

Variabilité spatio-temporelle et incertitudes des données d'entrée des modèles de prévision acoustique

Benoit Gauvreau

Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC)
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais CEDEX
E-mail : benoit.gauvreau@lcpc.fr

Fabrice Junker

EDF R&D
1, avenue du Général de Gaulle
92141 Clamart CEDEX
E-mail : fabrice.junker@edf.fr

Résumé

Ce papier vise à quantifier l'influence de la variabilité et de l'incertitude de certains paramètres influents sur les prévisions de niveaux sonores en milieu extérieur complexe : les effets induits par les limites du milieu de propagation ou «effets de sol» et par les caractéristiques du milieu de propagation ou «effets météo». Ces travaux s'appuient sur les résultats expérimentaux issus d'une importante campagne appelée «Lannemezan 2005» ainsi que sur des prévisions numériques obtenues à l'aide de modèles de référence. Les résultats montrent que la dispersion acoustique associée à la dispersion des données d'entrée de ces modèles est loin d'être négligeable devant la précision communément requise pour ces modèles. Ces résultats ont ainsi des implications importantes en termes de recommandations sur les pratiques expérimentales et méthodologiques actuelles.

Abstract

This paper aims at quantifying the influence of variability and uncertainty of the ground effects and meteorological effects on outdoor sound prediction. The study deals both with the experimental results from an important campaign so called "Lannemezan 2005" and with numerical predictions using reference models. The spreading of the distribution of the acoustical results due to the variation of the input data is far from being negligible assuming the expected accuracy of the models. Those results will lead to some important recommendations with respect to in-situ measurement methods and experimental uncertainties assessment.

Les travaux menés actuellement en propagation acoustique s'inscrivent dans un contexte marqué par la récente parution de la Directive européenne sur l'évaluation et la gestion du bruit ambiant, et par la mise en place des projets de recherche européens HARMONOISE et IMAGINE [1]. Ces projets ont pour but de proposer une méthode de calcul prévisionnel harmonisée au niveau européen pour l'acoustique extérieure. Parallèlement, certains projets se développent à l'échelle nationale, dont le but est de fournir des résultats permettant de classer les phénomènes observés en fonction de leur influence relative sur la variabilité d'une situation acoustique donnée [2,3,4,5]. Ce type de résultats pourra être utilisé pour appréhender la caractérisation d'une situation sonore, pour améliorer les outils de calcul prévisionnel et pour alimenter les travaux des groupes de travail au sein des commissions de normalisation AFNOR S 30 J : «Bruit dans l'environnement» et S 30 M : «Acoustique des milieux extérieurs», qui s'attachent à évaluer l'incertitude et la représentativité d'un niveau sonore.

Cet article vise particulièrement à quantifier l'influence de la variabilité et de l'incertitude de certains paramètres influents sur les prévisions (le calcul) de niveaux sonores. Volontairement, les incertitudes liées à la source (stabilité,

directivité ...) ne sont pas abordées dans ce papier. Quant à l'influence des fluctuations saisonnières des conditions micrométéorologiques sur les niveaux sonores dits de «long terme», elle est plus précisément abordée dans [6]. La présente étude se focalise davantage sur deux sources importantes de variabilité et d'incertitude pour la propagation acoustique en milieu extérieur :

- les effets induits par les limites du milieu de propagation («effets de sol» - Section 3) et,
- ceux induits par les caractéristiques du milieu de propagation («effets météo» - Section 4).

Ces travaux s'appuient sur les résultats expérimentaux issus d'une importante campagne brièvement décrite au préalable (Section 2).

Il existe plusieurs types de modèles :

- Les modèles de «référence» (R&D) [7,8] ;
- Les modèles plus opérationnels (ingénierie) [9,10,11,12].

Afin de s'assurer d'une sensibilité réaliste de notre modèle acoustique aux données d'entrée, nous utilisons ici un modèle de référence basé sur l'approximation parabolique [13,14,15,16] et un modèle basé sur la théorie des rayons [17].

Bases de données expérimentales

Protocoles expérimentaux

Une campagne expérimentale a été réalisée de juin à août 2005 (3 mois) sur le site de Lannemezan (France, Hautes-Pyrénées) dans le cadre d'un projet de recherche pour le ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables (MEDAD, ex-MEDD) mené en partenariat avec EDF, le LCPC, l'École centrale de Lyon et la SNCF sur la période 2004-2006. Ce site expérimental a été choisi pour plusieurs raisons :

- environnement sonore relativement silencieux,
- sol plan et herbeux,
- grande variété de vitesse et de direction du vent,
- présence d'une station Météo-France à proximité immédiate.

Le principe de cette campagne était d'observer les variations du niveau sonore dans l'environnement proche d'une source de bruit blanc stable sur un site plan et sur un sol herbeux supposé homogène. Un ensemble de microphones et de capteurs météorologiques a été disposé le long de plusieurs directions de propagation (DP1, DP2 et DP3) partant de la source et jusqu'à 200 m. Les protocoles expérimentaux pour les mesures acoustiques, micrométéorologiques et la caractérisation du sol (impédance) sont respectivement rappelés ci-après. Pour plus de détails sur cette campagne expérimentale (protocoles expérimentaux pour l'acoustique, la micrométéorologie et l'impédance de sol), le lecteur pourra se référer aux différentes communications faites sur ce sujet, par exemple les références bibliographiques [2,3].

