

Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance

Fabrice Junker

EDF R&D
1, avenue du Général de Gaulle
92141 Clamart CEDEX
Tél : +33 (0)1 47 65 51 03
e-mail : fabrice.junker@edf.fr

Benoit Gauvreau

LCPC
Section Acoustique Routière et Urbaine
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais CEDEX
Tél : +33 (0)2 40 84 58 98
e-mail : benoit.gauvreau@lcpc.fr

Philippe Blanc-Benon

ECL/LMFA
Centre Acoustique
UMR CNRS 5509
36, avenue Guy de Collongue
69134 Ecully CEDEX
Tél : +33 (0)4 72 18 60 19
e-mail : Philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr

Cora Cremezi

SNCF
Direction de la recherche et de la technologie
45, rue de Londres
75379 Paris CEDEX 08
Tél. : +33 (0)1 53 42 92 39
e-mail : cora.cremezi@sncf.fr

Le but de cet article est de présenter le programme de travail commun des différents partenaires du projet "Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation acoustique à grande distance", répondant à l'appel à propositions de recherche lancé par le MEDD en date du 1er avril 2003 dans le cadre du programme "Bruit et Nuisances Sonores".

Ces travaux de recherche consistent à considérer l'ensemble des paramètres d'influence pour la propagation acoustique en milieu extérieur (effets micrométéorologiques, réflexion, diffusion, absorption, divergence, effet de sol, trafic routier ou ferroviaire, installations industrielles, etc.) pour des sites plus ou moins complexes. En fixant un certain nombre de ces paramètres, il s'agit d'étudier l'influence relative de la variation de chaque paramètre sur les niveaux sonores, que ce soit à l'aide de modèles numériques évolués et validés issus des recherches récentes (équation parabolique, méthodes analytiques diverses) ou de modèles d'ingénierie, ou enfin grâce à des campagnes expérimentales adaptées sur des sites équipés. Pour ce faire, notre partenariat scientifique nous permet de disposer d'importants moyens numériques et expérimentaux. L'analyse de l'ensemble des données mènera à une classification de l'influence relative des principaux paramètres physiques affectant les conditions de propagation acoustique en milieu extérieur, en fonction des caractéristiques du milieu de propagation acoustique existant entre source et récepteur (géométrie, longueurs d'onde, effets de sol, effets micrométéorologiques, etc.).

This paper deals with the presentation of the working program for all partners of the national research project "classification of relative influence of physical parameters for long range acoustic propagation". This project stems from the French Ministry of Ecology and Sustainable Development "demand for research proposals" which was published 2003, the 1st of April in the framework of "noise and sound annoyance". This research work is related to the study of relative influence of the whole propagation parameters for different acoustical situations, and for more or less complex configurations. This will be done both experimentally and numerically. Thus, adapted experimental campaigns will be carried out on an experimental (monitoring) site. The numerical predictions will be done using « laboratory » models such as those developed by ECL and LCPC (parabolic equation, analytical models) or engineering models such as TYMPAN (EDF), etc. All those results will be used to determine a classification method for the whole set of parameters involved in typical acoustical situations, which relative influence varies in relation with the medium characteristics (geometry, wave lengths, ground effects, meteo effects, etc.). It should be also possible to apply this classification method to the elaboration of a methodology guidebook for the evaluation of the physical parameters to be considered for the experimental and/or numerical characterisation of any site sound field.



Les exigences toujours plus grandes en termes de réduction du bruit amènent les ingénieurs en charge des études d'impact à considérer des situations pour lesquelles la source de bruit et le récepteur sont très éloignés. Typiquement, il est assez commun de devoir prévoir l'impact acoustique d'une source à une distance comprise entre quelques centaines de mètres et un kilomètre. Dans ces conditions, on trouve sur le trajet de propagation de l'onde acoustique une grande hétérogénéité autant en termes de géométrie (divers obstacles, présence de relief) qu'en termes de propriétés acoustiques (types de sols, d'obstacles et propriétés du milieu propagation). Sans une

connaissance approfondie de l'ensemble des grandeurs caractéristiques du milieu, il est impossible de prévoir un niveau sonore avec précision. En pratique, la prévision de l'impact acoustique d'une installation dans une situation complexe fait donc autant appel à l'expertise du technicien qu'à l'utilisation de modèles de calculs.

La réalisation de mesures sur site est aussi une opération délicate. En effet, la variabilité des conditions de propagation mène à une grande dispersion des résultats de mesures. Par exemple, au delà de quelques centaines de mètres le niveau sonore dû à une source de bruit stable peut facilement varier d'une quinzaine de dB(A).

La figure 1 illustre la variation du niveau sonore énergétique continu équivalent pondéré A L_{Aeq} (grandeur normalisée à considérer dans les études d'impact) observée à 200m d'une source stable (source de référence) placée sur un terrain plat (de type pâture). Dans ce cas, c'est la variation des conditions micrométéorologiques qui est responsable de la variabilité observée et c'est d'ailleurs dans la plupart des situations le paramètre le plus influent. On notera dans cette situation une variation du L_{Aeq} de l'ordre de 15 dB(A) entre le jour et la nuit.

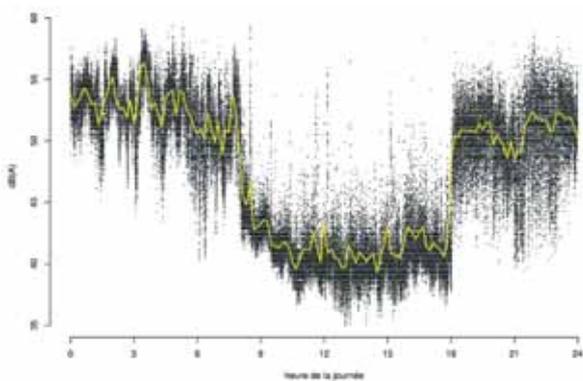


Fig. 1: Variabilité du L_{Aeq} observée à 200m d'une source stable sur une période de 24h00 (échantillonnage 10 min pour la courbe en jaune et 1s pour la courbe en noir)

Ce type de remarque, bien connu des spécialistes du domaine, a conduit à intégrer aux méthodes de mesurage et de calcul actuelles la notion de variabilité. Les travaux réalisés par le LCPC dans les années 1990 [1] ont d'ailleurs servi de base à l'établissement d'une première classification des conditions micrométéorologiques et de leur influence sur la propagation. Des groupes de travail au sein des comités de normalisation S30J «Bruit dans l'environnement» et S30M «Acoustique des milieux extérieurs» s'intéressent de très près à la notion d'incertitude pour les problèmes de propagation acoustique.

