

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Propagation d'incertitudes pour l'estimation des paramètres micrométéorologiques influents en acoustique environnementale

Olivia Leroy¹, Benoit Gauvreau¹, Fabrice Junker², Michel Bérengier¹

¹ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Route de Bouaye, F-44341 Bouguenais Cedex

² EDF R&D, 1 avenue du Général de Gaulle, F-92141 Clamart Cedex

Les phénomènes de propagation acoustique à grande distance présentent une forte variabilité et sont soumis à de nombreuses sources d'incertitudes. Variabilité et incertitudes induisent une dispersion importante des niveaux sonores. Cette dispersion est notamment associée aux phénomènes micrométéorologiques influents, et en particulier aux profils verticaux de célérité. Ces sources d'incertitudes et leurs effets sur les niveaux sonores sont difficilement quantifiables. Aux incertitudes météorologiques et à la variabilité "physique" des phénomènes vient s'ajouter la diversité des méthodes de mesures (mât équipé de capteurs lents, anémomètres ultrasoniques 3D) et l'influence de la période d'observation (de la minute à l'heure). L'ensemble de ces paramètres conditionne l'estimation des champs de vent et de température et par suite le calcul des paramètres d'intérêt (profils verticaux de vent et de température).

Une méthode statistique de propagation d'incertitudes est proposée. Elle permet d'étudier le comportement des incertitudes expérimentales en propageant cette information dans le système, et finalement de quantifier cet effet sur les paramètres d'intérêt puis sur les observables d'intérêt. Cet article présente les bases théoriques de la méthode de propagation d'incertitudes et une application de cette méthode au calcul des profils verticaux de célérité du son. Une campagne expérimentale menée en 2007 sur le site du LCPC Nantes nous fournit une base de données conséquente. Cette étude permet d'appréhender la sensibilité de ces diverses approches par la propagation et la quantification des incertitudes.

1 Introduction

Les normes et réglementations actuelles dans le domaine de la propagation acoustique en milieu extérieur ne rendent pas suffisamment compte des incertitudes associées aux niveaux sonores. Les incertitudes expérimentales liées aux paramètres influents sur la propagation et notamment les paramètres micrométéorologiques, sont liées aussi bien aux aspects purement météorologiques (disposition des capteurs, précision de la mesure, échantillonnage) qu'aux aspects méthodologiques (types de capteurs utilisés, méthodes de calcul choisies). Des études concernant la caractérisation des incertitudes et de la variabilité des phénomènes ont déjà été menées en propagation acoustique en milieu extérieur en considérant les incertitudes dans leur globalité [1] [2] [3]. On propose dans ce papier de ne considérer que les incertitudes expérimentales et de quantifier ces dernières par une méthode statistique communément utilisée, la méthode de propagation d'incertitudes. Cette méthode va permettre d'étudier l'effet des différentes sources d'incertitudes expérimentales à travers les systèmes physiques considérés. Après une présentation théorique de la méthode, une application à la propagation acoustique en milieu extérieur est présentée. L'application de la propagation d'incertitude à deux méthodes de mesures des paramètres micrométéorologiques, combinés à un modèle de propagation acoustique de référence, va permettre d'apprécier quantitativement la sensibilité des niveaux sonores aux

incertitudes expérimentales et météorologiques associées aux paramètres micrométéorologiques.

2 Propagation d'incertitudes

2.1 Choix de la méthode

La propagation d'incertitudes dans un système consiste à estimer la dispersion des sorties du modèle due aux incertitudes associées aux entrées du système (erreurs expérimentales, précision de mesures, *etc.*). Cette dispersion peut être caractérisée par différentes quantités d'intérêt telles que des intervalles de prévision, des moments voire même une fonction de probabilité liée aux paramètres (on parle alors de mesure "complète de l'incertitude"). Différentes méthodes de propagation d'incertitudes peuvent être utilisées selon la nature statistique des quantités d'intérêt (statistiques) recherchées. Certaines contraintes méthodologiques sont également liées aux caractéristiques des variables d'intérêt étudiées. Les principales méthodes de propagation d'incertitudes (approximation de Taylor [4], simulation de Monte-Carlo [5], *etc.*) dépendent d'éléments clés [6] :

- la formulation du critère de décision (probabilité de dépassement du paramètre estimé) ;
- les caractéristiques du modèle d'incertitude : variables discrètes ou continues, les dépendances entre les variables, le champ spatial, la dépendance temporelle ou la multidimensionnalité des va-

riables de sortie ;

- les caractéristiques du système et notamment les contraintes en temps de calcul.

