

Prise en compte des incertitudes en acoustique de l'environnement

David Écotière

CEREMA/DTer Est
Équipe de recherche en Acoustique ERA32
6, rue Jean Mentelin
BP 9
67035 Strasbourg CEDEX 9
Tél. : 03 88 77 79 33
E-mail : david.ecotiere@cerema.fr

Résumé

Lorsqu'on rend compte du résultat d'un mesurage acoustique, il est nécessaire de donner une indication quantitative permettant d'estimer sa fiabilité. En l'absence de cette information, communément appelée « incertitude », aucune comparaison ne peut être effectuée entre plusieurs résultats de mesurage ou entre un résultat et une valeur de référence, fournie par exemple par une spécification, une norme ou un texte réglementaire. L'incertitude permet de rendre compte du degré de précision avec lequel on connaît le résultat de mesurage et permet de caractériser la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées à une mesure acoustique. Suite à l'évolution des connaissances et du matériel, des travaux ont été engagés ces dernières années afin de fournir des informations pertinentes sur l'estimation des incertitudes en acoustique de l'environnement.

T

oute opération de mesure est inéluctablement entachée d'erreurs. Ces erreurs peuvent avoir pour origine le système de mesure, le processus de mesurage mis en œuvre ou bien la grandeur mesurée elle-même. Il en découle que la valeur « vraie » de toute grandeur mesurée (appelée « mesurande ») est à jamais inconnue et que tout résultat de mesurage ne peut fournir qu'une valeur approchée de celle-ci [1] [2] [3].

Lorsqu'on rend compte du résultat d'un mesurage, il est nécessaire de donner une indication quantitative permettant d'estimer sa fiabilité. En l'absence de cette information, communément appelée « incertitude », aucune comparaison ne peut être effectuée entre plusieurs résultats de mesurage, ou bien encore entre un résultat et une valeur de référence, fournie par exemple par une spécification, une norme ou un texte réglementaire. L'incertitude permet de rendre compte du degré de précision avec laquelle on connaît le résultat de mesurage, et de caractériser la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande [1] [2] [3].

Si l'existence de causes d'incertitudes dans un processus de mesurage est généralement facilement admise par tout praticien de la mesure, le concept d'incertitude est souvent

difficile à comprendre ou à admettre pour des personnes qui ne sont pas familières avec la pratique métrologique. De nombreuses causes peuvent être invoquées à cet état de fait : l'association faite à tort entre « incertitude » et mauvaise qualité ou mauvaise maîtrise du processus de mesurage (si le résultat est incertain, c'est que la mesure a été mal effectuée), l'inconfort intellectuel de devoir cohabiter avec l'incertain (comment prendre une décision sereinement si rien n'est sûr ?), la complexité souvent attribuée à l'estimation de l'incertitude.

Une opération de mesurage acoustique n'échappe pas, bien entendu, à ces considérations. Pendant de nombreuses années, l'estimation des incertitudes en acoustique était essentiellement pratiquée par des laboratoires de métrologie de pointe (métrologie primaire, laboratoire de recherche...) et très peu dans le domaine de l'acoustique de l'environnement. Désormais, les normes d'essais du domaine imposent depuis plusieurs années de fournir des informations sur la manière d'évaluer les incertitudes. Suite à l'évolution des connaissances et du matériel, des travaux ont été engagés dans ce sens et la norme française Pr S 31-115-1 [4], par exemple, doit permettre prochainement de fournir des informations pertinentes sur l'estimation des incertitudes en acoustique de l'environnement.

Généralités

Quel est l'objet de la mesure ?

La première tâche à réaliser lors d'un processus d'estimation d'incertitude est de définir très précisément l'objet exact de la mesure. Cette tâche qui peut paraître triviale est pourtant souvent négligée et peut être, par la suite, à la source de nombreuses confusions.

Par exemple, une mesure de bruit routier peut avoir plusieurs buts dont chacun entraînera un calcul différent de l'incertitude :

- Si l'objectif est d'obtenir uniquement une estimation du bruit pendant la période d'observation (mesure de constat, au sens de la norme NF S 31-085 [5]), l'incertitude proviendra essentiellement du matériel et de la mise en œuvre expérimentale.
- Si l'objectif est d'estimer un niveau sonore caractéristique d'un trafic moyen de l'infrastructure (niveau sonore de long-terme trafic [5]), l'imprécision sur les données de trafic recueillies sur la méthode de recalage adoptée entrera dans le calcul de l'incertitude.
- Enfin, si l'objectif est d'estimer le niveau sonore moyen rendant compte des conditions moyennes du site en termes de trafic ou de météorologie (niveau sonore de long-terme [5]), les incertitudes sur les conditions environnementales ainsi que le choix et la durée de la période d'observation ajoutent de nouvelles composantes à l'incertitude. Ce dernier cas de figure fait intervenir des composantes qui vont jouer sur la représentativité du résultat obtenu par rapport à la grandeur que l'on cherche à caractériser.

