

→ P. Danière, V. Planeau,
Département Ingénierie des équipes de travail, INRS, Centre de Lorraine, Nancy

WORKPLACE ACOUSTICS

CORRECTION OF SPATIAL DECAY ACCORDING TO THE EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF THE REFERENCE SOUND SOURCES

Under existing regulations, the acoustic qualification of industrial workplaces is covered by the ministerial order of 30 August 1990. This order requests the on-site measurement of the spatial decay of noise produced by a reference sound source (RSS). Such measurements allow calculation of the noise decay slope resulting from doubling the distance, noted DL, the legal values of which are set by the order in relation to the surface area and fittings of the premises.

Measurements carried out in the same industrial premises with two different RSS resulted in different DL for the same premises, the discrepancy between DL not being constant from one work area to another. To identify the source of these discrepancies, measurements of two commonly used RSS (RSS A: mechanical source CIMPO/INRS, and RSS B: loudspeaker source) were carried out in a free field on a reflecting plane in a semi-anechoic chamber, then in industrial premises. These measurements allowed quantification of the importance of RSS non-omnidirectivity as well as their impact on the decay readings. It emerged that although the directivity characteristics of the RSS used were in conformity with the standard requirements relative to RSS, their non-omnidirectivity was at the source of the DL discrepancies observed in the industrial premises. Two corrections of the decay readings were tested in an attempt to reduce the discrepancies. One exploits qualified, on-site, free-field measurements on a reflecting plane, the other directivity measurements carried out in a semi-anechoic chamber. Testing these corrections in a reference configuration where the theoretical DL was known led to rejecting the principle of correction based on directivity measurements in a semi-anechoic chamber. The measurements carried out in eight industrial premises were exploited to test the efficiency of the correction based on experimental decay curves obtained in a free field on a reflecting plane. The average value of the DL discrepancies obtained with the two sources without correction was 0.66 dB(A). Using the correction took this average value to 0.15 dB(A). This correction was therefore not total, but did however significantly reduce the influence of RSS non-omnidirectivity in the premises investigated. The test demonstrated that, in the work areas tested, RSS A can be used without correction whereas RSS B must definitely be corrected. The correction used has been included in draft standard ISO 14257 relative to measuring and modelling spatial decay curves in workplaces with a view to assessing their acoustic performance.

● work premises ● acoustics ● spatial decay
● measurement ● reference sound sources
● experimental characteristics

Acoustique des locaux de travail

Correction des décroissances spatiales suivant les caractéristiques expérimentales des sources sonores de référence

La qualification acoustique des locaux industriels s'appuie, sur le plan réglementaire, sur l'arrêté du 30 août 1990. Cet arrêté préconise la mesure dans le local, des courbes de décroissance du bruit produit par une Source sonore de Référence (SSR) lorsque l'on s'en éloigne. De telles mesures permettent de calculer la pente de décroissance du bruit par doublement de distance, notée DL, dont les valeurs limites réglementaires sont fixées par l'arrêté, en fonction de la surface et de l'encombrement du local.

Des mesures effectuées dans les mêmes locaux industriels avec deux SSR différentes ont conduit à des DL différentes pour un même local, les écarts entre DL n'étant pas constants d'un local à l'autre.

Afin d'identifier l'origine de ces écarts, des mesures sur deux SSR couramment utilisées (SSR A : source mécanique CIMPO/INRS et SSR B : source à haut-parleurs) ont été effectuées en champ libre sur plan réfléchissant, en chambre semi-anéchoïque, puis dans des locaux industriels. Ces mesures ont permis de quantifier l'importance des défauts de directivité des SSR, ainsi que leur impact sur les relevés de décroissance. Il est apparu que bien que les caractéristiques de directivité des SSR utilisées soient conformes aux exigences normatives relatives aux SSR, leurs défauts de directivité sont à l'origine des écarts de DL constatés dans les locaux industriels.

Deux corrections des relevés de décroissance ont été testées afin de tenter de réduire les écarts. L'une exploite des mesures sur site extérieur qualifié de champ libre sur plan réfléchissant, l'autre exploite des mesures de directivité effectuées en chambre semi-anéchoïque. Le test de ces corrections dans une configuration de référence, où la DL théorique est connue, a conduit à rejeter le principe de correction à partir des mesures de directivité en chambre semi-anéchoïque.

Des mesures effectuées dans huit locaux industriels ont été exploitées pour tester l'efficacité de la correction à partir des courbes de décroissance expérimentale en champ libre sur plan réfléchissant. La valeur moyenne des écarts de DL obtenues avec les deux sources sans correction est de 0,66 dB(A). L'utilisation de la correction permet de ramener cette valeur moyenne à 0,15 dB(A). Cette correction n'est donc pas totale, mais elle permet de réduire de façon notable l'influence des défauts de directivité des SSR dans les locaux traités. Ce test a permis de constater que, dans les locaux testés, la SSR A peut être utilisée sans correction alors que la SSR B doit impérativement être corrigée. La correction utilisée a été incluse au projet de normalisation ISO 14257 relatif au mesurage et à la modélisation des courbes de décroissance sonore spatiale dans les locaux de travail, en vue de l'évaluation de leur performance acoustique.

● acoustique ● local de travail ● décroissance du bruit ● mesure ● expérimentations

L'application de l'arrêté français du 30 août 1990, relatif à la correction acoustique des locaux de travail [1], s'appuie sur le relevé de la décroissance du niveau sonore émis par une Source Sonore de Référence (SSR) en fonction de la distance à la source. Ce relevé de décroissance permet de calculer la pente moyenne par doublement de distance. Le paramètre obtenu est appelé DL ; il caractérise globalement la qualité

acoustique du local et doit être supérieur, en valeur absolue, à des valeurs limites définies dans l'arrêté, en fonction de l'encombrement et de la surface au sol de ce local.

La mise en œuvre des mesures définies dans l'arrêté à l'aide de deux SSR différentes, a mis en évidence des différences entre les pentes DL obtenues avec les deux sources pour un même local. Les

deux séries de mesures ont également été réalisées dans plusieurs locaux et les écarts de DL constatés entre les deux sources sont différents d'un local à l'autre.

A partir de ce constat et dans le cadre d'une réflexion commune avec le Club d'Acoustique des Locaux de Travail, groupe associé à la Société Française d'Acoustique, l'INRS a engagé une étude dont l'objectif était de préciser les origines des différences constatées, et de tenter de les réduire en corrigeant les mesures effectuées en fonction de la source utilisée.