Dispersion des niveaux sonores

Un certain nombre d'opérations de validation a été réalisé sur les données expérimentales avant leur exploitation. Ce travail de post-traitement a porté à la fois sur les données acoustiques et sur les données micrométéorologiques. Ces aspects sont également détaillés dans [2,3]. La Figure 1 fixe un ordre de grandeur pour la dispersion des niveaux sonores mesurés à 2 m de hauteur pendant la campagne «Lannemezan 2005» sur une même direction de propagation (DP2). On vérifie que cette dispersion augmente avec la distance (50 m, 100 m, 200 m) et qu'elle est plus importante pour les moyennes et hautes fréquences ($f > 500$ Hz). Cette dispersion spectrale

est quasi-identique dans les autres directions de propagation (DP1 et DP3), et caractéristique de ce que l'on peut observer avec une telle source sonore (ponctuelle et stable), sur un tel site (plan et herbeux), avec la géométrie considérée (source et récepteur à 2 m) et sur une telle période d'observation (3 mois environ), qui inclut donc les variations temporelles de l'ensemble des paramètres influents (essentiellement effets de sol et effets météo), ainsi que les incertitudes expérimentales associées. La question qui se pose alors est celle-ci : comment rendre compte de cette variabilité expérimentale à travers les modèles numériques ?

Incertitudes des caractéristiques de sol (impédance)

Détermination expérimentale des caractéristiques de sol – Incertitudes associées

Un suivi des caractéristiques acoustiques du sol a également été réalisé pendant toute la campagne expérimentale «Lannemezan 2005». Ce suivi a consisté en 2 types de mesures d'impédance du sol :

- Le premier («Méthode EDF») était réalisé toutes les 4 heures en un point fixe placé à 20 m de la source, par comparaison spectrale entre 2 microphones disposés à des hauteurs de 2 m et 0,3 m.
- Le second type de mesures d'impédance («Méthode LCPC») a été réalisé en plusieurs points du site, très régulièrement pendant les trois premières semaines puis de manière moins intensive ensuite, en fonction des changements significatifs de temps (pluie).

Ces mesures ont été faites tous les 50 m pour chaque direction de propagation, suivant une méthode qui repose sur le principe de l'émission d'un signal «burst chirp» depuis une source disposée à 0,6 m de haut et de la comparaison du signal reçu en 2 récepteurs placés à 0,6 m et 0 m de hauteur (Figure 2(a)). Ces deux procédures complémentaires ont permis de caractériser à la fois l'évolution spatiale et l'évolution temporelle des propriétés acoustiques du sol (impédance).

L'impédance acoustique du sol est déterminée par «calage» des résultats expérimentaux avec un modèle théorique d'impédance. Pour ce faire, on utilise le modèle semi-empirique de Delany & Bazley [18], complété d'un modèle théorique pour la réflexion

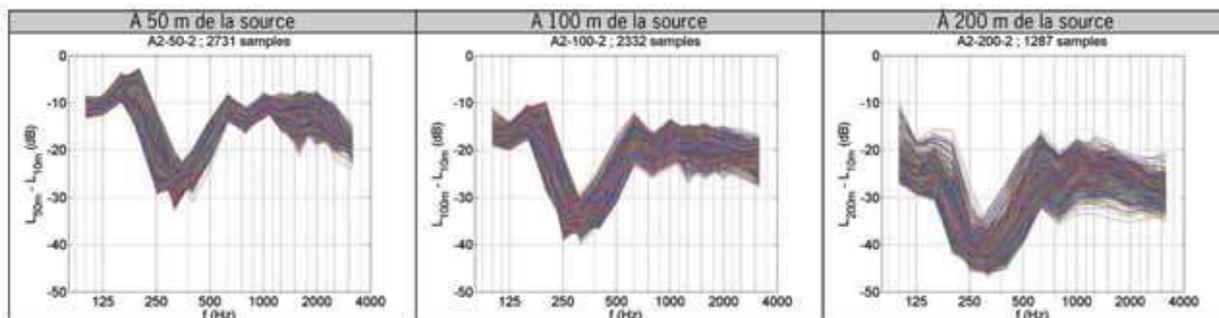


Fig. 1 : Campagne expérimentale «Lannemezan 2005» - Spectres 1/3 d'octave des niveaux sonores relatifs au niveau de référence à 10 m (en dB) en plusieurs points de mesure sur une même direction de propagation. La source et le récepteur sont à 2 m du sol.

Experimental campaign «Lannemezan 2005» - 1/3 octave spectrums for SPL rel. 10 m SPL (in dB) for several measuring points located on the same propagation direction (Source and receiver heights : 2 m)

d'une onde sphérique. Ce modèle d'impédance

fait apparaître un seul paramètre phénoménologique : la résistance spécifique au passage de l'air « σ ». On peut éventuellement lui ajouter un «effet d'épaisseur» à travers l'introduction du paramètre d'épaisseur « e » [19].