Erreur, incertitude-type, incertitude composée, incertitude élargie

L'erreur de mesure est l'écart entre un résultat de mesurage et la valeur vraie. Cette erreur peut être divisée en deux composantes : l'erreur systématique et l'erreur aléatoire. L'erreur systématique (biais) est la composante qui, dans des mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible ; l'erreur aléatoire est la composante qui, dans des mesurages répétés, varie de façon imprévisible [6] (voir Fig. 1).

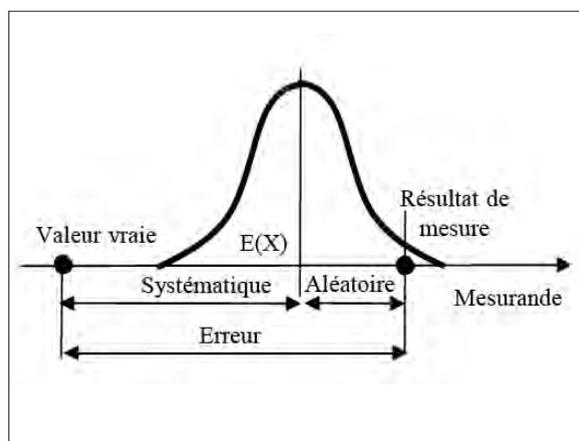


Fig. 1 : Décomposition de l'erreur en partie systématique et partie aléatoire

L'erreur systématique entraîne un biais b sur la mesure, et lorsque celui-ci est connu il est généralement recommandé de le corriger. L'erreur aléatoire totale est caractérisée par une incertitude estimée à l'aide d'un écart-type appelée incertitude-type composée u . Lorsque le résultat a été corrigé du biais, l'incertitude-type composée contient toutes les erreurs aléatoires.

Pour exprimer l'incertitude finale, on calcule l'incertitude élargie obtenue en multipliant l'incertitude-type composée par un facteur d'élargissement k :

$$U = k \times u(y) \quad (1)$$

La valeur du facteur d'élargissement est choisie sur la base du niveau de confiance que l'on s'accorde pour définir l'intervalle $[y-U, y+U]$, en général $k=2$ ou 3. Choisir $k=2$ (resp. 3) revient à considérer un intervalle avec un niveau de confiance d'approximativement 0,95 (resp. 0,99). Exprimer un résultat de mesure avec un intervalle de confiance où $k=2$ revient ainsi à dire que la valeur du mesurande a 95 % de chance de se trouver dans l'intervalle présenté.

La présentation du résultat assorti de son incertitude peut alors se faire de la façon suivante :

$$Y = Yb \pm kuc \quad (k=2) \quad (2)$$

ou bien encore

$$Y = Yb \text{ compris dans l'intervalle à 95 \%} \\ [LC - k \times uC, LC + k \times uC] \quad (3)$$

où $Yb = y - b$ est le résultat de mesure corrigé de son biais.

Facteurs d'influence

Différents phénomènes, appelés grandeurs d'influence, facteurs d'influence ou encore poste d'incertitude, peuvent affecter le degré de précision d'un résultat de mesurage. Leurs effets proviennent aussi bien de phénomènes physiques que du procédé de mise en œuvre expérimental adopté. En acoustique de l'environnement, les principaux facteurs d'influence sont présentés dans le tableau 1.

Instrumentation	Mise en œuvre
Directivité du microphone	Durée de la mesure
Linéarité de niveau	Post-traitement
Pondération fréquentielle (A, C, Z)	Conditions environnementales
Pondération temporelle (F, S, I)	Conditions météorologiques locales au niveau du microphone (vent, pluie...)
Température et humidité de l'air	Champs électromagnétiques extérieurs au dispositif de mesure acoustique
Pression de l'air ambiant	
Niveau du calibre	
Alimentation électrique	

Tabl. 1 : Principaux facteurs d'influence [4] [8]

Chaque facteur d'influence pourra être une source d'incertitude dont l'importance variera d'un facteur à l'autre et en fonction du protocole de mesurage.