1. Arrêté du 30 août 1990

L'arrêté français du 30 août 1990 prescrit une mesure de la décroissance sonore à partir des relevés des niveaux sonores à des distances données de la SSR (3, 4, 6, 8, 12, 16 et 24 m), la distance maximale (24 m) étant fonction des dimensions du local et d'une distance minimale entre la SSR et les parois du local.

Le niveau sonore, en dB(A), en chaque point, est calculé non pas à partir des niveaux sonores bruts relevés par bande d'octave, mais à partir de niveaux sonores par bande d'octave corrigés. Cette correction dite « de bruit rose », est utilisée pour simuler une SSR émettant un bruit dont le spectre en bandes d'octave serait plat, afin de ne privilégier aucune bande de fréquence dans le calcul de la pente.

Les niveaux sonores aux différents points de mesure, corrigés en dB(A), sont ensuite utilisés pour déterminer, par régression linéaire, les coefficients de la droite représentative des mesures, au sens des moindres carrés. La pente de cette droite, exprimée en dB(A) par doublement de distance, est le résultat recherché DL. La pente DL exprime la diminution de niveau sonore en dB(A) par doublement de distance, que l'on compare aux valeurs limites données dans l'arrêté français. Un exemple de résultat est présenté sur la *figure 1*.

Fig. 1. Exemple de tracé de la courbe de décroissance et de calcul de la pente DL -
Example of the plot of the decay curve and the calculation of the DL slope

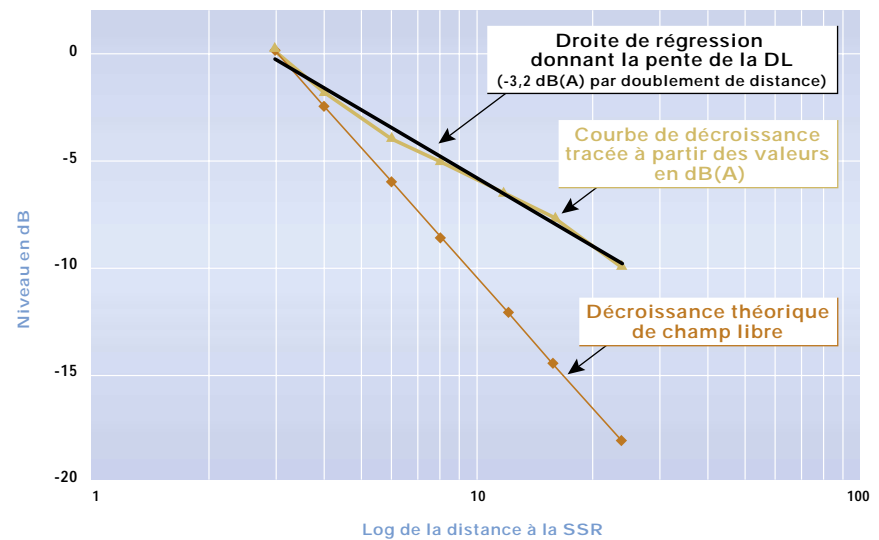


Fig. 2. Exemple des décroissances différentes relevées dans le même local (n° 2) avec deux SSR différentes -
Example of the different decays recorded in the same premises (n° 2) with two different RSS

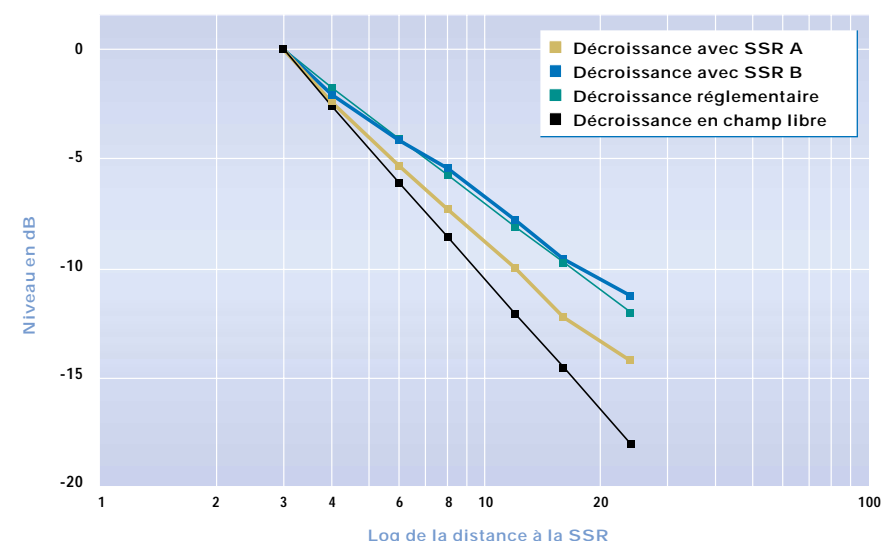
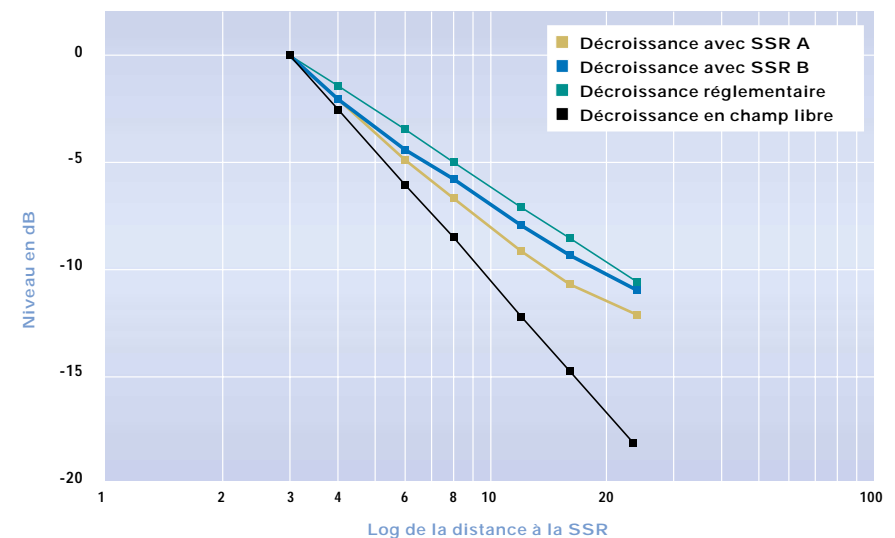


Fig. 3. Exemple des décroissances différentes relevées dans le même local (n° 7) avec deux SSR différentes -
Example of the different decays recorded in the same premises (n° 7) with two different RSS

2. Mise en application - Analyse des problèmes

La qualité acoustique de 8 locaux, déterminée avec deux SSR différentes (SSR A et SSR B), a été évaluée selon les prescriptions de l'arrêté du 30 août 1990.

