

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



XP S 31-115-1 : une nouvelle norme pour évaluer les incertitudes liées à l'instrumentation lors de mesurages du bruit dans l'environnement

D. Ecotière^a, M. Rumeau^b, D. Brassens^c, F. Junker^d, H. Lefèvre^e, E. Marchal^f, C. Ribeiro^g et C. Rosin^h

^aCerema, Ifsttar, UMRAE, 11 rue Jean Mentelin, 67000 Strasbourg, France

^bAAE, 12/14 rue Jules Bourdais, 75017 Paris, France

^c4 rue Cressent, 93160 Noisy Le Grand, France

^dEDF Lab Paris-Saclay, Département ERMES, 7 boulevard Gaspard Monge, 91120 Palaiseau, France

^eCerema, 8-10, rue Bernard Palissy, 63017 Clermont-Ferrand, France

^fGroupe Venathec, Ingénierie acoustique et vibratoire, Centre d'Affaires Les Nations, BP 10101, 54503 Vandœuvre-Les-Nancy, France

^gBruitparif, Axe Pleyel 4 - B104, 32 boulevard Ornano, 93 200 Saint-Denis, France

^hSNCF RÉSEAU, Direction générale Île-de-France, 34 rue du Commandant Mouchotte, 75 014 Paris, France

david.ecotiere@cerema.fr

La présentation du résultat d'un mesurage acoustique nécessite d'être accompagnée de l'incertitude associée à ce mesurage afin d'en estimer sa fiabilité. En l'absence de cette information, 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 ou un texte réglementaire. Le papier présente le premier volet de la première norme française traitant de l'évaluation de l'incertitude de la mesure du bruit dans l'environnement : XP S 31-115-1. Cette norme s'adresse à toute personne procédant à des mesurages acoustiques dans l'environnement, ainsi qu'aux rédacteurs de norme de mesurage en acoustique de l'environnement. Le document traite de l'estimation de l'incertitude liée uniquement à l'instrumentation et aux appareillages utilisés et n'aborde pas l'incertitude liée à la représentativité des phénomènes observés, ni à celle liée au protocole de mise en œuvre. Quelques résultats sont proposés concernant à l'incertitude liée à la réalisation du calcul de quelques indicateurs acoustiques courants (Leq, fractiles ...), dont l'indicateur d'émergence qui a fait l'objet d'un travail spécifique et original à l'occasion de la rédaction de cette norme. Le document présente la méthodologie générale adoptée, les postes d'incertitudes et les facteurs d'influence à considérer et des valeurs par défaut à utiliser pour l'estimation des incertitude-types, ainsi que les méthodologies qu'il est possible d'adopter pour obtenir des incertitude-types plus précises. La méthode de recombinaison des incertitude-types pour obtenir l'incertitude finale, ainsi que la manière de les présenter et de les utiliser est également présentée. Cette communication présente le contenu et les principaux travaux menés à l'occasion de la rédaction de cette norme.

1 Introduction

La présentation du résultat d'un mesurage acoustique nécessite d'être accompagnée de l'incertitude associée à ce mesurage afin d'en estimer sa fiabilité. En l'absence de cette information, 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 ou un texte réglementaire.

Les origines de l'incertitude associée à un résultat de mesurage peuvent être réparties en trois catégories. Il s'agit : i) de l'incertitude associée à la représentativité de la grandeur mesurée vis à vis d'un phénomène qui peut varier dans l'espace et dans le temps ; ii) de l'incertitude liée à l'instrumentation, qui affecte spécifiquement le mesurage dans des conditions données ; iii) de l'incertitude liée à l'opérateur et au protocole de mesurage.

La nouvelle norme XP S 31-115-1 [1] est la première norme française qui traite des incertitudes de mesure du bruit dans l'environnement. Elle traite uniquement de l'évaluation de l'incertitude liée à l'instrumentation proprement dite et peut s'appliquer à tout mesurage acoustique. Les grandeurs d'influence traitées s'appliquent cependant principalement à des mesurages acoustiques dans l'environnement réalisées avec un appareillage répondant aux exigences de la classe 1 de la norme NF EN 61672 [2] dans la gamme fréquentielle [10 Hz ; 20 kHz]. Pour d'autres conditions opérationnelles, les grandeurs d'influence à considérer et les valeurs à utiliser doivent être adaptées.