Ainsi, les normes de mesurage en vigueur pour le bruit dans l'environnement demandent notamment de relever avec une certaine précision les données micrométéorologiques observées durant les essais. Les modèles de calcul de type ingénierie permettent, dans une certaine mesure, de simuler de manière simplifiée « un renforcement » du niveau sonore correspondant à certaines conditions micrométéorologiques (dites «favorables» - lire infra § «Les effets météorologiques»). Malgré cela, les outils actuellement disponibles ne permettent pas d'appréhender la gamme de variabilité des phénomènes de manière satisfaisante. C'est pourquoi, aussi bien au niveau national qu'au niveau international, un certain nombre de travaux sont menés sur ce sujet.

Certains acteurs de notre projet ont participé au projet européen HARMONOISE qui s'est terminé courant 2004 et participent au projet suivant nommé IMAGINE qui court jusqu'à fin 2006. Ces projets ont pour but de proposer une méthode de calcul prévisionnel harmonisée au niveau européen pour l'acoustique extérieure. Ils ont été impulsés par la Directive sur le bruit ambiant [2].

Les travaux actuellement en cours s'inscrivent dans ce contexte. Ils ont pour but de fournir des résultats permettant de classer les phénomènes observés en fonction de leur influence relative sur la variabilité d'une situation acoustique donnée. 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 comités de normalisation en données de référence.

Les phénomènes physiques affectant la propagation à longue-distance et la démarche d'étude proposée

Les phénomènes physiques généraux

Pour caractériser une situation sonore, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques rencontrés in situ. Ils sont reliés d'une part, aux caractéristiques physiques du milieu dans lequel se propagent les ondes acoustiques (atmosphère) et d'autre part, aux conditions aux limites de ce milieu (chaussée, sols naturels environnants, obstacles, etc.).

Lorsque nous sommes en présence de situations pour lesquelles un de ces phénomènes est prépondérant, il est possible d'utiliser des formulations simplifiées. Pour les situations dans lesquelles plusieurs phénomènes interagissent, il faut faire appel à des modèles plus élaborés. Enfin, il existe un certain nombre de situations réelles pour lesquelles aucune méthode de calcul n'est disponible à ce jour. Il faut donc recourir à l'analyse de données expérimentales.

Certains de ces phénomènes sont relativement bien connus, comme par exemple la divergence géométrique. Il s'agit de l'évolution de la répartition spatiale de l'énergie d'un front d'onde au cours de son déplacement au sein du milieu de propagation. L'onde sonore perd ainsi de son énergie, dans une direction donnée, au fur et à mesure qu'elle s'éloigne de la source. En espace parfaitement ouvert, la diminution du niveau sonore pour des sources ponctuelle ou linéique est respectivement de -6 dB et -3 dB par doublement de distance.

D'autres phénomènes sont plus difficiles à appréhender. C'est par exemple le cas de l'absorption atmosphérique, responsable de la perte énergétique de l'onde sonore au cours de sa propagation. Ces processus dissipatifs apparaissent le plus souvent dans les fluides complexes (non homogènes ou polyphasiques), mais également dans les fluides simples (en particulier dans les gaz). Dans le cas de la propagation atmosphérique, le phénomène prépondérant est la relaxation moléculaire : il s'agit du retard à l'établissement d'un équilibre, dû à une sollicitation extérieure (physique, thermique, chimique, etc.) et qui n'apparaît pas instantanément. Ce phénomène peut être important dans l'air lors de la propagation à longue distance ou dans certaines circonstances : les retards temporels sont affectés de manière significative par la concentration en molécules polyatomiques, en particulier en molécules de vapeur d'eau, ou en termes plus communs par l'humidité relative ; cet effet est donc directement proportionnel à la pression atmosphérique et à l'hygrométrie. La norme ISO 9613-1 [3] donne une

méthode de calcul qui permet de quantifier ces effets de manière relativement précise. À titre d'exemple, l'absorption à 1000 Hz à une température de 15°C pour une humidité relative de 60% est de 4 dB par kilomètre et passe à 9 dB à 2000 Hz dans les mêmes conditions.

L'absorption atmosphérique doit être prise en compte lors de la propagation des ondes sonores à grande distance. Cependant, étant donné qu'à grande distance les différents trajets suivis par l'onde acoustique sont de longueur voisine (propagation au voisinage du sol) on considère que l'absorption atmosphérique, dans des conditions de température, d'hygrométrie et de pression données ne dépend que de la fréquence et de la distance source-récepteur, et peut donc facilement être prise en compte en supplément des autres effets.

Enfin, les autres phénomènes physiques influant sur la propagation acoustique font l'objet de travaux de recherche soutenus, tant à l'échelle nationale qu'internationale, en raison de leur complexité et de leur interdépendance. C'est le cas de l'effet des obstacles et de la topographie sur la propagation sonore, pour lesquels des codes de simulation numérique spécifiques doivent être développés, notamment en milieu densément urbanisé.

Étant donnés les moyens disponibles dans le cadre de notre projet (d'une durée de 2 ans), nous nous focalisons sur les phénomènes physiques les plus sensibles en espace semi-ouvert (terrain plan sans obstacle) : les effets de sol et les effets micrométéorologiques. Ces effets sont décrits plus en détails ci-après.

Les effets de sol

Dans cette partie, on fait l'hypothèse que les conditions de propagation sont «homogènes» c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'influence des conditions micrométéorologiques sur la propagation acoustique (cf. § «Les effets météorologiques»). Lorsqu'une onde acoustique se propage à proximité du sol, il se produit une interaction entre l'onde directe (provenant directement de la source) et l'onde réfléchiée par le sol qui donne naissance à un champ d'interférences. Les «effets de sol» traduisent à la fois le résultat de cette interaction et la perte énergétique de l'onde sonore par absorption.

Dans le cas d'un sol homogène, la pression acoustique résultante p_t en un point est donnée par l'expression suivante :

$$p_t = p_d + Q \cdot p_r$$

où p_d est la pression acoustique due à l'onde directe ;
 p_r est la pression acoustique due à l'onde réfléchiée sur le sol ;
 Q est le coefficient de réflexion du sol.