Le principe de fonctionnement de la SSR A est basé sur le rayonnement d'une plaque circulaire en aluminium excitée par une machine à frapper (source CIMPO/INRS) [2].

Le principe de fonctionnement de la SSR B est basé sur le rayonnement d'une série de 7 haut-parleurs montés à la périphérie d'une hémisphère et excités en bruit rose.

A titre d'exemple, les *figures 2 et 3* présentent les relevés des niveaux sonores corrigés en dB(A) obtenus avec ces deux SSR dans deux locaux (n° 2 et n° 7).

Pour le local 2

- les pentes obtenues à partir des mesures sont :
 - 4,1 dB(A) avec la SSR A,
 - 3,6 dB(A) avec la SSR B.
- La valeur limite réglementaire de pente DL est égale à - 3,5 dB(A).

Ce local est donc conforme à la réglementation, quelle que soit la SSR utilisée.

Pour le local 7

- les pentes obtenues à partir des mesures sont :
 - 4,8 dB(A) avec la SSR A,
 - 3,8 dB(A) avec la SSR B.
- La valeur limite réglementaire de pente DL est égale à - 4,0 dB(A).

La conformité de ce local est donc fonction de la source utilisée (conforme avec SSR A et non conforme avec SSR B).

Ces deux exemples permettent de constater que les pentes DL obtenues avec les deux sources sont différentes pour un même local et que les écarts entre les résultats obtenus à partir des deux sources varient en fonction du local.

Dans le cas de locaux dont les caractéristiques sont proches des limites réglementaires, la conformité ou la non conformité d'un local peut donc varier en fonction de la SSR utilisée (1).

(1) L'incertitude expérimentale sur les pentes DL présentées dans ce texte est de $\pm 0,2$ dB(A), compte tenu du mode opératoire utilisé. La prise en compte de cette incertitude peut modifier la conformité réglementaire d'un local mais ne modifie pas les écarts de résultats constatés entre les deux sources.

Les premières analyses ont conduit à penser que les défauts de directivité des SSR pouvaient être l'une des causes principales des écarts constatés. En effet, dans les locaux traités acoustiquement, les points de mesure de la décroissance les plus proches de la SSR sont fortement influencés par le champ direct de celle-ci. Tous les défauts de directivité de la SSR dans le plan vertical se répercutent alors sur le début de la courbe de décroissance et donc sur la pente DL. La partie éloignée de la courbe de décroissance est, quant à elle, influencée par le couplage entre la directivité globale de la source et la réponse acoustique globale du local (champ réverbéré).

L'écart sur les DL, obtenues avec deux sources, peut donc varier d'un local à l'autre suivant le poids relatif du champ direct et du champ réverbéré aux différents points de mesure de la décroissance dans le local, et ce bien que les défauts de directivité des SSR soient intrinsèques aux sources et indépendants du local.

3. Méthodologie

Afin d'étudier l'influence de la directivité des SSR sur la détermination de la DL, des mesures destinées à caractériser la directivité des deux SSR utilisées ont été effectuées en chambre semi-anéchoïque.

Ensuite, d'autres mesures ont été réalisées en extérieur dans une configuration de champ libre sur plan réfléchissant. Dans cette configuration, la décroissance théorique est connue. Elle est de - 6 dB par doublement de distance, car il n'existe pas de champ réverbéré et les sources sont situées sur le sol. Les relevés expérimentaux obtenus pour les deux sources permettent alors d'identifier l'influence de la directivité du champ direct émis par les SSR sur la décroissance.

Deux méthodes correctives de l'effet de directivité ont ensuite été étudiées. Il est en effet possible de corriger les décroissances relevées en remplaçant, dans chaque mesure de pression, la pression due au champ direct réel de la source sonore de référence par celle d'un champ direct théorique, qui serait fourni par une source omnidirectionnelle de même puissance acoustique.

La pression due au champ direct réel peut être déterminée, soit à partir des mesures de directivité de la SSR en chambre semi-anéchoïque, soit directe-

ment à partir des mesures sur site extérieur qualifié de champ libre sur plan réfléchissant. L'effet de ces deux méthodes de correction a été quantifié sur les mesures en extérieur.

Les corrections ont ensuite été appliquées aux mesures réalisées avec les deux SSR dans les huit locaux. Dans ces cas, il existe un champ réverbéré et les corrections précédentes qui ne portent que sur le champ direct, ne permettront pas de corriger totalement les écarts entre les deux sources. Les résultats obtenus dans les locaux après correction ont donc été utilisés pour quantifier l'effet de la directivité globale des sources sur la DL des locaux étudiés.

3.1. Détermination des caractéristiques acoustiques des deux SSR en chambre semi-anéchoïque

Le spectre de la puissance acoustique émise en bandes d'octave par les SSR est nécessaire pour effectuer les corrections de bruit rose dans la détermination de la DL. Le spectre et le niveau de puissance émise a été déterminé en utilisant le projet de norme ISO 6926 [4] (2), en exploitant deux séries de mesures en 20 positions fixes réparties sur une hémisphère de rayon 2 m. Pour chaque série, les positions de microphone correspondent à 20 hauteurs successives (0,05 m ; 0,15 m ; 0,25 m ; 0,35 m ; 1,75 m ; 1,85 m ; 1,95 m). Pour chaque hauteur, l'emplacement en azimut doit être déplacé de 60° en 60° par rapport à la position précédente, afin de créer une configuration d'échantillonnage en spirale. La deuxième série de 20 points est obtenue aux mêmes emplacements, mais en tournant la SSR de 180°, ce qui est recommandé par la norme quand la SSR est directive.