Est exclue du domaine d'application de la norme la question de la représentativité des mesures qui dérive de la variabilité du phénomène mesuré. Par exemple, sont exclues la variabilité de l'émission des sources étudiées, la variabilité due aux effets de la météorologie sur le milieu de propagation (qui peut dépendre par exemple de la saison [3]), la variabilité spatiale d'un champ sonore. Ces exclusions doivent faire l'objet d'une évaluation relevant de chaque norme de mesurage particulière.

L'incertitude d'un résultat de mesurage se traduit par un écart entre ce résultat et une valeur de référence qui peut être soit la valeur « vraie » de la grandeur mesurée (inconnue car inaccessible), soit une valeur conventionnelle (connue). Cet écart est appelé « erreur de mesure » et peut être décomposé en deux composantes : l'erreur systématique et l'erreur aléatoire. L'erreur systématique (biais) est la composante

qui, dans le cas de mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible ; l'erreur aléatoire est la composante qui, dans le cas de mesurages répétés, varie de façon imprévisible (voir figure 1) et est la cause de la dispersion de la distribution des résultats de mesurage.

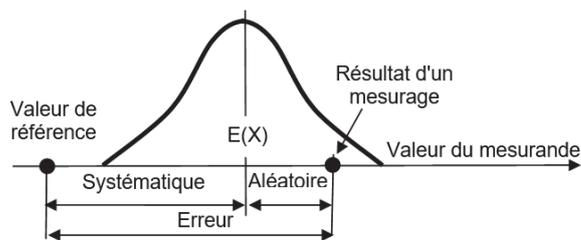


Figure 1: Décomposition de l'erreur d'un résultat de mesurage unique en partie systématique et partie aléatoire. $E(X)$ représente l'espérance mathématique de la distribution (courbe noire) des résultats de mesurages qui serait observée pour de très nombreuses répétitions.

L'erreur systématique entraîne un biais sur la mesure, et il est très fortement recommandé de le corriger lorsque celui-ci est connu. L'erreur aléatoire est caractérisée par une incertitude estimée à l'aide d'un écart-type appelée incertitude-type composée u_c . L'incertitude-type composée résulte de la combinaison des incertitudes-types de chaque grandeur d'influence. Pour exprimer l'incertitude finale, on calcule l'incertitude élargie qui rend compte de la largeur de l'intervalle à l'intérieur duquel se trouve le résultat de mesurage avec une probabilité donnée. Cette probabilité est directement liée au niveau de confiance que l'on s'accorde pour l'estimation du résultat de mesurage. Plus le niveau de confiance que l'on désire obtenir est élevé, plus la largeur de l'intervalle est grande.

Utilisation des incertitudes. Les incertitudes sont un outil pour estimer la qualité de résultats de mesurage, en fonction de l'usage qui doit être fait de ces résultats. Le résultat final de l'estimation des incertitudes peut ainsi parfois conduire à l'impossibilité de conclure, et amener l'utilisateur à repenser sa démarche de mesurage, adopter un matériel différent, mieux maîtriser ses conditions de mesurage, etc. Cela peut par exemple être le cas lorsqu'il est nécessaire de comparer le résultat de mesurage à un seuil

(limite réglementaire, seuil de conformité, etc.) et que ce dernier se situe dans l'intervalle d'incertitude calculé : si les cas 1 et 2 (voir Figure 2) ne posent pas de problème pour conclure, le cas 3 est problématique et ne permet pas de conclure compte tenu du niveau de confiance adopté. Cette dernière situation conduit à chercher une réduction de l'intervalle d'incertitude pour parvenir à une conclusion satisfaisante (cas n° 4 de la Figure 2). Pour cela, la première solution est de chercher à réduire les postes d'incertitude les plus importants (en maîtrisant mieux les conditions de mesurage, en adoptant un matériel plus performant, etc.). Lorsque cela n'est pas possible, ou que cela n'est pas souhaité, il est nécessaire de mettre en œuvre une deuxième solution qui est de réduire le niveau de confiance accordé à son résultat. Lorsqu'aucune des deux solutions n'est adoptée, aucune conclusion ne peut être prise pour le cas 3 concernant la comparaison à un seuil.

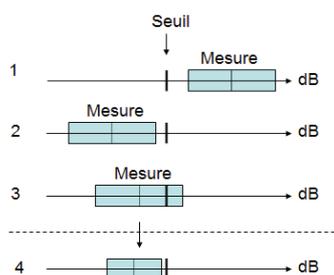


Figure 2 : Résultats de mesurage et leur intervalle d'incertitude associé, comparaison avec un seuil (4 cas).