Les modèles qui décrivent l'effet de sol [4] ont pour but de définir l'expression de Q la plus adaptée. Le principe est de tenir compte de l'aspect sphérique de l'onde. On peut retenir que pour l'ensemble des modèles le coefficient de réflexion Q dépend de :

- la distance parcourue par l'onde réfléchiée ;
- l'angle d'incidence de l'onde réfléchiée sur le sol ;
- la fréquence ;
- l'impédance du sol.

En général, les modèles proposés dans la littérature diffèrent quant à la description de l'impédance du sol. L'expression usuelle de cette impédance est donnée par la formule semi-empirique de Delany-Bazley [5] :

$$Z_c = 1 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} + 11.9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73}$$

où Z_c est l'impédance caractéristique normalisée du sol ;
 f la fréquence (en Hz) ;

σ la résistance spécifique au passage de l'air (en kNsm^{-4} communément appelé kRayls).

L'avantage de cette expression est qu'elle ne requiert que la connaissance d'un paramètre (σ) pour caractériser le sol, paramètre auquel on accède facilement grâce à la mesure [6].

La figure 2 donne un exemple de calcul de l'atténuation relative au champ direct pour plusieurs fréquences et deux valeurs de résistance spécifique au passage de l'air typique d'un sol absorbant (gazon à 300 kNsm^{-4}) et d'un sol réfléchissant (asphalte à 20000 kNsm^{-4}).

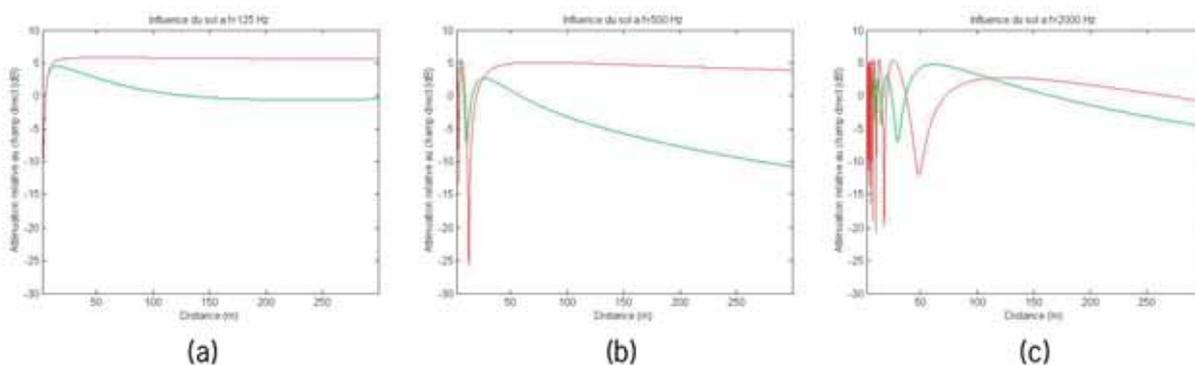


Fig. 2 : Atténuation relative au champ direct en fonction de la distance à la source pour une source et un récepteur placés à 1,5m du sol pour 3 valeurs de fréquence (125 Hz, 500 Hz et 2000 Hz) et pour deux valeurs de résistance spécifique au passage de l'air (courbe verte : $\sigma=300 \text{ kNsm}^{-4}$ et courbe rouge : $\sigma=20000 \text{ kNsm}^{-4}$)

On peut faire quelques commentaires sur la figure 2. On remarque la présence d'un champ d'interférences marqué tant que la différence de marche entre l'onde directe et l'onde réfléchi est supérieure à une demi longueur d'onde. On peut donc constater qu'à grande distance, on se trouve toujours en dehors du champ d'interférence (dans des conditions de propagation homogènes).

En basse fréquence, le sol reste assez réfléchissant quelle que soit la distance d'observation. C'est un des phénomènes qui explique la faible atténuation des basses fréquences à grande distance.

L'atténuation en moyennes fréquences (ici 500 Hz) est plus importante qu'en hautes fréquences (ici 2000 Hz). C'est ce que certains auteurs appelle le «ground dip». En pratique, l'amplification en hautes fréquences est difficile à observer puisque l'effet de sol est cumulé aux autres effets et notamment à l'absorption atmosphérique qui croit avec la fréquence.

Dans certaines situations, il est difficile de supposer que le sol est homogène et on observe sur le trajet de l'onde acoustique des variations notables de la résistance spécifique au passage de l'air. Il faut recourir à des modèles plus sophistiqués permettant de prendre en compte ces variations d'impédance de sol.

On peut notamment citer l'exemple du bruit routier pour lequel la source est située sur une surface réfléchissante (résistance spécifique au passage de l'air élevée) et pour lequel l'essentiel de la propagation à grande distance s'effectue sur un sol naturel plutôt absorbant. Un autre exemple assez courant en bruit industriel est l'existence d'un plan d'eau (résistance spécifique au passage de l'air élevée) entre la source et le récepteur.

Dans tous les cas, on observe au niveau des ruptures d'impédance des figures de diffraction (lobes) et des variations nettes du niveau sonore. Ce phénomène est équivalent à la présence de sources secondaires dont l'amplitude et la phase dépendent des différents sols en présence. Ceci est illustré sur la figure 3 :

Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons sur l'effet de sol en conditions homogènes en définissant tout d'abord plusieurs valeurs de résistance spécifique au passage de l'air typiques à partir d'une étude de sensibilité sur la variation du niveau sonore global, puis par bande d'octave en fonction de la distance et du type de spectre de la source (routier, industriel, ferroviaire).