Les 40 points de mesure sont également utilisés pour déterminer l'indice de directivité global en bandes d'octave des SSR suivant les recommandations du projet de norme ISO 6926 [4]. L'indice de directivité est égal à la différence maximale entre le niveau de pression acoustique relevé en un point particulier sur une surface hémisphérique de rayon 2 m, et la pression acoustique moyenne relevée sur cette surface. Cet indice est donné en valeur absolue.

(2) Cette norme a été publiée depuis la rédaction de l'article sous la référence ISO 6926:1999 (cf. [4]).

Les caractéristiques obtenues pour les deux SSR sont présentées dans *les tableaux I et II*.

Le *tableau I* permet de constater que les deux SSR ne présentent pas le même niveau de puissance acoustique et que leur spectre n'a pas la même forme. Cette différence de forme de spectre peut introduire des différences dans la «réponse du local» à l'émission de chaque SSR, compte tenu du couplage entre émission et réception que constitue l'absorption moyenne du local. De plus, dans un cas comme dans l'autre, le bruit obtenu n'est pas rose (spectre par bande d'octave plat). Il est donc nécessaire de tenir compte de la puissance émise par octave pour réaliser la correction de bruit rose lors de l'exploitation des mesures pour déterminer la décroissance.

L'indice de directivité global de la SSR B est de 2,6 dB(A), alors que celui de la SSR A est plus faible puisqu'il est de 1,7 dB(A). La SSR B est donc plus directive que la SSR A. Ces deux SSR respectent néanmoins les valeurs maximales exprimées en octaves de l'indice de directivité (6 dB) imposées dans les normes relatives aux caractéristiques des sources sonores de référence [3, 4].

Bien que les deux SSR utilisées pour les mesures de pente DL satisfassent aux exigences normatives relatives à la caractérisation et à l'étalonnage des SSR, leur utilisation dans les locaux conduit à des résultats différents. Il est donc possible, si l'influence de la directivité est confirmée, que les exigences normatives sur la directivité des SSR soient insuffisantes pour une caractérisation précise de la qualité acoustique des locaux et, dans ce cas, il conviendrait de modifier les exigences normatives des SSR.

3.2. Mesures de la décroissance en champ libre extérieur sur plan réfléchissant

Le relevé de la décroissance est effectué sur une piste d'un terrain d'aviation, en béton lissé, de plus de 50 m de largeur et de grande longueur. Les relevés de la pression acoustique sont effectués à une hauteur de 1,2 m et pour les distances, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 16 et 24 m de la SSR. Il s'agit des distances vraies entre centre acoustique de la SSR et centre du microphone, et non des distances projetées au sol.

Les résultats en dB(A) sont comparés à la décroissance théorique pour les deux SSR sur la *figure 4*. Cette figure permet de constater que la SSR A présente une décroissance très proche de la décroissan-

ce théorique, alors que celle de la SSR B se décompose en deux segments (de 3 à 12 m et de 12 à 24 m), dont les pentes sont respectivement plus faible (de l'ordre de 5 dB(A)) et plus forte (de l'ordre de 7 dB(A)) que la pente théorique (6 dB(A)).

Les DL, obtenues à partir des mesures pour les deux SSR, sont également comparées par octave et en dB(A) dans le *tableau III*. La DL en dB(A) est obtenue en utilisant la réglementation c'est-à-dire sans tenir compte de l'octave 125 Hz et en effectuant la correction de bruit rose pour les spectres de puissance globale émise par les sources.

Pour la SSR A, on constate dans ce tableau que les pentes DL par octave sont assez homogènes et proches de la valeur idéale (- 6 dB), et que la pente DL expérimentale est de - 6,3 dB(A). La figure 4 permet d'ailleurs de constater que l'écart de 0,3 dB(A) par rapport à la valeur théorique provient uniquement du dernier point de décroissance à 24 m où il existe un écart de 1 dB(A) par rapport à la valeur théorique. Etant donné que la pente DL est calculée sur trois doublings de distance (3-6 m, 6-12 m, 12-24 m), l'écart de 1 dB(A) dû au dernier point est réparti sur les trois segments, soit 0,33 dB(A) par doublement de distance.

Par contre, pour la SSR B, les pentes DL par octave sont sensiblement inférieures à la valeur théorique, dans les octaves 125 et 1 000 Hz, et particulièrement sous estimée dans l'octave 2 000 Hz. Par contre

pour les octaves 250 Hz et 500 Hz les pentes DL sont légèrement surestimées. La droite de régression calculée en dB(A) sur l'ensemble des octaves moyenne les deux tendances.

Le résultat global est donc relativement peu éloigné de la valeur théorique, malgré des écarts importants dans certaines bandes d'octave.

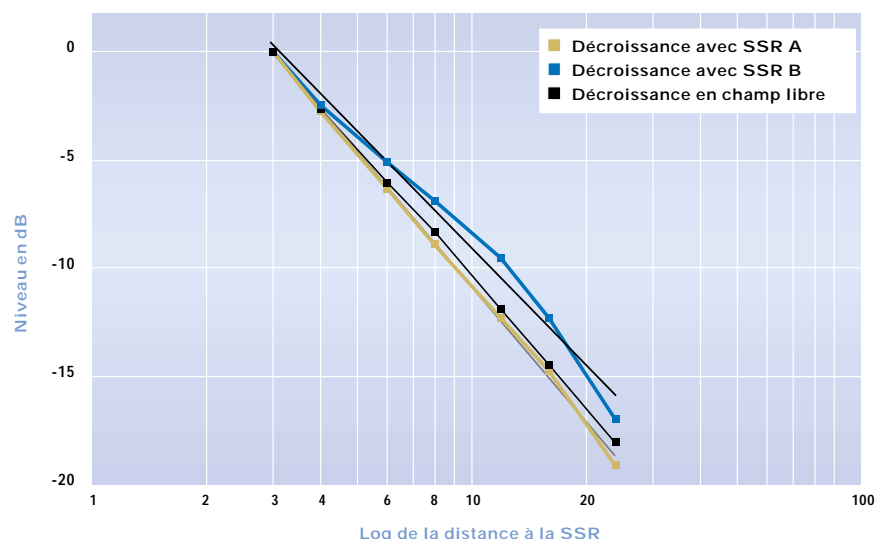
Compte tenu des écarts de DL obtenus entre la valeur théorique et les valeurs mesurées pour les deux SSR, il apparaît que la SSR A peut être utilisée pratiquement sans correction mais que la SSR B nécessite une correction relativement importante pour retrouver les valeurs théoriques.

