonomètres) à 2 ou 4 mètres de hauteur (Figure 1(a)). Ces 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. En parallèle (Figure 1(b)), 13 mesures d'impédance de sol ont été effectuées quasi quotidiennement. 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 grâce à un important dispositif combinant des capteurs classiques (girouettes, anémomètres à coupelles) et des capteurs ultrasoniques.



(a) Protocole des mesures acoustiques

(b) Protocole des mesures d'impédance

Figure 1 : Campagne de Lannemezan 2005 - distribution spatiale des mesures et capteurs.

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 2005 nous fournit un grand nombre de situations particulièrement intéressantes (spectres complets en tous les points). L'étude est complétée par une présentation du travail préalable réalisé sur les mesures d'impédance du 20 juin.

3. ELEMENTS DE GEOSTATISTIQUE

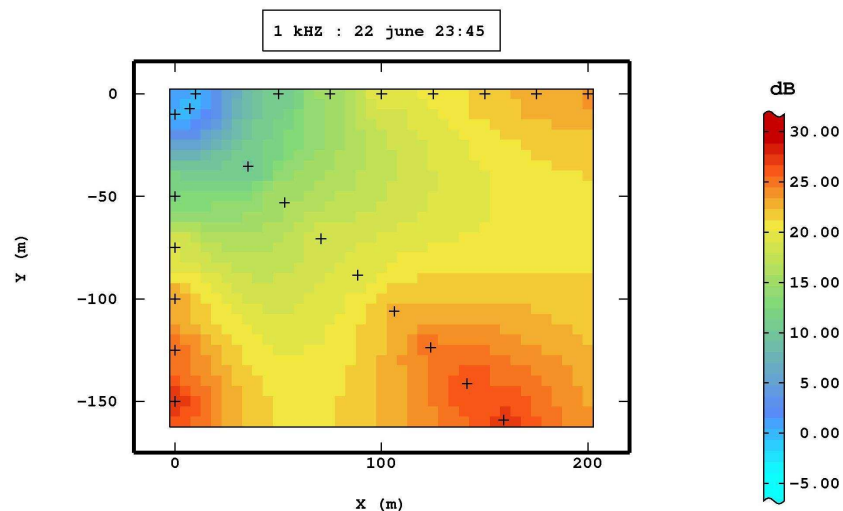


Figure 2 : Campagne de Lannemezan 2005 – 22 juin 23h45 : carte d'interpolation obtenue par un calcul d'inverse du carré des distances.

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 $L_{eq,15min}$ du 22 juin à 23h45.

Le parti pris de la géostatistique d'utiliser la corrélation entre les points de mesures lui apporte deux avantages. Premièrement elle prend en compte les caractéristiques intrinsèques du phénomène étudié, et en deuxième lieu elle n'a pas le caractère arbitraire des méthodes plus classiques puisqu'elle parvient à définir des critères objectifs d'optimisation de l'interpolation de points de mesures. 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 analytiques ou numériques donnant une indication de tendance générale sur le phénomène physique.

3.1. HYPOTHESES ET STRUCTURE DES DONNEES

Pour les méthodes les plus simples, les hypothèses d'étude sont relativement restrictives. Néanmoins, les méthodes de calcul étant peu coûteuses, l'itération émission d'hypothèses sur la variable étudiée et vérification de ces hypothèses se fait fort aisément. L'hypothèse **intrinsèque** est par exemple nécessaire pour construire l'outil d'exploration privilégié en géostatistique : le **variogramme expérimental**. Cette hypothèse correspondant à une stabilité des accroissements de la variable étudiée est définie et largement discutée dans l'ouvrage de Chilès et Delfiner (Chilès *et al.*, 1999).

Pour calculer le degré de corrélation entre 2 points de l'espace x_i et x_j pour la variable z étudiée, on considère leur écartement spatial $h = |x_i - x_j|$, puis il suffit de construire le demi-écart quadratique pour chacune de ces paires :

$$\gamma^* = \frac{(z(x_i) - z(x_j))^2}{2}. \quad [1]$$

Reportant tous les couples $\{h, \gamma^*\}$ sur une figure et en effectuant la moyenne sur des valeurs régulières de h , on obtient le variogramme expérimental. Ce variogramme est ensuite approché par une fonction mathématique (en introduisant des hypothèses supplémentaires sur la variable étudiée). 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 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.

3.2. KRIGEAGE

La méthode d'interpolation privilégiée en géostatistique est le **krigeage**. 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. Le calcul de cette variance d'estimation fait intervenir le variogramme et les pondérateurs (coefficient linéaires entre les mesures et la valeur estimée) dépendent ainsi de la corrélation entre les points de mesure.

Le krigeage appliqué de manière directe à une variable est appelé soit **simple** lorsque l'espérance de la variable sur le domaine est connue, soit **ordinaire** si elle est inconnue. Si le krigeage n'est pas appliqué directement à la variable d'étude mais à une de ses composantes (considérée stationnaire par exemple et aléatoire), il s'agit alors d'un krigeage **universel**.

4. APPLICATION AUX DONNEES D'IMPEDANCE DE SOL

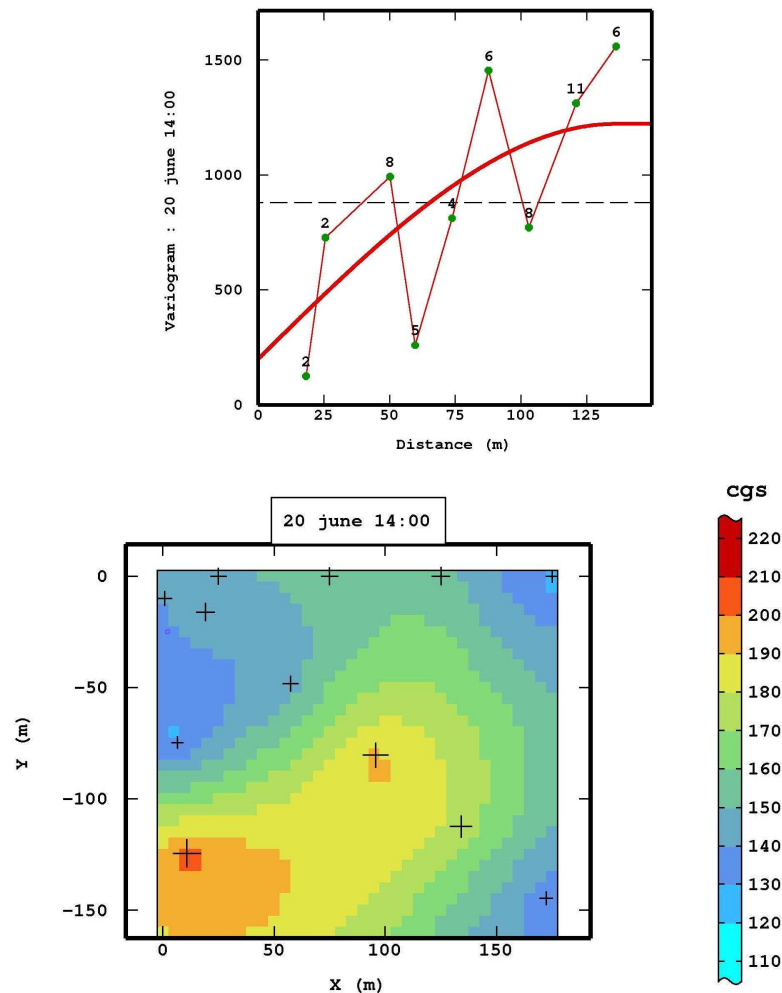


Figure 3 : Campagne de Lannemezan 2005 - 20 juin 14h00 : krigeage ordinaire de la résistance spécifique au passage de l'air du sol - (en haut) variogramme expérimental et ajustement d'un modèle sphérique d'une portée de 136 mètres et d'un palier de $1022 \text{ (kNsm}^{-4})^2$ (en bas) carte d'interpolation correspondante sur une grille de points de 5 mètres de côté.

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 sont considérées constantes sur le domaine d'étude. 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 en absorption (impédance) 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 phénoménologique : la résistance spécifique au passage de l'air du modèle de Delany et

Bazley (Delany *et al.*, 1970) (Rasmussen, 1981). 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 125 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 résistance au passage de l'air (impédance de sol), nous avons réalisé une interpolation par krigeage aboutissant à la carte de la Figure 3. 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.

5. APPLICATION A LA PROPAGATION 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(a)).

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 $m(x)$ modélisant la tendance de non stationnarité. La fonction aléatoire Z 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 . 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.*, 2004). Dans nos travaux, le choix de la dérive s'est porté sur le modèle de Embleton (Embleton, 1983) tenant compte d'un effet de sol moyen calculé à partir des mesures mais laissant de côté l'influence des conditions micrométéorologiques sur la propagation.

Afin de rendre la méthode plus performante, et 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. C'est une technique couramment utilisée. 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 de la carte du 22 juin à 23 heures 45, la Figure 4 présente le variogramme du résidu après réajustement de la dérive. Nous pouvons clairement observer que la portée est réduite (moins de 100 mètres - moitié des dimensions du domaine). Ceci justifie l'emploi du réajustement : le modèle de variogramme est bien un modèle stationnaire. De plus, le palier reste également à des valeurs faibles réduisant ainsi la variance de l'erreur d'estimation et apportant ainsi plus de fiabilité à la

valeur estimée. Finalement, la carte résultante est également présentée à la Figure 4. 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 couverture nuageuse. Comparé au résultat Figure 2 d'une méthode classique mais bien subjective, le krigeage universel permet d'obtenir une représentation clairement anisotrope - et plus réaliste - du champ acoustique.

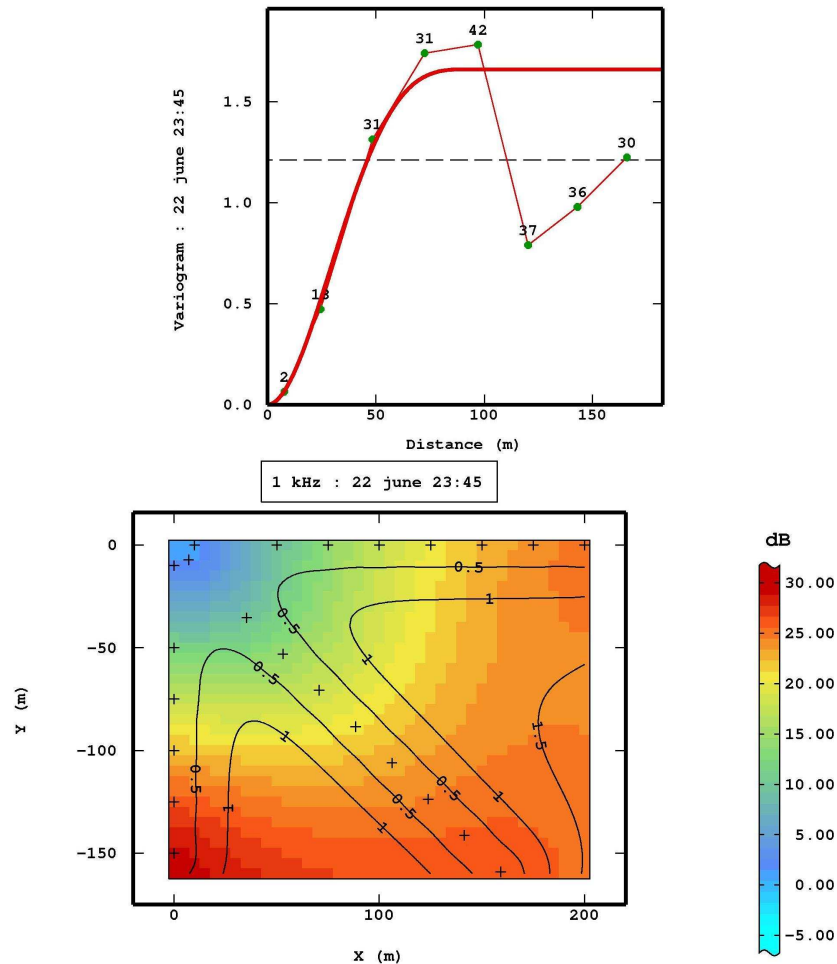


Figure 4 : Campagne de Lannemezan 2005 – 22 juin 23h45 : krigeage universel de l'atténuation acoustique - (en haut) variogramme expérimental et ajustement d'un modèle cubique d'une portée de 96 mètres et d'un palier de 1.66 dB^2 (en bas) carte d'interpolation correspondante sur une grille de points de 5 mètres de côté.

6. CONCLUSION

L'étude géostatistique des propriétés du sol (impédance) permet d'estimer un champ réaliste de résistance spécifique au passage de l'air et de lui associer une variance d'estimation. Une étude doit être menée sur la sensibilité des codes numériques de calcul acoustique à des valeurs extrêmes du paramètre de sol calculées à l'aide du krigeage. 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 simple ne prenant pas en compte la micro-météorologie. Finalement, le résidu, différence entre les mesures et le modèle

acoustique en conditions homogènes, permet de rendre compte de l'influence des variations spatiales des caractéristiques du milieu de propagation (sol et micrométéorologie). Il est considéré comme la partie stochastique du champ. La carte krigée peut être retenue comme carte de référence des $L_{eq,15min}$ car elle correspond à une estimation optimale de l'atténuation conditionnellement aux mesures.

Les méthodes géostatistiques sont donc d'un grand intérêt dès lors que l'on considère un phénomène variable dans l'espace. Elles sont justifiées d'un point de vue théorique par le cadre probabiliste dans lequel est placé le problème de l'interpolation et, d'un point de vue plus pratique, elles permettent de confronter l'interprétation physique des cartes obtenues à une modélisation de la structure expérimentale du phénomène par le variogramme. Les hypothèses généralement émises pour appliquer le krigeage ne représentent pas un facteur limitant dans notre problématique où pourtant une très forte non-stationnarité, due aux propriétés de l'expansion d'un front d'onde, apparaît. 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 plus complexe (vallon) et dont la source sonore principale est une autoroute (Gauvreau *et al.*, 2006) et (Gauvreau, 2007).

7. BIBLIOGRAPHIE

- Delany M.E., Bazley E.N. (1970) « Acoustical properties of fibrous absorbent materials » *Applied Acoustics*, vol. 3, p. 105-116.
- Embleton T.F.W. (1983) « Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements » *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 74, n° 4, p. 1239-1244.
- Gauvreau B. (2007) Page web du site expérimental : <http://www.lcpc.fr/fr/presentation/moyens/slt/index.dml>
- Gauvreau B., Bonhomme B., Lefèvre H., Lauzin F. (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.
- Junker F., Gauvreau B., Cremezi-Charlet C., Gérault C., Ecotière D., Blanc-Benon P., Cotté B. (2006) « 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).
- Rasmussen K.B. (1981) « Sound propagation over grass covered ground » *Journal of Sound and Vibration*, vol. 78, n° 2, p. 247-255.
- Wackernagel H., Lajaunie C., Blond N., Roth C., Vautard R. (2004) « Geostatistical risk mapping with chemical transport model output and ozone station data » *Ecological Modelling*, vol. 179, p. 177-185.