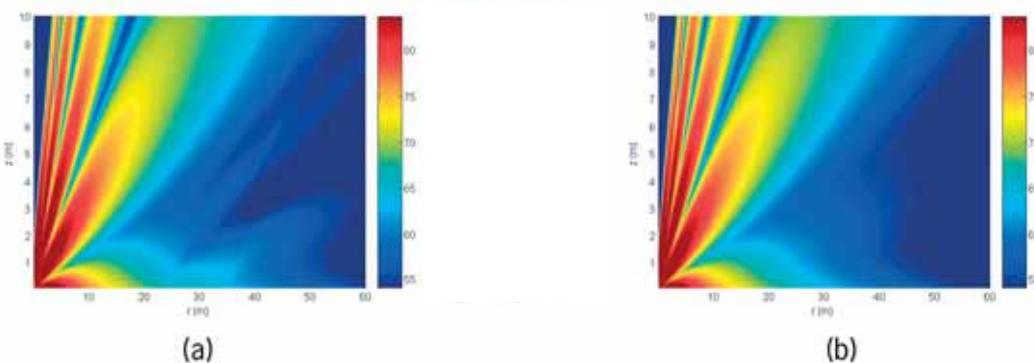
Les effets micrométéorologiques

La propagation d'une onde acoustique est également sensiblement affectée par les caractéristiques du milieu : les conditions atmosphériques (vent, température, hygrométrie). Considérant les échelles spatio-temporelles mises en jeu dans le domaine de l'acoustique environnementale (i.e. en milieu extérieur), il convient d'appréhender ces phénomènes physiques à travers les théories de la micrométéorologie plutôt que celle de la météorologie à méso-échelle. On se place ainsi dans le cadre des lois thermiques (transfert de chaleur) et aérodynamiques (profils de vent) telles qu'elles se décrivent à très basse altitude (moins de 100m). Les phénomènes qui apparaissent à cette altitude présentent donc une interaction très forte avec le sol (topographie, température de surface et de sous-sol, hygrométrie, cultures, forêts, obstacles, bâti, etc.). De plus, ils évoluent rapidement dans le temps et dans l'espace, ce qui rend leur description analytique et leur modélisation numérique complexe.

Par analogie avec les lois de l'optique, l'effet des conditions atmosphériques sur la propagation acoustique peut être décrit à travers l'expression de l'indice acoustique «n» du milieu de propagation. Si l'on se place dans une coupe verticale, cet indice est supposé varier avec l'altitude «z» et avec la distance source-récepteur «r», tel que :

$$n(r, z) = \frac{c(r, z)}{c_0} = \langle n(r, z) \rangle + \mu(r, z)$$

où c est la célérité effective de l'onde sonore dans le milieu traversé et c_0 celle de référence (typiquement $c_0 = 344 \text{ ms}^{-1}$).



(a) 500 Hz - Sol herbeux (300 kNsm⁴) - Présence d'un cours d'eau à une distance comprise entre 25 m et 35 m de la source (simulé par une résistance spécifique au passage de l'air de 30000 kNsm⁴)

(b) 500 Hz - Sol herbeux (300 kNsm⁴) sur tout le chemin de propagation.

Fig. 3 : Résultat d'une résolution numérique de l'équation parabolique avec et sans discontinuité d'impédance. On remarque un comportement similaire à la présence de sources secondaires au niveau des discontinuités

Ainsi, on peut distinguer deux phénomènes distincts influant sur la propagation acoustique, respectivement liés aux parties moyenne $\langle n \rangle$ (1) et stochastique μ (2) de l'indice du milieu de propagation :

- La partie **moyenne** $\langle n \rangle$ de l'indice du milieu rend compte de la **réfraction** des ondes sonores, induite par la **stratification horizontale** de l'atmosphère. Les profils moyens de célérité du son sont calculés à partir des valeurs moyennes des variables micrométéorologiques. Les échelles de temps impliquées sont de l'ordre de la minute, voire de l'heure.

Ces données sont acquises in situ via des mâts équipés de capteurs (plusieurs hauteurs d'acquisition), où à l'aide d'instrumentation spécifique (une seule hauteur d'acquisition) nécessitant un traitement des données adapté (théorie de la similitude de Monin-Obukhov). Typiquement, les valeurs relevées sont moyennées sur des échantillons temporels de 10 minutes, pendant lesquels les profils moyens de vent et de température sont supposés constants. A chaque « strate » correspond des conditions bien particulières (vent, température, hygrométrie), qui conduisent à autant de valeurs respectives pour la célérité du son, dont on donne ci-après son expression $c(z)$, dans le cas où l'on considère un terrain plan et dégagé, conduisant à négliger son évolution avec la distance (dépendance en r) :

$$\langle c(z) \rangle = c_0 \sqrt{1 + \frac{\langle T(z) \rangle}{273.15}} + \langle u(z) \rangle \cdot \cos \theta$$

où $\langle T(z) \rangle$ et $\langle u(z) \rangle$ sont respectivement la température moyenne et le vent moyen à l'altitude z , et où $\cos \theta$ est la projection de la direction du vent sur la direction de propagation acoustique. Le profil moyen de célérité du son dépend ainsi des profils moyens de vent et de température. Ce profil de célérité peut être décrit de manière analytique, suivant qu'il suit une loi linéaire (« lin »), logarithmique (« log »), hybrides (« log-lin ») ou autre. La figure 4 montre les différences qui peuvent exister entre de tels profils de célérité.

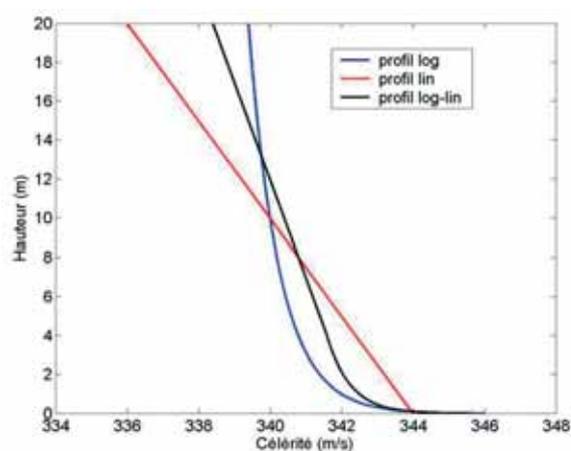


Fig. 4 : comparaison des profils de célérité du son du type log, lin et log-lin.

Les profils « log » présentent ainsi l'avantage de traduire le très fort gradient de célérité du son au voisinage immédiat du sol, mais ne rendent pas bien compte de l'évolution constante avec l'altitude au-delà d'une certaine hauteur (tendance asymptotique). A l'inverse, les profils « lin » ne sont pas représentatifs de la réalité lorsque l'on se place très près du sol.

