Influence des fluctuations des conditions météorologiques sur la dispersion des niveaux sonores

David Ecotière
Centre d'études techniques de l'équipement de l'Est
Laboratoire régional des ponts et chaussées de Strasbourg
Équipe de recherche n°32 (Acoustique)
6, rue Jean Mentelin
BP 9
67035 Strasbourg CEDEX 9
Tél. : 03 88 77 79 33
E-mail : david.ecotiere@equipement.gouv.fr

Résumé
La prise en compte des effets météorologiques dans la propagation du bruit à grande distance est une nécessité. Compte tenu de ces effets, le niveau sonore est constitué par la superposition de fluctuations aléatoires de courte durée produite par la turbulence ainsi que par des fluctuations à plus grande échelle temporelles tels les cycles journaliers ou saisonniers. De ce fait, le niveau sonore à grande distance doit être décrit comme une variable aléatoire. La qualité de son estimation et la représentativité d'un résultat de mesure sont alors fortement dépendantes de la période ainsi que de la durée d'observation. Des approches expérimentales ou numériques permettent d'appréhender les caractéristiques statistiques du niveau sonore. Les recherches en cours visent à mettre au point des méthodes permettant d'accéder aux valeurs d'incertitude du résultat d'une mesure ou d'un calcul et liées aux fluctuations temporelles météorologiques.

Abstract
Meteorological effects are very important for outdoor sound propagation and must be taken into account in most impact studies. Due to these effects, the sound level is constituted of a superposition of short time random fluctuations caused by the turbulence, and of larger time scale fluctuations caused by diary or seasonal cycles. The sound level at large distance must then be considered as a stochastic variable. The quality of the estimation of a measurement result is then highly dependent on the duration and on the period of observation. Some experimental or numerical ways can lead to interesting information on statistical properties of the sound level. Current researches focus on the elaboration of methods that can give values of incertitude due to temporal meteorological fluctuations.

L'influence des conditions météorologiques sur la propagation acoustique à grande distance est un phénomène connu [2] dont la prise en compte est devenue une nécessité. Des différents phénomènes qui peuvent être à l'origine des incertitudes obtenues sur l'estimation d'un niveau sonore, les effets météorologiques sont très souvent les plus influents dès que la distance excède 50 à 100 m. Les conditions météorologiques fluctuant largement au cours du temps, et avec elles les niveaux sonores, il est délicat de vouloir considérer le niveau sonore à grande distance comme une valeur déterministe.
Dans le domaine opérationnel, une étude d'impact acoustique demande généralement de quantifier la situation sonore d'un site en sous-entendant de déterminer une grandeur représentative d'une situation moyenne de celui-ci. Actuellement, aucune information n'est fournie pour estimer ce degré de représentativité : s'agit-il d'une situation présente 50% du temps ? 90% du temps ?…

Dès lors, les problématiques suivantes apparaissent :

- Comment comparer un résultat de calcul avec celui d'une mesure ?
- Quelle précision donner à une mesure lorsqu'on doit la comparer à un seuil réglementaire ?
- Avec quel seuil de confiance peut-on considérer qu'un résultat de mesure ne dépassera pas un niveau sonore calculé ?

Après une présentation succincte des phénomènes physiques mis en jeu, une présentation de l'approche statistique du niveau sonore à grande distance et des approches expérimentales et numériques existantes sont effectuées. Finalement, différents résultats sont exposés en dernière partie et permettent de mieux appréhender les ordres de grandeur mis en jeu. Ils portent par exemple, sur la dispersion des niveaux sonores au cours des jours ou des saisons, ou encore sur la durée d'observation nécessaire pour atteindre une précision donnée.

Ces éléments doivent permettre de mieux replacer dans son contexte physique les principes utilisés dans certaines méthodes d'ingénierie couramment utilisées, par exemple pour effectuer une cartographie acoustique, et/ou de permettre de mieux appréhender les résultats de calculs ou de mesures.