Les systèmes étudiés ici correspondent à des méthodes analytiques permettant de calculer les profils et gradients verticaux de célérité du son à partir de mesures micrométéorologiques (*cf* section 3). Par suite, les fonctions de densité de probabilité des profils et gradients seront utilisées comme données d'entrée d'un modèle numérique de propagation acoustique (Équation Parabolique) [7]. Ce système présente donc un caractère multidimensionnel des variables de sortie (obtention finale de spectres en tiers d'octave). De plus, le système étudié n'étant pas une simple fonction mathématique, il est difficile de définir un modèle de propagation d'incertitudes de manière purement analytique (hypothèses de linéarité, vérification du théorème Central-Limite). Afin de passer outre ces contraintes et estimer des fonctions de densité de probabilité, la méthode de Monte-Carlo est la méthode la plus adaptée à notre problématique.

2.2 Méthode de Monte-Carlo

Par convention, le modèle mathématique sera défini par la relation $Y = f(X)$, où Y est une variable de sortie scalaire et X représente les N paramètres d'entrée $(X_1, \dots, X_N)$. Chaque valeur d'entrée X_i est considérée comme une variable aléatoire, Y est donc également une variable aléatoire. Les variables X_i peuvent être représentées par une fonction de densité de probabilité $p_{x_i}(x_i)$ (x_i sont les valeurs possibles prises par X_i). L'*espérance* ou la meilleure estimation de la valeur X_i est notée $E(X_i)$ et l'*incertitude* associée à cette valeur $u(x_i) = \sigma(X_i)$. Ces quantités sont calculées à partir de la fonction de densité de probabilité de X_i . À partir de ces données et connaissant leurs propriétés, notre problème est l'estimation de l'incertitude associée aux variables de sortie notée $u(Y)$. La méthode de Monte-Carlo permet de résoudre des problèmes numériquement en simulant M fois les paramètres d'entrée X (*cf* section 3.4).

Les valeurs x_{ik} des variables d'entrée aléatoires sont simulées à partir de valeurs aléatoires distribuées selon la fonction de densité de probabilité définie préalablement (*cf* section 3.3). Il est donc possible de créer des "échantillons réels" de Y pour chaque tirage k en appliquant l'équation suivante :

$$y_k = f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}), \quad k = 1, \dots, M. \quad (1)$$

L'évaluation de l'incertitude d'une "mesure" indirecte par la méthode de Monte-Carlo peut être synthétisée suivant les étapes suivantes :

1. définir le système étudié ;
2. sélectionner les variables d'entrée X_i qui contribuent à l'incertitude de Y ;
3. identifier la fonction de densité de probabilité g_{X_i} correspondant aux variables d'entrée préalablement sélectionnées ;
4. définir le nombre de tirages de Monte-Carlo ;
5. simuler M séries de nombres aléatoires $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, \dots, x_{iM})$ pour chaque variable d'entrée sélectionnée x_i où $i = 1, \dots, N$;

6. calculer les M échantillons de Y à partir de l'équation $y_k = f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Nk})$ où $k = 1, \dots, M$.

L'incertitude $u(Y)$ est assimilée à l'écart-type de l'échantillon :

$$u(Y) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M y_k^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M y_k \right)^2}{M - 1}}. \quad (2)$$

2.3 Discussion

La méthode de Monte-Carlo est une méthode numérique très efficace pour la propagation des distributions. Cette méthode peut être implémentée pour évaluer l'incertitude de processus analytiques. Les principaux avantages d'une simulation de Monte-Carlo sont que le caractère non-linéaire d'une fonction n'est pas limitant, aucune hypothèse n'est faite sur la distribution des variables, le calcul du nombre de degrés de liberté effectif n'est pas nécessaire, il n'est pas non plus nécessaire de calculer les dérivées partielles des fonctions étudiées. La méthode présente cependant certaines limitations : les temps de calculs peuvent être longs dans certains cas complexes, la sélection de la fonction de densité de probabilité des variables d'entrée peut être difficile du fait de l'imprécision sur les données ou d'un manque de compréhension du processus, la précision de la méthode de Monte-Carlo dépend aussi de la qualité du générateur de nombres aléatoires.

