

Isolement aux bruits aériens dans les bâtiments - Calcul d'incertitude de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré, R'_w , selon les méthodes de Monte-Carlo

Florent Reboul^{1,a}, Jean-Michel Pou²

¹Bureau Veritas – Division Marine et Offshore, 67/71 Boulevard du Château 92571 Neuilly-Sur-Seine CEDEX, France

^aflorent.reboul@bureauveritas.com

²Président Fondateur de la société Delta Mu, Président du cluster d'Excellence Auvergne Efficience Industrielle, Centre d'Affaires du Zénith - Le Trident E 48 rue de Sarliève 63800 COURNON D'Auvergne, France

Abstract. In the field of building acoustics, the uncertainty of the apparent sound reduction index R'_w is complicated to calculate. ISO 12999-1 [1] standard offers two main solutions: interlaboratory testing and calculation of an upper limit of uncertainty. The first solution may be difficult to implement. Results of the second one are pessimistic. This document presents an alternative method based on numerical simulation of Monte-Carlo. Based on an assumption of no correlation between the insulation values obtained from each third octave band, this method has the advantage that corresponds to a measurement procedure or a particular measurement situation. Indeed, each of uncertainty factors can be customized to correspond to the equipment and methodology of a testing laboratory. In addition, uncertainties in the volume of the receiving room and on the surface of the separating element are taken into account. With a confidence level of 95% ($k = 2$), the expanded uncertainty obtained by this numerical simulation method (1.6 dB) seems quite consistent with the expanded uncertainty given in the ISO 12999-1 standard (1.8 dB).

1. Rappels théoriques en métrologie [2]

De nos jours, la mesure est omniprésente. En acoustique des bâtiments, comme dans tout autre domaine, l'incertitude de mesure associée au résultat d'un mesurage est un paramètre primordial caractérisant « la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande ». L'intérêt de connaître et maîtriser l'incertitude de mesure est multiple : assurer la fiabilité du résultat que ce soit en interne ou auprès de ses clients, maîtriser et améliorer son processus de mesure, comparer des résultats de mesures entre eux ou à des valeurs de référence données par une spécification ou une norme.

Pour évaluer l'incertitude d'un processus de mesure, la première approche consiste à s'orienter vers l'ISO/IEC 98-3 (ou GUM) [3]. Ce document de référence définit les termes et concepts applicables à la métrologie. Il s'agit donc d'un ouvrage indispensable définissant notamment deux méthodes d'évaluation des incertitudes élémentaires des facteurs participants au processus de mesure : évaluation de type A (méthode expérimentale) et évaluation de type B (méthode analytique). La loi de propagation est ensuite appliquée à partir du modèle de mesure.

1.1 Evaluation de type A de l'incertitude-type

L'évaluation de type A de l'incertitude-type est basée sur un nombre représentatif de résultats de mesures à partir duquel est calculé un estimateur statistique de la dispersion : l'écart-type expérimental. Cet indicateur permet de caractériser la variabilité des valeurs mesurées autour de la moyenne.

Dans le cadre d'une évaluation de type A, il est indispensable d'identifier les principales causes de l'incertitude et de s'assurer de leur variation effective au cours des différentes mesures (mesurande, moyen, mode opératoire, milieu et main d'œuvre) sous peine de minimiser l'écart-type expérimental par rapport à l'écart-type réel. Les résultats de mesure doivent donc provenir, par exemple, de différents opérateurs, équipements, niveaux de mesurande, modes opératoires, etc.

Bien que cette méthode puisse sembler relativement simple à mettre en œuvre, la réalisation d'un nombre important d'essais permettant de faire varier l'ensemble des causes de l'incertitude peut s'avérer coûteuse.

1.2 Evaluation de type B de l'incertitude-type

L'évaluation de type B de l'incertitude-type est basée sur un ensemble d'informations telles que les spécifications du fabricant, les données des certificats d'étalonnage, les connaissances du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés, etc.

L'évaluation de type B de l'incertitude-type permet de s'affranchir de la réalisation d'essais mais nécessite de connaître (voire d'admettre) la loi de probabilité du facteur considéré.