Prise individuellement, l'influence de certains facteurs pourra apparaître comme faible (de l'ordre de quelques dixièmes de dB). Il est cependant prudent, lors du calcul, de les conserver car c'est l'accumulation de tous les facteurs qui contribuera à une incertitude finale non négligeable.

Suivant l'objectif de la mesure, des composantes d'incertitudes supplémentaires peuvent apparaître et affecter la représentativité du résultat. On peut ainsi citer les conditions météorologiques (vent, température...) ou le choix des périodes d'observation si l'on cherche à caractériser un niveau sonore de long-terme (sur une année par exemple) à partir d'une mesure sur une période plus courte. Cette incertitude est caractéristique d'une incertitude d'échantillonnage statistique.

Panorama des méthodes de calcul de l'incertitude

Typologie des méthodes

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour estimer les incertitudes. Les trois principales approches sont les suivantes :

- approche expérimentale par essais inter-laboratoire : ISO 5725 [9] ;
- approche par modélisation mathématique à l'aide de la loi de propagation de l'incertitude : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) [3] ;
- approche par modélisation informatique à l'aide de la loi de propagation des distributions : Supplément 1 au Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure [10].

Le choix entre ces méthodes s'effectue selon que le processus de mesure est modélisable à l'aide d'une équation mathématique, à l'aide d'un modèle numérique informatique, ou non modélisable (Figure 2), ou bien encore selon des impératifs propres à chaque essai (essai difficilement répétable...).

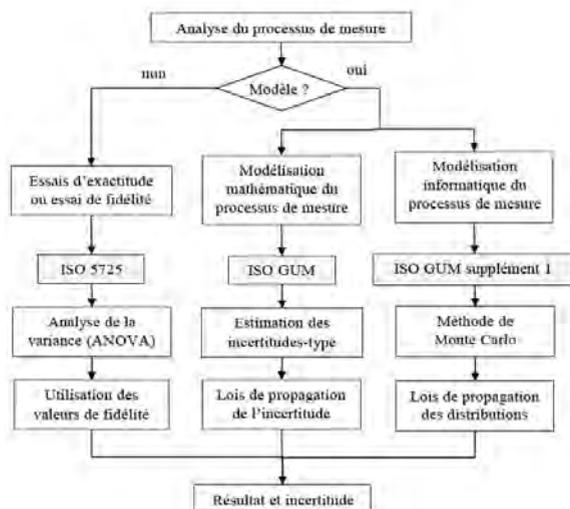


Fig. 2 : Typologie des méthodes d'évaluation de l'incertitude (adapté de [1] et [2])

Méthode ISO 5725

L'approche de l'ISO 5725 [9] permet d'étudier globalement les variations d'un mesurande pour en tirer son incertitude. Cette approche présente l'avantage de ne pas requérir nécessairement une connaissance précise des différents facteurs d'influence dans leur détail. Elle permet d'évaluer l'incertitude d'un essai à partir des deux indicateurs qui constitue l'exactitude [6] : la justesse et la fidélité, qui sont obtenues à partir d'une méthode statistique d'analyse de la variance (ANOVA) menée sur les résultats d'essais inter laboratoires.

Lorsqu'elle est disponible (il n'est pas toujours possible de l'estimer), la justesse fournit une estimation du biais, tandis que l'écart-type de fidélité fournit une estimation de l'incertitude-type. La fidélité la plus couramment utilisée est la reproductibilité qui ne prend en compte que la variation intra-laboratoire (répétabilité) et inter-laboratoires (voir Figure 3 pour une illustration de ces grandeurs). Justesse et fidélité peuvent être directement fournies dans les normes d'essai : la norme de caractérisation *in situ* des performances acoustiques des revêtements de chaussées à partir d'une mesure en continu XP S 31-145 estime par exemple sa reproductibilité à $R=1,4$ dB(A) et sa répétabilité à $r=0,6$ dB(A). Lorsque ce n'est pas le cas, il y a lieu de procéder à des essais inter-laboratoires spécifiques.