La détermination des valeurs de σ et e implique donc un post-traitement. Aussi, l'opérateur doit se donner des critères de calage, le principal critère étant le respect de la position et de l'amplitude du premier creux très marqué (Figure 2(b)). Les opérations de calage sur les mesures de suivi spatial ("Méthode LCPC") ont été effectuées par 3 techniciens, et celles des mesures en continu ("Méthode EDF") par 2 techniciens. Ainsi le résultat de la moyenne sur 2 ou 3 opérateurs a permis, dans une certaine mesure, de réduire les incertitudes liées à l'opérateur, i.e. à l'interprétation subjective du calage. Par ailleurs, pour une meilleure comparaison des 2 méthodes de mesure, les valeurs obtenues par la méthode LCPC sont en fait les moyennes des valeurs des 3 points de mesure pris autour du point de mesure en continu (méthode EDF).

On limite ainsi les écarts dus à la surface d'étude, qui n'est pas exactement la même avec les 2 méthodes. Finalement, les incertitudes proviennent essentiellement des conditions expérimentales et du traitement qui en est réalisé par la suite. Considérant une plage de valeurs pour un sol du type herbeux comme celui-ci, cette incertitude expérimentale de traitement sur σ est ainsi estimée à $\pm 20 \text{ kNsm}^{-4}$ (cgs). Les principes d'acquisition et de traitement de ces données expérimentales sont reportés en Figure 2.

parler de «zone d'étude»). Les évolutions temporelles correspondantes sur toute la période de la campagne expérimentale sont présentées sur la Figure 3(a). Sur les 2 courbes, nous pouvons observer qu'une tendance générale apparaît clairement.

À partir du 8 juin, la résistance spécifique au passage de l'air est plus élevée et semble subir de fortes variations. Ensuite, un pic important apparaît autour du 14 juin, date à partir de laquelle σ décroît fortement, puis plus doucement jusqu'à mi-juillet. Enfin, jusqu'à fin août, elle stagne dans des valeurs plus faibles et quasi constantes. Cette tendance générale est bien commune aux 2 courbes. Elle peut s'expliquer par l'évolution temporelle des caractéristiques d'humidité de surface (pluie/assèchement - voir Section suivante).

Par contre, il existe un décalage quasi-permanent de l'ordre de 50 kNsm^{-4} entre les deux méthodes. Cet écart dépend donc de la méthode de mesure et peut être considéré comme une cause supplémentaire d'incertitude de mesure du paramètre σ puisque les deux méthodes de caractérisation sont - a priori - valides. Cette translation doit être rapprochée des différences de géométrie, d'acquisition et de traitement entre les deux méthodes.

Pour illustrer l'influence de ce décalage sur le calcul de niveaux sonores, la Figure 3(b) donne l'évolution des

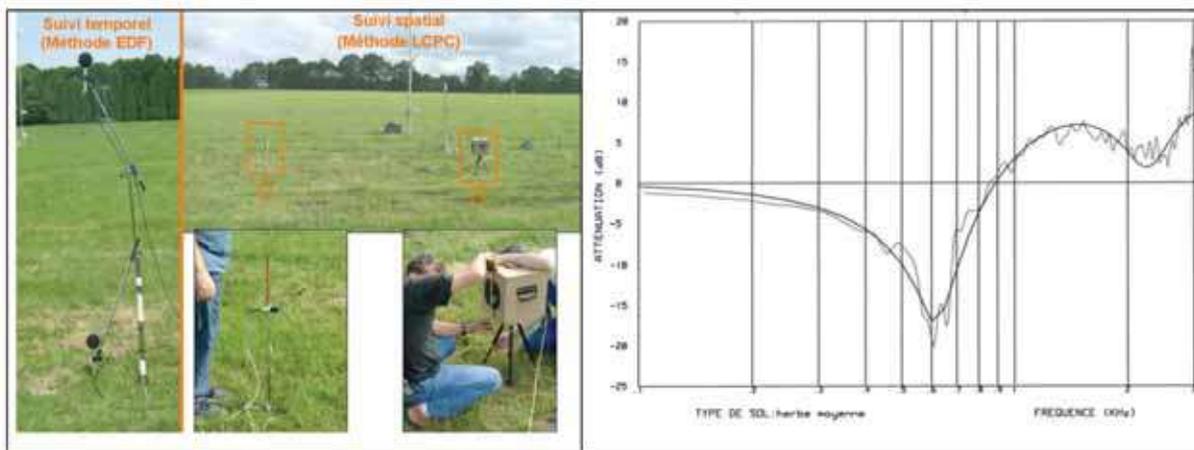


Fig. 2 : Campagne expérimentale «Lannemezan 2005» - (a) principe d'acquisition expérimentale et (b) de post-traitement pour la détermination de la résistance spécifique au passage de l'air σ

«Lannemezan 2005» experimental campaign - Principle of (a) experimental data acquisition and (b) data post-processing for the determination of the specific air flow resistivity σ

La suite de cette analyse se focalise sur les valeurs d'un seul paramètre : σ . En effet, les résultats montrent une faible variation de l'épaisseur autour de 2 cm. Ceci constitue une approximation, faite pour conduire cette première étude de sensibilité. Dans de futurs travaux, il serait intéressant de considérer le couple (σ, e) plutôt que le seul paramètre σ , voire davantage de paramètres phénoménologiques en utilisant d'autres modèles d'impédance [20].