1.3 Loi de propagation : Incertitude composée sur les données d'entrée

Les évaluations de types A ou B permettent de déterminer l'incertitude composée sur chaque grandeur d'entrée mesurée. Ces incertitudes composées sont considérées gaussiennes (propriété du théorème central limite) puisqu'elles proviennent de plusieurs facteurs indépendants.

A partir du modèle de mesure (dans notre cas, l'équation (3) présentée ci-après), la loi de propagation sur les données d'entrée est appliquée de façon à déterminer l'incertitude finale sur le mesurande.

Lorsque les facteurs d'incertitude sont indépendants les uns des autres, l'incertitude-type composée u_c est alors estimée selon la formule suivante :

$$u_c(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i) \right)^2} \quad (1)$$

Avec f : le modèle de mesure
 n : le nombre de facteurs i
 $u(x_i)$: écart-type du facteur x_i
 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$: dérivée partielle de f par rapport au facteur x_i , appelée « coefficient de sensibilité »

Lorsque les facteurs d'incertitude sont dépendants, c'est-à-dire lorsque l'erreur provenant d'un facteur influence une ou plusieurs erreurs sur d'autres facteurs, l'incertitude-type composée u_c est égale à :

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i) \right)^2 + 2 * \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} cov(u_{x_i}, u_{x_j})} \quad (2)$$

Note : Du fait des coefficients de sensibilité, l'application de la loi de propagation peut perturber le caractère gaussien du mesurande.

2. Isolement aux bruits aériens dans les bâtiments - Indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré, R'_w

Les méthodes de mesurage in situ de l'isolation acoustique des bâtiments sont décrites dans la norme ISO 16283 [4]. La partie 1 de cette norme traite en particulier l'isolation des bruits aériens et définit l'indice d'affaiblissement acoustique apparent R' . L'évaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction aux bruits aériens est décrite dans la norme ISO 717 [5]. La partie 1 de cette norme permet de convertir les valeurs d'isolement aux

bruits aériens en fonction de la fréquence¹, R' , obtenues par mesurage, en une valeur unique apte à caractériser la performance acoustique, dans notre cas l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w .

Il ne sera présenté ci-dessous que les éléments de ces normes nécessaires à la compréhension de cet article.

L'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w est calculé entre deux locaux séparés par une cloison commune. Le principe de la mesure est le suivant :

- Un des deux locaux est défini comme étant le local d'émission, l'autre étant le local de réception
- Une source de bruit est placée dans le local d'émission puis mise en fonctionnement. Le niveau de bruit L_{1_i} est mesuré pour chaque bande de tiers d'octave i comprise entre 100Hz et 3150Hz
- Le niveau de bruit L_{2_i} est ensuite mesuré dans le local de réception pour chaque bande de tiers d'octave i comprise entre 100Hz et 3150Hz
- Après extinction de la source de bruit, le niveau de bruit de fond B_{2_i} est mesuré dans le local de réception pour chaque bande de tiers d'octave i comprise entre 100Hz et 3150Hz
- Une mesure de la durée de réverbération T_i est réalisée dans le local de réception pour chaque bande de tiers d'octave i comprise entre 100Hz et 3150Hz
- Le volume de la salle de réception V ainsi que l'aire de la cloison commune S entre les deux locaux sont mesurés.

A partir de ces mesures, l'indice d'affaiblissement acoustique apparent R'_i par bande de tiers d'octave i est défini par la relation suivante :

$$R'_i = L_{1_i} - L_{2_i}' + 10 * \log \left(\frac{S * T_i}{0,16 * V} \right) \quad (3)$$

Avec :
 L_{1_i} : niveau moyen de pression acoustique dans la salle d'émission (dB)
 L_{2_i}' : niveau moyen de pression acoustique dans la salle de réception (dB) corrigé du bruit de fond B_{2_i} ⁽¹⁾
 S : aire de la cloison commune (m²)
 V : volume de la salle de réception (m³)
 T_i : durée de réverbération de la salle de réception (s)

¹ En acoustique, les bandes de tiers d'octave sont des bandes de fréquences utilisées lors d'analyses et dont les fréquences inférieure f_1 et supérieure f_2 sont respectivement égales à $\frac{f_0}{\sqrt[6]{2}}$ et $f_0 * \sqrt[6]{2}$ avec f_0 la fréquence centrale.