Les premiers travaux de notre projet consistent à déterminer les bornes inférieures et supérieures ainsi que la sensibilité aux paramètres micrométéorologiques des profils moyens de célérité du son (sur terrain plan quelconque dégagé d'obstacles) à travers le domaine de variation des paramètres « a » et « b » qui apparaissent dans leur expression analytique « log-lin » :

$$c(z) = c_0 + a \cdot \log\left(\frac{z}{z_0}\right) + b \cdot z$$

La propagation dans un milieu à célérité variable a pour principal effet d'incurver les rayons sonores vers le bas ou vers le haut suivant que le gradient vertical de célérité du son est respectivement positif (**conditions favorables** à la propagation) ou négatif (**conditions défavorables** à la propagation). Ces effets sont illustrés en figure 5 sur des cartographies de niveaux sonores dans le cas de propagation sonore au-dessus d'un sol d'abord parfaitement réfléchissant (jusqu'à 10 m de la source) puis à impédance « finie ». Sur cette figure, on observe ainsi la modification de la répartition spatiale (courbure) des zones de concentration de l'énergie sonore (lobes). Les effets de sol (atténuation de l'énergie acoustique par absorption – lire supra) s'en trouvent plus (conditions favorables) ou moins (conditions défavorables) renforcés. En l'absence de turbulence, la « zone d'ombre » due aux effets de sol peut ainsi être significativement renforcée en conditions défavorables par rapport au cas de propagation en conditions homogènes ($a = 0 \text{ ms}^{-1}$ – voir figure 6 – cas 1). Il convient de noter que ces effets de réfraction ne dépendent pas de la fréquence considérée.

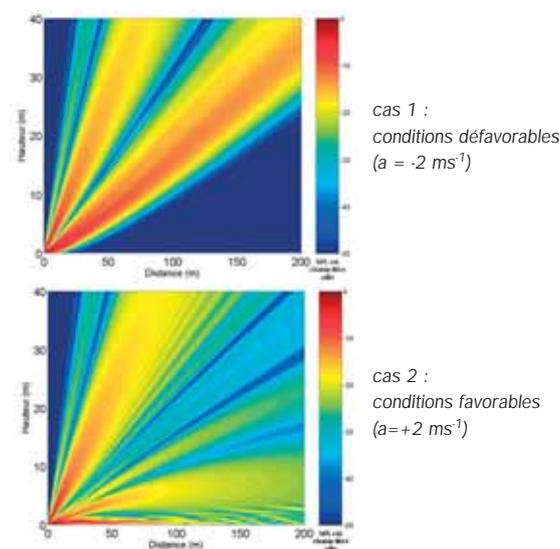


Fig. 5 : Illustration de l'effet de la stratification horizontale de l'atmosphère sur la propagation acoustique (réfraction)
 $f = 4 \text{ kHz}$, $H_s = 10^{-1} \text{ m}$, $\sigma_1 = 105 \text{ kNsm}^{-4}$, $\sigma_2 = 10^3 \text{ kNsm}^{-4}$,
 $D_{\text{rupture impédance}} = 10 \text{ m}$, profil « log »

La partie fluctuante (ou stochastique) μ de l'indice du milieu traduit les effets de la turbulence atmosphérique sur la propagation acoustique, causée par les fluctuations aléatoires des grandeurs micrométéorologiques. L'échelle de temps considérée ici est inférieure à la seconde (de 0,02 à 0,1 s) : c'est l'échelle de variation temporelle dont les effets sont les plus significatifs sur la propagation acoustique à grande distance. La difficulté réside alors dans la caractérisation expérimentale de cette turbulence, dont les paramètres caractéristiques peuvent être évalués à l'aide d'équipements autorisant une acquisition à fréquence élevée, du type anémomètre sonique tridimensionnel ou anémomètre à fil chaud. En théorie, cette turbulence atmosphérique est essentiellement décrite par son (ou ses) échelle(s) et son intensité (μ^2), déduite des fluctuations des variables micrométéorologiques par la relation :

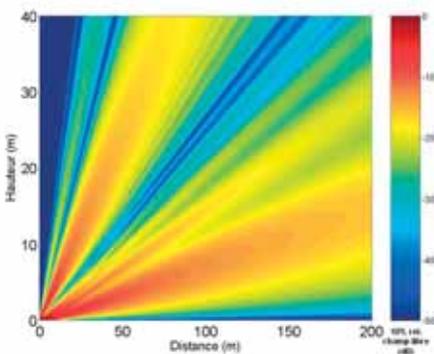
$$\mu(r, z) = -\frac{T'(r, z)}{2T_0} - \frac{u'(r, z)}{c_0}$$

où T' et u' représentent respectivement les parties stochastiques de la température T et de la composante longitudinale du vent u alignée avec la direction de propagation. T_0 et c_0 sont des valeurs de référence (constantes) pour la température et la célérité du son (typiquement $T_0 = 293\text{K}$ et $c_0 = 344\text{ ms}^{-1}$).

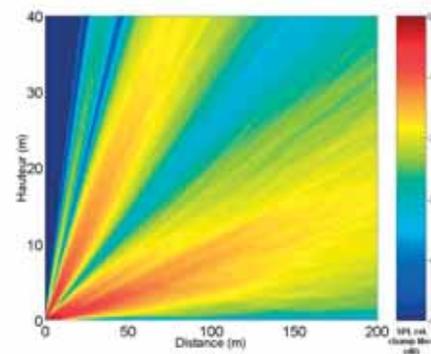
conditions défavorables) est *diffusée* dans cette zone en présence de turbulence, où les niveaux sonores calculés retrouvent alors des valeurs réalistes.

À ces considérations, il convient d'ajouter les remarques suivantes :

- Les profils moyens de célérité du son sont calculés sur des intervalles de temps (10 minutes par exemple) pendant lesquels les grandeurs micrométéorologiques sont supposées relativement stationnaires. En réalité, ces grandeurs fluctuent légèrement sur cette période, en raison de phénomènes aérodynamiques et thermiques qui apparaissent à grande échelle dans la troposphère. Eu égard aux échelles de temps et d'espace concernés par cette « turbulence » (au sens du météorologue), ces phénomènes ne conduisent pas aux mêmes effets que ceux produits par la turbulence atmosphérique (au sens de l'acousticien) et se doivent de ne pas être négligés.
- En pratique, réfraction et turbulence thermique co-existent et interagissent, ce qui conduit à des conditions de propagation complexes, ainsi qu'à une très large dispersion des niveaux sonores rencontrés in situ, tous paramètres identiques par ailleurs (topographie, nature de sol, géométrie source-récepteur, etc.).
- En ce qui concerne la turbulence atmosphérique, sa prise en compte dans ces travaux de recherche sera réalisée à travers son introduction en tant que paramètre à part entière de l'étude de sensibilité. Cependant, son influence sur les niveaux sonores est moindre lorsque



cas 1 : atmosphère homogène (calcul déterministe)



cas 2 : atmosphère turbulente ($\langle \mu^2 \rangle = 8 \cdot 10^{-6}$)