3 Applications

3.1 Systèmes d'étude

Les systèmes étudiés sont des méthodes de mesure indirecte des profils verticaux de célérité du son via les profils verticaux de température et de vitesse du vent. Ces profils peuvent être mesurés grâce à des capteurs "lents" (ou "conventionnels") placés sur un mât à trois hauteurs (système (a)) et des capteurs "rapides" (anémomètre ultrasonique tridimensionnel) (système (b)). Selon la technique de mesure utilisée, les méthodes de calculs des profils sont différentes.

3.1.1 Paramètres de réfraction

Système (a) : les paramètres mesurés par les capteurs "lents" sont la vitesse de vent horizontal $u(m.s^{-1})$, la direction du vent $\theta(^{\circ})$ et la température $T(^{\circ}C)$ à trois hauteurs (par exemple 1, 3, 10 m). Ces paramètres permettent alors de calculer la célérité du son aux différentes hauteurs : $c(z) = \sqrt{\gamma R T(z)} + u(z) \cos \theta$. La méthode de calcul des paramètres de réfraction consiste alors à ajuster par minimisation au sens des moindres carrés un profil vertical de célérité défini par l'équation (6) sur les trois valeurs de célérité.

Système (b) : les anémomètres ultrasoniques mesurent avec une certaine fréquence (typiquement 20 Hz) les composantes de vent dans le plan horizontal et le plan vertical (respectivement u , v et $w (m.s^{-1})$) ainsi que la température sonique. La température sonique

est la température mesurée par l'anémomètre ultrasonique ; elle est généralement inférieure à la température de l'air (d'environ 1 °C) mais présente la même structure temporelle que les composantes de vent. A partir de ces mesures instantanées, complétées par des mesures de température de l'air, sont calculées les échelles caractéristiques de Monin-Obukhov U^* (la vitesse de frottement), T^* (l'échelle de température) et L_{MO} (la longueur de Monin-Obukhov *i.e.* l'altitude à partir de laquelle les forces de cisaillement deviennent négligeables devant les forces convectives). Ces échelles basées sur la théorie de Monin-Obukhov sont définies par les expressions suivantes [8] :

$$\begin{cases} U^* = \left(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2} \right)^{1/4} \\ T^* = \frac{-\overline{w'\theta'_v}}{U^*} \\ L_{MO} = -\frac{\theta_v (\overline{u'w'} + \overline{v'w'})^{3/4}}{kg\overline{w'\theta'_v}} \end{cases}, \quad (3)$$

où k est la constante de von Karman ($k = 0,4$), θ_v la température virtuelle définie par $\theta_v \approx T - 0,01z_{mes}$ avec z_{mes} la hauteur de mesure. Ces expressions montrent la dépendance des échelles caractéristiques avec les covariances de grandeurs mesurées. Le paramètre de stabilité $\xi = \frac{z_{mes}}{L_{MO}}$ définit la stabilité de l'atmosphère. Des paramètres de réfraction a_{log} et b_{lin} peuvent être définis en fonction de ces conditions de stabilité [9].

En conditions neutres et stables ($0 \leq \xi < 1$) :

$$\begin{cases} a_{log} = \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} \frac{0,74T^*}{k} + \frac{U^*}{k} \cos \theta \\ b_{lin} = \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} \left(\frac{T^*}{k} \frac{4,7}{L_{MO}} - \Gamma_d \right) + \frac{U^*}{k} \frac{4,7}{L_{MO}} \cos \theta. \end{cases} \quad (4)$$

En conditions instables ($-0,8 < \xi < 0$) :

$$\begin{cases} a_{log} \approx \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} \frac{0,74T^*}{k} + \frac{U^*}{k} \cos \theta \\ b_{lin} \approx \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} \left(\frac{T^*}{k} \frac{0,74}{L_{MO}} - \Gamma_d \right) + \frac{U^*}{k} \frac{1,0}{L_{MO}} \cos \theta, \end{cases} \quad (5)$$

avec le gradient sec de température adiabatique Γ_d ($= 0,0098 \text{ K m}^{-1}$), la constante des gaz parfaits R ($= 287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), le rapport des capacités calorifiques massiques de l'air ($\gamma = C_p/C_v$), la direction de propagation $\theta(^{\circ})$.

