COMMENT MESURER L'INTENSITÉ ACOUSTIQUE CORRECTEMENT ?

J. DUMAS

*Brüel & Kjaer France, 46 rue du Champoreux, BP. 33, F-91541 Mennecy cedex, France***Summary :**

Acoustic intensity is a physical term well known and now frequently used by research labs and manufacturers to qualify sound sources by measuring their sound power and locating their radiating areas. Acoustic intensity is currently measured with a 2 microphones - probe (P-P probe). The calibration of the measuring system has to be done for reliability of measurements. The New IEC standard 1043 defines required technical specifications of the intensity measuring system mainly composed by a probe and a frequency analyser. Particularly, pressure - residual intensity index represents the quality of the system. Brüel & Kjaer has recently released a calibration system allowing complete calibration of the measuring system. Residual intensity may be used for the final calculation of acoustic intensity but many cares has to be taken. A more reliable and simple way is to measure acoustic intensity directly with phase matched channels.

Introduction :

Depuis dix ans, la pratique de la mesure de l'intensité acoustique s'est développée pour permettre une meilleure approche et connaissance des sources sonores. Elle permet principalement la mesure de la puissance acoustique des sources dans des milieux réels tels que les ateliers. La connaissance des flux d'énergie sonore dans le champ proche des sources permet de repérer les zones actives dans le rayonnement sonore. Les limites des mesures de l'intensité acoustique sont maintenant connues. Outre celles liées à l'environnement de mesure (bruits parasites, réverbération de la salle...), d'autres sont dues au principe même de la méthode. Si la limite liée à l'approximation du vecteur vitesse particulaire est immuable, celle amenée par l'instrumentation peut être réduite considérablement en prenant les précautions nécessaires. La norme d'instrumentation CEI 1043 propose les performances à respecter. Le respect de ces critères passe par la validation de l'intensimètre qui peut être réalisé par le système d'étalonnage Brüel & Kjaer Type 3541. Le fonctionnement de ce système s'avérant extrêmement simple et logique, il peut être pratiqué sur le site de mesure, pour assurer la fiabilité des résultats. La notion de l'intensité résiduelle propre à chaque intensimètre doit être obligatoirement connue pour connaître ses limites d'utilisation. De plus, lorsque peu d'attention est portée sur l'instrumentation, l'intensité résiduelle est très variable dans le temps, ce qui rend impossible l'obtention correcte des niveaux d'intensité acoustique surtout si des fichiers de correction sont utilisés pour le résultat final. Il apparaît alors, en pratique, beaucoup plus facile d'utiliser un intensimètre apparié en phase donc à niveau d'intensité résiduelle faible et, qui plus est, garanti stable dans le temps.

La mesure de l'intensité acoustique :

La mesure de ce paramètre a été déjà largement abordée dans la littérature. La figure 1 résume le principe de l'estimation de l'intensité acoustique.

Pour des signaux sinusoïdaux, l'intensité acoustique intégrée temporellement s'exprime ① :

$$\textcircled{1} \quad I_r = \frac{P_A P_B \sin \phi}{\omega \Delta t} \quad \text{où} \quad \omega = \text{fréquence angulaire} = 2\pi f$$

$\phi = \text{phase mutuelle de } P_A \text{ et } P_B$

Fig. 1

L'étalonnage de l'intensimètre :

L'équation ① montre que le résultat final de la mesure de l'intensité acoustique sur une direction r est fonction des deux pressions acoustiques mesurées, de leur phase mutuelle, de la fréquence angulaire, de la masse volumique et enfin de l'écartement entre les microphones. Tous ces paramètres doivent être maîtrisés. La complexité de la formulation de l'intensité acoustique rend difficile l'étalonnage des moyens de mesures. La maîtrise de chaque paramètre se fera comme suit.

- **La masse volumique ρ :** En général, elle est calculée à partir de termes physiques mesurables tels que la pression atmosphérique et la température.

$$\textcircled{2} \quad \rho = 0,348534 \frac{P_{\text{atm}}}{273+T} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} P_{\text{atm}} = \text{pression atmosphérique en hPa} \\ T = \text{Température en } ^\circ\text{C} \end{array}$$

Les paramètres P_{atm} et T sont rentrés numériquement dans l'analyseur. ρ est exprimé en kg/m^3 .

- **L'écartement des microphones Δr :** Il est défini par la configuration de la sonde. Des essais de laboratoire ont permis une optimisation de cette configuration et donc la stabilité de Δr en fonction de la fréquence. La valeur est rentrée numériquement dans l'analyseur. Elle entraîne une limite haute fréquence liée au principe de l'approximation du gradient de pression.

- **Les pressions acoustiques P_A et P_B :** Chacun des microphones pourra être soumis à un étalonnage classique par pistonphone ou source sonore étalon tel que couramment pratiqué pour les sonomètres. L'intérêt de cette action est d'avoir apparié en amplitude la sensibilité des deux voies de mesure.