Si l'on ne désire pas réduire le niveau de confiance et que l'on aboutit à une situation où il n'est pas possible de conclure, il est indispensable d'avoir préalablement montré et justifié qu'il n'était pas possible de réduire les incertitudes en agissant sur les différents postes d'incertitude. Ne pas pouvoir conclure ne peut ainsi se présenter *in fine* qu'après avoir exploré toutes les possibilités de réductions d'incertitudes qui peuvent se présenter.

Cette communication présente la méthodologie générale adoptée dans la norme XP S 31-115-1. Elle présente également les postes d'incertitudes et les facteurs d'influence à considérer, des valeurs par défaut à utiliser pour l'estimation des incertitude-types, ainsi que les méthodologies qu'il est possible d'adopter pour obtenir des incertitude-types plus précises. La méthode de recombinaison des incertitude-types pour obtenir l'incertitude finale, ainsi que la manière de les présenter et de les utiliser est également présentée.

2 Méthodologie

2.1 Principe général

L'approche adoptée dans la norme XP S 31-115-1 est celle retenue dans la norme NF ISO/CEI 98-3 (GUM) [4] et basée sur une composition par calcul des effets des grandeurs d'influence pour estimer le biais et l'incertitude.

Les étapes de l'estimation de l'incertitude adoptées sont les suivantes et détaillées dans les parties suivantes :

- Identification et recensement des grandeurs d'influence intervenant dans le mesurage ;

- Estimation du biais induit par chaque grandeur d'influence ;
- Estimation de l'incertitude-type associée à chaque grandeur d'influence ;
- Calcul de l'incertitude-type composée et du biais total du résultat de mesurage, qui intègre l'ensemble des grandeurs d'influences identifiées ;
- Calcul de l'incertitude élargie associée au résultat de mesurage et de l'intervalle de confiance ;
- Présentation du résultat de mesurage et de l'information d'incertitude.

2.2 Grandeurs 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 expérimentale adopté. Le Tableau 1 fournit les principales grandeurs d'influence identifiées par la norme XP S 31-115.

Tableau 1 : Principales grandeurs d'influence

Instrumentation	Mise en œuvre et conditions environnementales
<ul style="list-style-type: none"> - directivité du microphone - linéarité de niveau - pondération fréquentielle et linéarité en fréquence (A, C, Z) - température et humidité de l'air - pression de l'air ambiant - niveau de l'étalon de terrain - écran anti-vent - alimentation électrique - bruit propre de l'instrumentation - pondération temporelle (F, S, I) 	<ul style="list-style-type: none"> - durée de la mesure ; - post-traitement ; - conditions météorologiques locales au niveau du microphone (vent, pluie, ...); - champs électromagnétiques extérieurs au dispositif de mesure acoustique

Chacune des grandeurs d'influence donne lieu à une évaluation détaillée dans la norme. L'estimation des incertitudes liées à la mise en œuvre de la chaîne de mesurage, aux conditions opératoires, et à l'opérateur ne sont pas traitées par la norme mais relèvent de normes particulières.

2.3 Estimation de la valeur du biais induit par chaque grandeur d'influence

Conformément aux recommandations fournies par le GUM [4], la pratique consistant à remplacer la méconnaissance d'un biais par un facteur d'incertitude supplémentaire est fortement déconseillée, car l'incertitude-type associée ne pourrait pas être utilisée dans le formalisme de propagation des incertitudes (loi de composition des variances, voir par ex [4]).

La valeur du biais est affichée avec 1 décimale minimum (davantage de décimales peuvent être utilisées pour les calculs intermédiaires).

Cas particulier d'un bruit perturbateur. Un niveau sonore mesuré peut être augmenté par un bruit perturbateur (bruit propre de l'instrumentation, bruit du vent sur l'appareillage, champ électromagnétique ...). Lorsque le niveau du bruit perturbateur est connu avec une certaine incertitude (incertitude-type $\sigma_{L_{perturb}}$), le biais induit par le bruit perturbateur est égal à

$$b_{perturb} = -10 \log(1 - 10^{(L_{perturb} - L_{mes})/10}) \quad (1)$$

et son incertitude-type :

$$\sigma_{perturb} = \sigma_{L_{perturb}} \left(10^{\frac{L_{perturb} - L_{mes}}{10}} - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

où L_{mes} et $L_{perturb}$ sont respectivement le niveau sonore mesuré et la contribution sonore du bruit perturbateur dans le bruit mesuré.