Influence de la méthodologie de mesure d'impédance de sol sur les niveaux sonores

Dans un premier temps, nous comparons l'influence des différences entre les 2 méthodes d'évaluation du paramètre σ au même «point» (plus rigoureusement, il faudrait plutôt

niveaux sonores relatifs au champ libre à 1 kHz en fonction de la distance à la source à 2 m de hauteur. Les variations d'amplitude autour de cette fréquence de 1 kHz sont assez représentatives des variations du niveau global A.

La configuration étudiée est typique d'une situation de bruit routier : source très proche du sol (5 cm) et rupture d'impédance à 5 m de la source (sol réfléchissant/impédant). Le modèle utilisé est basé sur la résolution de l'équation de Helmholtz (approximée par l'équation parabolique : PE) par la méthode «split-step Padé» [16], en utilisant le modèle de sol de Delany & Bazley [18] et un profil vertical de célérité du type «log-lin» (Conditions favorables : $A_{\log} = 1$ et $B_{\log} = 0,12$, en accord avec [21]).

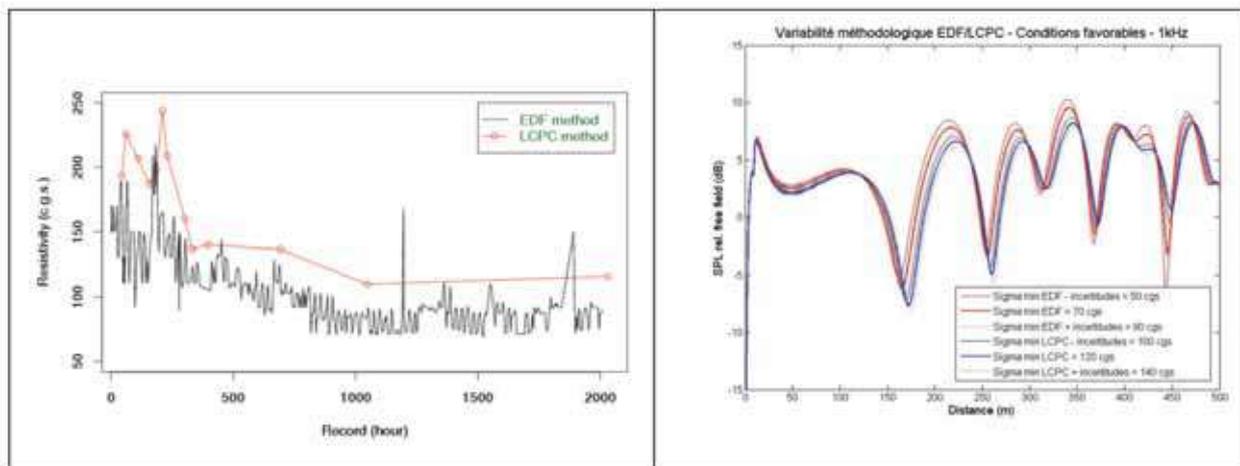


Fig. 3 : (a) Résultats de mesure des caractéristiques de sol obtenus suivant les 2 méthodologies et (b) Influence respective sur les niveaux sonores calculés par le modèle PE (récepteur à 2 m du sol) en prenant en compte les incertitudes expérimentales (+/- 20 cgs)

(a) Ground characteristics measured data using the 2 methods and (b) respective influence on the calculated SPL using the PE model (receiver height: 2 m) and taking into account experimental uncertainties (+/- 20 cgs)

Ces prévisions numériques permettent de quantifier – pour cette fréquence pure de 1 kHz et en tenant compte des incertitudes expérimentales - les écarts prévisibles sur les niveaux sonores suivant la méthode employée pour la caractérisation du paramètre de sol σ (EDF/LCPC). Ainsi, la Figure 3(b) montre que les tendances sont respectées (positions quasi-identiques des figures interférentielles) et que les résultats peuvent être considérés comme identiques (ou presque) si on considère les incertitudes associées : les fluctuations de +/- 20 cgs engendrent des fluctuations sonores d'autant plus grandes que σ est petit et que la distance dS-R est grande (ce qui est cohérent avec la physique des phénomènes) et pouvant être évaluées à une valeur de l'ordre de +/- 1 dB maximum. Cependant, pour certaines distances et certaines positions des figures interférentielles (creux), on peut observer des écarts en amplitude supérieurs à ceux qui sont engendrés par ces incertitudes expérimentales, pouvant atteindre environ 5 dB.