3.1.2 Profils et gradients verticaux de célérité du son

Les paramètres de réfraction ainsi obtenus par les systèmes (a) et (b) permettent de calculer profils et gradients verticaux de célérité du son. Les profils verticaux de célérité peuvent être approchés par l'équation (6) :

$$c(z) = c_0 + a_{log} \log \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) + b_{lin} z, \quad (6)$$

où a_{log} et b_{lin} sont les paramètres de réfraction, c_0 est la célérité effective de référence ($= 343 \text{ m.s}^{-1}$ à 20 °C),

$z(m)$ le paramètre de hauteur et $z_0(m)$ la longueur de rugosité (sa valeur dépend de la nature du sol et s'étend de 10^{-2} à plusieurs mètres). Les gradients de célérité sont ensuite calculés par dérivation de la formulation du profil vertical de célérité :

$$\frac{\partial c(z)}{\partial z} = \frac{a_{log}}{z} + b_{lin}. \quad (7)$$

Ces paramètres calculés (gradients et/ou paramètres de réfraction) sont alors appliqués comme paramètres d'entrée d'un modèle de propagation acoustique. Le modèle considéré dans cette étude est le modèle de propagation de référence basé sur la résolution de l'équation parabolique [7].

3.2 Sélection des paramètres d'entrée

Les données utilisées dans cette étude sont issues d'une campagne expérimentale de trois mois menée en 2007 sur le site du LCPC Nantes [10] [11]. Les mesures issues d'un anémomètre ultrasonique (échantillonnage 20 Hz, hauteur 3 m) et les mesures effectuées à l'aide d'un mât équipé de capteurs conventionnels (1, 3, 10 m) seront utilisées. Les incertitudes expérimentales des deux techniques métrologiques seront étudiées sur des intervalles de temps de 10 et 60 minutes.

- **Système (a)** : dans le cas de mesures par capteurs "lents", les paramètres expérimentaux incertains sont la vitesse horizontale de vent u_a (m.s^{-1}), la température de l'air T_a ($^{\circ}\text{C}$), ainsi que la direction du vent θ_a ($^{\circ}$) aux trois hauteurs du mât ;
- **Système (b)** : dans le cas de mesures par anémomètre ultrasonique, les paramètres expérimentaux entachés d'incertitude sont les trois composantes de la vitesse de vent (u_b, v_b, w_b) (m.s^{-1}), la température sonique T_{sb} ainsi que la température de l'air T_b ($^{\circ}\text{C}$).

Dans le cadre de la propagation d'incertitudes, ces paramètres constituent les paramètres d'entrée et sont considérés comme aléatoires. Dans une approche probabiliste, ces paramètres sont notés X .

3.3 Identification de la fonction de densité de probabilité

Dans l'implémentation d'une méthode de Monte-Carlo, M vecteurs sont construits à partir des fonctions de densité de probabilité $g_{X_i}(\xi_i)$ pour les N quantités d'entrée X_i . Les incertitudes expérimentales sur les paramètres d'entrée servent alors d'incertitude standard $u(x)$ associée à l'estimation x . Estimation et incertitude standard étant les seules informations disponibles en regard d'une quantité X , d'après le principe du maximum d'entropie, une distribution de probabilité gaussienne $\mathcal{N}(x, u^2(x))$ peut être associée à X . La fonction de densité de probabilité de X s'écrit :

$$g_X(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}u(x)} \exp \left(-\frac{(\xi - x)^2}{2u^2(x)} \right). \quad (8)$$

L'espérance et la variance de X s'écrivent alors :

$$E(X) = x \quad V(X) = u^2(x). \quad (9)$$

Pour effectuer un échantillonnage à partir d'une distribution normale $\mathcal{N}(x, u^2(x))$, on procède à un tirage aléatoire κ à partir de la distribution normale $\mathcal{N}(0, 1)$ et on génère ainsi les données $\xi = x + u(x)\kappa$.

3.4 Nombre de tirages de Monte-Carlo

Il est nécessaire de déterminer le nombre de tirages de Monte-Carlo M , *i.e.* le nombre d'évaluations du modèle. Etant donné le grand nombre de données expérimentales à disposition (trois mois de mesures), le nombre de calculs à effectuer ne facilite pas l'application d'une valeur M élevée pour obtenir une connaissance suffisante des distributions des quantités de sortie. Dans ce cas, une alternative est de considérer que la fonction de densité de probabilité des variables de sortie suit une loi normale et procéder comme suit : pour une faible valeur M (50 ou 100), la moyenne et l'écart-type des M valeurs résultantes du modèle sont considérés respectivement y et $u(y)$. Une fonction de densité de probabilité gaussienne $g_Y = \mathcal{N}(y, u^2(y))$ est alors attribuée pour caractériser Y .