Ce formalisme peut être utilisé par exemple pour les grandeurs d'influence telles que le bruit du vent, l'influence d'un champ électromagnétique, etc.

2.4 Estimation des incertitudes-types de chaque grandeur d'influence

Les incertitude-types sont estimées à partir des écart-types pouvant être associés aux effets de chaque grandeur d'influence sur le résultat de mesurage. L'incertitude-type u_i pour une grandeur d'influence peut être donnée par des valeurs documentées (norme, document technique ...), ou bien par des mesurages répétés où un nombre maîtrisé de grandeurs d'influence ont la liberté de varier.

Les incertitude-types pour chaque grandeur d'influence sont affichées avec 2 décimales (davantage de décimales peuvent être utilisées pour les calculs intermédiaires).

2.5 Calcul de l'incertitude-type composée et du biais total

En première approximation, chaque grandeur d'influence peut être supposée indépendante des autres. Connaissant les incertitudes-types individuelles u_i , l'incertitude-type composée u_c est exprimée par :

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (3)$$

Dans le cas où des grandeurs d'influence ne seraient pas indépendantes, il y a lieu de considérer les corrélations entre chaque grandeur dépendante. Des éléments pour traiter ce cas sont présentés en annexe de la norme ainsi que dans [4].

La valeur finale de l'incertitude composée est arrondie à la 1ère décimale la plus proche.

Le biais total b induit par les grandeurs d'influence est égal à

$$b = \sum_i b_i \quad (4)$$

où les termes b_i représentent les biais de chaque grandeur d'influence.

2.6 Calcul de l'incertitude élargie

L'incertitude élargie U est obtenue en multipliant l'incertitude-type composée par un facteur d'élargissement k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (5)$$

où y est la mesure de la grandeur observée. La valeur du facteur d'élargissement est choisie selon le niveau de confiance que l'on s'accorde pour que la valeur du mesurande soit dans un intervalle donné. Exprimer un intervalle avec par exemple un niveau de confiance de 95% signifie que la valeur du mesurande a 95% de chance de se trouver dans l'intervalle présenté. Selon les applications, deux types d'intervalle de confiance peuvent être utilisés : un intervalle de confiance bilatéral ou un intervalle de confiance unilatéral. La norme fournit des indications sur les valeurs de k à adopter en fonction du choix du type d'intervalle et du niveau de confiance.

2.7 Présentation du résultat de mesurage incluant les informations d'incertitude

Une expression complète du résultat d'un mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure. Lorsqu'on donne un résultat, on doit indiquer clairement si l'on se réfère au résultat brut ou au résultat corrigé de son biais, et la valeur de ce biais. Selon l'utilisation qui doit être faite du résultat, l'incertitude présentée pourra être l'incertitude-type composée, l'incertitude élargie ou un intervalle de confiance. Un exemple de présentation du résultat avec un intervalle de confiance, serait par exemple (niveau sonore corrigé de son biais (0,5 dB) de $L=63,4$ dB) : " Le niveau sonore mesuré, corrigé de son biais (0,5 dB), est de $L=63,4$ dB, compris dans l'intervalle de confiance à 95% [61,2 dB ; 65,6 dB]".

3 Estimations des incertitudes-types et des biais pour chaque grandeur d'influence

Deux méthodes d'estimation des incertitudes types à partir de valeurs documentées sont présentées dans la norme. Ces méthodes, présentées ci-dessous, diffèrent essentiellement de par la façon d'obtenir les valeurs d'incertitudes-types.

La première méthode permet d'estimer les incertitudes types à partir de valeurs forfaitaires provenant de documents techniques faisant référence (norme de matériel, etc.). Ces valeurs sont nécessairement majorantes ; elles permettent néanmoins une estimation de l'incertitude sans connaissance approfondie des performances de l'appareillage utilisé.

La seconde méthode permet d'estimer les incertitudes types à partir de valeurs documentées spécifique à l'appareillage utilisé (certificat d'étalonnage, publication, documentation fournisseur, etc.). Ces valeurs sont inférieures ou égales à celles obtenues avec la première méthode et permettent ainsi de réduire l'incertitude du résultat de mesure lorsque cela est nécessaire. Cette méthode doit notamment être utilisée lorsque la première méthode ne permet pas de conclure sur le respect d'un seuil à tester

(valeur contractuelle ou réglementaire à ne pas dépasser par exemple).