(1) *Détail de la correction de bruit de fond sur le niveau du signal*

Si la différence entre le niveau dans la salle de réception L_{2_i} et le niveau de bruit de fond B_{2_i} est supérieure ou égale à 10 dB, aucune correction n'est nécessaire. Dans ce cas $L_{2_i}' = L_{2_i}$.

Si la différence des niveaux est comprise entre 6 et 10 dB, le niveau L_{2_i}' est calculé selon la formule suivante :

$$L_{2_i}' = 10 * \log \left(10^{\frac{L_{2_i}}{10}} - 10^{\frac{B_{2_i}}{10}} \right) \quad (4)$$

Avec :

L_{2_i} : niveau moyen de pression acoustique dans la salle d'émission (dB)

B_{2_i} : niveau de bruit de fond moyen dans la salle de réception (dB)

Si la différence de niveau est inférieure ou égale à 6 dB, on utilise la correction de 1,3 dB. Le niveau L_{2_i}' est alors calculé selon la formule suivante :

$$L_{2_i}' = L_{2_i} - 1,3 \quad (5)$$

Les indices d'affaiblissement acoustique apparents R' sont calculés pour l'ensemble des bandes de tiers d'octave de 100Hz à 3150Hz puis tracés sur la courbe d'atténuation normalisée définie dans la norme ISO 717-1 (Tableau 3 : valeurs de référence pour l'isolement aux bruits aériens).

L'évaluation du résultat d'un mesurage est réalisé par décalage de la courbe de référence par incrément de 0,1 dB vers la courbe mesurée jusqu'à ce que la somme des écarts défavorables soit la plus grande possible sans toutefois dépasser 32,0 dB. Un écart défavorable, à une fréquence donnée, se produit lorsque le résultat des mesurages est inférieur à la valeur de référence. Seuls les écarts défavorables doivent être pris en considération. Après avoir effectué les décalages successifs, la valeur de la courbe de référence à 500 Hz correspond à l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w .

3. Problématique de l'évaluation de l'incertitude sur l'indice R'_w

Bien qu'il soit préférable de déterminer l'incertitude de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w à l'aide du guide ISO/IEC 98-3, les méthodes décrites sont difficilement applicables au domaine de l'acoustique du bâtiment. En effet, les méthodes de type A nécessitent de nombreuses mesures coûteuses à mettre en œuvre. Puisqu'il n'existe pas de relation fonctionnelle entre les grandeurs mesurées et l'indice

d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w , la norme ISO 12999-1 propose les solutions suivantes :

- Traiter la valeur unique comme le mesurande : les résultats d'essais interlaboratoires réalisés selon les normes ISO 5725 [6, 7] permettent de déterminer une incertitude-type (méthode de type A). Le principal obstacle réside dans la difficulté à réaliser ce type d'évaluation pour un laboratoire isolé (le nombre de laboratoires doit être supérieur ou égal à huit suivant le §5.4 de la norme ISO 12999-1). De plus, la mise en œuvre de l'expérience d'essais interlaboratoires peut s'avérer complexe.
- Appliquer les incertitudes par bande de tiers d'octave fournies dans la norme à la méthode de pondération (décalage de la courbe de référence). Dans ce cas, le degré de corrélation inconnu entre les résultats par bande de tiers d'octave influe directement sur l'incertitude associée à la valeur unique. La norme propose donc un calcul de la limite supérieure de l'incertitude associée à la valeur unique en supposant un coefficient de corrélation égal à 1 (Annexe B, §2 : Incertitude associée à l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré).
- Dans le §2 de l'Annexe B, la norme suggère également la possibilité de calculer l'incertitude associée à un indice d'affaiblissement acoustique pondéré à l'aide des méthodes de Monte-Carlo. Basée sur l'hypothèse d'une absence de corrélation entre les isolements par bande de tiers d'octave, cette méthode consiste à simuler des valeurs numériques en utilisant leurs propriétés probabilistes (loi de probabilité).

Cette dernière méthode a retenu notre attention. Néanmoins, l'utilisation des incertitudes sur l'indice R' par bandes de tiers d'octave fournies dans la norme pour réaliser une simulation ne nous semble pas appropriée.