3.3. Principe du calcul des corrections

Le champ acoustique dans un local est dû à la superposition du champ direct, identique au champ libre sur plan réfléchissant, et caractéristique de la source seule et du champ réverbéré, fonction de la source et du local. Pour construire les méthodes de correction, on suppose vérifiées les deux hypothèses suivantes :

- dans la superposition des deux champs acoustiques (direct et réverbéré), la composition des pressions est seulement énergétique ;
- au premier ordre, les écarts constatés sont essentiellement dus à des défauts de directivité de la SSR utilisée et à ses effets sur le champ direct.

Fig. 4. Décroissances en champ libre sur plan réfléchissant relevées avec les deux SSR et droite de régression donnant la pente DL - Free-field decays on a reflecting plane recorded with the two RSS and regression curve giving the DL slope



La première hypothèse conduit à écrire le carré du module de la pression mesurée en un point M dans un local $P^2(M)$ sous la forme :

$$P^2(M) = P_{\text{dir}}^2(M) + P_{\text{rev}}^2(M) \quad (1)$$

où :

$P_{\text{dir}}^2(M)$ est le carré du module de la pression due au champ direct ;

$P_{\text{rev}}^2(M)$ est le carré du module de la pression due au champ réverbéré.

Le principe des corrections proposées consistera donc à utiliser la relation (1) ci-dessus et à remplacer le champ direct réel influencé par la directivité de la SSR, par un champ direct idéal, qui serait émis par une source omnidirectionnelle émettant la même puissance acoustique dans le secteur angulaire de mesure.

Le carré du module de la pression corrigée P_c^2 en un point M du local s'écrira donc :

$$P_c^2(M) = P^2(M) - P_{\text{dir}}^2(M) + P_{\text{th}}^2(M) \quad (2)$$

où :

$P_{\text{th}}^2(M)$ est le carré du module de la pression due au champ direct théorique.

Le champ direct réel de la SSR $P_{\text{dir}}^2(M)$ peut être obtenu de deux façons différentes :

- en utilisant la décroissance expérimentale en champ libre sur plan réfléchissant ;
- en utilisant la directivité expérimentale.

Correction à partir de la décroissance expérimentale

L'amplitude des corrections à apporter à chaque point de mesure et pour chaque octave est obtenue directement à partir des mesures de décroissance en champ libre sur plan réfléchissant. L'amplitude de la correction est exprimée à partir de la différence entre la pression mesurée en champ libre sur plan réfléchissant et la pression théorique qui serait émise par une source monopolaire de même puissance que la SSR dans le secteur angulaire de mesure de la décroissance. La relation (3) donne l'expression de la correction issue des mesures de décroissance en champ libre sur plan réfléchissant :

$$\text{Cor}(M) = P_{\text{mes}}^2(M) - P_{\text{th}}^2(M) \quad (3)$$

Où :

$P_{\text{mes}}^2(M)$ est le carré du module de la pression mesurée en champ libre sur plan réfléchissant.

Dans le cas particulier des mesures en champ libre sur plan réfléchissant, il est intéressant de comparer en dB les niveaux de pression mesurés et les niveaux de pression théoriques. Ce résultat permet d'évaluer les performances des deux SSR par rapport à une source théorique et de les comparer entre elles.

Les *tableaux IV et V* présentent les écarts en dB en chaque point par octave et en dB(A) pour les deux SSR.

Ces deux tableaux permettent de constater encore une fois que la SSR A est très proche d'une source monopolaire parfaite, sauf pour le point à 24 m où l'écart atteint - 1,1 dB(A).

TABLEAU I

NIVEAUX DE PUISSANCE ACOUSTIQUE DÉTERMINÉS POUR LES DEUX SSR
SOUND POWER LEVELS DETERMINED FOR THE TWO RSS

LW SSR	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	LIN	A
SSR A	97,4	98,8	102,7	111,2	110,6	107,0	115,5	115,6
SSR B	89,7	103,8	104,9	106,0	103,8	99,0	111,2	110,1

TABLEAU II

INDICES DE DIRECTIVITÉ GLOBAUX DÉTERMINÉS POUR LES DEUX SSR
GLOBAL DIRECTIVITY INDEXES DETERMINED FOR THE TWO RSS

DI SSR	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	LIN	A
SSR A	1,2	3,1	2,7	2,8	1,8	3,6	1,5	1,7
SSR B	2,5	1,2	2,3	3,4	3,6	2,6	2,2	2,6

TABLEAU III

DL DÉTERMINÉS POUR LES DEUX SSR EN CHAMP LIBRE SUR PLAN RÉFLÉCHISSANT
DL DETERMINED FOR THE TWO RSS IN A FREE FIELD ON A REFLECTING PLANE

DL SSR	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	dB(A)
SSR A	- 6,0	- 6,1	- 6,0	- 6,3	- 6,3	- 6,3	- 6,3
SSR B	- 5,6	- 6,2	- 6,1	- 5,3	- 4,4	- 5,9	- 5,4

TABLEAU IV

SSR A - ÉCARTS AUX POINTS DE MESURE À PARTIR DE LA DÉCROISSANCE
RSS A - DISCREPANCY AT THE MEASUREMENTS POINTS DETERMINED FROM THE DECAY

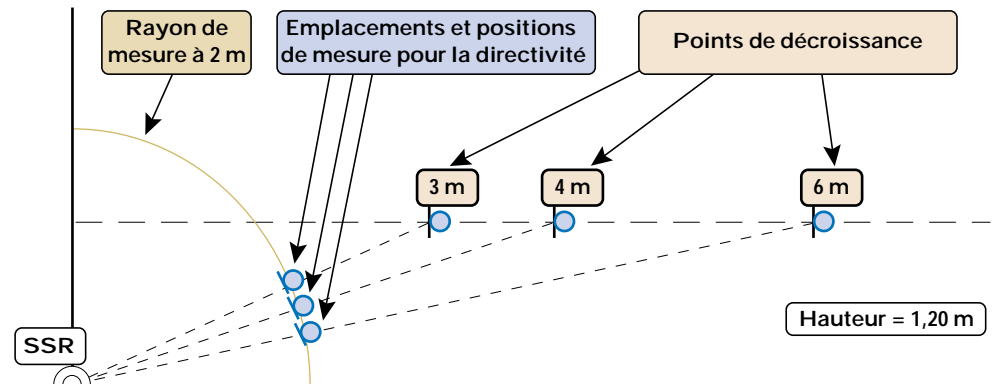
ÉCARTS SSR A	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	dB(A)
point à 3 m	0,5	- 0,4	- 1,0	- 0,5	0,8	- 0,5	0,0
point à 4 m	0,1	0,0	- 0,9	- 0,4	0,6	- 0,9	- 0,1
point à 6 m	0,0	- 0,1	- 0,6	- 0,4	0,6	- 1,4	- 0,2
point à 8 m	- 0,1	- 0,2	- 0,5	- 0,5	0,3	- 1,8	- 0,4
point à 12 m	0,0	- 0,1	- 0,5	- 0,5	0,6	- 1,8	- 0,2
point à 16 m	0,4	- 0,1	- 0,8	- 0,8	0,6	- 1,0	- 0,2
point à 24 m	0,3	- 0,5	- 1,2	- 1,5	- 0,7	- 1,6	- 1,1