Les deux méthodes peuvent être utilisées conjointement, selon la nature des facteurs d'influence considérés et les données dont on dispose concernant son matériel.

3.1 Calcul avec des valeurs forfaitaires

En l'absence de connaissance sur les caractéristiques de son appareillage, les exigences de la classe 1 de la norme NF EN 61672 [2] fournissent des informations pour le calcul des incertitudes-types et des biais. Ces valeurs forfaitaires sont présentées ci-dessous pour les principales grandeurs d'influence.

Directivité du microphone. La prise en compte de la directivité du microphone est relative à la réponse de celui-ci en fonction de l'incidence de l'énergie sonore provenant de la source, par rapport à une direction de référence (en général l'axe du microphone). Le Tableau 2 fournit les valeurs des incertitudes-types et de biais obtenues à partir de la norme NF EN 61-672 [2].

Tableau 2 : Biais / incertitudes-types (dB) pour la directivité du microphone. θ est l'angle entre la direction de la source et la direction de référence du microphone (axe du microphone).

Angle	Fréquence (kHz)				
	0,25 à 1	1 à 2	2 à 4	4 à 8	8 à 12,5
$ \theta < 30^\circ$	-0.5 / 0,29	-0.5 / 0,29	-0.75 / 0,43	-1.25 / 0,72	-2 / 1,15
$ \theta < 90^\circ$	-0.75 / 0,43	-1 / 0,58	-2 / 1,15	-3.5 / 2,02	-5 / 2,89
$ \theta < 150^\circ$	-1 / 0,58	-2 / 1,15	-3 / 1,73	-5 / 2,89	-7 / 4,04

Pondérations fréquentielles A, C, Z. Ecran anti-vent.

Les Tableaux 3-4 fournissent les valeurs des incertitudes-types et de biais obtenues à partir de [2]. Il est possible d'utiliser une valeur unique majorante commune à toutes les bandes de tiers d'octave en prenant le maximum des incertitude-type de la bande fréquentielle utilisée lors du mesurage. Cette approche a l'avantage de la simplicité, elle majore cependant l'incertitude.

Tableau 3 : biais (b) et incertitudes-types (u) pour les pondérations fréquentielles A, C et Z.

f (kHz)	16	20	25	31,5	40-800	1000
u	1,73	1,15	1,01	0,87	0,58	0,4
b	-1	0	0,25	0	0	0

f (kHz)	1.25-4	5	6.3	8	10	12.5	16
u	0,58	0,87	1,01	1,15	1,44	2,02	5,34
b	0	0	-0,25	-0,5	-0,5	-1,5	-6,75

Tableau 4 : Incertitudes-types pour l'écran anti-vent

f (kHz)	0.063-2	2-8	8-12.5	12.5-16
u (dB)	0,29	0,46	0,58	0,87

Autres grandeurs d'influence. Les incertitudes-types pour les principales grandeurs d'influence sont données dans le tableau 5. Le biais est nul pour ces grandeurs d'influence.

Tableau 5 : Incertitudes-types des principales grandeurs d'influence pour les appareils de classe 1.

Facteurs d'influence		u (dB)
Erreur de linéarité de niveau		0.46
Tension d'alimentation		0.06
Pression statique de l'air	85 kPa à 108 kPa	0.23
	65 kPa à 85 kPa	0.52
Température de l'air	-10 à + 50°C	0.28
	0 à + 40°C	-
Humidité de l'air	20% à 90%	0.28
Champs à la fréquence du secteur et à fréquence radioélectrique		0.57
Calibre		0.17
Ecran anti-vent	63 Hz à 2 kHz	0.28
	2 kHz à 8 kHz	0.46
Pondération temporelles F et S		0.06
Mesurage des Leq		0.06
Arrondi de la mesure		0.03
Ajustage		0.01
Mesurage des niveaux de pression acoustique crête pondérés C		1.15

3.2 Calcul avec des valeurs particulières

La norme propose des méthodes qui permettent d'optimiser les valeurs d'incertitudes induites par certaines grandeurs d'influence. La première méthode présentée ci-dessous concerne une optimisation par la méthode de réduction des écarts maximum tolérés (EMT) (voir ci-dessous). Des travaux spécifiques ont été menés dans le cadre de la rédaction de la norme pour déterminer des valeurs particulières de plusieurs grandeurs d'influence. Deux exemples de ces travaux sont présentés ci-dessous (bruit du vent, écran anti-vent).