En effet, les valeurs du Tableau 2 – Incertitudes-types associées à l'isolement aux bruits aériens par bande de tiers d'octave - s'appliquent uniquement aux situations dans lesquelles le volume de la salle de réception et la surface de l'élément de séparation sont bien définis. Cette hypothèse peut, dans le cas d'une mesure sur site, ne pas être vérifiée.

De plus, nous n'avons aucune maîtrise des valeurs indiquées dans le Tableau 2 de la norme ISO 12999-1 provenant d'essais interlaboratoires. Nous ne savons donc pas si l'ensemble des sources d'incertitude des indices R' est bien couvert par ces essais, ce qui est un prérequis important pour l'utilisation de cette méthode. Par exemple, si l'un des facteurs d'influence n'a pas varié au cours des différentes expériences, le résultat obtenu peut être sous-estimé.

Enfin, les valeurs du Tableau 2 de la norme ISO 12999-1 ne sont pas applicables à une procédure de mesure ou

à une situation de mesurage particulière (salle de réception d'un volume inférieur à 25m³).

Nous présentons donc ici une méthode d'évaluation de l'incertitude de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w par les méthodes de Monte-Carlo applicables à l'ensemble des mesurages et tenant compte des incertitudes sur le volume de la salle de réception et sur la surface de l'élément de séparation. Les valeurs numériques des différentes grandeurs utilisées dans le calcul des indices R' ($L_{1i}, L_{2i}, B_{2i}, T_i, S$ et V) normalement mesurées, sont ici simulées.

Le résultat de ce calcul pourra ensuite être comparé aux résultats obtenus par les deux autres méthodes présentées dans la norme ISO 12999-1.

4. Evaluation de l'incertitude par les méthodes de Monte-Carlo

4.1 Application de la loi de propagation à l'incertitude sur R'_i

Comme nous l'avons déjà vu, l'indice d'affaiblissement acoustique apparent R'_i peut-être décrit par une relation fonctionnelle dépendant des grandeurs mesurées :

$$R'_i = f(L_{1i}; L_{2i}; B_{2i}; T_i; S; V) \quad (6)$$

Il est donc possible de calculer l'ensemble des dérivées partielles :

$$\frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} = 1 \quad (7)$$

$$\frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} = \frac{10^{\frac{B_{2i}}{10}}}{10^{\frac{L_{2i}}{10}} - 10^{\frac{B_{2i}}{10}}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial R'_i}{\partial T_i} = \frac{10}{T_i * \ln(10)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial R'_i}{\partial S} = \frac{10}{S * \ln(10)} \quad (10)$$

$$\frac{\partial R'_i}{\partial V} = - \frac{10}{V * \ln(10)} \quad (11)$$

En l'absence de correction ou lorsque la correction de 1,3 dB est utilisée :

$$\frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} = -1 \quad (12)$$

En cas de correction :

$$\frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} = - \frac{10^{\frac{L_{2i}}{10}}}{10^{\frac{L_{2i}}{10}} - 10^{\frac{B_{2i}}{10}}} \quad (13)$$

La variance sur l'indice R'_i est obtenue par la relation suivante :

$$u_c^2(R'_i) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R'_i}{\partial x_i} * u(x_i) \right)^2 + 2 * \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial R'_i}{\partial x_i} \frac{\partial R'_i}{\partial x_j} cov(u(x_i), u(x_j)) \quad (14)$$

D'où l'équation 15 présentée en bas de page.

Discussion autour des covariances

Nous faisons l'hypothèse que les covariances entre les incertitudes sur les grandeurs de natures différentes sont nulles : niveau de bruit et volume/surface, niveau de bruit et temps de réverbération, temps de réverbération et volume/surface.

De plus, un calcul du terme de covariance entre S et V , $cov(u(S), u(V))$, montre une faible dépendance entre les deux valeurs. L'écart obtenu sur l'incertitude-type du volume avec et sans corrélation entre les grandeurs qui le composent (surface et largeur) est de l'ordre de 10%. Nous le négligerons donc ici.