TABLEAU V

SSR B - ÉCARTS AUX POINTS DE MESURE À PARTIR DE LA DÉCROISSANCE
RSS B - DISCREPANCY AT THE MEASUREMENT POINTS DETERMINED FROM THE DECAY

ÉCARTS SSR B	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	dB(A)
point à 3 m	- 1,2	- 0,6	- 0,9	- 3,1	- 4,1	0,5	- 2,5
point à 4 m	- 1,0	- 0,7	- 0,7	- 1,5	- 3,6	- 0,8	- 1,7
point à 6 m	- 1,1	- 0,6	- 0,3	- 0,1	- 0,9	- 2,6	- 0,5
point à 8 m	- 0,8	- 0,6	- 0,4	0,1	0,3	- 1,7	0,0
point à 12 m	- 0,6	- 0,8	- 0,4	0,2	1,3	1,2	0,5
point à 16 m	- 0,3	- 0,8	- 0,7	- 0,1	1,1	0,8	0,2
point à 24 m	0,0	- 1,3	- 1,2	- 0,8	- 0,1	- 1,1	- 0,7

Fig. 5. Correction à partir de la directivité expérimentale -
Correction on the basis of experimental directivity



Ce résultat confirme le fait que cette source peut être utilisée pratiquement sans correction.

La SSR B nécessite par contre des corrections. En effet, les écarts les plus importants sont de l'ordre de - 2 dB(A) et apparaissent pour les points situés à proximité de la source. Or ce sont ces points qui sont le plus influencés par le terme direct dans les relevés de décroissance expérimentale dans les locaux.

L'effet des corrections sur les décroissances mesurées dans les locaux sera donc plus important pour la SSR B que pour la SSR A.

Correction à partir de la directivité expérimentale (fig. 5)

L'amplitude des corrections à apporter à chaque point de mesure et pour chaque octave est obtenue à partir des relevés de directivité de la SSR en chambre semi-anéchoïque, en supposant une propagation en ondes sphériques entre les points de mesure de la directivité de la SSR et les points de mesure de la décroissance. Les mesures de directivité en chambre semi-anéchoïque sont effectuées sur un arc de cercle de rayon 2 m situé dans le plan vertical contenant la direction de mesure de la décroissance, en des points correspondants aux angles de vue de la SSR pendant le relevé de décroissance. Pour ces mesures, le microphone est dirigé vers le centre de l'arc de cercle, qui coïncide avec le centre de la SSR.

La relation 4 donne l'expression de la correction issue de la mesure de directivité en chambre semi-anéchoïque, en supposant une propagation sphérique :

$$\text{Cor}(M) = P^2(\theta(M)) \times \frac{4}{r^2(M)} - P_{th}^2(M) \quad (4)$$

TABLEAU VI

SSR A - ÉCARTS AUX POINTS DE MESURE À PARTIR DE LA DIRECTIVITÉ
RSS A - DISCREPANCE AT THE MEASUREMENT POINTS DETERMINED FROM THE DIRECTIVITY

ECARTS SSR A	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	dB(A)
point à 3 m	-0,5	0,1	0,3	0,3	-0,7	0,6	-0,1
point à 4 m	-0,2	-0,1	0,5	0,7	-0,6	0,8	0,1
point à 6 m	0,1	0,3	0,7	0,6	-0,5	0,2	0,0
point à 8 m	0,0	0,3	0,7	0,3	0,4	1,0	0,4
point à 12 m	-0,1	0,1	0,8	0,3	-0,6	1,7	0,1
point à 16 m	-0,4	0,2	1,3	0,8	-1,1	1,2	0,1
point à 24 m	-0,3	0,5	1,4	1,6	0,5	2,7	1,4

TABLEAU VII

SSR B - ÉCARTS AUX POINTS DE MESURE À PARTIR DE LA DIRECTIVITÉ
RSS B - DISCREPANCE AT THE MEASUREMENT POINTS DETERMINED FROM THE DIRECTIVITY

ECARTS SSR B	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	dB(A)
point à 3 m	0,8	0,2	0,1	0,6	0,8	-0,2	0,3
point à 4 m	1,0	0,7	0,2	0,2	0,6	-0,3	0,3
point à 6 m	1,2	0,8	0,4	0,3	0,0	-0,1	0,2
point à 8 m	1,0	0,7	0,7	0,2	0,6	0,6	0,4
point à 12 m	0,5	0,7	0,7	0,4	0,0	-1,3	0,2
point à 16 m	0,4	0,9	1,1	1,0	0,1	0,4	0,7
point à 24 m	0,2	1,2	1,5	1,7	1,0	2,8	1,6

TABLEAU VIII

VALEURS BRUTES DES PENTES DL EN dB(A) ET ÉCARTS ENTRE DL DONNÉS PAR LES DEUX SSR -
UNCORRECTED VALUES OF THE DL SLOPES IN dB(A) AND DISCREPANCE BETWEEN THE DL GIVEN BY THE TWO RSS

LOCAL	1	2	3	4	5	6	7	8
SSR A	-4,8	-4,1	-4,4	-3,5	-5,0	-3,5	-4,8	-4,9
SSR B	-4,0	-3,6	-3,5	-3,2	-4,3	-2,9	-3,8	-4,4
ECARTS DE DL	0,8	0,5	0,9	0,3	0,7	0,6	1,0	0,5

Où : $P^2(\theta(M))$ est le carré du module de la pression mesurée à 2 m pour l'angle θ .