Conditions météorologiques et propagation acoustique

A l'extérieur, le milieu de propagation acoustique est inhomogène, éventuellement en mouvement, et ses frontières sont souvent complexes. L'inhomogénéité du milieu est essentiellement due aux conditions météorologiques locales : la présence de gradients verticaux de température et/ou de vitesse du vent conduisent à la présence d'un gradient vertical de célérité acoustique dont l'influence devient importante à grande distance (typiquement au-delà de 50 à 100 m). Trois grandes classes de propagation acoustique sont généralement considérées :

- La première correspond à une situation où la célérité acoustique augmente avec l'altitude (cas de vent portant par exemple) : ceci se traduit par un renforcement des niveaux sonores au niveau du récepteur par rapport à une situation homogène.
- La deuxième classe correspond à une situation où la célérité acoustique diminue avec l'altitude (cas de vent contraire par exemple) : ceci se traduit par une diminution des niveaux sonores au niveau du récepteur par rapport à une situation homogène. Dans cette dernière situation, d'autres effets, tels que ceux de la turbulence liée à la vitesse du vent ou à la température, deviennent prépondérants sur les seuls effets des gradients verticaux [1].
- La dernière classe est une situation où le milieu de propagation est homogène. Cette situation est rare dans la réalité puisqu'elle est liée à l'absence d'effets météorologiques (gradients verticaux de vitesse du vent et de température nuls ou compensation de ces deux effets) : cette classe est plus un cas limite théorique entre les deux autres classes parce qu'elle ne se rencontre dans la réalité que rarement et brièvement, au lever ou au coucher du soleil par exemple.

La Figure 1 illustre le lien qui peut exister entre les fluctuations d'un niveau sonore relevé à 100 m d'une source ponctuelle stationnaire et celles du gradient de célérité acoustique (campagne «Lannemezan 2005» [2]).

Bien entendu, la réalité est plus compliquée que cette description succincte : les profils de célérité acoustique peuvent présenter des formes plus complexes qu'une croissance ou décroissance monotone avec l'altitude. Ils peuvent également présenter des inhomogénéités spatiales non plus uniquement suivant l'altitude mais également le long du trajet de propagation. D'autres phénomènes, comme les fluctuations des propriétés acoustiques du sol au cours du temps peuvent également donner lieu à des dispersions temporelles du niveau sonore [3]. Ils ne sont pas abordés ici.

Approche statistique du niveau sonore à grande distance

Les profils verticaux de température et de vitesse de vent varient largement au cours du temps. Ces fluctuations peuvent se produire sur quelques fractions de seconde (turbulence) ou sur des périodes plus importantes en raison de cycles journaliers, saisonniers, annuels ou même de tendance à plus long terme. Les fluctuations du niveau sonore à grande distance sont ainsi constituées par la superposition de ces différentes fluctuations d'origine météorologique.

Le niveau sonore à grande distance peut alors être considéré comme une variable aléatoire temporelle et sa caractérisation est alors très dépendante de sa durée d'observation.

Trois grandes échelles de temps sont à considérer pour les périodes d'observation :

- l'échelle de court terme correspond à une période pendant laquelle les caractéristiques météorologiques peuvent être considérées comme stables. Sa durée est d'une à plusieurs dizaines de minutes.
- l'échelle de moyen terme correspond généralement à une période de référence ou une période réglementaire (bruit routier : 6h-22h et 22h-6h, bruit industriel 7h-22h et 22h-7h…). Durant cette période, les conditions météorologiques ne sont plus stationnaires mais restent cependant accessibles à la mesure.
- l'échelle de long terme fait appel à une connaissance statistique du phénomène : son ordre de grandeur permet de couvrir la quasi-totalité des situations météorologiques présentes sur un site (échelle supérieure ou égale à 1 an et pouvant aller jusqu'à 30 ans).