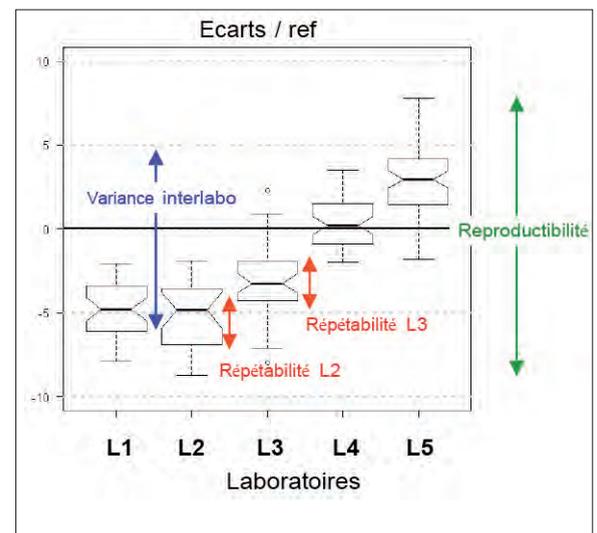


Fig. 3 : Exemple de résultats d'une campagne inter laboratoire selon l'ISO 5725 : boîtes à moustaches rendant compte de la variance intra laboratoires (répétabilité) et inter laboratoires. La reproductibilité est la somme de la répétabilité moyenne et de la variance inter laboratoire

Méthode GUM – Propagation de l'incertitude

Cette méthode présentée dans le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) [3] est celle qui est retenue dans le projet de norme Pr 31-115-1 [4]. Elle nécessite la connaissance d'une relation mathématique entre le mesurande y (un niveau sonore, une émergence sonore, un niveau d'exposition SEL...) et les différents facteurs d'influences x_1, \dots, x_N : $y=f(x_1, \dots, x_N)$. Un développement de la fonction f au premier ordre permet d'obtenir une estimation de la variance du résultat de mesure u^2 en fonction des variances des facteurs d'influence $u^2(x_i)$ et de leurs covariances respectives $u(x_i, x_j)$:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) u(x_i, x_j) \quad (4)$$

Cette relation constitue la loi de propagation de l'incertitude et permet d'obtenir l'incertitude-type u du mesurande.

Les dérivées partielles $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ sont également appelées

coefficients de sensibilité : ils traduisent l'intensité de l'influence de chaque facteur sur la valeur du mesurande. Lorsque les facteurs d'influence ne sont pas corrélés entre eux, cette relation prend les formes plus connues suivantes :

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (5a)$$

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (5b)$$

où $u_i(y) = c_i u(x_i)$ traduit la variation qu'entraîne l'effet du facteur x_i sur la valeur du mesurande y lorsque ce facteur varie de $u(x_i)$. La relation (5a) ne peut être utilisée que lorsque la fonction f est modélisable (mathématiquement ou numériquement) ; elle permet d'utiliser directement les fluctuations des facteurs d'influences comme grandeur d'entrée. Dans le cas contraire, c'est la relation (5b) qui est appliquée et nécessite de connaître les incertitude-types $u_i = u(y)$ de chaque facteur d'influence. Pour estimer ces incertitude-types, deux approches sont décrites dans le GUM : les méthodes de type A et de type B. Ces deux méthodes peuvent être complémentaires et utilisées l'une ou l'autre suivant le facteur d'influence considéré.

L'incertitude finale est habituellement présentée en acoustique avec un chiffre significatif : la norme Pr 31-115-1 préconise de conserver deux chiffres significatifs dans les incertitude-types afin de ne pas perdre de précision dans le calcul de composition des incertitudes finales (même s'il est bien entendu illusoire de prétendre à une telle précision en acoustique).

Estimation des incertitude-types par méthode de type A

Lorsque le nombre de résultats de mesure est insuffisant, en qualité et en quantité, une évaluation de type A peut être utilisée. Cette méthode permet d'évaluer de manière « simple » l'incertitude sur une campagne de mesures en étudiant la distribution des résultats autour d'une moyenne centrale obtenue à partir de n échantillons. La meilleure estimation du résultat est donnée par la moyenne arithmétique de ces n observations et l'incertitude de type A associée est donnée par :

$$u_A(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

où s est l'écart-type expérimental.

L'incertitude de répétabilité est un exemple d'incertitude estimée avec une méthode de type A. La figure 4 présente un autre exemple d'incertitude-type obtenue par une méthode de type A pour un autre facteur d'influence.

Estimation des incertitude-types par méthode de type B

Lorsque l'expérimentation ne fournit qu'un nombre limité de valeurs, voire qu'une seule valeur, la méthode utilisée consiste à estimer les incertitudes-types à partir de diverses sources de données : documents « constructeur », documents normatifs, résultats expérimentaux fiables, certificats d'étalonnage...