Il va de soi que cette sensibilité des niveaux sonores à la méthode de mesure d'impédance augmente avec la fréquence et qu'elle dépend de la configuration géométrique étudiée. Ainsi, en présence de différents phénomènes physiques comme dans le cas présent (discontinuité d'impédance, fort gradient de célérité, figures interférentielles marquées), les tendances peuvent parfois s'inverser et conduire à des résultats surprenants. Cependant, ces tendances peuvent être lissées en considérant les niveaux sonores en 1/3 d'octave, voire en octave ou en global pondéré A.

Influence de la variabilité temporelle de l'impédance de sol sur les niveaux sonores

La tendance générale commune aux 2 courbes (Figure 3(a)) peut s'expliquer par l'évolution temporelle des conditions d'humidité du sol : au mois de juin, le sol regorge encore d'eau ; le 14 juin, la pluie a rendu le sol encore plus réfléchissant, puis le beau temps continu – quelques orages mis à part – a asséché progressivement la terre jusqu'à obtenir un sol relativement poreux à partir de mi-juillet. Par ailleurs, la courbe des mesures du suivi temporel en continu du paramètre σ

(Figure 3(a) - Méthode EDF) présente une variabilité de plus courte échelle que l'on retrouve en juin, en juillet et en août. Cette variabilité de courte échelle est en fait une périodicité journalière, qui peut être mise en exergue en utilisant soit le périodogramme ("smoothed periodogram" : représentation de l'énergie spectrale contenue dans un signal obtenu par transformation de Fourier discrète [22]), soit une autre méthode : la «décomposition en tendances saisonnières» ou «STL» (Seasonal Trend decomposition based on Loess). Cette méthode utilisant des régressions locales est capable d'extraire du signal une composante périodique en le décomposant en 3 parties : une partie périodique ou «seasonal», une partie tendance ou «trend» et une partie résidu ou «remainder». Cette méthode de décomposition permet de fixer des ordres de grandeur pour la périodicité journalière et pour le résidu du paramètre σ [22]. Ces 2 sources de fluctuations sont ainsi de l'ordre de +/- 10 cgs, c'est-à-dire inférieures aux incertitudes expérimentales de traitement estimées à +/- 20 cgs (voir Section précédente). La variabilité du paramètre σ relatif à ces deux sources de fluctuations n'est donc pas prise en compte dans la présente étude.

La Figure 4(b) illustre l'influence de la variabilité temporelle du facteur σ sur les niveaux sonores, calculés dans les mêmes conditions que précédemment (Figure 3(b)). Les considérations sur les possibles inversions de tendances s'appliquent également dans ce cas (voir Section précédente). L'influence des incertitudes expérimentales de +/- 20 cgs sur les niveaux sonores est du même ordre et cohérente avec la Figure 3(b). Cependant, dans notre cas d'étude, cette variabilité temporelle présente une influence sur les niveaux sonores qualitativement différente (les interférences sont clairement déplacées) et quantitativement plus importante que la variabilité méthodologique : les écarts en amplitude sont de l'ordre de 3 à 5 dB lorsque les figures d'interférences coïncident et peuvent même dépasser 10 dB pour certaines distances (par exemple à 260 m de la source). Ainsi, sur un sol apparemment homogène (une prairie de type sol herbeux), qui aurait été caractérisé par un paramètre de sol constant dans la plupart des études, nous avons pu montrer que la variabilité du niveau sonore à 1 kHz pouvait facilement atteindre 3 dB.

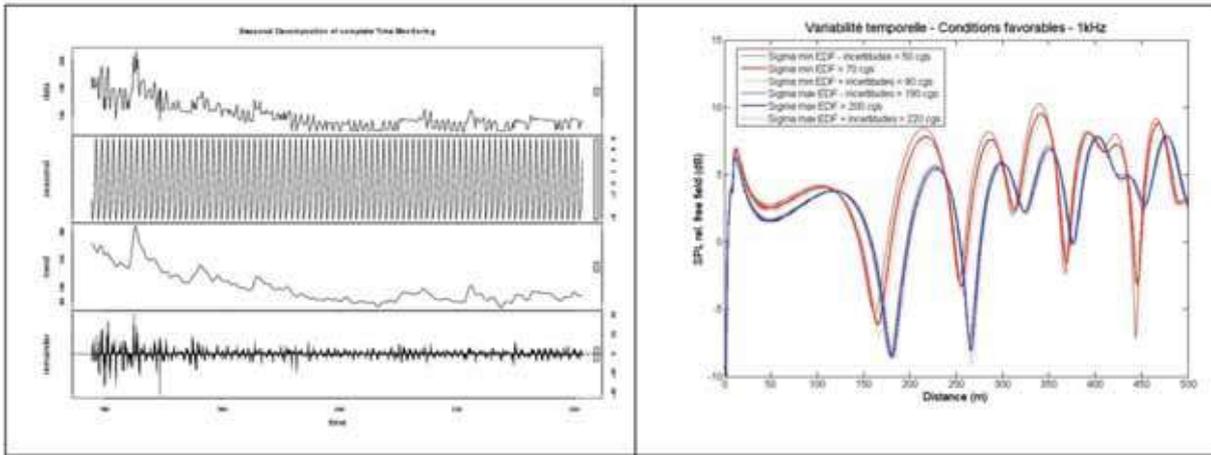


Fig. 4 : (a) Décomposition par la méthode STL de la série temporelle « monitoring » (Méthode EDF) de la résistance spécifique au passage de l'air sur toute la durée de la campagne «Lannemezan 2005» et (b) Influence de la variabilité temporelle de l'impédance de sol sur les niveaux sonores calculés par le modèle PE (hauteur de récepteur : 2 m) en prenant en compte les incertitudes expérimentales (+/- 20 cgs)