Cette correction de directivité présente l'avantage, par rapport à la correction de décroissance, de pouvoir être déterminée à partir des mesures en chambre semi-anéchoïque sans recourir à des mesures sur site extérieur, qui peuvent être difficiles à réaliser.

Etant donné l'analogie entre les relations (3) et (4), il est important de vérifier que les termes correctifs obtenus par ces deux relations sont équivalents.

Cette vérification peut être réalisée simplement en comparant en dB les niveaux de pression mesurés en champ libre sur plan réfléchissant $P_{mes}(M)$ et les niveaux de pression construits à partir de la direc-

tivité mesurée en chambre semi-anéchoïque $P(\theta(M)) \times 2/r(M)$. Cette comparaison permet d'évaluer l'efficacité de la méthode de correction à partir de la directivité expérimentale. Les *tableaux VI et VII* présentent les écarts en dB obtenus en chaque point par octave et en dB(A) pour les deux SSR.

Ces deux tableaux permettent de constater que la prise en compte de la directivité expérimentale mesurée en chambre semi-anéchoïque ne permet pas de retrouver exactement les mesures réalisées en champ libre sur plan réfléchissant. Les écarts constatés sont relativement faibles pour les deux sources, sauf pour les points à 24 m et dans l'octave 4 KHz.

Les écarts constatés sont attribués à l'utilisation de l'hypothèse d'expansion monopolaire de la directivité mesurée à 2 m. Cette hypothèse n'est valide que pour une source ponctuelle non directive, or les dimensions des SSR utilisées et leur index de directivité ne vérifient pas cette hypothèse.

La correction monopolaire de directivité, bien qu'intéressante sur le plan expérimental, n'est donc pas totalement adaptée à ce type de sources. Il serait préférable d'utiliser une expansion multipolaire de la directivité des sources qui tient compte du champ acoustique proche rayonné par les sources. Mais ce type d'expansion nécessite des mesures phasées lourdes en chambre semi-anéchoïque, ce qui annule l'intérêt de ce type d'expansion.

Dans la suite, seule la correction de décroissance expérimentale, qui tient compte du rayonnement effectif de la source en champ proche et en champ lointain, a été utilisée pour le traitement des mesures effectuées dans les locaux.

3.4. Mesure et correction des décroissances dans les 8 locaux industriels

Pour cette dernière étape, des décroissances sont relevées dans 8 locaux différents, avec les deux SSR A et B. Les relevés sont effectués conformément à l'arrêté du 30 août 1990, c'est-à-dire au maximum sur une longueur de 24 m, aux distances de 3, 4, 6, 8, 12, 16 et 24 m. Dans le cas éventuel où des accidents peuvent apparaître dans les décroissances, les points à 2 et 5 m ont été aussi mesurés afin d'affiner le tracé de la décroissance ; ils n'ont pas été pris en compte dans les calculs de la pente DL. Les locaux sont choisis de façon à constituer un échantillon regroupant des locaux vides et encombrés, petits et grands, traités acoustiquement.

Les valeurs de la pente DL de la droite de régression calculées pour chaque local sans correction, et pour les deux SSR sont données dans le *tableau VIII*.

Comme le laissent supposer les résultats des mesures effectuées en champ libre (cf. § 3.2), les pentes DL en dB(A) obtenues avec la SSR B sont systématiquement plus faibles que celles obtenues avec la SSR A. Les écarts de pente (SSR B-SSR A) en dB(A) sont sensiblement différents d'un local à l'autre, et varient entre 0,3 et 1,0 dB(A), avec une valeur moyenne calculée sur l'ensemble des 8 locaux de

0,66 dB(A). Ceci confirme qu'une correction qui ne tient pas compte du local, ne peut être que partielle.

Les corrections de décroissance expérimentale ont été appliquées aux valeurs brutes de DL déterminées dans les 8 locaux à l'aide des deux SSR. A titre d'exemple, les *figures 6 et 7* présentent l'effet de cette correction pour les locaux 2 et 7. Ces deux figures permettent de constater que l'effet de la correction sur la SSR A est très faible alors qu'il est assez important dans le cas de la SSR B, et ce quel que soit le local considéré.

Fig. 6. Exemple de décroissances corrigées dans le local n° 2 - *Example of corrected decays in premises n° 2*

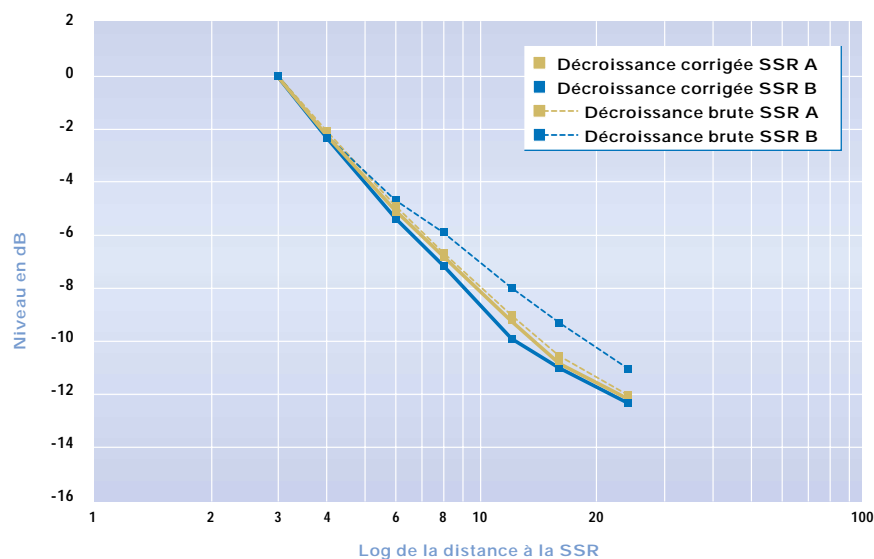
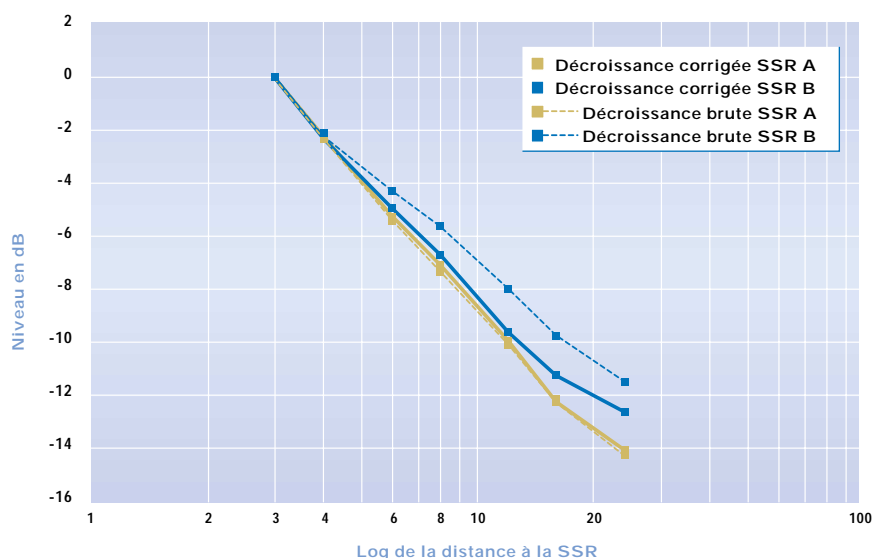