Réduction des EMT. Pour certaines grandeurs d'influence (température de l'air, humidité relative de l'air et pression statique de l'air) où les écarts maximums tolérés (EMT) fournis par un document technique sont données pour un domaine de variation fixé, il est admis qu'une réduction des incertitudes est possible en tenant compte de la plage de variation de la grandeur d'influence constatée lors du mesurage. Il est possible d'utiliser un EMT réduit à la place de l'EMT estimé selon

$$EMT_{réduit} = \frac{d}{\Delta} EMT \quad (6)$$

où Δ est l'étendue du domaine de variation de la grandeur d'influence pour laquelle est garantie l'EMT. d est la plage d'évolution des niveaux sonores : $d = \max(X_i, X_{etal}) - \min(X_i, X_{etal})$ pour un niveau sonore et $d = \max(X_i) - \min(X_i)$ pour une émergence, où X_i et X_{etal} représentent respectivement les valeurs de la grandeur d'influence au cours du mesurage et au moment de l'étalonnage.

Conditions de vent. Le biais et l'incertitude associée au bruit du vent peuvent respectivement être estimées par les relations suivantes [5-6], en fonction du niveau sonore mesuré L_{mes} :

$$b_{vent} = a_{b,1} + \frac{a_{b,2}}{\sqrt{L_{mes} - L_0}} \quad (7)$$

$$u_{vent} = \sqrt{\left(a_{u,1} + \frac{a_{u,2}}{\sqrt{L_{mes} - L_0}}\right)^2 + u_{vent,mod}^2} \quad (8)$$

La norme fournit les valeurs des différents paramètres des Eq. (7-8) pour des vitesses de vent allant de 1 à 10m/s au niveau du microphone, et des hauteurs de microphone de 1.5m, 2m et 3m. Un exemple de ces résultats est donné figure 3.

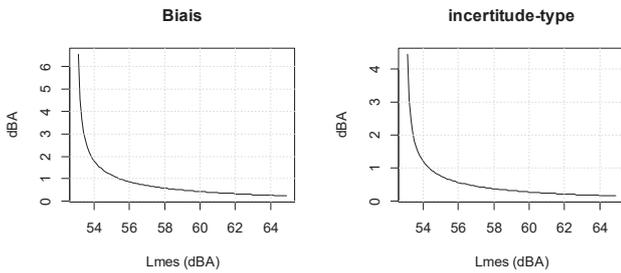


Figure 3 : Biais et incertitude-type dus au bruit du vent en fonction du niveau de bruit mesuré L_{mes} (vitesse de vent : 5/m/s, hauteur de microphone : 1.5m).

Ecran anti-vent mouillé. La présence d'eau dans un écran anti-vent, après une période de pluie par exemple, peut entrainer une incertitude due à la modification de la réponse spectrale de l'équipement. Le biais et l'incertitude-type (figure 4) dus à cet effet ont été estimés à partir de campagnes d'expérimentation en laboratoire [7] et à l'aide de la méthode décrite au 4.1.

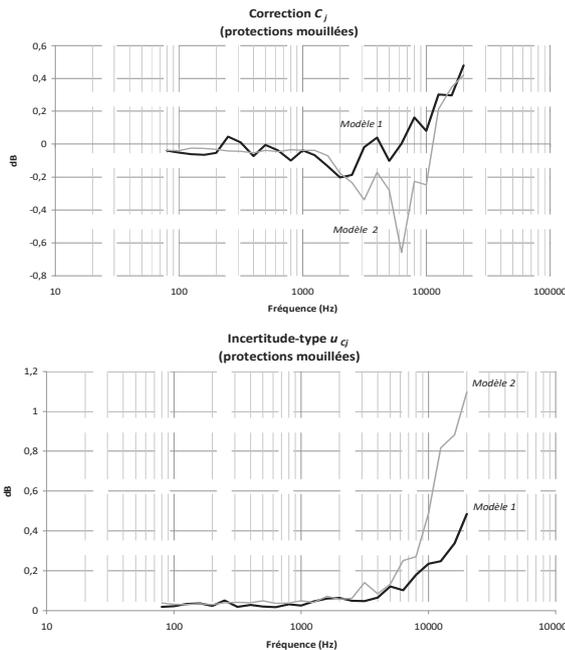


Figure 4 : Correction (opposé du biais) et incertitude-type dus à la présence d'eau dans un écran anti-vent pour 2 familles de protections : protections performantes (modèle 1) et moins performantes (modèle 2) [7].