Compte-tenu des éléments décrits ci-dessus, nous obtenons donc l'équation suivante :

$$u_c^2(R_i) = \left(\frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \cdot u(L_{1i}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \cdot u(L_{2i}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \cdot u(B_{2i}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \cdot u(T_i) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial S} \cdot u(S) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial V} \cdot u(V) \right)^2 + 2 \left[\frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} cov(u(L_{1i}), u(L_{2i})) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} cov(u(L_{1i}), u(B_{2i})) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} cov(u(L_{2i}), u(B_{2i})) \right] \quad (16)$$

Les dérivées partielles précédemment calculées permettent de constater que les produits des coefficients de sensibilité des covariances restantes sont toujours négatifs. Nous pourrions donc penser que chaque terme relatif à la covariance entre les différents facteurs est également négatif. Dans ce cas, leur contribution aurait pour effet de diminuer l'écart-type global par rapport à une hypothèse d'absence de corrélation.

$$\begin{aligned}
u_c^2(R_i) = & \left(\frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \cdot u(L_{1i}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \cdot u(L_{2i}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \cdot u(B_{2i}) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \cdot u(T_i) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial S} \cdot u(S) \right)^2 + \left(\frac{\partial R'_i}{\partial V} \cdot u(V) \right)^2 \\
& + 2 \left[\frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \text{cov}(u(L_{1i}), u(L_{2i})) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \text{cov}(u(L_{1i}), u(B_{2i})) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \text{cov}(u(L_{1i}), u(T_i)) \right. \\
& + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial S} \text{cov}(u(L_{1i}), u(S)) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{1i}} \frac{\partial R'_i}{\partial V} \text{cov}(u(L_{1i}), u(V)) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \text{cov}(u(L_{2i}), u(B_{2i})) \\
& + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \text{cov}(u(L_{2i}), u(T_i)) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial S} \text{cov}(u(L_{2i}), u(S)) + \frac{\partial R'_i}{\partial L_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial V} \text{cov}(u(L_{2i}), u(V)) \\
& + \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \text{cov}(u(B_{2i}), u(T_i)) + \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial S} \text{cov}(u(B_{2i}), u(S)) + \frac{\partial R'_i}{\partial B_{2i}} \frac{\partial R'_i}{\partial V} \text{cov}(u(B_{2i}), u(V)) \\
& \left. + \frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \frac{\partial R'_i}{\partial S} \text{cov}(u(T_i), u(S)) + \frac{\partial R'_i}{\partial T_i} \frac{\partial R'_i}{\partial V} \text{cov}(u(T_i), u(V)) + \frac{\partial R'_i}{\partial S} \frac{\partial R'_i}{\partial V} \text{cov}(u(S), u(V)) \right] \quad (15)
\end{aligned}$$

Cependant, chaque terme covariance peut être positif ou négatif : c'est le cas lorsque les deux variables en présence évoluent dans le même sens ou en sens opposé.

Il n'est donc pas possible de conclure sur l'influence de la covariance sur la valeur finale de l'incertitude-type composée de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent R'_i .

Nous ferons l'hypothèse d'une absence de corrélation entre les variances des différents facteurs dans la suite de notre étude, sachant qu'il reste un doute dont nous sommes conscients.

Cette hypothèse permet de calculer des valeurs de R'_i par bande de tiers d'octave à partir de simulations numériques de l'ensemble des facteurs $L_{1i}, L_{2i}, B_{2i}, T_i, S$ et V . Les écarts-types sur l'indice R'_i par bande de tiers d'octave obtenus pourront être comparés aux valeurs proposées dans le Tableau 2 de la norme ISO 12999-1.

Néanmoins, les incertitudes sur le volume de la salle de réception et sur la surface de l'élément de séparation sont ici prises en compte. De plus, la méthode de calcul pourra être utilisée pour des situations de mesurage particulières non couvertes par les valeurs du Tableau 2 de la norme 12999-1.

4.2 Hypothèses de la simulation d'indices R'_i

Les grandeurs L1, L2 et B2 sont simulées par des tirages aléatoires selon des lois de distributions normales dont les moyennes et les écart-types correspondent à des résultats de mesure réels. Ces valeurs sont indiquées dans le Tableau 1.

La grandeur T2 est simulée par des tirages aléatoires selon des lois de distribution normales dont les moyennes correspondent à des résultats de mesures réels. Les écarts-types sur T2 ont été fixés de manière conservative. Ces valeurs sont indiquées dans le Tableau 2.