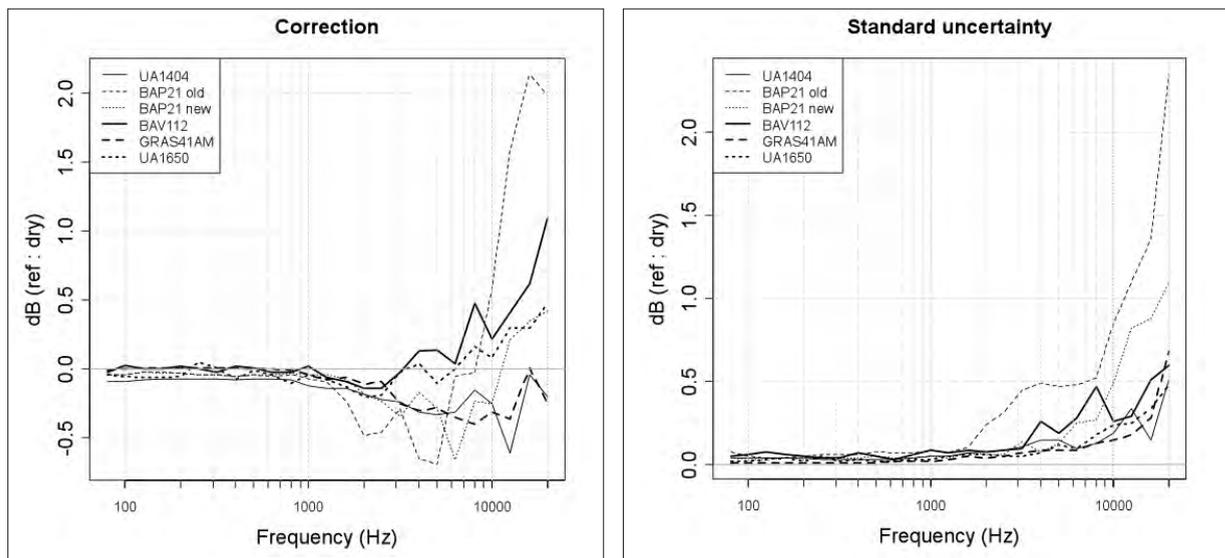


Fig. 4 : Influence de la présence d'eau dans une boule anti-vent. Correction de biais (gauche) et incertitude-type (droite), en fonction de la fréquence et pour différents types de protection anti-vent [7]

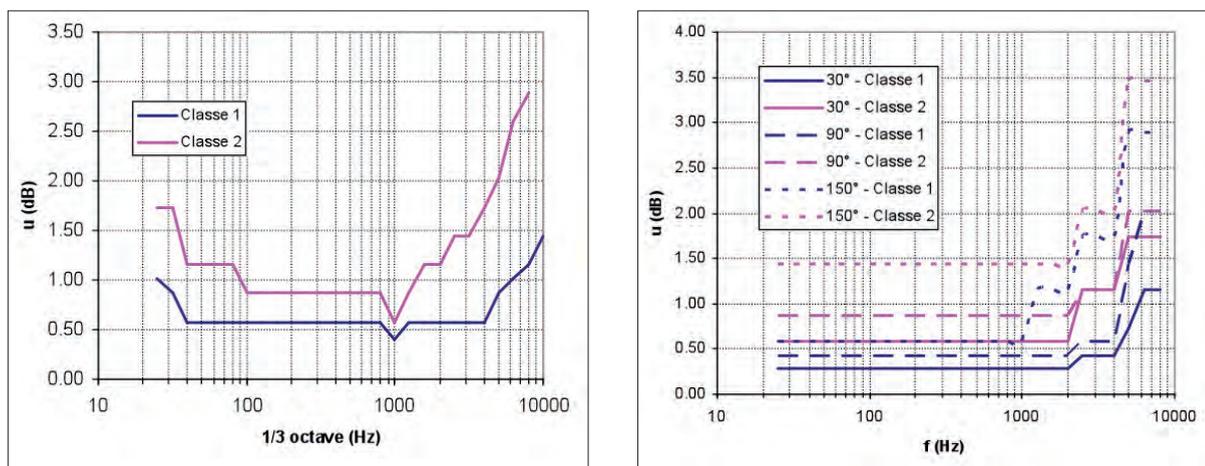


Fig. 5 : Incertitude-type obtenues à partir de la norme CEI 61672-1 [8] pour l'influence de la pondération fréquentielle A (gauche) et de la directivité du dispositif de mesure pour différents angles (droite)