- **La fréquence angulaire :** Elle est intrinsèque au phénomène sonore à mesurer. Elle est toutefois dépendante dans le résultat, de la résolution en fréquence de la méthode de mesure (FFT, filtrage numérique ou analogique).

- **La phase mutuelle des signaux de pression P_A et P_B :** Cette quantité se révèle comme très importante dans l'estimation finale de l'intensité acoustique en basse fréquence car le moindre désappariement en phase des voies de mesure entraîne une erreur. Elle se caractérise par l'apparition d'une intensité résiduelle. Un biais de quelques dizaines de degrés donne une intensité résiduelle importante. L'intensité résiduelle est intrinsèque à l'instrumentation et ne caractérise pas le champ sonore au point de mesure. Elle se mesure très facilement par simulation d'un champ sonore d'intensité acoustique nulle. Elle définit la limite basse fréquence de l'instrumentation.

La norme d'instrumentation CEI 1043 :

Elle définit les caractéristiques et les grandeurs intervenant dans la mesure de l'intensité acoustique. Egalement, les spécifications des moyens de mesure sont imposées et classifiées en 2 classes principales (classe 1 et 2). L'indice de pression - intensité résiduelle minimum s'avère l'élément principal de caractérisation de l'intensimètre et de distinction des classes. L'intensité résiduelle est produite intrinsèquement par le désappariement en phase (erreur de phase) des 2 voies de mesure de l'intensimètre (sonde + analyseur). L'équation ③ la définit comme suit :

$$\textcircled{3} \quad I_{\text{res}} = - \frac{P_o^2}{\rho c} \frac{1}{k} \frac{\Delta\phi}{\Delta r} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} I_{\text{res}} = \text{intensité résiduelle (W/m}^2\text{)} \\ P_o = \text{pression acoustique du champ sonore d'intensité active nulle (Pa)} \\ \rho c = \text{impédance acoustique (rays)} \\ k = \text{nombre d'onde (rad/m)} \\ \Delta\phi = \text{erreur de phase (rad)} \\ \Delta r = \text{écartement des microphones (m)} \end{array}$$

L'indice pression - intensité résiduelle s'exprime aussi :

④

$$\delta p_{10} = L_{p0} - L_{i0} = 10 \log \left(\frac{k \Delta r}{\Delta \phi_0} \right) \text{ (dB)}$$

δp_{10} s'appelle encore écart de champ résiduel. Il se mesure dans un champ sonore d'intensité active nulle simulé ou recréé artificiellement par positionnement de la sonde.

Les figures 2 et 3 présentent les exigences de la norme pour l'instrumentation utilisée avec les écartements de microphones de 12 et 50 mm (indice pression-intensité résiduelle en fonction de la fréquence).

Figure 2 : indice pression-intensité résiduelle minimum de l'instrumentation pour $\Delta r = 12 \text{ mm}$

Figure 3 : indice pression-intensité résiduelle minimum de l'instrumentation pour $\Delta r = 50 \text{ mm}$

La pratique de l'étalonnage de l'intensimètre :

Le système d'étalonnage de l'intensité acoustique Brüel & Kjaer type 3541 est un ensemble compact permettant la vérification complète des systèmes de mesure de pression, d'intensité acoustique et de vitesse particulière.

Le coupleur d'intensité est un moyen original pour simuler le positionnement de la sonde à 2 microphones pour 0 et 90 degrés d'incidence en condition de champ libre. La figure 4 en montre une coupe.

Un **pistonphone** réalise des étalonnages individuels en niveau de pression, d'intensité et de vitesse particulière.

Une **source sonore** large bande (bruit blanc/ bruit rose) assure la mesure de l'indice pression - intensité résiduelle. Ceci rend possible la quantification de l'intensité résiduelle durant les mesures. La procédure de calibrage est simple. Les instructions et détails des termes de correction sont donnés dans la fiche d'étalonnage fournie avec le système.

Coupe du coupleur d'intensité* utilisé

Fig. 4

Fig. 5

L'étalonnage en pression (Fig. 5). Un niveau de pression connu, produit par le pistonphone, fournit un point de référence qui permet de s'assurer que les voies de mesure ont la même réponse. Jusqu'à maintenant, le calibrage d'un équipement de mesure acoustique s'arrêtait là. Un système de mesure d'intensité acoustique requiert d'autres étapes pour garantir une confiance suffisante.

Vérification de mesure de l'intensité acoustique et de la vitesse particulière (Fig. 6). L'intensité est mesurée à partir des signaux de pression et de vitesse particulière. La vitesse particulière est détectée par intégration temporelle du gradient de pression entre les 2 microphones de la sonde. Lors de l'étalonnage en pression, le signal de gradient de pression est égal à 0. Le fonctionnement du détecteur de vitesse particulière doit être vérifié par l'utilisation du coupleur et du pistonphone en simulant une onde plane incidente à 0° par rapport à la sonde.