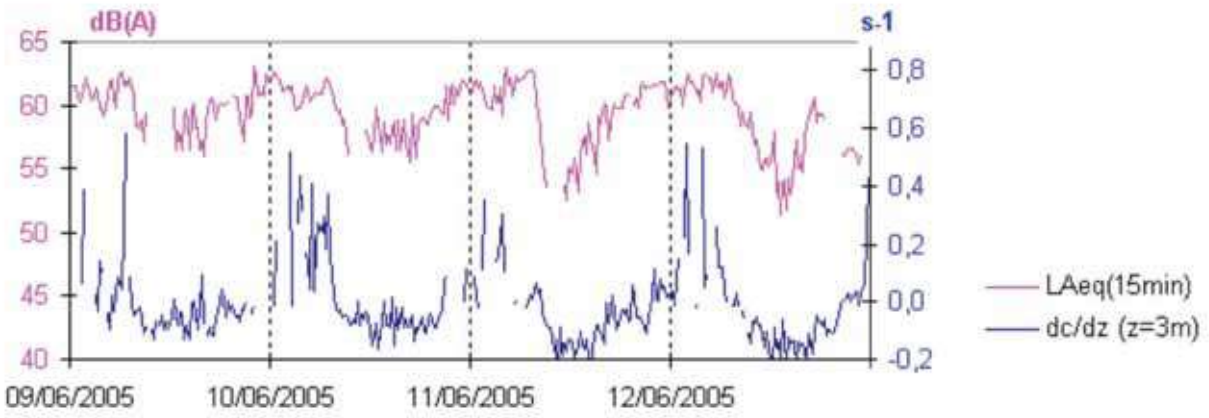

Fig. 1 : Niveau sonore LAeq(15 min) à une distance de 100 m (hauteur : 2 m) d'une source ponctuelle stationnaire (hauteur : 2 m) et gradient de célérité acoustique (hauteur : 3 m, distance : 75 m), en fonction du temps

Sound level LAeq(15 min) at 2 m high and 100 m far from a punctual stationnary source (height : 2m), and acoustic celerity vertical gradient (height : 3 m, distance : 75 m) along with time

Seule cette dernière échelle permet de décrire complètement la situation sonore d'un site. Bien évidemment, elle est généralement inaccessible à la mesure et ne peut qu'être approchée à l'aide d'échantillonnage sur des périodes plus brèves de court et moyen terme. Le processus d'échantillonnage mis en œuvre ne concernant, par définition, qu'un nombre restreint de situations météorologiques, il s'ensuit inévitablement une incertitude sur l'estimation du niveau sonore qu'il soit mesuré ou calculé.

Le niveau sonore à grande distance doit être représenté à l'aide de descripteurs statistiques pertinents. La fonction de répartition permet, par exemple, de déterminer la probabilité de dépassement de la valeur particulière d'un niveau sonore et d'associer un intervalle de confiance à son résultat de mesure ou de calcul.

Une mesure unique peut être considérée comme un échantillonnage de la fonction de répartition théorique. Cette valeur est aléatoire et dépend des conditions météorologiques particulières présentes au moment de cet échantillonnage. Si l'on ne prend aucune précaution particulière, le résultat de la mesure pourra se situer n'importe où dans l'intervalle de variations considéré. La solution préconisée actuellement par les principales normes de mesurage en milieu extérieur (voir par exemple les normes NFS 31-085 ou NFS 31-010) est de se placer lors des mesures dans les situations météorologiques engendrant le moins de dispersion possible sur les niveaux sonores de manière à réduire l'intervalle de confiance, sans toutefois être capable de le quantifier.

Caractérisation des fluctuations temporelles des niveaux sonores

Les paragraphes suivants présentent deux types d'approche qui peuvent être adoptées pour appréhender les caractéristiques statistiques des fluctuations temporelles des niveaux sonores : la première est basée sur l'observation expérimentale (acoustique et météorologique), et concerne surtout les échelles de court ou moyen terme, la deuxième est basée sur la modélisation numérique à partir de données météorologiques de long terme.

Méthodes expérimentales

L'approche expérimentale est indispensable pour identifier clairement les phénomènes physiques mis en jeu ainsi que leurs interactions, aussi bien spatiales que temporelles.

Parmi les campagnes expérimentales de grande envergure de ces dernières années, on peut citer celles qui sont mises en œuvre au sein des Laboratoires des ponts et chaussées [4,5] et qui ont permis d'aboutir à la méthode d'ingénierie réglementaire de calcul du bruit routier [6]. Plus récemment, la campagne mise en œuvre en 2005, grâce à la collaboration d'EDF, de la SNCF, du LCPC et de l'ECL, sur un site expérimental à Lannemezan (65) [2] a consisté à mesurer en continu, durant 3 mois, le niveau sonore généré par une source ponctuelle stationnaire, ainsi que les grandeurs météorologiques et les caractéristiques d'absorption du sol, en un grand nombre de points d'observation (distance, hauteur, direction de propagation, …). De par sa durée et la variété des situations météorologiques rencontrées, cette campagne a permis de fournir une importante base de données dans laquelle sont répertoriées conjointement les mesures acoustiques, météorologiques et d'absorption du sol au cours du temps. Une analyse croisée des différentes grandeurs permet de dégager leur influence respective sur les niveaux sonores, en particulier au cours du temps. On peut également citer la campagne mise en œuvre dans le cadre du projet européen HARMONOISE qui a consisté à mesurer des caractéristiques météorologiques durant différentes périodes allant de 1 mois à 3 mois sur deux sites en Allemagne [7] dans le but de dégager une classification de conditions météorologiques affectant la propagation acoustique.