Principaux facteurs d'influence		Incertitude-type	
		Classe 1	Classe 2
Erreur de linéarité de niveau		0,46	0,63
Tension d'alimentation		0,06	0,12
Pression statique de l'air	85 kPa à 108 kPa	0,23	0,40
	65 kPa à 85 kPa	0,52	0,92
Température de l'air	-10 à + 50°C	0,29	-
	0 à + 40°C	-	0,57
Humidité de l'air	20 % à 90 %	0,29	0,57
Champs à la fréquence du secteur et à fréquence radioélectrique		0,58	1,15
Calibre		0,17	
Écran anti-vent	63 Hz à 2 kHz	0,28	
	2 kHz à 8 kHz	0,46	

Tabl.2 : Incertitude-types des principaux facteurs d'influence pour les appareils de classe 1 et 2 estimées à partir de la norme CEI 61672-1 [8]

La norme CEI 61672-1 [8], qui définit les spécifications des sonomètres, permet de fournir des valeurs forfaitaires d'incertitude-type pour divers facteurs. Des exemples de valeurs d'incertitude-types utilisables en acoustique de l'environnement sont présentés dans le tableau 2 et sur la figure 5, pour des appareils de classe 1 et 2.

Les valeurs de limite de tolérance issues des normes CEI 61672-1 et CEI 60942 [11] correspondent à des variations maximales pour le classement des appareils. Le cumul des différents postes à l'aide de la relation (5b) indique que l'instrumentation entraîne une incertitude élargie minimale de $\pm 2,2$ dB(A) ($k=2$).

Afin de réduire les incertitudes, il peut être plus intéressant d'utiliser des données propres au matériel utilisé lors de la mesure, à partir du certificat d'étalonnage de l'appareil par exemple [12]. Toutefois, afin de limiter les incertitudes liées à la dérive des appareils, ceux-ci doivent être étalonnés et autocontrôlés (ISO 61672-3) régulièrement (respectivement tous les 2 ans et tous les 6 mois en général).

Fréquences (Hz)	Incertitude-types u_i (dB)		
	Certificat d'étalonnage	Classe 1 Norme	Écarts
63	0,5	0,6	-0,1
125	0,5	0,6	-0,1
250	0,5	0,6	-0,1
500	0,3	0,6	-0,3
1000	0,3	0,4	-0,1
2000	0,4	0,6	-0,2
4000	0,4	0,6	-0,2
8000	0,4	1,2	-0,8
10000	0,4	1,4	-1,0

Tabl. 3 : Comparaison des incertitudes élargies issues de l'extrait d'un certificat d'étalonnage ou calculées à partir de la norme CEI 61672-1 [8]

L'exemple présenté dans le tableau 3 montre qu'il est par exemple possible ici d'obtenir une réduction des postes d'incertitude qui peut être intéressante pour certaines fréquences et de réduire ainsi l'incertitude due à l'instrumentation à une incertitude élargie à $\pm 1,9$ dB(A) ($k=2$).

L'estimation des incertitudes liées aux conditions opératoires et celles liées à l'opérateur doivent être spécifiées dans les normes de mesurage ou bien étudiées spécifiquement. Elles sont à prendre en compte dans le bilan d'incertitude final.

Méthode GUM-supplément 1 - Propagation des distributions

Lorsqu'il est possible de modéliser numériquement le processus de mesure, le supplément 1 du GUM [10] propose une alternative à la loi de propagation des incertitudes pour estimer l'incertitude associée à un résultat de mesure. Cette méthode est basée sur la propagation des lois de distribution des facteurs d'influence pour estimer la loi de distribution du mesurande, à l'aide d'une méthode de Monte Carlo (Fig. 6).

Le principe est d'effectuer de multiples estimations du mesurande en partant de multiples tirages aléatoires indépendants, selon les fonctions de distribution des facteurs d'influence. L'ensemble des estimations obtenues permet de construire la fonction de distribution du mesurande. L'incertitude-type et une estimation de la valeur moyenne du résultat de mesure sont alors obtenues directement à partir de la loi de distribution obtenue.

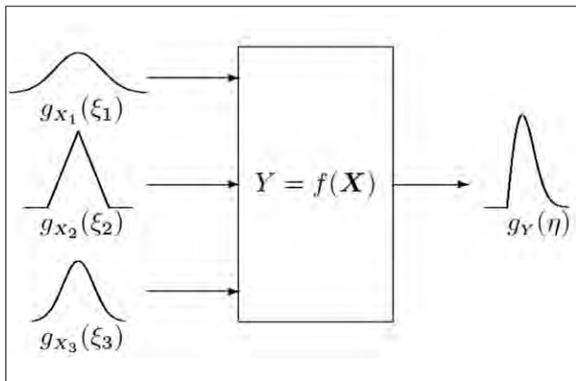


Fig. 6 : Illustration du principe de propagation des distributions pour $N = 3$ facteurs d'influence indépendants [10]

Cette méthode présente l'avantage de fournir davantage d'informations sur le comportement du mesurande que les 2 méthodes précédentes, en considérant la forme réelle de la distribution du mesurande. Elle permet d'étudier de façon plus systématique des facteurs d'influence qu'il est difficile d'appréhender avec les autres méthodes (voir un exemple de résultat obtenu avec cette méthode sur la figure 7). Elle présente cependant l'inconvénient de ne pas permettre d'accéder facilement aux contributions respectives de chaque facteur d'influence, et d'identifier ainsi sur quel facteur d'influence il est possible d'agir pour réduire l'incertitude.

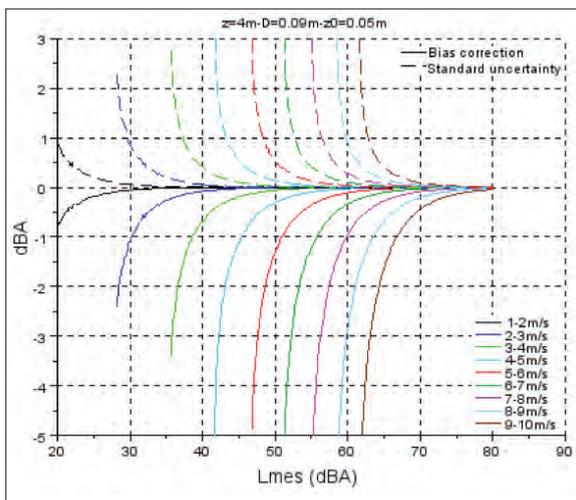


Fig. 7 : Bruit du vent sur une boule anti-vent de 9 cm de diamètre : correction de biais (traits pleins) et incertitude-type (tirets) en fonction du niveau sonore mesuré (hauteur $z=4$ m) et pour différentes vitesses de vent [13]

Autres sources d'incertitude

Outre l'instrumentation et la mise en œuvre expérimentale, d'autres sources d'incertitude peuvent entrer dans le bilan d'incertitude.

De nombreux indicateurs utilisés en acoustique de l'environnement ne sont pas mesurés directement mais peuvent être issus d'un calcul nécessitant un post-traitement manuel qui peut être une source d'incertitudes. Cela peut-être le cas par exemple d'un Leq dont les bornes temporelles seraient fixées manuellement, plus ou moins précisément.

L'indicateur d'émergence est également le résultat d'un calcul car il est défini comme la différence de deux niveaux sonores mesurés, soit sur des périodes différentes (appelées période de bruit ambiant et période de bruit résiduel), soit simultanément mais à des endroits différents. Dans ce cas de figure, les biais des facteurs d'influence attachés à la mesure des niveaux sonores peuvent se compenser totalement ou en partie; on obtient ainsi un biais moindre pour l'émergence. En revanche, l'incertitude de l'émergence est en général plus élevée que celle associée à la mesure de chaque niveau sonore. On peut montrer que l'incertitude-type de l'émergence E , pour un facteur d'influence i , peut s'estimer à l'aide de la relation suivante [4] :

$$u_{E,i}^2 = u_{A,i}^2 + u_{R,i}^2 (1 - 2\rho_i 10^{-E/10}) \quad (7)$$

où $u_{E,i}^2$ et $u_{R,i}^2$ sont les incertitude-types du facteur d'influence pour les niveaux sonores relevés au cours de la période de mesure de bruit ambiant et de bruit résiduel. ρ_i est un facteur rendant compte de la différence possible de l'influence du poste i sur la contribution sonore du bruit résiduel pendant les mesures de bruit ambiant et résiduel. Il peut prendre des valeurs allant de 0 à 1, mais en l'absence de connaissance sur la valeur de cette grandeur, on adoptera par défaut $\rho_i = 0$, ce qui revient à majorer l'incertitude.

Certains postes d'incertitude ne font pas l'objet de documentations techniques issues de laboratoires ou de constructeurs ; c'est notamment le cas de l'influence de l'opérateur qui est liée à sa compétence à mettre en œuvre une méthode d'essai. Il est assez difficile de l'évaluer, mais il est toutefois possible de s'appuyer sur des résultats d'essais de répétabilité, dans la limite où ceux-ci sont représentatifs de la campagne de mesure étudiée.

Certains facteurs d'influence peuvent intervenir sur l'incertitude liée à la représentativité des résultats. C'est le cas par exemple des conditions météorologiques qui peuvent avoir un impact important sur la propagation du son en environnement extérieur et amener à des fluctuations des niveaux sonores entraînant des biais supérieurs à 5 dB et des incertitude-types allant jusqu'à 10 dB pour 150 Hz à une distance de 500 m [15]. Des travaux complémentaires doivent être réalisés pour intégrer ces incertitudes dans des textes normatifs.

Discussion

Loin de mettre en exergue la faiblesse d'un processus de mesure et du résultat qui en découle, la démarche d'estimation des incertitudes permet de démontrer au contraire une meilleure maîtrise du processus et de la fiabilité du résultat.

Actuellement, les exigences réglementaires en acoustique de l'environnement précisent des seuils à ne pas dépasser, sans notion de tolérance qu'il est possible d'accepter quant à un éventuel dépassement. Dans la mesure où il est bien entendu impossible de garantir de telles exigences tout le temps, une évolution de la réglementation vers des exigences assorties d'une tolérance serait plus en accord avec la réalité des phénomènes : « ne pas dépasser X dBA pendant Y % du temps » pourrait être une évolution intéressante. Cette approche en termes de risque est tout à fait commune dans d'autres domaines (crues, risques industriels...). L'incertitude associée à un résultat de mesure permettrait alors de quantifier de façon rigoureuse ces risques de dépassement, à l'aide de l'utilisation de l'intervalle de confiance construit à partir de l'incertitude élargie (2) qui permet d'associer la notion de seuil de risque à un résultat de mesure.

Références bibliographiques

- [1] C. Perruchet, M. Priel, *Estimer l'incertitude – Mesures & Essais*, AFNOR (2e ed.), ISBN 2-12-460703-0, 2003
- [2] M. Désenfant, M. Priel, *Road map for measurement uncertainty evaluation*, Measurement 39, 841-848, 2006
- [3] JCGM 100:2008(F) – *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, 2008
- [4] AFNOR, Pr S 31-115-1, *Guide pour l'évaluation des incertitudes de mesurage en acoustique de l'environnement*, à paraître
- [5] AFNOR, NF S 31-085, *Caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier*, nov 2002
- [6] JCGM 200:2008, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*, 2008
- [7] C. Ribeiro, D. Ecotière, P. Cellard, C. Rosin, 'Uncertainties of the frequency response of wet microphone windscreens', *Applied Acoustics* 78:11-18, 2014
- [8] CEI, CEI 61672-1 : 2002 : *Electroacoustique Sonomètres Partie 1 : Spécifications*, 2002
- [9] ISO, ISO 5725:1994, *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*, 1994
- [10] JCGM 100:2008(E) – *Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 2008
- [11] CEI, CEI 60942 : 2003 *Troisième édition : Electroacoustique – Calibreurs acoustiques*, 2003
- [12] I. Campbell, *Extracting meaningful uncertainty data from calibration certificates and associated sound level meter standards*, *Acoustics in Practice* 1(2), 35-41, 2014
- [13] D. Ecotière, *Estimation of uncertainties due to the wind-induced noise in a screened microphone*, *Acoustics 2012*, Nantes (F), 2012
- [14] L. M. Caligiuri, *The evaluation of uncertainty in environmental acoustic measurements according to the ISO 'Guide'*, *Noise Control Eng. J.* 55(1), 116-132, 2007
- [15] D.K. Wilson, E.L. Andreas, J.W. Weatherly, C.L. Petit, E.G. Patton, P.P. Sullivan, *Characterization of uncertainty in outdoor sound propagation predictions*, *J. Acoust. Soc. Am.* 121(5), 177-183, 2007