Fig. 6 : Illustration des effets des variations stochastiques de l'indice du milieu (turbulence atmosphérique)
 $f = 4\text{kHz}$, $H_0 = 10\text{-}1\text{m}$, $\sigma_1 = 105\text{ kNsm}^{-4}$, $\sigma_2 = 103\text{ kNsm}^{-4}$, $D_{\text{rupture impédance}} = 10\text{m}$, $a = 0\text{ ms}^{-1}$

Si on fait l'hypothèse de Taylor dite de la turbulence gelée, alors on peut considérer les caractéristiques de la turbulence comme invariantes pendant le temps de traversée de l'onde sonore. Une hypothèse supplémentaire d'isotropie et d'homogénéité nous permet de pouvoir modéliser numériquement ses effets sur la propagation acoustique (par la technique des modes de Fourier aléatoires, par exemple). Ces effets dépendent sensiblement de la fréquence et sont présentés sur la figure 6 (calcul monochromatique à 4kHz) : la turbulence atmosphérique *homogénéise* les niveaux sonores dans l'espace. Ainsi, les figures d'interférences destructives (« lignes » de moindre énergie sonore) qui apparaissent avec un calcul déterministe (sans turbulence) se trouvent « lissées » en présence de turbulence. De même, l'énergie sonore présente à la limite de la zone d'ombre qui apparaît dans le cas déterministe (effet de sol + éventuellement

l'on considère ces niveaux en termes de 1/3 d'octave ou d'octave, et a fortiori en termes de niveau global pondéré A.

Les moyens mis en œuvre dans le cadre du projet

Les partenaires

Le projet regroupe les partenaires suivants :

- ECL : Le Centre Acoustique du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon, (LMFA UMR CNRS 5509), s'intéresse de façon générale à l'aéroacoustique aussi bien pour les problèmes de génération de bruit par les écoulements turbulents que

pour ceux de la propagation des ondes acoustiques dans les milieux inhomogènes et de la réduction de bruit par contrôle actif. Les activités portent à la fois sur l'expérimentation, la modélisation et la simulation numérique. Le Centre Acoustique dispose notamment d'une grande chambre anéchoïque associée à des souffleries subsonique et supersonique adaptées à la caractérisation des sources de bruit et de la propagation en milieu turbulent pour des configurations académiques ou industrielles. Il possède une expérience de plus de 20 ans en partenariat avec de grands groupes industriels et organismes nationaux en particulier dans le domaine de l'aéronautique et des transports terrestres. Il est également impliqué dans les actions nationales (MEDD, PREDIT, GDR Bruit des transports, CNRT R2A, ACI MNRT-INRS, CAHPAC) et européennes (SOBER, SILENCER, COJEN).

- EDF R&D : Le groupe Acoustique et Vibrations sous Écoulement possède des compétences en R&D autour des thèmes de la propagation extérieure, de l'aéroacoustique et de la perception du bruit industriel. Il est aussi en charge de la définition des méthodologies et des outils de calcul utilisés par le Groupe EDF pour réaliser ses études d'impact acoustiques. Outre la participation à des programmes de recherche nationaux, il participe à la validation pour le bruit industriel des méthodes de calcul prévisionnelles définies dans le cadre du projet européen IMAGINE. EDF R&D dispose d'un retour d'expérience de plus de 20 ans sur les problèmes d'impact des sources industrielles ainsi que des outils de référence et un logiciel d'ingénierie développés en interne.

- LCPC : la Section « Acoustique Routière et Urbaine » du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées travaille à la fois sur la caractérisation expérimentale (recherche méthodologique, site expérimental « Station de long terme ») et sur la modélisation numérique (équation parabolique, méthode des rayons, etc.) de l'ensemble des phénomènes physiques affectant la propagation acoustique à grande distance, et en particulier l'influence des conditions micrométéorologiques sur ces niveaux sonores. Ces activités s'inscrivent dans le cadre d'opérations de recherche pluriannuelles pilotées par le LCPC, et dans le cadre de projets nationaux (MEDD, PREDIT, ADEME, etc.) et européens (HARMONOISE, SILVIA, etc.).

- SNCF : la Direction de la Recherche et de la Technologie de la SNCF travaille sur la propagation acoustique aux abords des infrastructures ferroviaires et aussi sur la définition des sources acoustiques spécifiques que sont les matériels roulants. Elle est impliquée dans des programmes de recherche nationaux (PREDIT) et européens (HARMONOISE). En collaboration avec le département Ingénierie de la SNCF et l'Agence d'essais ferroviaires, elle dispose de moyens, tant pour réaliser des études prévisionnelles que des mesures d'impacts chez les riverains en bordure d'emprises ferroviaires.

Les moyens expérimentaux

Une importante campagne expérimentale est prévue au printemps 2005 sur le site expérimental de Lannemezan (CRA - Université de Toulouse). Tous les partenaires

impliqués dans ce projet seront mobilisés pour cette campagne, qui se déroulera en 2 phases :

- Campagne de 3 semaines pendant laquelle d'importants moyens matériels seront mobilisés, avec une surveillance accrue des conditions de mesure et des capteurs, ainsi qu'un échantillonnage optimisé pour l'acquisition comme pour le stockage des données. Pendant cette période, il est prévu de pouvoir disposer sur site d'environ 100 voies d'acquisition acoustique et d'environ 50 capteurs micrométéorologiques.

- Campagne de 2 ou 3 mois supplémentaires avec un nombre de capteurs, une surveillance et un échantillonnage moindres. A priori, le nombre de capteurs et de voies d'acquisition serait réduit d'environ 75% pendant cette période.

Le principal intérêt de cette campagne est de disposer d'une source sonore stable, dont on maîtrise le spectre et la puissance à l'émission. Le protocole expérimental correspondant est actuellement en cours d'élaboration, de manière à optimiser l'échantillonnage spatial et temporel de l'acquisition de telles données, en prenant en compte l'ensemble des contraintes matérielles (site, capteurs, etc.) et logicielles (échantillonnage, transfert de données, etc.). Ainsi, ce protocole expérimental devrait suivre le schéma de principe illustré sur la figure 7.