Cependant, ces campagnes expérimentales de grande envergure présentent l'inconvénient d'être forcément limitée dans le temps à cause des échelles de temps de long terme mises en jeu. Afin de pallier cet inconvénient, le LCPC s'est doté en 2001 d'un site expérimental à Saint-Berthevin (53), baptisé «Station de Long Terme» et dédié à l'observation à long terme [8]. Cet outil permet d'acquérir simultanément un grand nombre de données trafic/acoustique/météo en continu sur plusieurs années et d'étudier les relations statistiques spatio-temporelles qui existent entre ces grandeurs. Ce site présente en outre le double intérêt d'être de topographie complexe (vallée traversée par un viaduc routier) et d'offrir la possibilité d'y étudier également les sources sonores d'origine ferroviaire.

Méthode numérique

Une méthode numérique a été mise au point au sein du réseau des Laboratoires des ponts et chaussées en collaboration avec l'INRA [9], afin de pallier l'incapacité des méthodes expérimentales à donner accès à des grandeurs de long terme, dont l'échelle de temps est de l'ordre de plusieurs dizaines d'années. La méthode permet, à partir de données météorologiques standards mesurées dans des stations de Météo France, de calculer le niveau sonore LAeq (1h) sur des durées jusqu'ici inaccessibles à la mesure (par exemple : 30 années d'observation). Son principe est le suivant : des résultats de mesures météorologiques de longue durée (rayonnement, précipitations, vitesse et directions du vent, …) alimentent un modèle micro météorologique permettant de reconstituer les profils verticaux de vitesse du vent et de température à l'échelle micro climatique [10]. On obtient ainsi la série horaire de gradients verticaux de température et de vitesse de vent, puis celle du gradient vertical de célérité acoustique.

En utilisant un modèle de propagation acoustique capable d'appréhender un milieu de propagation inhomogène [11], la série temporelle de gradient vertical de célérité acoustique, associée aux informations acoustique et géométrique de la source sonore et du récepteur, permet d'obtenir une série chronologique de niveaux sonores horaires sur une période représentative de celle du long terme (comme 30 ans, soit 254 208 échantillons). Les résultats obtenus peuvent alors faire l'objet des analyses statistiques appropriées (voir Figure 2 et Figure 3 par exemple).

Le cœur de la méthode a été mis au point pour une source ponctuelle, mais des développements pour toute source pouvant être discrétisée à l'aide de sources ponctuelles (source linéique par exemple) ont également été menés.

Il est important de souligner que cette approche présente l'avantage de ne quantifier que les effets météorologiques, toutes choses étant égales par ailleurs (effet de sol, source acoustique, …), cette dernière condition étant souvent difficile à obtenir sur de grandes périodes d'observation expérimentale.

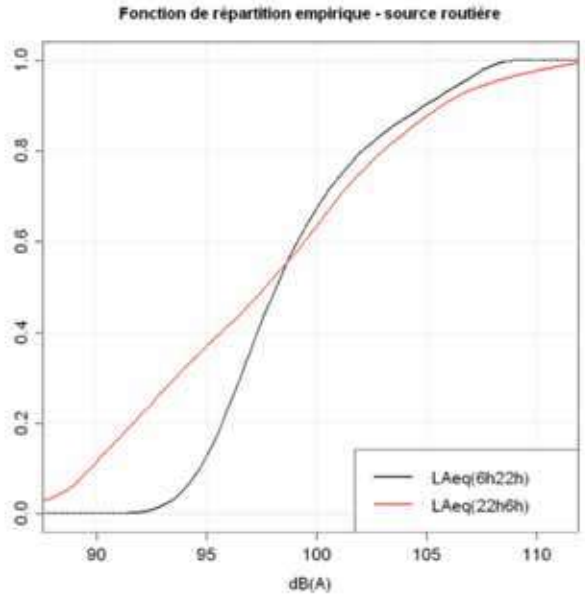

Fig. 2 : Fonction de répartition empirique des niveaux sonores LAeq (6h-22h) et LAeq (22h-6h) pour 29 années (ref. arbitraire), source routière à 150 m du récepteur

Empirical cumulative distribution function of the sound level LAeq(6h-22h) and LAeq(22h-6h) for 29 years (arbitrary ref.), road source 150 m far from the receiver

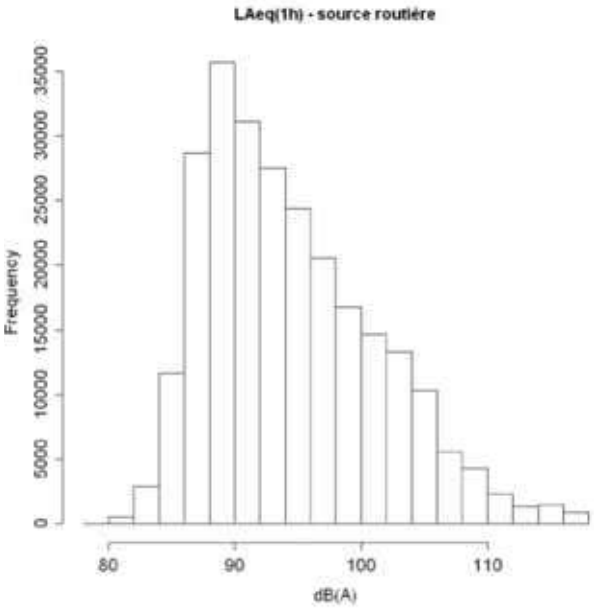

Fig. 3 : Histogramme du niveau sonore LAeq(1h) (ref. arbitraire), source routière à 150 m du récepteur

Histogram of the sound level LAeq(1h) (arbitrary ref.), road source 150 m far from the receiver

Quelques caractéristiques du niveau sonore de long terme

La méthode décrite au chapitre précédent permet d'obtenir certaines caractéristiques intéressantes du niveau sonore de long terme qui sont décrites ci-dessous. L'ensemble des résultats présentés a été établi à l'aide des données météorologiques de la station Météo France d'Avrillé (49) de 1961 à 1990. La source et le récepteur sont respectivement placés à 0,05 m et 2 m au-dessus du sol. L'absorption acoustique du sol est représentative de celle d'un sol herbeux sur la quasi-totalité du trajet.

Dispersion des niveaux sonores avec la distance

La Figure 4 représente la dispersion du niveau sonore LAeq(1h) en fonction de la distance. On constate que la dispersion est plus importante en présence de gradients verticaux de célérité acoustique négatifs que positifs. Ce phénomène, bien connu des opérateurs acoustiques, a amené les principaux textes normatifs à déconseiller ces situations pour la mesure. Il apparaît également que la dispersion croit avec la distance, excepté en présence de gradients verticaux de célérité positifs où la décroissance est probablement due à un effet de sol.

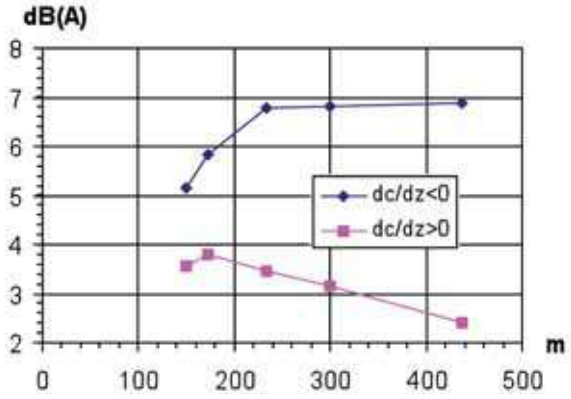

Fig. 4 : Ecart-type du niveau sonore LAeq(1h) en fonction de la distance source-recepteur. Bleu : gradient de célérité négatif, Rose :gradient de célérité positif

Standard deviation of the sound level LAeq(1h) along with the distance source-receiver. Blue : negative celerity vertical gradient, Pink : positive celerity vertical gradient

Cycles journaliers et saisonniers

Les cycles journaliers entraînent de fortes variations des profils de température et par conséquent des niveaux sonores. L'amplitude des fluctuations de ces derniers dépend également de la période de l'année, la période estivale présentant les amplitudes les plus importantes (voir sur la Figure 5, l'exemple d'une source ponctuelle placée à 300 m du récepteur dans la direction 300° par rapport au nord).

La dispersion est en général également moins élevée en période nocturne car cette période présente davantage de situations à gradient de célérité positif (essentiellement dues aux effets thermiques).

Les cycles saisonniers influencent également les fluctuations des niveaux sonores. La Figure 6 présente à titre d'exemple les fluctuations des niveaux sonores de moyen terme LAeq(6h-22h) et LAeq(22h-6h) d'une source ponctuelle placée à 300 m du récepteur. On constate en particulier une diminution moyenne de plusieurs décibels en période diurne lors de la période estivale, ainsi qu'une dispersion moins importante durant cette dernière période. Ces résultats sont également constatés, avec des ordres de grandeurs différents, dans le cas d'une source linéique telle qu'une source routière.

Échantillonnage temporel

Le résultat d'une mesure étant le résultat d'un échantillonnage temporel, la largeur de l'intervalle de confiance qui sera associée à ce résultat diminuera, bien entendu, avec la durée d'observation. La Figure 7 présente par exemple l'erreur commise sur l'estimation du LAeq(6h-22h) en fonction de la durée d'observation, pour une source routière située à 150 m. Inversement, en se fixant un seuil de tolérance maximal pour l'erreur commise sur l'estimation du niveau sonore, il

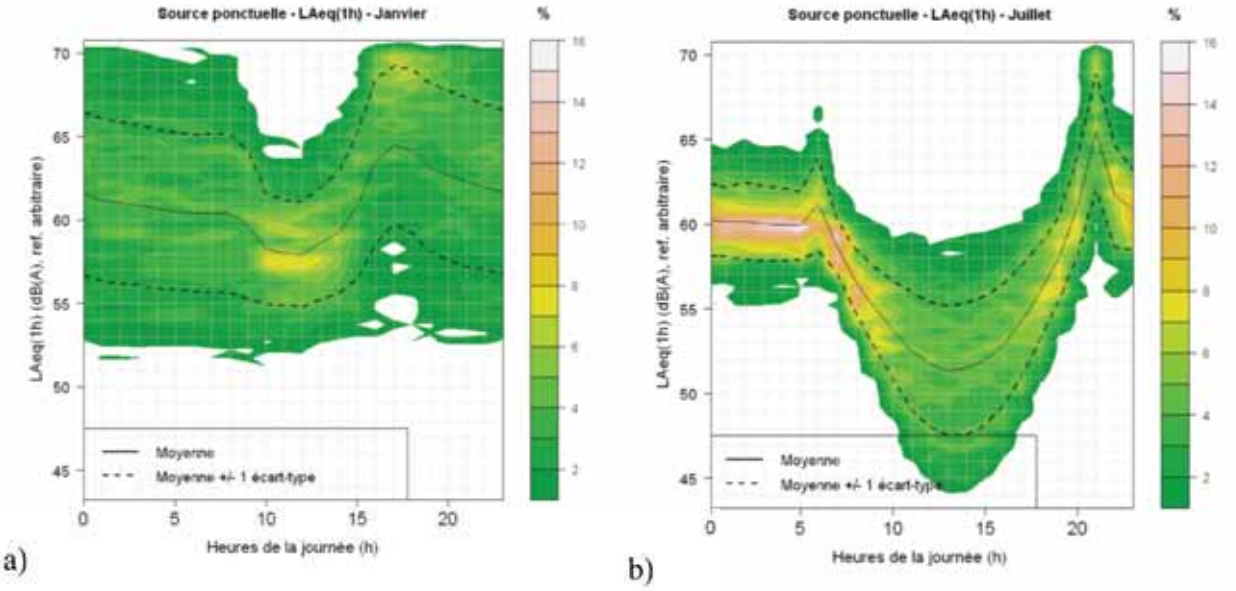

Fig. 5 : Histogrammes de la répartition du niveau sonore LAeq(1h) d'une source sonore ponctuelle stationnaire (puissance arbitraire) en fonction des heures de la journée. a) janvier, b) juillet.

Histograms of the sound level LAeq(1h) of a stationary punctual source (arbitrary ref.) along with day time. a) january, b) july.

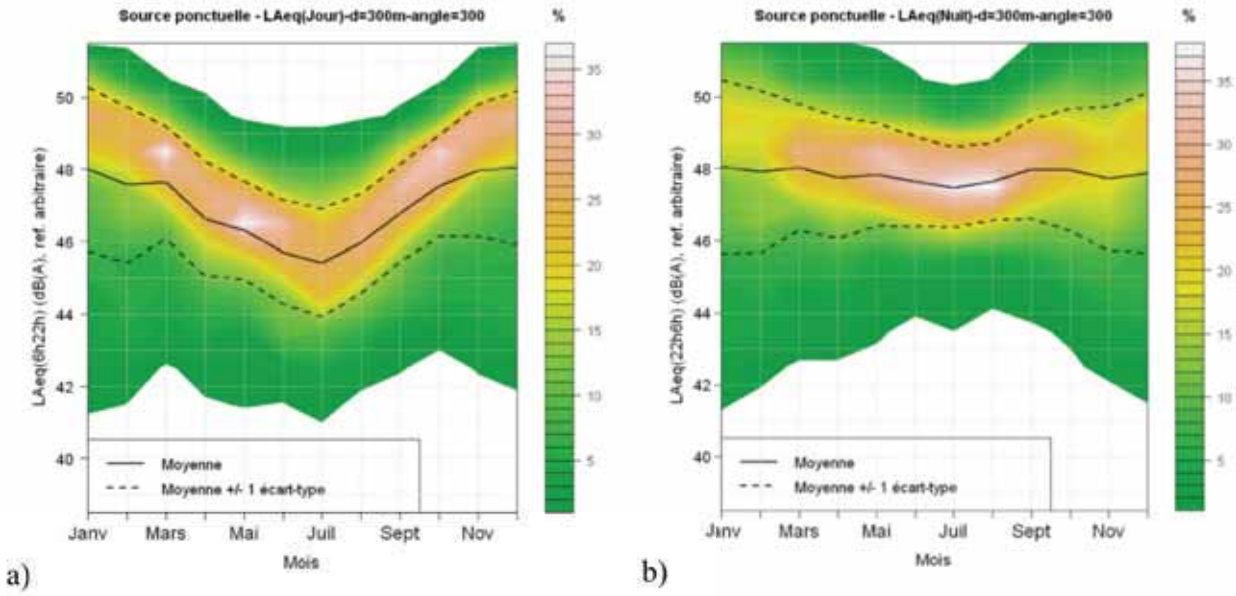

Fig. 6 : Histogrammes de la répartition des niveaux sonores a) LAeq(6h-22h) et b) LAeq(6h-22h) d'une source sonore ponctuelle stationnaire (puissance arbitraire) en fonction des mois.

Histograms of the sound level a) LAeq(6h22h) and b) LAeq(22h6h) of a stationary punctual source (arbitrary ref.) along with months.

est possible de déterminer le seuil de confiance obtenu en fonction de la durée d'observation. Dans le cas d'une source routière, il apparaît que pour s'assurer d'une erreur inférieure à 1 dB(A) sur l'estimation du LAeq(6h-22h) avec un seuil de confiance de 90%, il est nécessaire de mesurer pendant plus de 250 jours (voir Figure 8). Cette durée, qui peut paraître excessive de prime abord, est tout à fait en accord avec les ordres de grandeur des périodes des fluctuations saisonnières décrites au dernier chapitre.

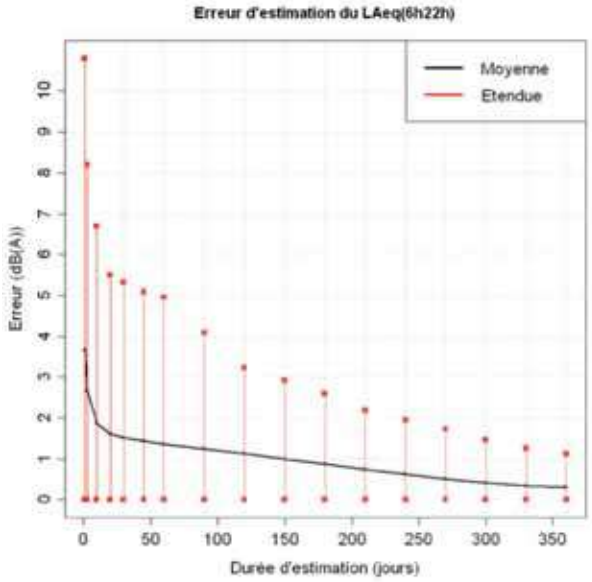

Fig. 7 : Erreur d'estimation du LAeq(6h22h) en fonction de la durée d'observation. Source routière

Estimation error of the LAeq(6h22h) along with the duration of observation. Road source