4 Incertitude d'indicateurs acoustiques courants

La norme aborde les incertitudes du niveau sonore global, de l'indicateur d'émergence, du SEL et des indices fractiles. A titre d'exemple, seuls les résultats concernant les deux premiers indicateurs sont présentés ci-dessous.

4.1 Niveau sonore global, recombinaison fréquentielle des incertitudes

Ce paragraphe décrit la méthode de détermination de l'incertitude et du biais de la mesure d'un niveau global pondéré (A, C, ou autre) d'un signal à spectre connu ou estimé, induit par une fonction de transfert connue assortie de ses tolérances ou de ses incertitudes types pour chaque bande de fréquence. Cette grandeur d'influence dépend de la composition spectrale du bruit mesuré, et des caractéristiques du sonomètre.

Pour un sonomètre mesurant un bruit stable de spectre (S_j) au travers d'une fonction de transfert (P_j) (directivité du microphone par exemple), et affecté d'une pondération fréquentielle (A_j) (pondération A, C ou Z par exemple) (j dénote l'indice de la bande fréquentielle), l'incertitude-type due à la recombinaison fréquentielle sur le niveau global est donné par :

$$u = (y_{max} - y_{min}) / (2\sqrt{3}) \quad (9)$$

et le biais

$$b = \frac{y_{max} + y_{min}}{2} - \log \sum_j 10^{(S_j + P_j + A_j) / 10} \quad (10)$$

Les bornes de l'étendue [$y_{min}; y_{max}$] sont obtenues en calculant les compositions en niveau global pondéré, du spectre ($S_j + P_j$) cumulé avec des tolérances garanties (EMT) $T_{inf,j}$ et $T_{sup,j}$:

$$y_{min} = 10 \log \sum_j 10^{(S_j + P_j + T_{inf,j} + A_j) / 10} \quad (11)$$

$$y_{max} = 10 \log \sum_j 10^{(S_j + P_j + T_{sup,j} + A_j) / 10} \quad (12)$$

Lorsque le bruit est non stable, l'incertitude sur le niveau global pondéré mesuré pendant une période est calculé en reproduisant la méthode précédente sur chacun des N intervalles élémentaires de temps d'intégration.

4.2 Indicateur d'émergence

Cette partie présente une approche analytique permettant d'estimer l'incertitude sur l'émergence ainsi que la correction de biais associée.

L'émergence E est définie comme la différence entre un indicateur de bruit ambiant L_{amb} et un indicateur de bruit résiduel L_{res} . Elle porte sur le niveau global ou sur le niveau mesuré dans une bande quelconque de fréquence. A chaque instant, l'indicateur de niveau de pression acoustique L_{amb} est la composition énergétique d'un niveau de bruit particulier L_{part} (bruit engendré par la source objet de l'étude) et d'un

niveau de bruit résiduel L_{res1} (bruit engendré par toutes les autres sources de l'environnement pendant le mesurage de bruit ambiant). Pour le distinguer du bruit résiduel présent lors du mesurage du bruit ambiant on notera l'indicateur de bruit résiduel L_{res} par L_{res2} . Ainsi :

$$E = L_{amb} - L_{res} = 10 \log(10^{\frac{L_{part}}{10}} + 10^{\frac{L_{res1}}{10}}) - L_{res2} \quad (13)$$

La situation idéale est celle pour laquelle L_{res} , L_{res1} et L_{res2} sont identiques. Mais celle-ci n'existe pas en pratique. De ce fait, qu'ils soient mesurés au même point, mais sur une période différente de celle du mesurage du niveau ambiant, ou à un point différent mais pendant la même période de mesurage que le niveau ambiant, L_{res1} et L_{res2} peuvent être différents et ne pas être totalement corrélés, ce qui doit être pris en compte dans l'estimation de l'incertitude sur l'émergence.

L'incertitude-type de l'émergence u_E et le biais associé b sont calculés poste par poste puis recomposés respectivement à partir des relations :

$$b = \sum_i b_{E,i} \quad \text{et} \quad u_E^2 = \sum_i u_{E,i}^2 \quad (14)$$

où $u_{E,i}$ et $b_{E,i}$ sont respectivement les incertitude-type et le biais associés à la grandeur d'influence i .

Des composantes d'erreurs communes aux mesurages des niveaux de bruit résiduel et de bruit ambiant entraînent une corrélation dont il faut tenir compte. Pour certaines grandeurs d'influence, la prise en compte de ces corrélations permet de réduire le biais et de ne pas limiter l'évaluation de l'incertitude à la simple somme quadratique des incertitudes sur les niveaux des bruits ambiant et résiduel.

Biais. Pour chaque poste d'incertitude, le biais s'exprime comme :

$$b_{E,i} = b_{A,i} - b_{R,i} \quad (15)$$

où $b_{A,i}$ et $b_{R,i}$ sont les biais associés au poste d'incertitude i lors du mesurage de bruit ambiant et lors du mesurage du bruit résiduel. Cette relation met en évidence que pour les postes où le biais est constant entre les deux périodes de mesurage, les valeurs moyennes des erreurs se compensent et le biais de l'émergence est nul.

Incertainitude-type. Les incertitude-type $u_{E,i}$ de chaque grandeur d'influence i sont évaluées à l'aide de la relation suivante :

$$u_{E,i}^2 = u_{A,i}^2 + u_{R,i}^2 - 2\rho_i u_{R,i}^2 10^{-\frac{E}{10}} \quad (16)$$

où $u_{A,i}$ et $u_{R,i}$ sont les incertitudes-types liées à l'influence du poste i sur le niveau sonore pendant le mesurage de bruit ambiant et pendant le mesurage du bruit résiduel. E est la valeur de l'émergence corrigée de son biais. ρ_i est un facteur rendant compte de la différence possible de l'influence du poste i sur le niveau sonore du bruit résiduel pendant les mesurages de bruit ambiant et résiduel. Il peut prendre des valeurs allant de 0 à 1. En l'absence de connaissance sur la valeur de cette grandeur, on adoptera par défaut $\rho_i = 0$, tandis que $\rho_i = 1$ si on estime que la grandeur d'influence a un effet identique sur les contributions du résiduel lors des mesurages du bruit ambiant et du bruit résiduel.

5 Conclusion

La nouvelle norme XP S 31-115-1 est la première norme française présentant des méthodes d'estimation des incertitudes du bruit mesuré dans l'environnement. Elle ne traite que des incertitudes liées à l'instrumentation. Une deuxième partie doit être rédigée afin de traiter les incertitudes liées aux questions de représentativité, ainsi qu'à celles induites par un calcul.

Deux approches sont proposées dans la norme et laissées au choix de l'utilisateur. La première approche permet de s'affranchir d'une connaissance détaillée de son matériel et est plus simple à mettre en œuvre. Elle majore nécessairement l'estimation des incertitudes. La deuxième méthode doit permettre une réduction des incertitudes, mais nécessite une meilleure connaissance des performances de son appareillage. Les deux approches sont complémentaires et doivent être choisies en fonction du contexte et des objectifs des mesures.

La rédaction de la norme a donné lieu à la réalisation de travaux originaux tels que par exemple les incertitudes dues au bruit du vent, à la présence d'un écran anti-vent (mouillé ou sec), à la recomposition fréquentielle des incertitudes, ou bien encore l'estimation de l'incertitude de l'émergence.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres des commissions S30M et S30J de l'AFNOR pour leur relecture et leurs commentaires sur le projet de norme, ainsi que B. Gauvreau pour la relecture de cette communication.

Références

- [1] Norme XP-S 31-115-1, Acoustique, Méthode d'évaluation des incertitudes de mesurage en acoustique de l'environnement - Partie 1 : Influence de l'instrumentation, à paraître. AFNOR
- [2] Norme NF EN 61672, Électroacoustique - Sonomètres - Partie 1 : spécifications, AFNOR
- [3] D. Ecotière, Road noise: characterization and estimation of uncertainty due to meteorological effects, *J. Acoust. Soc. Am.* (123), 3152-3152, mai 2008.
- [4] Norme NF ISO/CEI GUIDE 98-3, Incertitude de mesure - Partie 3 : guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, 2014. AFNOR
- [5] D. Ecotière, 'Estimation of uncertainties due to the wind-induced noise in a screened microphone', Acoustics 2012, Nantes, 2012
- [6] D. Ecotière, A semi empirical model to estimate the uncertainties of wind-induced noise in a screened microphone, *Internoise*, 2018.
- [7] C. Ribeiro, D. Ecotière, P. Cellard, C. Rosin, Uncertainties of the frequency response of wet microphone windscreens, *Applied Ac.* 78:11-18 (2014)