(a) STL decomposition of the "monitoring" time series (EDF method) for the specific air flow resistivity σ during the "Lannemezan 2005" experimental campaign and (b) influence of temporal variability on the calculated SPL using the PE model (receiver height: 2 m) and taking into account experimental uncertainties (+/- 20 cgs)

Influence de la variabilité spatiale de l'impédance de sol sur les niveaux sonores

La Figure 5(a) permet de comparer les évolutions temporelles de la résistance spécifique au passage de l'air σ en plusieurs points du site expérimental pendant toute la campagne. On peut ainsi vérifier que les tendances générales sont similaires pour l'ensemble des points de mesure : tendance à une baisse régulière et à une stabilisation du paramètre σ (juillet/août) après une période plus versatile en début de campagne (juin), comme pour le point de référence (Figure 2(b) – Méthode EDF). Cependant, on observe également une certaine dispersion spatiale des valeurs de σ mesurées le même jour en plusieurs points du site. Ainsi, la Figure 5(b) permet d'apprécier quantitativement l'effet de cette dispersion spatiale sur les niveaux sonores, calculés dans les mêmes conditions que précédemment (Sections précédentes), pour une certaine

variabilité spatiale des caractéristiques de sol, e.g. celle de la journée du 5 juillet 2007 : [90cgs ; 260 cgs] +/- 20 cgs (incertitudes expérimentales).

Ainsi, en ce qui concerne l'influence de la variabilité spatiale de l'impédance de sol sur les niveaux sonores calculés, les considérations sur les possibles inversions de tendances s'appliquent encore (cf. Section "Influence de la méthodologie") et les observations sont proches de celles mentionnées supra pour la variabilité temporelle (Section précédente - Figure 4) : l'influence des incertitudes expérimentales de +/- 20 cgs sur les niveaux sonores est du même ordre qu'en Figure 3(b) et Figure 4(b), c'est-à-dire +/- 1 dB pour les plus faibles valeurs de σ ; quant aux figures interférentielles, elles sont logiquement déplacées selon la valeur de σ et conduisent à des écarts des niveaux sonores à 1 kHz correspondants pouvant atteindre 3 à 5 dB en cohérence de phase et 10 à 15 dB en opposition de phase.

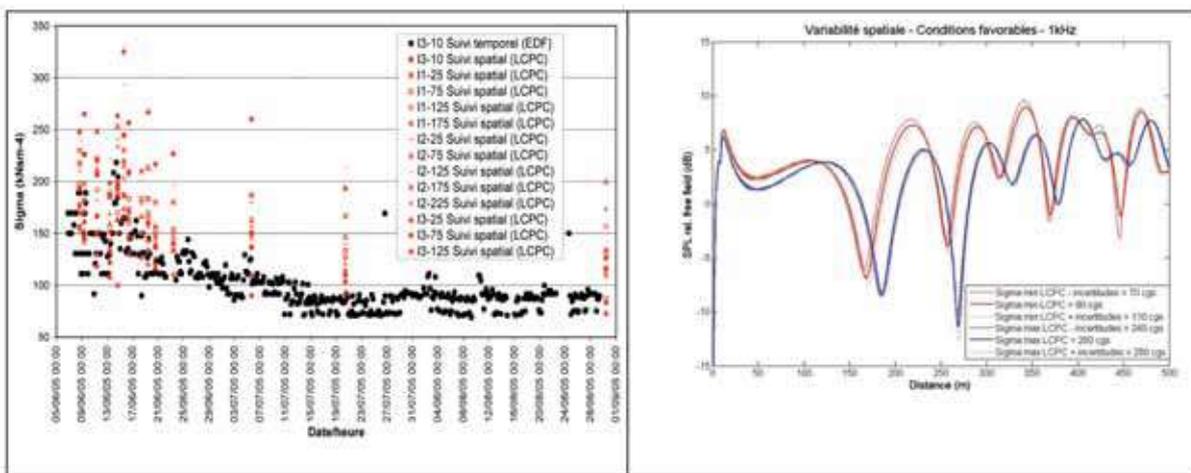


Fig. 5 : (a) Dispersion spatiale et temporelle de la résistance spécifique au passage de l'air σ pendant la campagne «Lannemezan 2005» et (b) influence de la variabilité spatiale de l'impédance de sol mesurée le 5 juillet 2007 sur les niveaux sonores calculés par le modèle PE (Hr = 2 m) en prenant en compte les incertitudes expérimentales (+/- 20 cgs)