Fig. 6

Fig. 7

Mesure de l'indice pression - intensité résiduelle (Fig. 7). Quand les sondes d'intensité sont exposées à une onde plane incidente à 90 degrés, les équipements de mesure devraient indiquer un niveau d'intensité égal à 0 w/m². Ils montreront en fait un niveau d'intensité très inférieur au niveau de pression sonore. Tous les équipements de mesure de l'intensité acoustique montreront cet effet, connu sous le nom d'intensité résiduelle, qui est un problème valable pour tous les angles d'incidence. En utilisant le coupleur et la source sonore large bande, on déterminera le spectre d'indice pression - intensité résiduelle de l'intensimètre. Des microphones à correcteurs de phase permettent d'atteindre des performances excellentes. Ils équipent dorénavant toutes les sondes Brüel & Kjaer et répondent aux exigences de la norme CEI 1043.

Variations de l'indice pression intensité résiduelle : stabilité de l'intensimètre :

A partir de l'indice pression intensité résiduelle, est définie la capacité dynamique de l'intensimètre ⑤ dépendant du niveau de précision requis. La récente norme internationale ISO/DIS 9614-1 concernant le mesurage de la puissance acoustique par intensimétrie montre l'utilisation de la capacité dynamique dans la validation des résultats de mesure.

⑤ $L_d = \delta_{p_{ro}} - K \quad (\text{dB})$ où $L_d = \text{capacité dynamique}$
 $\delta_{p_{ro}} = \text{indice de pression - intensité résiduelle} = L_{p_{ro}} - L_{p_o}$
 $K = \text{facteur définissant la classe de précision}$

L'intensité résiduelle peut être utilisée pour optimiser l'intensité mesurée et obtenir une valeur corrigée.

⑥ $I_{cor} = I_m - \frac{P_m^2}{P_o^2} \cdot I_o$ où $I_{cor} = \text{intensité active corrigé (w/m}^2\text{)}$
 $I_m = \text{intensité mesurée (w/m}^2\text{)}$
 $I_o = \text{intensité résiduelle mesurée dans le coupleur du 3541 (w/m}^2\text{)}$
 $P_m = \text{pression efficace moyenne mesurée (Pa)}$
 $P_o = \text{pression efficace moyenne mesurée dans le coupleur du 3541 (Pa)}$

L'utilisation de cette formule oblige à garantir la stabilité dans le temps de $\delta_{p_{ro}}$. Or, il s'avère que pour différentes configurations électroniques de la chaîne de mesurage (gains, filtres de conditionnement...) et parce que tout se joue à quelques dixièmes de degrés, la formule ⑥ est très souvent inexploitable pour assurer le sérieux du résultat. De plus, la mesure de l'intensité acoustique dans les champs réactifs renforce l'exigence de stabilité. Evidemment, si le constructeur de l'instrumentation assure des valeurs minimum pour $\delta_{p_{ro}}$, alors cette formule de correction est utilisable. Brüel & Kjaer garantit dorénavant pour toute combinaison sonde/analyseur de fréquence, une erreur de phase entre voies de mesure de 0,15° maximum de 20 à 250 Hz. Dans ce cas, la formule ⑥ ne joue que sur quelques centièmes de dB. Une mesure régulière de $\delta_{p_{ro}}$ assure la maîtrise de l'intensimètre et permet de repousser les limites d'utilisation surtout en basse fréquence.

Conclusion :

Pour mesurer l'intensité acoustique correctement, il est absolument nécessaire, outre les précautions d'usage propres aux mesures physiques, de définir l'indice pression - intensité résiduelle (écart de champ résiduel) caractérisant la qualité de l'intensimètre. De plus, cet intensimètre devra répondre aux exigences définies par la norme CEI 1043. Un système d'étalonnage pratique et simple permettra de maîtriser l'intensimètre à n'importe quel moment et d'éviter la pratique de fichiers de correction pour obtenir une valeur fiable. La sensibilité aux erreurs de phase de l'intensimètre est trop grande pour pouvoir négliger la stabilité des performances. C'est pourquoi, il est plus sûr de mesurer l'intensité acoustique correctement avec un système dont les voies de mesure sont appariés en phase.

Références :

- CEI 1043 : "Instruments For the Measurement of Sound Intensity", 2nd Committee Draft, January 1991.
- ISO 9614-1 : "Détermination des niveaux de puissance acoustique des sources sonores par intensimétrie - Mesurage par points".
- "Système d'étalonnage pour les appareils de mesure de l'intensité acoustique. Un outil au service des industriels" Jacky DUMAS, Brüel & Kjaer France, Congrès International de Métrologie, 17, 18 et 19 septembre 1991, Lyon.
- Manuel d'instruction du système d'étalonnage d'intensité Brüel & Kjaer type 3541, BE 1024-11.