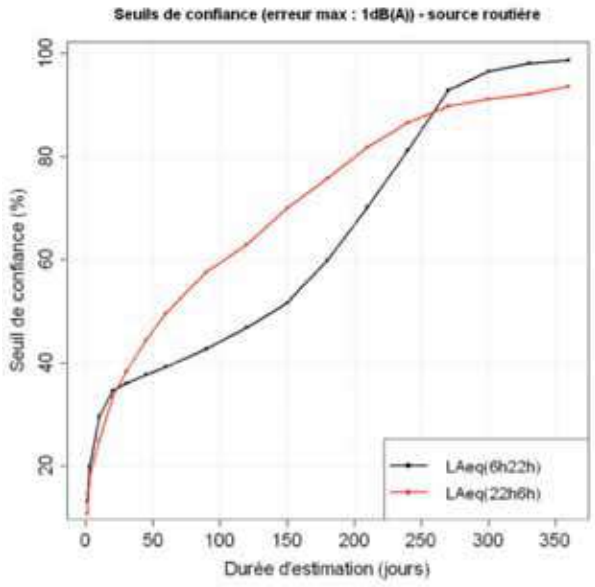

Fig. 8 : Seuil de confiance associé à une erreur d'estimation maximale de 1 dB (A) du LAeq en fonction de la durée - source routière

Confidence level associated to a maximal estimation error of 1 dB (A) for the LAeq along with the duration of observation - road source

Conclusions

La prise en compte des effets météorologiques dans la propagation du bruit à grande distance est une nécessité. Compte tenu de ces effets, le niveau sonore est constitué par la superposition de fluctuations aléatoires de courte durée produite par la turbulence ainsi que par des fluctuations à plus grande échelle temporelle tels les cycles journaliers ou saisonniers. De ce fait, le niveau sonore à grande distance doit être décrit comme une variable aléatoire. La qualité de son estimation et la représentativité d'un résultat de mesure sont alors fortement dépendantes de la période d'observation ainsi que de la durée d'observation. Actuellement, dans un bon nombre de cas, le niveau sonore obtenu à grande distance continue à être considéré comme une grandeur déterministe. Comparer un résultat de mesure à un seuil réglementaire paraît alors très délicat, voire irréaliste, dans la mesure où il est actuellement difficile de quantifier l'intervalle de confiance associé à ce résultat de mesure. Les recherches en cours visent à mettre au point des méthodes permettant d'accéder à ces valeurs d'incertitudes.

Références bibliographiques

[1] T.F.W. Embleton, Tutorial on sound propagation outdoors, J. Acoust. Soc. Am., 100 (1996), 31-48

[2] Junker F., Gauvreau B., Cremezi-Charlet C., Gérault C., Ecotiere D., Blanc-Benon Ph., Cotté B., Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance, 8ème Congrès Français d'Acoustique, Tours, avril 2006

[3] Gauvreau B., Junker F., Variabilité spatio-temporelle et incertitudes des données d'entrée des modèles de prévision acoustique, Acoustique et Techniques n°50, 2007.

[4] V. Zouboff, F. Curran, Approche expérimentale de l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du bruit à grandes distances, Bulletin de liaison des LPC, 168 (1990), 127-141

[5] E. Séchet, V. Zouboff, Application des méthodes factorielles à la caractérisation des effets météorologiques sur la propagation du bruit à grande distance, Bulletin de liaison des LPC, 198 (1995), 67-85

[6] Norme NF S31-133, Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques, février 2007.

[7] Heimann D., Bakermans M., Defrance J., Künher D., Vertical sound speed profiles determined from meteorological measurements near the ground, Acta Acustica, vol 93 (2007), 228-240

[8] 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, Proceedings of the CFA/DAGA International Congress (2004).

[9] V. Zouboff and Y. Brunet, Statistical Effects of Meteorology on Long-Range Sound Propagation, Proceedings of the 17th ICA (2001).

[10] Y. Brunet, J.P. Lagouarde and V. Zouboff, Estimating long-term microclimatic conditions for long-range sound propagation studies, Proceedings of the 7th LRSP Symp. (1996).

[11] B. Lihoreau, B. Gauvreau, M. Bérengier, Ph. Blanc-Benon and I. Calmet, Outdoor sound propagation modeling in realistic environments: Application of coupled parabolic and atmospheric models, Journal of the Acoustical Society of America, 120(1), 110-119 (2006).