Fig. 7. Exemple de décroissances corrigées dans le local n° 7 - *Example of corrected decays in premises n° 7*



On remarque également que les courbes corrigées des deux sources sont maintenant très proches.

Le **tableau IX** présente l'ensemble des résultats obtenus pour les deux SSR dans les 8 locaux.

L'analyse de ces résultats montre que :

- l'effet de la correction est important sur les décroissances et les pentes DL obtenues avec la SSR B, alors qu'il est très faible sur les mesures effectuées avec la SSR A ;

- la valeur moyenne de l'écart résiduel pour les 8 locaux est de 0,15 dB après correction à l'aide de la décroissance expérimentale, au lieu de 0,66 dB avant correction.

La correction proposée est donc pertinente lorsque l'on utilise la SSR B. Elle ne semble pas indispensable lorsque l'on utilise la SSR A. Par contre, cette correction n'est pas complète, puisqu'un écart demeure entre les résultats obtenus après correction avec les deux sources. Ceci est dû aux hypothèses simplificatrices qui ont été admises comme point de départ, à savoir la non-prise en compte des phases dans les calculs de pression corrigée, et au principe même de la correction du champ direct seul, qui est indépendant du local. L'écart résiduel entre les résultats corrigés est attribué au terme de couplage entre la directivité globale de la source et la réponse globale du local qui ne peut être corrigé expérimentalement.

CONCLUSION

Cette étude montre que les défauts de directivité des SSR expliquent une grande partie des écarts constatés entre les pentes DL calculées à partir des décroissances relevées dans des locaux avec des SSR différentes. Dans le cas particulier de deux SSR A et B, couramment utilisées, il apparaît que :

- les défauts de directivité dans le plan vertical conduisent à des anomalies du

TABLEAU IX

VALEURS DES PENTES DL EN dB(A) BRUTES ET CORRIGÉES ET ÉCARTS RÉSIDUELS ENTRE SSR
UNCORRECTED AND CORRECTED VALUES OF THE DL SLOPES IN dB(A),
AND RESIDUAL DISCREPANCY BETWEEN RSS

LOCAL 1	1	2	3	4	5	6	7	8
SSR A bruts	- 4,8	- 4,1	- 4,4	- 3,5	- 5,0	- 3,5	- 4,8	- 4,9
SSR A corrigés	- 4,7	- 4,1	- 4,4	- 3,5	- 5,0	- 3,5	- 4,8	- 4,9
Influence de la correction	- 0,1	0	0	0	0	0	0	0
SSR B bruts	- 4,0	- 3,6	- 3,5	- 3,2	- 4,3	- 2,9	- 3,8	- 4,4
SSR B corrigés	- 4,7	- 4,2	- 4,1	- 3,7	- 4,7	- 3,3	- 4,3	- 4,7
Influence de la correction	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,3
Écarts sans correction	0,8	0,5	0,9	0,3	0,7	0,6	1,0	0,5
Écarts après correction	0,0	- 0,1	0,3	- 0,2	0,3	0,2	0,5	0,2

champ direct, qui se traduit par des décroissances en champ libre sur plan réfléchissant qui s'éloignent de la valeur théorique de 6 dB ;

- les défauts de directivité dans le plan vertical sont susceptibles de générer dans certains locaux des écarts entre les valeurs de pentes DL mesurées avec les deux SSR de l'ordre de 1 dB(A) ;

- pour les 8 locaux étudiés, la correction de la décroissance mesurée à l'aide de la décroissance expérimentale en champ libre sur plan réfléchissant, permet de ramener la valeur moyenne des écarts de 0,66 dB(A) à 0,15 dB(A), l'écart résiduel est attribué à l'effet de la directivité globale de la SSR sur le terme de champ réverbéré ;

- la correction à partir de la décroissance en champ libre sur plan réfléchissant est indispensable pour la SSR B alors qu'elle ne modifie pratiquement pas les résultats obtenus à l'aide de la SSR A ; la SSR A peut donc être utilisée sans correction alors que la SSR B doit impérativement être corrigée ;

- les caractéristiques de directivité des SSR, imposées par les normes existantes, ne sont pas assez contraignantes pour

assurer des résultats compatibles avec l'objectif des mesures si aucune correction n'est utilisée.

Article reçu en mars, accepté en mai 2000

BIBLIOGRAPHIE

1. Arrêté français du 30 août 1990 pris pour l'application de l'article R. 2352-2-11 du Code du travail et relatif à la correction acoustique des locaux de travail. *Journal Officiel*, 27 septembre 1990.
 2. BENARD M., DAMONGEOT A. - La source sonore de référence CIMPO-INRS. *Revue d'Acoustique*, 1975, 35, pp. 75-79.
 3. NF S 31-005 - Acoustique. Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit. Caractérisation et étalonnage des sources sonores de référence. Paris - La Défense, AFNOR, 1987, 15 p.
 4. ISO/DIS 6926 - Acoustique. Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit. Prescriptions relatives aux performances et à l'étalonnage des sources de référence. Genève, ISO, (projet de norme).
- ISO 6926:1999 - Acoustique. Exigences relatives aux performances et à l'étalonnage des sources sonores de référence utilisées dans la détermination des niveaux de puissance sonore. Genève, ISO, déc. 1999, 11 p. (norme définitive).