Pour réaliser les simulations, les valeurs de S et V sont simulées pour des lois de distribution normales

dont les moyennes et les écarts-types sont indiquées dans le Tableau 3.²

Ces valeurs correspondent à des ordres de grandeur typiquement observés dans le cadre de nos mesures.

L'ensemble des valeurs moyennes et des écarts-types a été défini par analyse des données d'essais antérieurs.

Le nombre de tirages aléatoires de chaque grandeur a été fixé à 10 000.

Tableau 1. Hypothèses de simulation sur L1, L2 et B2

Fréquence (Hz) ³	L1 (dB)	L2 (dB)	B2 (dB)	Ecart-type u (dB)
100	79.43	52.38	43.77	0.8
125	80.06	60.99	36.19	0.4
160	84.14	62.63	32.43	0.5
200	82.65	53.9	33.38	0.5
250	88.77	50.97	28.37	0.8
315	82.87	57.33	28.05	0.5
400	87.18	59.13	30.23	0.5
500	89.36	60.89	32.88	0.5
630	91.33	59.06	32.38	0.6
800	88.91	54.61	32.65	0.6
1000	88.82	50.29	30.29	0.4
1250	84.61	46.33	29.45	0.4
1600	83.48	41.82	29.34	0.4
2000	87.84	39.98	30.88	0.4
2500	88.32	39.2	31.88	0.5
3150	85.37	42.67	30.15	0.4

Tableau 2. Hypothèses de simulation sur T2

Fréquence (Hz)	T2 (s)	Ecart-type u (s)
100	0.39	0.1
125	0.6	0.1
160	0.3	0.1

² Une vérification de la normalité des valeurs de mesure de S et V a été réalisée au préalable.

³ Nous constatons que l'écart-type u d'un niveau de bruit mesuré est indépendant du niveau de bruit mesuré mais dépend de la fréquence de la bande de tiers d'octave elle-même. Cela est dû à la nature du filtre utilisé lors des mesures, à la pondération de niveau, etc.

200	0.29	0.1
250	0.35	0.1
315	0.28	0.1
400	0.68	0.1
500	0.45	0.1
630	0.35	0.1
800	0.41	0.1
1000	0.38	0.1
1250	0.42	0.1
1600	0.38	0.1
2000	0.4	0.1
2500	0.43	0.1
3150	0.46	0.1

Tableau 3. Hypothèses de simulation sur S et V

Grandeur	Moyenne	Ecart-type u
S	12	1 m ²
V	25	3 m ³

4.3 Résultat de la simulation des indices R'i

Les écarts-types obtenus à la suite de la simulation numérique sont présentés dans les deux dernières colonnes du Tableau 4. Afin de permettre une comparaison rapide, les valeurs de la norme ISO 12999-1 (Situation B correspondant à notre cas de figure) ont également été indiquées.

Tableau 4. Résultats de la simulation des indices R'i

Fréquence (Hz)	NF EN ISO 12999-1 Situation B - σ_{situ} (dB)	Simulation numérique avec S et V connus	Simulation numérique avec S et V non connus
100	2.8	1.8	1.9
125	2.4	0.9	1.1
160	2.0	1.7	1.9
200	1.8	1.8	1.9
250	1.6	1.8	1.9
315	1.4	1.8	1.9
400	1.2	1.0	1.2
500	1.1	1.2	1.4
630	1.0	1.6	1.7
800	1.0	1.4	1.6
1000	1.0	1.4	1.5
1250	1.0	1.3	1.4
1600	1.0	1.4	1.5
2000	1.0	1.4	1.5
2500	1.3	1.3	1.5
3150	1.6	1.1	1.3

Nous constatons que les valeurs des écarts-types par bande de tiers d'octave obtenues par la méthode de Monte-Carlo sont :

- Inférieures celles indiquées par la norme ISO 12999-1 pour les bandes de fréquences centrées sur 100, 125, 160 et 3150Hz ;
- Supérieures ou égales à celles indiquées par la norme ISO 12999-1 pour les autres bandes de fréquences ;
- Supérieures de 0.1 à 0.2 dB lorsque la simulation est réalisée avec une surface S et un volume V pas parfaitement connus.