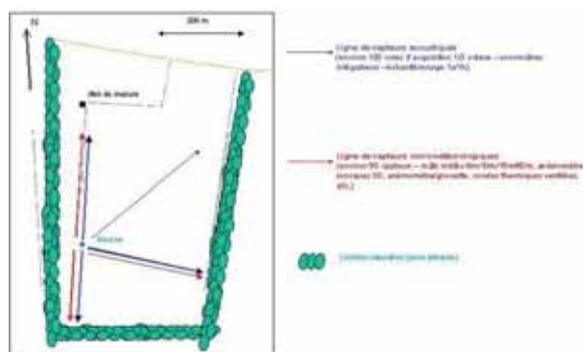


Fig. 7 : Schéma de principe de la campagne expérimentale prévue au printemps 2005 sur le site de Lannemezan

Les données expérimentales respectivement issues de ces deux campagnes complémentaires seront ensuite traitées, puis analysées dans le but d'alimenter l'étude de sensibilité en fonction des valeurs des différents paramètres relevées in situ.

Parallèlement à cette campagne expérimentale d'envergure mais « ponctuelle » (i.e. se déroulant sur quelques semaines), d'autres données expérimentales pourront être éventuellement exploitées : il s'agit des données issues du site expérimental dont le LCPC s'est doté en 2001, baptisé « Station de long terme ». Cet outil permet d'acquérir simultanément un grand nombre de données trafic/acoustique/météo sur le long terme (monitoring), et d'étudier les relations statistiques spatio-temporelles qui existent entre ces grandeurs[7]. Ce site présente le double intérêt d'être non plan (vallée traversée par un viaduc routier) et d'offrir la possibilité d'y étudier également les sources sonores d'origine ferroviaire.

Cependant, il conviendra le cas échéant de conduire rigoureusement l'analyse de ces données en raison de la grande variabilité de la source sonore présente sur le site (trafic routier), suivant la période considérée.

Les moyens de calcul

Nos équipes disposent de plusieurs types d'outils de calcul, parmi lesquels on citera :

TYMPAN

TYMPAN est un logiciel d'ingénierie acoustique propre à EDF qui permet de réaliser des études d'impacts de sites industriels. Les méthodes de calculs utilisées sont des méthodes simplifiées de type ISO 9613 et NMPB étendues à des applications 3D. Son utilisation permet en pratique de hiérarchiser les sources principales d'un site industriel et d'éventuellement tester l'influence de solutions d'insonorisation (écran, enceintes, etc.). Dans le cadre du projet, cet outil peut être utilisé dans le cas où le recours à des calculs avec des méthodes plus sophistiquées s'avère trop coûteux, notamment pour évaluer l'influence relative de la présence d'obstacles sur le trajet source récepteur.

Le code EOLE 3D

Le code EOLE 3D est un code de propagation acoustique résolvant les équations d'Euler linéarisées.

On montre que ces équations gouvernent le comportement d'ondes acoustiques qui se déplacent à la vitesse du son dans toutes les directions, et d'ondes de type mécanique des fluides, sans variation de pression, convectées par l'écoulement. Elles sont obtenues en décomposant les grandeurs physiques : ρ la masse volumique, p la pression et u la vitesse en une valeur moyenne (indice 0) et une fluctuation acoustique supposée de faible amplitude par rapport à la grandeur moyenne :

$$\rho = \rho_0 + \rho', \quad p = p_0 + p', \quad u = u_0 + u'$$

$$\text{avec } \rho' \ll \rho_0, \quad p' \ll p_0, \quad u' \ll u_0$$

Cette décomposition est reportée dans les équations d'Euler, qui gouvernent la mécanique des fluides non visqueuse ; ce qui donne, en ne gardant que les termes du premier ordre, les équations d'Euler linéarisées. Les équations sont résolues par une méthode de différences finies sur un maillage structuré [8].

Dans le cadre de ce projet, cet outil peut être utilisé pour des calculs de diffractions en champ proche éventuellement couplés à l'équation parabolique pour l'extension en champ lointain.

PE Split-Step Padé

Il s'agit d'un code acoustique développé dans le cadre du partenariat ECL/LCPC. Le principe consiste à approximer l'équation elliptique d'Helmholtz par une équation parabolique 2D, résolue grâce à un développement Padé (1;1). Le champ de pression ϕ suit alors la loi d'évolution spatiale suivante :

$$F \left[1, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \frac{\partial \phi(r)}{\partial x} = G \left[1, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \frac{\partial^3}{\partial z^3} \right] \phi(r)$$

où F et G représentent des opérateurs incluant les dérivées partielles suivant z aux ordres 1, 2 et 3. Ce code permet de prendre en compte un sol non plan, de multiples discontinuités d'impédance, un obstacle type écran, un profil de célérité positif ou négatif, constant ou variable avec la distance, ainsi que la turbulence atmosphérique [9-12].

Modèles analytiques basés sur la théorie des rayons

Ces codes numériques ont été développés au LCPC. Ce sont des modèles analytiques basés sur le principe de tracé de rayons, qui donnent l'atténuation par rapport à un récepteur de référence sur sol plan (hypothèses présentées dans la partie « Les effets de sol »).

En posant un certain nombre d'hypothèses et/ou d'approximations complémentaires, ces codes analytiques permettent également de prendre en compte une discontinuité d'impédance, des modèles d'impédance plus réalistes que celui de Delany & Bazley (modèles multi-paramètres et multi-couches), des gradients verticaux de célérité (constant avec la distance), une barrière acoustique et la turbulence atmosphérique [13].

Ainsi, les codes « PROPATE » et « PROPLINE » sont respectivement applicables au cas d'une source ponctuelle et linéique, cette dernière étant décomposée comme une somme de sources élémentaires ponctuelles. Les codes « DISCED » et « ECRAN » s'appliquent quant à eux aux situations présentant respectivement une rupture d'impédance et une barrière acoustique.

Les outils statistiques

Le développement d'un nouvel outil statistique prend en compte les travaux menés par E. Séchet et V. Zouboff qui ont abouti à la définition de la grille UiTi [1]. Le jeu de données issu de la nouvelle campagne permettra une approche multi-dimensionnelle plus complète, avec notamment une prise en compte de l'évolution temporelle des paramètres de sol, l'intégration des incertitudes spatiales des grandeurs micrométéorologiques caractérisant le site ainsi qu'une sélection en amont des échantillons temporels acoustiques.

L'échantillonnage temporel fin (1 seconde) prévu pour la mesure des L_{eq} suivant le protocole expérimental de la future campagne permettra l'utilisation de nouveaux outils d'analyse de la structure. Le variogramme expérimental déjà utilisé dans le cadre de l'exposition au bruit en milieu industriel [14] repère des structures temporelles typiques qui peuvent, par exemple, être corrélées aux fluctuations rapides dues aux instabilités micrométéorologiques. Ces structures pourront être prises comme critère de sélection des données en amont de l'analyse factorielle.

Conclusion

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet vont permettre d'étudier la sensibilité d'une situation acoustique aux principaux paramètres que sont la divergence géométrique, l'absorption atmosphérique, les effets du sol et les effets météorologiques.

Les principales données d'entrées considérées seront :

- la fréquence (spectre en 1/3 d'octave et 1/1 octave de 125 à 4 kHz) ;
- la distance source-récepteur (jusqu'à 1300m) ;
- la hauteur de la source H_S et du récepteur H_R ($0,05m \leq H_S \leq 100m$ et $1m \leq H_R \leq 5m$) ;
- le type de sol via son impédance acoustique décrite par un modèle semi-empirique à un seul paramètre σ ($10kNsm^{-4} < \sigma < 100000 kNsm^{-4}$) ;
- la réfraction (classe des paramètres a et b) ;
- la turbulence (intensité μ).

Le travail le plus conséquent réside alors dans la définition des classes météorologiques qui mènent à un des profils de célérités équivalent et donc à des situations acoustiques supposées identiques. Il s'agira de réaliser une « matrice de sensibilité » à n dimensions, n étant le nombre de paramètres influant sur la propagation acoustique en milieu extérieur semi-ouvert (terrain plan et dégagé). Cette matrice pourra ensuite constituer un outil d'évaluation des paramètres physiques à considérer pour caractériser expérimentalement et/ou numériquement le champ sonore d'un tel site.

Parmi les applications de ces travaux, on peut citer l'élaboration d'un guide méthodologique permettant de fixer quelques ordres de grandeurs sur l'influence relative des différents phénomènes physiques rencontrés in situ en fonction des caractéristiques du site considéré. Ce guide pourra servir de base pour les nouvelles versions des normes de mesurage et de calcul.

En outre, ces travaux offriront également l'opportunité de quantifier les différences de prévisions de niveaux sonores pouvant exister entre les modèles de référence (ou de « laboratoire », du type Equation parabolique) et ceux utilisés dans le domaine d'ingénierie, qui reposent sur des théories simplifiées du type NMPB et dont la précision et le champ d'application sont réduits (pas de calcul dans les zones d'ombre, pas de turbulence atmosphérique, modèles d'effet de sol simplifiés, etc.).

Remerciements

Ces travaux de recherche sont partiellement financés par le ministère de l'Écologie et du développement durable (MEDD).

Les partenaires de ce projet tiennent à remercier O. Baume (doctorant LCPC/EDF), B. Lihoreau (post-doctorant LCPC/ECL) et F. Poisson (SNCF) pour leur participation à ces travaux, ainsi que leurs proches collaborateurs pour leur soutien scientifique et technique :

les Laboratoires régionaux des ponts et chaussées de Blois, Clermont-Ferrand, Lille et Strasbourg, ainsi que l'Unité « EPHYSE » de l'INRA de Bordeaux, l'Agence d'essais ferroviaires, le département « SPE » d'EDF R&D, le Centre de recherches atmosphériques de l'Université de Toulouse et le Centre de géostatistique de l'École des Mines de Paris.

Références bibliographiques

- [1] E. Séchet, V. Zouboff, «Application des méthodes factorielles à la caractérisation des effets météorologiques sur la propagation du bruit à grande distance», Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°198, juil.-août 1995
- [2] Directive 2002/49/CE du 25 Juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement. (l'Ordonnance n°2004-11-99 pour sa transposition en droit français a été publiée au J.O. le 14/11/2004).
- [3] ISO 9613-1 : Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre. Partie 1 : Calcul de l'absorption atmosphérique.
- [4] K. Attenborough, "Review of Ground Effects on Outdoor Sound Propagation from continuous Broadband Sources", Appl. Acoust. 24, 289-319 (1988).
- [5] M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", Appl. Acoust. 3, 105-116 (1970).
- [6] J.E. Piercy, T.F.W. Embleton, "Excess attenuation or impedance of common ground surfaces characterized by flow resistance", J. Acoust. Soc. Am. Suppl. 1 65, S63 (1979).
- [7] 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, mars 2004
- [8] Christopher K. W. Tam, Computational Aeroacoustics : Issues and Methods, AIAA Journal 33, No.10, (1995).
- [9] B. Gauvreau, M. Bérengier, Ph. Blanc-Benon, C. Depollier, «Traffic noise prediction with the PE method: I Validation of a split-step Padé approach in complex environments», J. Acoust. Soc. Am 112, N°6, 2680-2687 (2002).
- [10] Ph. Blanc-Benon, B. Lihoreau, T. Pénelon, B. Gauvreau, I. Calmet, M. Bérengier, « Outdoor sound propagation modelling in complex environments : A new PE code coupled with a micrometeorological code », Long Range Sound Propagation symposium 2004, Penn State (EUA), June 2004.
- [11] P. Chevret, Ph. Blanc-Benon, D. Juve , «A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground», J. Acoust. Soc. Amer., 100, N° 6, 3587-3599 (1996).
- [12] Ph. Blanc-Benon, L. Dallois, D. Juve, «Long range sound propagation in a turbulent atmosphere within the parabolic approximation», Acta Acustica united with Acustica, 87, N°6, 659-669 (2001).
- [13] 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).
- [14] H. Wackernagel, C. Lajaunie, L. Thierry, M. Grzebyk, "Evaluation de l'exposition sonore en milieu professionnel : application des méthodes géostatistiques à l'estimation du Leq et conséquences sur les stratégies de mesurage», Note technique INRS, juin 1998