4 Résultats et discussion

4.1 Effets sur les paramètres micrométéorologiques

L'étude est menée sur l'intégralité de la campagne expérimentale en sélectionnant cependant des conditions de propagation caractéristiques. Les gradients verticaux de célérité ont initialement été calculés à une hauteur de trois mètres par les deux méthodes sur des intervalles de temps de 10 et 60 minutes sur l'ensemble de la campagne. La figure 1 montre une corrélation forte entre les gradients, malgré la présence d'écarts entre les méthodes, essentiellement en conditions favorables et défavorables (point d'inflexion en conditions homogènes). Ces écarts peuvent être dus à la hauteur de calcul des gradients. En effet, à trois mètres, la tendance logarithmique des profils est forte pour les mesures par capteurs rapides et n'est pas aussi marquée avec les mesures par capteurs lents. Une hauteur de mesures plus élevée (où les profils ont une tendance linéaire) pourrait pallier ces écarts. De plus, la dispersion des données peut s'expliquer par les différences entre les techniques de mesure. Ces remarques sont cependant propres aux conditions micrométéorologiques considérées ; les gradients verticaux de célérité peuvent en effet être scindés en deux populations bien distinctes selon leur signe.

Dans cet article, seuls les résultats obtenus dans des conditions nettement favorables à la propagation (valeur du gradient vertical de célérité déterministe $> 0,1 \text{ s}^{-1}$) seront présentés. Un échantillon caractéristique et représentatif de ces conditions est sélectionné dans la base de données sur des intervalles de 10 et 60 minutes.

4.1.1 Intervalle de 10 minutes

Les profils verticaux de célérité estimés après propagation d'incertitudes sur un intervalle de temps de 10 minutes présentent des disparités entre les mesures par

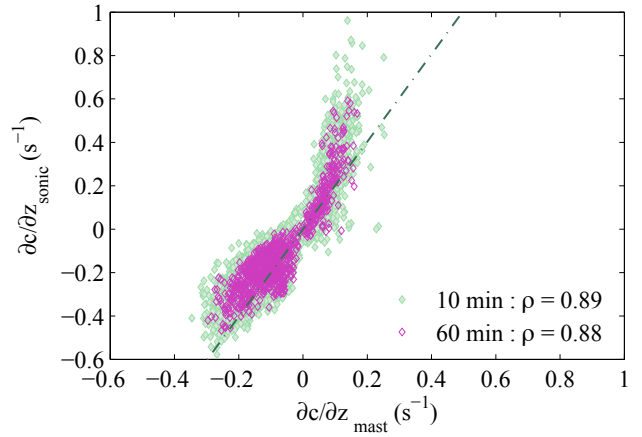


FIGURE 1 – Corrélation entre les gradients de célérité calculés par capteurs lents et capteurs rapides sur des intervalles de 10 et 60 min.

capteurs lents ou rapides. La figure 2 montre une certaine cohérence, une faible dispersion et une tendance logarithmique bien marquée des profils mesurés à l'aide du système (b). Les profils mesurés par le système (a) sont davantage dispersés et ne présentent pas toujours une tendance logarithmique marquée. Dans les deux cas, la dispersion des profils augmente avec la hauteur z . Cette disparité sur les profils verticaux de célérité a un effet sur les valeurs de gradients verticaux de célérité à trois mètres. Les histogrammes des gradients (Figure 2) rendent compte de l'étendue des données avec des gradients verticaux moyens proches, aux écarts près observés figure 1 (0,15 pour le système (a) et 0,12 pour le système (b)). Les écarts-type sur les gradients mesurés par le système (a) et (b) sont respectivement de $0,06 \text{ s}^{-1}$ et $0,01 \text{ s}^{-1}$. Ces résultats témoignent de la sensibilité des deux approches et invitent à utiliser le système (b). Le système (a) est en effet soumis à des erreurs météorologiques majeures dues à la multiplication des capteurs, capteurs qui eux-mêmes présentent une imprécision plus grande qu'un anémomètre ultrasonique. De plus, la méthode d'estimation des paramètres de réfraction par ajustement des profils sur les points de mesure est soumise à des remises en question (manque d'informations en $z = z_0$, les éventuelles inversions peuvent avoir un sens physique ou peuvent être dues à des erreurs de mesures, la valeur z_0 est généralement une constante et pourrait être une variable ajustable, *etc.*).

4.1.2 Intervalle de 60 minutes

Le passage à un intervalle de temps de 60 minutes montre une augmentation de la dispersion globale des profils verticaux de célérité (Figure 3), menant à des valeurs de gradients verticaux de célérité négatives pour le système (a). L'augmentation de la dispersion des profils verticaux de célérité pour le système (b) est plus nette. Comme dans le cas d'un intervalle de 10 minutes, la dispersion augmente avec l'altitude mais peut atteindre 6 m.s^{-1} à 20 m (contre 1 m.s^{-1} sur 10 min). Les écarts-type sur les gradients mesurés par le système (a) et par le système (b) sont respectivement de $0,12 \text{ s}^{-1}$ et $0,08 \text{ s}^{-1}$.

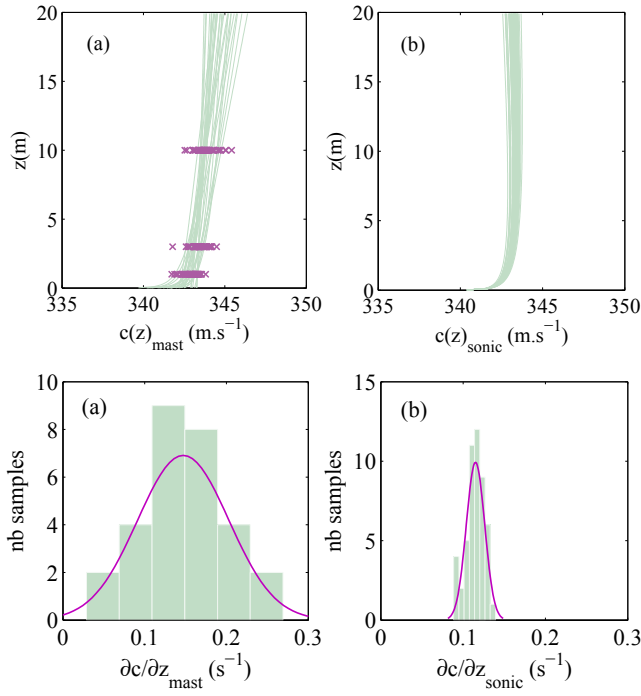


FIGURE 2 – Profils verticaux de célérité et histogrammes des gradients verticaux de célérité par capteurs lents (a) et capteurs rapides (b) sur un intervalle de 10 minutes.

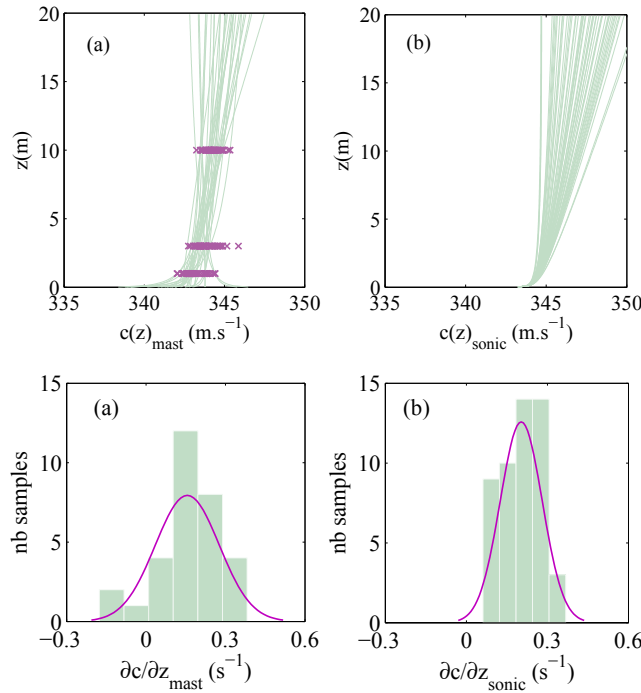


FIGURE 3 – Profils verticaux de célérité et histogrammes des gradients verticaux de célérité par capteurs lents (a) et capteurs rapides (b) sur un intervalle de 60 minutes.

Ces écarts-type rendent à nouveau compte de la disparité entre les méthodologies.

4.1.3 Bilan

Pour ces échantillons spécifiques, le passage d'un intervalle de 10 à 60 minutes a multiplié l'incertitude

sur les gradients verticaux de célérité par deux pour le système (a) et par huit pour le système (b). Cette étude rend compte de la variabilité temporelle des phénomènes et permet de quantifier cet effet sur l'estimation des paramètres micrométéorologiques. Cette étude donne des pistes intéressantes sur les approches métrologiques à envisager pour estimer des paramètres de réfraction en minimisant les erreurs sur ces estimations. L'approche par capteur rapide permet de minimiser l'étendue des valeurs des paramètres de réfraction et par suite de gradients verticaux de célérité acoustique. Ces résultats peuvent être liés à l'utilisation de la formule approchée pour a_{log} et b_{lin} (Equations (4) et (5)) qui contraint le domaine de variation des profils et réduit de ce fait la dispersion. Le choix de l'intervalle de temps a une incidence non-négligeable sur l'estimation des paramètres de réfraction et des profils verticaux de célérité.

4.2 Effet sur les niveaux sonores

Ces erreurs métrologiques et méthodologiques sur les paramètres micrométéorologiques ont des effets sur la prévision de la propagation acoustique et par conséquent des niveaux sonores. Les distributions des paramètres de réfraction sont appliquées en entrée du modèle d'équation parabolique afin d'appréhender l'effet des erreurs sur les spectres (en relatif à 10 m de la source). La configuration choisie est la suivante : source et récepteur à une hauteur de 2 m, site plan, sol herbeux (résistance spécifique au passage de l'air $\sigma = 150 \text{ kN.s.m}^{-4}$ et épaisseur $e = 0,04 \text{ m}$), distance de propagation jusqu'à 500 m, température fixée à 20°C , calcul en tiers d'octave puis calcul du niveau global (en dB), non prise en compte de la turbulence (le gradient de célérité étant positif, l'influence de la turbulence est moindre). La moyenne et l'étendue (écart entre le minimum et le maximum) des niveaux sonores en relatif à dix mètres de la source à trois distances de propagation (50, 250 et 500 m) sont présentées dans le Tableau (1) pour les systèmes considérés.

	Système	10 min		60 min	
		(a)	(b)	(a)	(b)
50 m	moyenne	-13,4	-13,6	-13,3	-13,4
	étendue	0,3	0,1	0,8	0,4
250 m	moyenne	-25	-27,3	-25,1	-24,2
	étendue	6,8	0,9	13,7	3,7
500 m	moyenne	-30,0	-33,5	-30,9	-30,4
	étendue	5,8	0,4	23,3	2,1

TABLE 1 – Moyenne et étendue des niveaux sonores relatifs aux niveaux à 10 m (dB) pour les systèmes (a) et (b) à trois distances de propagation.

L'étendue des niveaux sonores est toujours plus grande dans le cas du système (a) que dans le cas du système (b) ce qui s'explique aisément par une plus forte dispersion des paramètres de réfraction et correspond aux résultats attendus. Le passage à des distances de propagation plus grandes, de 50 m à 250 m ou de 50 m à 500 m, montre une augmentation de l'étendue des niveaux sonores. En effet, plus les distances de propagation sont grandes, plus les effets de réfraction

sont marqués. Cette observation n'est cependant pas systématiquement vérifiée en comparant l'étendue des niveaux à 250 et 500 m. En effet la figure 4 montre une augmentation de l'étendue des niveaux sonores jusqu'à une distance d'environ 350 m. L'étendue tend alors à diminuer de 1 dB pour le système (a) et de 2 dB pour le système (b) jusqu'à la distance d'étude maximale. Ces observations sont expliquées par l'existence de zones interférentielles notamment à 500 m.

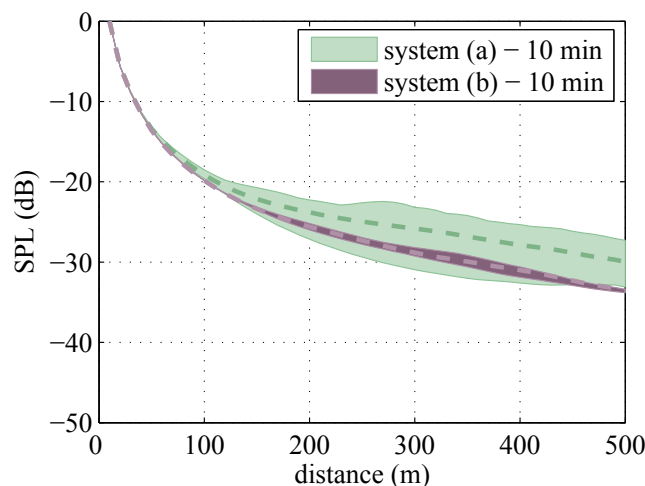


FIGURE 4 – Moyenne et étendue des niveaux sonores calculés sur 10 min en fonction de la distance à la source pour les systèmes (a) et (b).

Cette étude permet de montrer la forte sensibilité des niveaux sonores aux paramètres micrométéorologiques et notamment aux erreurs expérimentales et aux approches méthodologiques utilisées. A une distance donnée, l'étendue des niveaux sonores peut atteindre 24 dB (système (a) sur 60 minutes) pour ce cas d'étude. Le choix de l'intervalle de temps et de la méthode de mesure a donc un impact considérable sur l'estimation des niveaux sonores.

5 Conclusion

L'application de la méthode de propagation d'incertitude aux paramètres micrométéorologiques influents en propagation acoustique en milieu extérieur permet d'appréhender la dispersion des niveaux sonores due aux erreurs expérimentales, à la variabilité temporelle et aux approches méthodologiques utilisées. Cette étude tend à remettre en question la méthode conventionnelle de mesure indirecte des profils et gradients verticaux de célérité du son par capteurs lents. La prise en compte du paramètre de rugosité z_0 dans la procédure d'ajustement des profils pourrait remédier aux fortes dispersion observées dans cette étude. Le choix de l'intervalle de temps d'étude est également discutable du fait d'une grande dispersion des paramètres micrométéorologiques impliquant une dispersion importante sur les niveaux sonores globaux. Dans ce papier, l'étude est menée pour des conditions favorables à la propagation ; les cas de conditions homogènes et défavorables seront présentés dans des études ultérieures. Cette méthode statistique pourrait également être appliquée afin d'estimer quan-

titativement le paramètre le plus influent sur les profils et gradients verticaux de célérité et par suite sur les niveaux sonores, en propageant l'incertitude associée à chaque paramètre individuellement ou en procédant à des études de sensibilité. Cette étude ne rend compte que de la variabilité des paramètres micrométéorologiques et pourrait être combinée avec une étude de sensibilité sur les paramètres acoustiques de sol, sur les paramètres géométriques, et en prenant en compte les incertitudes de modélisation.

Références

- [1] Ecotière D., "Influence des fluctuations des conditions météorologiques sur la dispersion des niveaux sonores", *Acoustique et Technique* 51, 12-17 (2008)
- [2] Baume O., Wackernagel H., Gauvreau B., Junker F., Bérengier M., Chiles J.-P., "Space and time exploration of acoustical series under the influence of various micrometeorological stability conditions", *GEOstatistics for ENVironmental applications*, Rhodes (G), 45-57 (2006)
- [3] Pettit Chris L., Wilson D. Keith, "Proper orthogonal decomposition and cluster weighted modeling for sensitivity analysis of sound propagation in the atmospheric surface layer", *J. Acoust. Soc. Am.* 122(3), 1374-1390 (2007)
- [4] "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland (1993) corrected and reprinted in 1995
- [5] Robert C., Casella G., "Monte-Carlo Statistical Methods", New York : Springer-Verlog (1999)
- [6] de Rocquigny E., Devictor N., Tarantola S., "Uncertainty in industrial practice - A guide to Quantitative Uncertainty Management", *John Wiley & Sons* (2008)
- [7] Lihoreau B., Gauvreau B., Blanc-Benon P., Bérengier M., "Outdoor sound propagation modeling in realistic environments : a coupling method using parabolic equation and atmospheric model", *J. Acoust. Soc. Am.* 120(1), 110-119 (2006)
- [8] Stull R.B., "An introduction to boundary layer meteorology", Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands (1988)
- [9] Heimann D., Bakermans M., Defrance J., Kunher D., "Vertical sound speed profiles determined from meteorological measurements near the ground", *Acta Acustica* 93, 228-240 (2007)
- [10] Gauvreau B., "Methodological and metrological benchmarks for determining experimental values of meteorological parameters", In Invited paper to ASA/EEA/SFA joint congress, Acoustics'08, Paris (2008)
- [11] Gauvreau B., Ecotière D., Lefèvre H., Bonhomme B., "Propagation acoustique en milieu extérieur complexe. Caractérisation expérimentale in-situ des conditions micrométéorologiques. Eléments méthodologiques et métrologiques", *Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées* (2009)