L'influence de l'incertitude sur la surface S et le volume V semble relativement faible sur le résultat des écarts-types par bande de tiers d'octave.

La somme des écarts-types donnés par la norme ISO 12999-1 (Situation B) est de 23.2 dB. Celles obtenues par simulation dans le cas d'une surface S et d'un volume V parfaitement connus et non parfaitement connus sont respectivement de 22.9 dB et de 25.2 dB. Les valeurs des écarts-types obtenus par simulation sont donc cohérentes avec la norme ISO 12999-1.

4.4 Résultat du calcul des indices R'w

A partir des valeurs simulées d'indices d'affaiblissement acoustique apparents par bande de tiers d'octave, les valeurs uniques de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'w sont calculées.

4.4.1 Cas de la surface et du volume connus parfaitement

Plus de 95% des valeurs finales calculées de l'indice R'w sont comprises dans l'intervalle [-1dB ; +1dB] autour de la valeur de référence mesurée. La distribution des valeurs obtenues sont présentées dans l'histogramme ci-dessous.

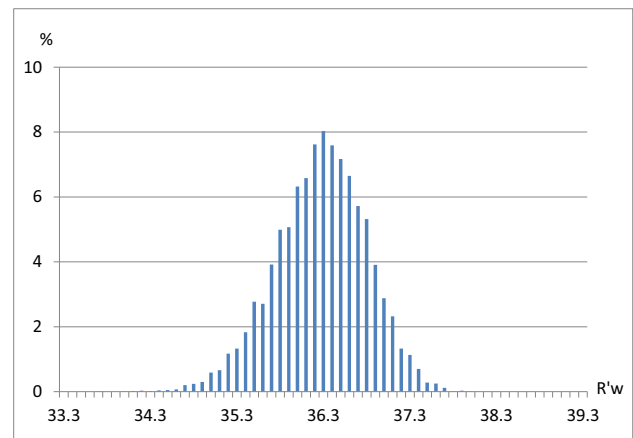


Figure 1. Distribution des valeurs de R'w obtenues par simulation (S et V parfaitement connus)

4.4.2 Cas de la surface et du volume non parfaitement connus

Plus de 95% des valeurs finales calculées de l'indice R'_w sont comprises dans l'intervalle $[-1.6\text{dB} ; +1.6\text{dB}]$ autour de la valeur de référence mesurée. La distribution des valeurs obtenues sont présentées dans l'histogramme ci-dessous.

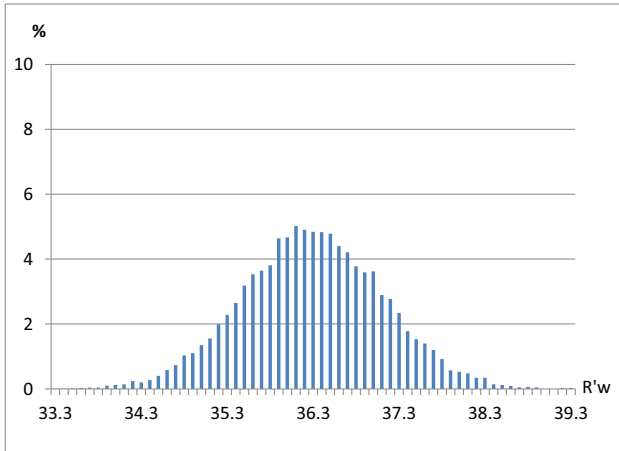


Figure 2. Distribution des valeurs de R'_w obtenues par simulation (avec incertitude sur S et V)

L'analyse des résultats de simulation permet d'observer le caractère gaussien du mesurande. Cette observation est un avantage de la méthode de simulation numérique qui justifie l'association habituelle « $k=2$ correspondant à un niveau de confiance à 95% », ce que l'application de la loi de propagation ne permet pas de garantir.

4.4.3 Conclusion

L'incertitude élargie sur la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w tel qu'il est mesuré est égal à 1.6 dB avec un niveau de confiance de 95% ($k=2$).

