

## 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)

Benoit Gauvreau<sup>1</sup>, Bernard Bonhomme<sup>2</sup>, Hubert Lefèvre<sup>3</sup>, Francis Lauzin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Section Acoustique Routière et Urbaine, BP 4129, 44341 BOUGUENNAIS cedex, France, courriel : benoit.gauvreau@lcpc.fr

<sup>2</sup> Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, 11 rue Laplace, 41000 BLOIS, France, courriel : bernard.bonhomme@equipement.gouv.fr

<sup>3</sup> Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, Section Acoustique, 8-10 rue Bernard Palissy, 63017 CLERMONT-FERRAND CEDEX 2, France, courriel : hubert.lefevre@equipement.gouv.fr

<sup>4</sup> Centre d'Études et de Construction des Prototypes, 2 bis, avenue du Général Foy, 49100 ANGERS, France, courriel : francis.lauzin@equipement.gouv.fr

### Résumé

Le changement de la réglementation française (article 6 de l'arrêté du 5 mai 1995) impose de prendre en compte les effets météorologiques dans les études de bruit pour les sites au-delà de 250m. Aussi, dans le but d'appréhender la connaissance et la modélisation de la propagation du bruit routier, le réseau des Ponts et Chaussées (LCPC, LRPC et CECP), s'est doté en 2001 d'un outil expérimental d'envergure localisé à Saint-Berthevin (France-53) : la « Station de Long-Terme » (SLT). L'objectif est de fournir une importante base de données croisées et synchronisées (trafic, acoustique, météo), avec une double finalité : permettre une analyse statistique spatiale et temporelle des grandeurs à l'étude, et fournir des données expérimentales de référence pour la validation des modèles numériques acoustique et micrométéorologique, tant dans le domaine de l'ingénierie que dans celui de la recherche scientifique.

Afin que cette importante base de données dite « de référence » puisse être exploitable avec la double finalité mentionnée supra, il est indispensable de procéder à un certain nombre d'opérations, visant à (in)valider une partie de ces données. Ces exigences nous ont conduit à développer des outils logiciels pour le « filtrage » de ces données, ainsi qu'à mettre en place des campagnes expérimentales périodiques pour le suivi météorologique de la SLT. Ces deux approches complémentaires sont présentées en détails dans la présente communication.

### Introduction

Dans le domaine de l'acoustique environnementale, les nuisances sonores peuvent provenir de différentes origines : sources de bruit de type transport routier, ferroviaire et aérien, ou bruit de type industriel. Elles présentent cependant des caractéristiques communes lorsque l'on s'intéresse aux phénomènes physiques liés à la propagation acoustique à grande distance en milieu inter ou péri-urbain. Dans ces situations, l'influence combinée des effets micrométéorologiques et des effets de sol conduit à une importante dispersion des niveaux sonores. Ces effets varient sur des échelles de temps très variables et leur influence relative sur le champ acoustique dépend fortement de la configuration géométrique étudiée et des caractéristiques du

milieu de propagation traversé : gradients verticaux moyens de vent et de température, turbulence atmosphérique.

Cette thématique de recherche présente des verrous scientifiques encore importants malgré l'intérêt que lui porte la communauté scientifique internationale et les moyens qu'elle lui consacre depuis quelques dizaines d'années [1][2][3]. Parallèlement, les instances réglementaires [4] et normatives [5] subissent de fortes contraintes liées à la pression publique. En effet, le nombre de citoyens européens aujourd'hui soumis aux nuisances sonores d'origine routière, ferroviaire ou industrielle est de plus en plus important. Ces citoyens font émerger un besoin urgent d'améliorer la fiabilité des outils d'estimation numérique ET expérimentale des niveaux sonores auxquels ils sont/seront exposés.

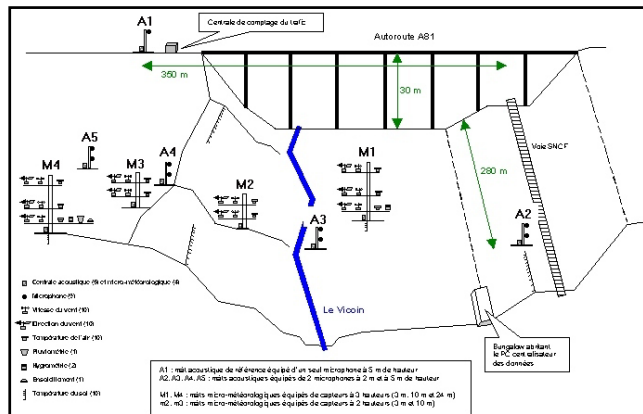
Aussi, dans l'objectif d'appréhender les phénomènes physiques relatifs à la propagation acoustique en milieu extérieur hétérogène, le LCPC a décidé de mettre en place un site expérimental : la Station de Long Terme (SLT) de Saint-Berthevin [6][7]. Cette Opération de Développement (OD) du LCPC a été mise en place en 1999 et est opérationnelle depuis 2001. Elle est prévue pour couvrir une période de 10 ans. Elle s'intègre dans le cadre de l'Opération de Recherche (OR) du LCPC identifiée OR 11M041 « Propagation acoustique en milieu extérieur complexe » (2004-2007) [7]. Ainsi, tout l'intérêt de la mise en place d'un tel site d'observation en continu (« monitoring ») pendant une longue période (10 ans) est de pouvoir quantifier l'influence des conditions micrométéorologiques sur la *variabilité* d'un champ acoustique à l'échelle *locale* (celle du site) relativement à l'échelle *régionale* (celle des stations Météo-France). Ces travaux de recherche portent autant sur l'aspect *spatial* (effet de site) que sur l'aspect *temporel* (court/long terme), dans l'objectif d'accéder à l'estimation de la variabilité spatio-temporelle de l'ensemble des grandeurs d'intérêt sur un site quelconque à court, moyen et long terme [8], [9].

En tant qu'« Equipement pour la Recherche », ce site expérimental n'a pas vocation à produire directement des études, mais plutôt à faire avancer les connaissances scientifiques dans le domaine de la propagation acoustique en milieu extérieur, notamment à travers l'exploitation de la riche base de données qui en est extraite. Ainsi, l'analyse (géo)statistique de la base de données issues de cet équipement pourra utiliser des outils statistiques

(variogrammes, variables « régionalisées », etc.) récemment appliquées à des données expérimentales acquises dans des cas moins complexes [10]. En outre, les données issues de la SLT permettront de valider les modèles numériques acoustiques et micrométéorologiques développés par le LCPC et ses partenaires [11]. Cette communication s'attache à présenter les techniques d'acquisition puis de traitement des données de la SLT, de manière à constituer une base de données valide et parfaitement exploitable.

## Présentation générale de la SLT

Le site de Saint-Berthevin (F-53) a été retenu suivant un cahier des charges qui en définissait les principales caractéristiques d'intérêt : topographie complexe, sources de bruit d'origine routière ET ferroviaire, sol relativement homogène, proximité d'une station Météo-France, etc. Le principe de ce site expérimental consiste en une acquisition permanente (« monitoring ») sur 10 ans (échantillonnage temporel : 10 s) des grandeurs acoustiques (niveau global, 1/1 octave, etc.) et micrométéorologiques (vitesse et direction du vent, température de l'air et du sol, pluviométrie, solarimétrie, etc.) en plusieurs points du site : 5 mâts acoustiques de 5m (2 hauteurs de capteurs du type GRASS G-41CM), 2 mâts météo de 25m (3 hauteurs de capteurs) et 2 mâts météo de 10m (2 hauteurs de capteurs) équipés de sondes YOUNG, Rotronic, Kipp & Zonen, Vectors Instruments et CAMPBELL Scientific.



**Figure 1:** le site expérimental du LCPC à Saint-Berthevin [6][7], plan schématique général de la disposition des mâts acoustiques (« A ») et micrométéorologiques (« M »).

L'implantation des mâts acoustiques et météorologiques a été réalisée de manière à permettre l'étude des différents aspects du terrain : fond de vallée, mi-pente, rupture de pente et plateau. Ainsi, pour chaque aspect, un mât acoustique a été implanté à 280m du bord de la voie autoroutière A81. Cette distance satisfait au critère retenu dans l'article 6 de l'arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières [4], qui impose de faire des études d'impact acoustique intégrant les effets météorologiques pour les sites au-delà de 250m. A chaque mât acoustique correspond un mât météorologique, avec une exception pour la mi-pente : le mât acoustique a été déplacé sur l'autre pente pour servir de référence à la source ferroviaire (ligne SNCF).

Un mât acoustique de référence a également été placé près de la voie autoroutière, à proximité d'une station de

comptage de trafic routier de type SIREDO. Cette dernière est également en fonctionnement 24h/24 et 365j/an sur le site. Elle a été adaptée à la problématique concernée et permet, à l'aide de deux boucles et d'un capteur piézoélectrique par voie, de discriminer 14 types de véhicules (poids, longueur, nombre d'essieux), d'indiquer la voie concernée par le véhicule, d'associer l'horodatage précis à chaque véhicule et de fournir la vitesse de passage de chaque véhicule

De plus, la SLT fournit des mesures de température du sol à 2, 5, 10, 20 et 100 cm de profondeur et une mesure de l'hygrométrie à 3m de hauteur. Le mât disposé sur le plateau (M4) dispose également d'un solarimètre et d'un pluviomètre.



**Figure 2:** vue générale du site expérimental du LCPC localisé à Saint-Berthevin [6][7].

L'ensemble des données est rapatrié par un réseau filaire parcourant le site en liaison série type RS485 jusqu'à une unité informatique centrale installée dans un bungalow climatisé en fond de vallée. A minuit heure GMT, la base de donnée est concaténée, l'horloge radio est interrogée pour remettre les 10 centrales à l'heure. L'acquisition pour la nouvelle journée commence par un calibrage automatique des 9 chaînes de mesure acoustique programmé pour débiter à 0H 0min 20s. Ce calibrage peut également être réalisé manuellement à l'aide d'un calibre classique en utilisant un adaptateur du type RA0009.

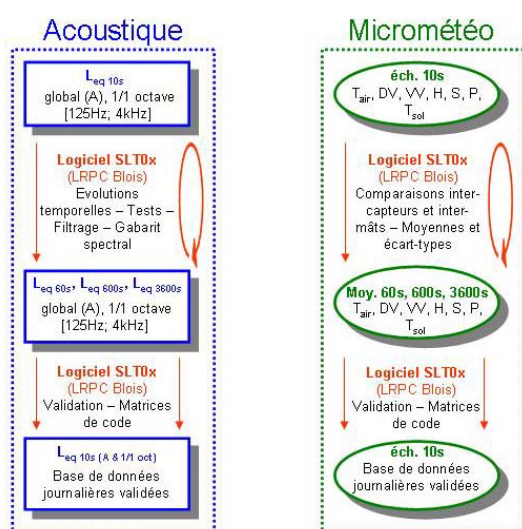
Parallèlement, des mesures des caractéristiques de sol sont régulièrement réalisées (fréquence mensuelle) en 12 points du site (échantillonnage spatial optimisé) afin d'accéder aux propriétés d'absorption de l'énergie sonore par le sol (impédance acoustique).

## Traitement et validation des données

L'ensemble des données journalières (environ 10 Mo/jour) sont quotidiennement pré-traitées, synchronisées, concaténées, compactées puis transférées vers un site d'accueil sur internet (protocole ftp). Avant toute utilisation, ces données subissent au préalable un important post-traitement de validation (filtres), afin de détecter les dysfonctionnements de capteurs, les événements sonores parasites, etc. Le logiciel de validation des données développé en Visual Basic au LRPC de Blois (« SLT0x ») comprend trois types de tests. Les deux premiers sont relativement simples : ils consistent à détecter des valeurs indiquant un dysfonctionnement des centrales acoustiques

et/ou micrométéorologique (valeur « -1000 » dans la base de données), ou un capteur micrométéorologique déconnecté (« 6999.00 »).

En ce qui concerne la micrométéorologie, la troisième phase de post-traitement des données est plus complexe : elle vise à rechercher les capteurs fournissant des valeurs aberrantes et/ou erronées. Pour la micrométéorologie par exemple, il s'agit de détecter – pour chacun des capteurs – les dépassements des plages d'utilisation, des écarts anormaux par rapport à une moyenne glissante, etc. Ce type de traitement est valable pour les capteurs à variation lente comme les thermomètres ou les hygromètres. Pour les autres types de capteurs, il est nécessaire d'avoir recours à l'analyse multi-capteurs (ou « inter-capteurs »). Il s'agit alors de vérifier que chaque capteur présente un fonctionnement cohérent par rapport aux autres capteurs, soit du même type, soit d'un type différent : par exemple, une girouette qui change de direction alors que la vitesse du vent est nulle au même endroit indique une probabilité de panne sur l'anémomètre. Ainsi, tous les cas probables ont été analysés de manière quasi-exhaustive, puis regroupés (tests sur échantillonnage 10s, 1min, 10min, 1h, etc.) pour éliminer les redondances, en faciliter la programmation et accélérer la procédure de validation automatique des données.



**Figure 3** : synopsis de post-traitement des données expérimentales acoustiques et micrométéorologiques à l'aide du logiciel « SLT0x » développé au LRPC de Blois.

Pour l'acoustique, le calibrage automatique à minuit de tous les microphones à 90dB pour 1kHz permet d'éviter les dérives importantes. Cela n'exclut pas des dérives éventuelles pour d'autres fréquences. C'est la raison pour laquelle les sondes sont régulièrement testées à l'aide d'un calibre multi-fréquences et multi-niveaux sonores. La recherche des événements sonores parasites (i.e. autres que ceux d'origine routière) se fait par analyse spectrale lors d'un dépassement de seuil, fixé à une valeur déterminée par une moyenne sur une longue période. L'événement est alors automatiquement identifié et listé. Le cas le plus simple est la détection des trains avec le mât acoustique situé à 10m de la voie ferrée (A2). Pour les bruits parasites plus difficiles à identifier (avions, animaux, klaxons, vent, présence humaine, etc.), un « filtre spectral » peut être utilisé. Celui-ci

consiste à vérifier – pour tous les octaves de chaque capteur – que chaque échantillon  $L_{eq10s}$  appartient à un intervalle de « fonctionnement normal ». Les limites inférieures (bruit de fond type  $L_{90}$  ou  $L_{95}$ ) et supérieures (niveaux de crête type  $L_1$  ou  $L_{10}$ ) d'un tel gabarit spectral dépendent évidemment des conditions de propagation (effets météo et effets de sol) et leur détermination est donc soumise à l'arbitraire, voire au savoir-faire.

Pour la caractérisation du trafic routier, le post-traitement consiste à vérifier la répartition des véhicules par voie et par silhouette. Cette répartition est comparée à des valeurs de fonctionnement « normal », par sens par exemple : 80% des véhicules environ sur la voie lente pour une 2x2 voies. Par leur conception, de telles station de trafic génèrent des véhicules « fantômes » qui proviennent généralement de passages « à cheval » sur deux voies. Le post-traitement permet également de vérifier que ces cas restent rares. Enfin, la répartition des types de véhicules (ou « silhouettes » : 2 roues, véhicules légers, utilitaires, poids lourds, trains routiers, etc.) est un indicateur du fonctionnement de la centrale.

Le logiciel de post-traitement « SLT0x » est utilisé quasi-quotidiennement sur les données journalières pour vérifier le bon fonctionnement des centrales et des capteurs, et pour déclencher une intervention sur site en cas d'anomalie. A l'issue des différents « filtres » appliqués aux données brutes, la base de données validées se présente sous forme d'une matrice de code associée à chaque phase de validation. Ce logiciel est en constante évolution et reste un outil précieux pour la maintenance matérielle et logicielle de la Station de Long Terme et pour la validation des données expérimentales.

## Suivi métrologique des capteurs

Les différentes tâches nécessaires à la maintenance matérielle et logicielle, au suivi préventif et curatif, à l'acquisition, au pré-traitement et au post-traitement des données mobilisent d'importants moyens humains et techniques du Réseau Scientifique et Technique (RST) du METLTM, dont principalement ceux du LCPC, du CETE Ouest et du CETE Normandie-Centre. En outre, un suivi métrologique de l'ensemble des capteurs du site (doublement de tous les capteurs) est réalisé tous les 2 ou 3 ans par l'ensemble des laboratoires impliqués (LCPC et Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées de Blois, Clermont-Ferrand, Lille et Strasbourg). Ce suivi consiste en un doublement de l'ensemble des capteurs acoustiques et micrométéorologiques du site par des capteurs de référence (étalonnés) du même type, suivi d'une analyse comparative pour identifier d'éventuels dysfonctionnements des capteurs de la SLT.

Le dernier suivi métrologique a été réalisé en octobre 2003 sur une période de 3 jours complets. Il a consisté en un doublement des capteurs sur certains mâts existants, et/ou la mise en place de mâts « doublons » pour les autres mâts. Ainsi, par comparaison des capteurs en place, ce suivi, permet de ne pas démonter les capteurs et de poursuivre l'acquisition permanente (« monitoring ») sur le site de la

SLT. Par contre, cette méthode de vérification est tributaire des aléas météorologiques et n'explore pas systématiquement toute la gamme de mesure. Pour la comparaison des mesures permanentes « slt » et des mesures de vérification « suivi », la base temporelle utilisée est l'échantillon de 10s pour les capteurs acoustiques et thermiques, et une moyenne sur 10 minutes pour les capteurs aérodynamiques (vitesse et direction du vent) pour s'affranchir des réponses dynamiques différentes entre capteurs de marque/modèle différents. A titre d'exemple de résultats de telles comparaisons, le Tableau 1 présente le maximum des écarts-types des écarts (« slt » - « suivi ») pour chaque type de capteur :

	Mâts	$\sigma$ max
Direction de vent > 1,2 m/s	M1, M2, M4	2°
Vitesse de vent	M1, M2, M4	0,1 m/s
Température	M1, M4	0,1 °C
$L_{Aeq}$ global à 5m	A1, A2, A5	0,4 dB <sub>A</sub>
$L_{Aeq}$ global à 2m	A2, A5	0,7 dB <sub>A</sub>

**Tableau 1:** Résultats sur la vérification des capteurs

Ainsi, la vérification des anémomètres a mis en évidence une faible perturbation aérodynamique provenant des mâts supports permanents (« slt ») en présence de vent contraire à la propagation. De même, certains capteurs défectueux ont pu être identifiés, et réparés ou échangés le cas échéant. Les méthodes employées lors du suivi métrologique seront prochainement intégrées dans le logiciel de validation pour détecter au plus tôt certains dysfonctionnement, tels que l'arrêt d'un ventilateur de sonde thermique par exemple. Le suivi métrologique d'un tel site expérimental fonctionnant 24h/24h et 365j/365j sur une période de 10 ans est indispensable pour s'assurer de la fiabilité des données et en autoriser toute exploitation aval.

## Conclusion et perspectives

La « station de Long Terme » mise en place par le LCPC constitue un outil expérimental puissant et performant, à condition d'en maîtriser les aspects métrologiques (matériels et logiciels) et d'être en mesure d'en détecter les dysfonctionnements. Ainsi, il convient de développer des outils adaptés pour le traitement et la validation des données expérimentales avant leur exploitation, qu'elle soit du type analyse statistique ou du type comparaison aux données théoriques et numériques.

Une évolution matérielle (anémomètres soniques tridimensionnels, capteurs de nébulosité et d'humectation, etc.) et logicielle (passage en 1/3 octave pour l'acoustique, calculs des paramètres de turbulence atmosphérique, etc.) est envisagée pour 2006 et 2007. Il est également prévu de développer et de mettre en place un système de surveillance en continu (« monitoring ») des caractéristiques de sol en un point du site (impédance), indépendamment des mesures ponctuelles réalisées régulièrement sur le site (12 points de mesure).

## Remerciements

Les auteurs de la présente communication tiennent à remercier Y. Brunet (INRA Bordeaux) pour son apport

scientifique à cet outil expérimental, tant pour la disposition des capteurs micrométéorologiques sur le site que pour le post-traitement et la validation des données correspondantes.

## Références

- [1] Embleton T. F. W., "Tutorial on sound propagation outdoors", *J. Acoust. Soc. Am.* 100(1), 31-48, (1996).
- [2] Wilson K., "A brief tutorial on atmospheric boundary layer turbulence for acousticians", *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Intern. Symp. on Long Range Sound Propagation*, Lyon (F), 111-121, (1996).
- [3] Gauvreau B., Bérengier M., Blanc-Benon Ph. and Depollier C., "Traffic noise prediction with the parabolic method: Validation of a split-step Padé approach in complex environments", *J. Acoust. Soc. Am.* 112(6), 2680-2687, (2002).
- [4] Arrêté du 5 mai 95 relatif au bruit des infrastructures routières art 6 pris en application de la loi n° 92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit et au décret n° 95-22 du 9 janvier 1995 relatif à la limitation du bruit des aménagements et infrastructures terrestres.
- [5] AFNOR XP S 31-133, « Acoustique. Bruit des infrastructures terrestres. Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques », transposition normative du Guide d'utilisation de la Nouvelle Méthode de Préviation du Bruit « NMPB-Routes 96 », (2001).
- [6] O. Baume, B. Gauvreau, M. Bérengier, F. Junker, F. Lauzin, "Long term monitoring site at Saint-Berthevin (France-53) : a tool for traffic noise characterization using space and time statistical variability of acoustical and meteorological events", *CFA/DAGA 2004*, Strasbourg, (2004).
- [7] URL: <http://www.lcpc.fr/fr/presentation/moyens/slt/>
- [8] Zouboff V., Brunet Y., Bérengier M., Séchet E., "A qualitative approach of atmospheric effects on long range sound propagation", *6th Intern. Symp. on Long Range Sound Propagation*, Ottawa, Canada, (1994).
- [9] D. Ecotière, B. Gauvreau, Y. Brunet, "Meteorological effects on long-range sound propagation : evaluation of the long term sound level using statistical analysis", *CFA/DAGA 2004*, Strasbourg, (2004).
- [10] O. Baume, B. Gauvreau, M. Bérengier, F. Junker, H. Wackernagel, J.P. Chilès, "Exploration statistique de fluctuations temporelles à petite échelle des grandeurs acoustiques et micrométéorologiques", *Congrès Français d'Acoustique 2006*, Tours (F), (2006).
- [11] B. Gauvreau, B. Lihoreau, M. Bérengier, Ph. Blanc-Benon, I. Calmet, "Une méthode de couplage de modèles acoustique et micrométéorologique pour la prévision des niveaux sonores de long-terme en situation complexe", *Congrès Français d'Acoustique 2006*, Tours (F), (2006).