(a) Spatial and temporal dispersion of the specific air flow resistivity σ during the "Lannemezan 2005" experimental campaign and (b) influence of σ spatial variability measured 2007 July 5th on the calculated SPL using the PE model (Hr = 2 m) and taking into account experimental uncertainties (+/- 20 cgs)

Incertitudes des caractéristiques du milieu (Réfraction atmosphérique)

En ce qui concerne la micrométéorologie, nous avons disposé pour chaque direction de propagation d'un anémomètre sonore 3D (3 m) et deux mâts équipés de capteurs micrométéorologiques (vitesse et direction du vent, température ventilée) placés à chacune des 3 hauteurs (1 m, 3 m et 10 m). Ces équipements étaient positionnés à respectivement 125 m, 75 m et 175 m de la source dans chaque direction de propagation [2,3]. Ces mesures permettent d'estimer la valeur du gradient vertical de célérité du son («Sound speed gradient» ou SSG) en moyenne sur une durée de l'ordre de quelques minutes (15 mn dans la présente étude).

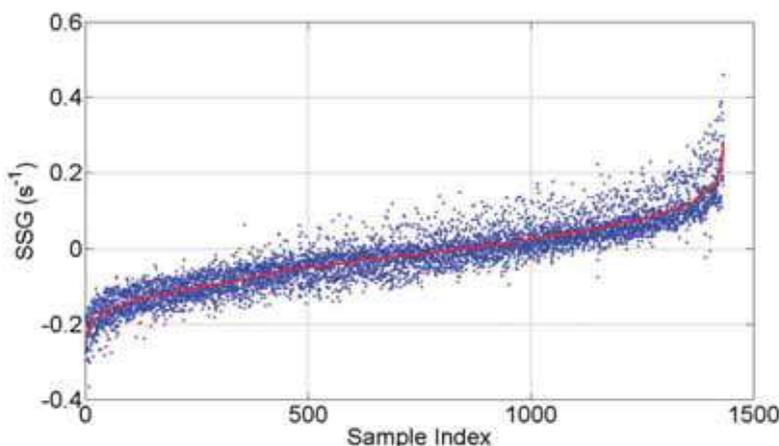


Fig. 6 : Valeur moyenne (courbe rouge) et dispersion (échantillons bleus) des mesures de gradient de célérité effective pour la campagne de Lannemezan 2005.

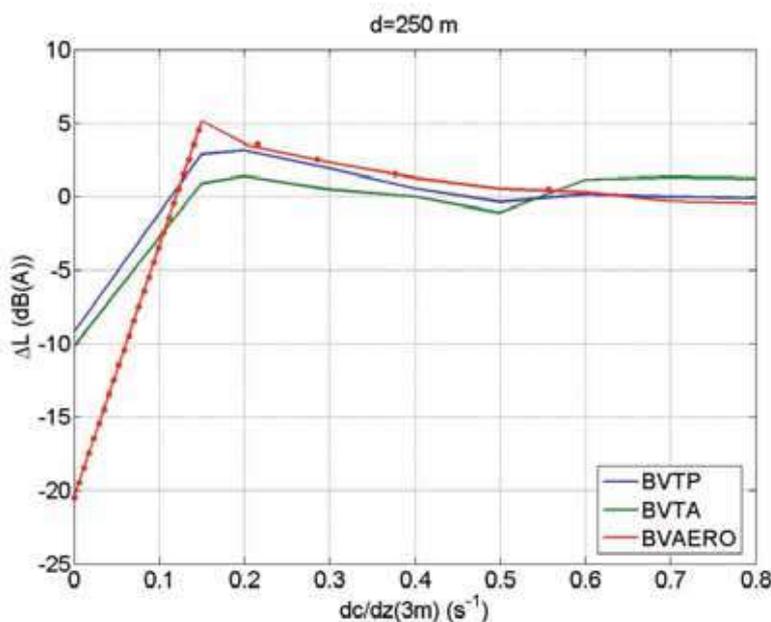


Fig. 7 : Atténuation relative au champ direct en dB (A) en fonction du gradient de célérité effective mesuré à 3 m ($dc/dz(3m)$) pour trois sources de bruit industriel (hauteur de source : 2 m) - BVTP, BVTA : transformateurs ; BVAERO : tour de réfrigération. Chaque point rouge correspond à une variation de 1 dB (A) pour ΔL .

Attenuation re. free field in dB (A) vs SSG measured at 3 m high ($dc/dz(3m)$) for 3 industrial sound sources (2 m source height) - BVTP; BVTA: transformers; BVAERO: cooling tower. The red dots are plotted assuming a 1 dB (A) variation for ΔL .

Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de quantifier l'influence des variabilités spatiale et temporelle des effets de sol et des effets météo sur la propagation acoustique à grande distance, dans une configuration simple. Les résultats de cette étude montrent également toute la difficulté de caractériser expérimentalement ces paramètres pourtant souvent considérés comme constants et connus et utilisés comme données d'entrée des modèles de prévisions et de calcul du bruit dans l'environnement. Ces considérations ont des implications importantes et doivent être traduites sous forme de recommandations sur les pratiques expérimentales et méthodologiques actuelles.

Pour la suite des travaux, il est prévu de s'appuyer sur les bases de données expérimentales existantes (e.g. «Lannemezan 2005») ainsi que sur celles issues de campagnes complémentaires (météo, impédance), et plus particulièrement, sur les données issues du site expérimental du LCPC : la «Station de Long Terme». Le principe de ce site expérimental consiste à mesurer simultanément les champs acoustiques et micrométéorologiques sur une grande période (de l'ordre de 10 ans), en permanence («monitoring» 24 h/24 h, 365 j/365 j) et avec un échantillonnage spatial et temporel permettant une analyse statistique pertinente [22].

Remerciements

Le projet de recherche et la campagne expérimentale associée décrits dans ce document ont été co-financés par le Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables (MEDAD, ex MEDD).

Références bibliographiques

- [1] <http://www.imagine-project.org>
- [2] F. Junker, B. Gauvreau, C. Cremezi-Charlet, C. Géralt, D. Ecotière, Ph. Blanc-Benon, B. Cotté, (2006), «Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance», Congrès Français d'Acoustique 2006, Tours (F), Avril 2006
- [3] F. Junker, C. Cremezi-Charlet, C. Géralt, B. Gauvreau, Ph. Blanc-Benon, B. Cotté, D. Ecotière, (2006), «Classification of Relative Influence of Physical Parameters for Long Range Acoustic Propagation – Experimental and numerical results», Euronoise 2006, Tampere (F), May/June 2006
- [4] F. Junker, B. Gauvreau, D. Ecotière, C. Cremezi-Charlet, Ph. Blanc-Benon, (2007), «Meteorological classification for environmental acoustics – Practical implications due to experimental accuracy and uncertainty», invited paper to International Congress on Acoustics (ICA) 2007, Madrid (S), 2-7 sept 2007
- [5] F. Junker, B. Gauvreau, C. Cremezi, Ph. Blanc-Benon, «Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance», Rapport final, sept 2006
- [6] D. Ecotière, « Influence des fluctuations des conditions météorologiques sur la dispersion des niveaux sonores », JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007

- [7] B. Cotté, « Modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur : effets atmosphériques », JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007
- [8] J. Defrance, « Modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur : effets de frontière JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007
- [9] D. van Maercke, « Prise en compte des effets météorologiques dans une méthode d'ingénierie acoustique JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007
- [10] G. Dutilleul, « La méthode réglementaire pour la prévision du bruit des routes (NMPB-96) et sa révision JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007
- [11] J. Lelong, « Evaluation du bruit routier en milieu urbain : apport de la modélisation dynamique », JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007
- [12] N. Tellado, « Comparaison de méthodes et d'outils pour la prévision du bruit », JS « Les méthodes de calcul prévisionnel du bruit dans l'environnement », SFA-GAIE, Reims, 10 décembre 2007
- [13] L. Dallois, Ph. Blanc-Benon & D. Juvé, 2001, "A wide angle parabolic equation for sound waves in inhomogeneous moving media: applications to atmospheric sound propagation", J. Comp. Acous., Vol. 9(2), pp 477-494
- [14] Ph. Blanc-Benon, L. Dallois and D. Juvé, "Long range sound propagation in a turbulent atmosphere within the parabolic approximation", Acta Acustica, 87, 659-669, 2001
- [15] M. Bérengier, B. Gauvreau, Ph. Blanc-Benon, D. Juvé, «Outdoor sound propagation: A short review on analytical and numerical approaches», Acustica united with Acta Acustica 89, N°6, 980-991 (2003)
- [16] B. Lihoreau, B. Gauvreau, Ph. Blanc-Benon, I. Calmet., M. Bérengier, 2006, "Outdoor sound propagation modeling in realistic environments: a coupling method using MW-WAPE and SUBMESO", J. Acoust. Soc. Am., 120, 110-119
- [17] E. M. Salomons, "Computational Atmospheric Acoustics", Kluwer Academic Publishers, 2001 – ISBN 0-7923-7161-5
- [18] M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", Appl. Acoust. 3, 105-116 (1970)
- [19] Bérengier M., Garai M., "A State-of-the-art of in situ measurement of the sound absorption coefficient of road pavements", 17th Int. Cong. Acous., Rome, Italy (2001)
- [20] K. Attenborough, 1988, "Review of Ground Effects on Outdoor Sound Propagation from continuous Broadband Sources", Appl. Acoust. 24, 289-319
- [21] J. Defrance, E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plosving, G. Watts, H. Jonasson, X. Zhang, E. Premat, I. Schmich, F. Aballea, M. Baulac, F. de Roo, "Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project", Acustica united with Acta Acustica 93, 213-227 (2007)
- [22] O. Baume, «Application des outils géostatistiques à l'analyse de l'influence des effets micrométéorologiques sur la propagation acoustique», Thèse Université du Maine, 2006
- [23] <http://www.lcpc.fr/fr/presentation/moyens/slt/index.dml> ■