5. Incertitude-type selon la norme ISO 12999-1

5.1 Incertitude-type associée à la valeur R'_w selon la norme ISO 12999-1

Le tableau 3 de la norme ISO 12999-1 indique des incertitudes-types associées aux grandeurs uniques, dont R'_w , résultant de mesurages interlaboratoires réalisés conformément aux normes ISO 5725. Ces valeurs sont applicables dans le cas où le volume de la salle de réception et la surface de l'élément de séparation sont bien définis.

Dans notre cas (Situation B), $\sigma = 0,9$ dB, ce qui implique donc une incertitude élargie $U(R'_w) = 1,8$ dB ($k=2$).

5.2 Incertitude-type maximale associée à la valeur R'_w selon l'annexe B de l'ISO 12999-1

En faisant l'hypothèse d'une corrélation positive totale entre les indices d'isolement acoustique apparent R'_w par bande de tiers d'octave, la valeur maximale de l'incertitude associée à l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w est calculée en utilisant la méthode proposée dans l'annexe B de la norme ISO 12999-1 (§B.2).

$$u(R'_w) = \frac{R'_w + u(R'_w) - [R'_w - u(R'_w)]}{2} \text{dB} \quad (17)$$

Avec

$$R'_w + u(R'_w) = -10 \cdot \log \left[\sum_i 10^{(L_i - R_i + u(R'_w))/10} \right] \quad (18)$$

Et

$$R'_w - u(R'_w) = -10 \cdot \log \left[\sum_i 10^{(L_i - R_i - u(R'_w))/10} \right] \quad (19)$$

A partir des données utilisées dans le calcul de l'incertitude type sur la valeur de l'indice R'_w , nous obtenons une valeur maximale $u(R'_w) = 2\text{dB}$. Avec un niveau de confiance de 95%, cela implique une incertitude élargie maximale $U(R'_w) = 4,0$ dB ($k=2$).

Cette valeur peut sembler élevée vis à vis de nos résultats précédents mais il est important de noter que ce cas représente une corrélation positive totale entre les isollements par bande de tiers d'octave. Cette valeur ne sera jamais obtenue expérimentalement puisque plusieurs mesures sont réalisées pour des positions de source et de microphone différentes.

Conclusion

Dans le domaine de l'acoustique du bâtiment, l'incertitude de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré R'_w peut s'avérer complexe à calculer. En alternative à la norme ISO 12999-1, nous avons présenté ici une méthode de simulation numérique à partir des méthodes de Monte-Carlo.

Avec un niveau de confiance de 95% ($k=2$), l'incertitude élargie obtenue par cette méthode de simulation numérique est de 1.6 dB.

Cette valeur est cohérente avec les valeurs de l'incertitude-type obtenues par la norme ISO 12999-1. En effet, l'incertitude-type élargie associée à la valeur de R'_w indiquée dans le tableau 3 de la norme et correspondant à notre cas (Situation B) est de 1,8 dB ($k=2$). A partir de l'annexe B de la norme ISO 12999-1 (§B.2), l'incertitude-type élargie maximale calculée est égale à 4,0 dB ($k=2$).

Basée sur une hypothèse d'absence de corrélation entre les isollements obtenus par bande de tiers d'octave, cette méthode a l'avantage de pouvoir correspondre à

une procédure de mesure ou à une situation de mesurage particulière. En effet, chaque facteur d'incertitude peut ici être personnalisé en fonction des équipements et de la méthodologie d'un laboratoire d'essai. De plus, les incertitudes sur le volume de la salle de réception et sur la surface de l'élément de séparation sont ici prises en compte.

Références

[1] NF EN ISO 12999-1:2014 Acoustique – Détermination et application des incertitudes de mesure dans l'acoustique des bâtiments – Partie 1 : Isolation acoustique

[2] Monographie sur l'évaluation des incertitudes de mesure – Partie 1 : Statistiques et incertitudes de mesure, DeltaMu, 2012

[3] ISO/IEC 98-3:2008 – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)

[4] ISO 16283-1:2014 Acoustique – Mesurage in situ de l'isolation acoustique des bâtiments et des éléments de construction – Partie 1 : Isolation des bruits aériens

[5] NF EN ISO 717-1:2013 Acoustique – Evaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction – Partie 1 Isolement aux bruits aériens

[6] ISO 5725-1:1994 Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 1 : Principes généraux et définitions

[7] ISO 5725-2:1994 Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée