

# Détermination de la puissance acoustique par intensimétrie, à l'aide de la technique de balayage

## Comparaison par simulation numérique des indicateurs de précision

*P. Danière, Service Métrologie - acoustique - vibrations, centre de recherche de l'INRS, Nancy*

**Determination of sound power by intensity measurement using a scanning technique. Comparison of accuracy indicators by numerical simulation**

*This study was based essentially on numerical simulation of the determination of sound power levels by intensity measurement using two techniques (fixed point and scanning). Additional experiments confirmed the results of the simulation and also allowed for variation in time, which could not be simulated.*

*It demonstrated that the scanning technique, using the same criteria and indicators as the fixed point technique, is a valid method for the determination of sound power levels. It also served to define the scanning conditions that produce results comparable to those obtained by the fixed point method.*

Sound power / Scanning technique / Intensity / Measurement / Accuracy

***L'étude réalisée repose sur une simulation numérique de la détermination de la puissance acoustique par intensimétrie par les deux techniques (points fixes et balayage). Une expérimentation complémentaire d'une part a permis de confirmer les résultats de la simulation, d'autre part a pris en compte le paramètre temporel qui ne pouvait être simulé.***

***Elle a permis de valider l'utilisation, pour la technique du balayage, des mêmes indicateurs et des mêmes critères que ceux utilisés pour la technique des points fixes. Elle a également permis de préciser les conditions du balayage qui conduisent à des résultats comparables à ceux obtenus par la méthode des points fixes.***

Puissance acoustique / Intensimétrie / Technique de balayage / Indicateur de précision

**L**a déclaration de l'émission sonore des machines a été instituée par deux directives européennes, qui, reprises en droit français, ont conduit à l'adoption de l'arrêté du 25 avril 1988 et du décret 92-767 du 29 juillet 1992 (cf. encadré n° 1). Ceux-ci instaurent la déclaration de l'émission sonore des machines, laquelle relève de la seule responsabilité du constructeur. Cette déclaration fait appel à trois descripteurs :

- le niveau de pression acoustique pondéré A au poste de travail,
- le niveau de pression acoustique crête non pondéré, au poste de travail,

- le niveau de puissance acoustique pondéré A de la machine noté  $L_{WA}$ .

### **La normalisation**

Sept méthodes de mesure, toutes basées sur l'utilisation du niveau de pression acoustique, sont actuellement disponibles pour déterminer le niveau de puissance acoustique, représentant l'énergie sonore totale émise par la machine. Aucune de ces méthodes n'est à la fois utilisable sur site, rapide d'exécution et suffisamment précise (classe de précision 2, « expertise », cf. encadré n° 2).

## Réglementation

- Directive 86/188/CEE du 12 mai 1986 relative à la protection des travailleurs contre les risques dus à l'exposition au bruit pendant le travail. *J.O. des Communautés européennes*, n° L.137 du 24 mai 1986, pp. 28-34.
- Directive 89/392/CEE, dite *directive machines*, amendée par les directives 91/368/CEE, 93/44/CEE et 93/68/CEE.
- Arrêté du 25 avril 1988 pris pour l'application de l'article R. 233-104-1 du code du travail et relatif à l'information sur le bruit émis par les machines et appareils. *J.O.* du 7 mai 1988, pp. 6923-6924.
- Décret n° 92-767 du 29 juillet 1992 relatif aux règles techniques et aux procédures de certification de conformité applicables aux équipements de travail. *J.O.* du 7 août 1992, pp. 10696-10714.

L'utilisation des méthodes de mesure d'intensité acoustique pour la détermination de la puissance acoustique offre de nouvelles possibilités sur site dans des situations acoustiques difficiles. Comme le précise en particulier la normalisation de la technique des points fixes [1, 2], l'obtention d'une précision de classe 2 nécessite souvent un grand nombre de points de mesure et une relative stabilité du bruit de fond (voir définition des indicateurs de champs et des critères de validité en annexe 2), ce qui en fait une méthode relativement lourde et coûteuse dont l'intérêt ne s'est pas totalement confirmé dans la pratique.

La technique de balayage consiste à déplacer continûment la sonde intensimétrique sur la surface de mesure entourant la source sonore. Compte tenu du principal intérêt de cette technique, qui est de réduire notablement la durée d'acquisition, la technique de balayage (« BAL ») est en cours de normalisation, mais il lui manquait au départ des outils analogues à ceux de

la technique des points fixes (« PF »), c'est-à-dire en particulier des critères d'évaluation de la précision de la mesure.

## La littérature

Plusieurs études [3 à 9] ont montré que :

- les écarts entre ces deux techniques sont faibles, typiquement inférieurs à 0,5 dB par bande de tiers d'octaves ou par bande d'octaves,
- dans les conditions expérimentales employées, la précision obtenue pour le BAL est supérieure ou égale à celle estimée à partir du calcul des indicateurs de champ des PF.

Les *principaux facteurs d'erreur* introduits par le BAL, qui repose sur un moyennage simultané spatial et temporel, sont :

- le remplacement d'une intégrale de surface par une intégrale le long d'un trajet,
- le choix de la vitesse,  $V$ , de déplacement de la sonde,
- le déplacement manuel de la sonde qui induit une fluctuation de la vitesse,  $\Delta V$ ,
- le choix du pas du balayage,  $p$ , (distance entre deux trajectoires parallèles),
- la tenue manuelle de la sonde qui ne peut garantir une direction rigoureusement perpendiculaire à la surface de mesure.

*Autres facteurs d'erreurs* : on retrouve également ceux propres aux PF :

- choix de la distance,  $d$ , de mesure (distance entre la surface de mesure et la surface enveloppe de la source),
- influence du temps d'intégration,  $T$ , pour chaque PF.

Certains aspects de ces facteurs d'erreurs ont été étudiés ; les résultats suivants ont été obtenus :

- l'erreur statistique dépend uniquement du temps réel total de mesure,  $T_N$  ( $T_N = T \times N$ ),  $T$  étant le temps d'intégration de chaque point fixe,  $N$  étant le nombre de points fixes de mesure [10] ;
- un balayage même partiel mais bien réparti sur la surface conduit à des erreurs inférieures à 0,1 dB, pour des sources monopolaires [11], (résultat obtenu par simulation numérique) ;

## Liste des abréviations utilisées

2L, 2l, h	longueur, largeur et hauteur de la machine (surface enveloppe)
C	coefficient de classe de précision
d	distance de mesure (distance entre la surface enveloppe de la machine et la surface de mesure S)
$d_{BAL}$	distance parcourue par la sonde entre deux acquisitions indépendantes d'intensité acoustique (distance entre deux pseudo-points fixes $i$ et $i+1$ )
$d_{PF}$	distance entre deux points fixes $i$ et $i+1$ , sur la même face
F1	indicateur de variabilité temporelle du champ acoustique
F2	indicateur d'écart global de champ (réactivité)
F3	indicateur de bruit parasite global
F4	indicateur d'hétérogénéité du champ
$I_n$	Intensité acoustique normale à la surface de mesure
$L_w$	niveau de puissance acoustique d'une source
$L_{wc}$	niveau de puissance acoustique intégré (calculé) sur une surface de mesure S
$L_{wo}$	niveau de puissance acoustique de la source (donnée du problème)
$L_{wSi}$	niveau de puissance acoustique obtenu par simulation de la mesure
$L_{wSIBAL}$	niveau de puissance acoustique obtenu par simulation de la technique du balayage
$L_{wSiPF}$	niveau de puissance acoustique obtenu par simulation de la technique des points fixes
N	nombre de points fixes de mesure
T	temps d'acquisition et de calcul d'un spectre d'intensité acoustique
V	vitesse de déplacement de la sonde
W	puissance acoustique d'une source
$x_s, y_s, z_s$	coordonnées de la source dans le volume enveloppe de la machine
$\Delta_c$	écart théorique entre le niveau de puissance acoustique calculé et $L_{wo}$
$\Delta_{Si}$	écart obtenu par simulation de la mesure
$\Delta_{SIBAL}$	écart obtenu par simulation de la technique du balayage
$\Delta_{SiPF}$	écart obtenu par simulation de la technique des points fixes

## Les normes d'acoustiques et les classes de précision

cf. l'article de J. Jacques, qui fait le point sur les normes d'acoustiques industrielles et une synthèse pratique de l'état de l'art (ND 2018-163-96).

Les trois classes de précision auxquelles appartiennent telle ou telle méthode de mesurage renseignent sur la *qualité* des résultats recherchés par le biais des dites méthodes.

Selon la classe d'appartenance, la méthode implique des installations plus ou moins sophistiquées et des conditions de mesurage plus ou moins strictes.

- La classe de précision 1, dite « laboratoire », exige des mesures en salle d'essai (réverbérante, anéchoïque ou semi-anéchoïque...).
- La classe de précision 2, dite « expertise », spécifie les conditions d'environnement à respecter strictement, permettant des mesures sur site.
- La classe de précision 3, dite « contrôle » ; certaines méthodes de classe 2 peuvent fournir des résultats de classe 3 par la fixation de valeur de paramètre a priori. Ce sont des méthodes qui fournissent des données d'évaluation.

– pour des sources idéales (monopôle, dipôle et quadrupôle) et décentrées par rapport au centre du plan de mesure (fig. 1), l'erreur introduite par la technique PF a été formulée analytiquement. Cette erreur est inférieure à 0,5 dB pour 4 points de mesure [12] ;

– la comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec 3 séries de points fixes et un balayage montre que la précision augmente avec le nombre de PF et que la technique BAL apparaît bien comme un suréchantillonnage spatial [13] ;

– l'influence de la variation de vitesse de déplacement de la sonde (ce qui est inévitable avec un balayage manuel) sur la précision de résultat a été calculée. Ce calcul montre que l'erreur est inférieure au dB et décroît quand la distance de mesure augmente [14] ;

– en considérant la technique BAL comme un simple échantillonnage spatial et en stockant les spectres d'intensité acoustique à intervalles de temps réguliers,  $T$ , correspondant au temps de calcul et d'intégration d'un spectre, l'indicateur de variabilité de champ  $F_4$  a été calculé à partir de l'ensemble des « pseudo-points ». Il en ressort que la précision est améliorée si le temps d'acquisition augmente [15], (même conclusion que [16]) ;

– en présence de bruit de fond, il existe une distance optimale de mesure  $d$  qui minimise l'erreur [17] (simulation de la mesure par PF).

Dans la plupart des études recensées, les auteurs ont calculé et utilisé, pour la technique BAL, les indicateurs de champ  $F_2$  et  $F_3$  de la technique PF définis dans les normes ISO et AFNOR (cf.

annexe 2). Mis à part Hojbjerg [15], aucune de ces études ne propose d'indicateur de variabilité du champ  $F_4$  (hétérogénéité du champ permettant de valider l'échantillonnage réalisé). En effet, la technique BAL ne fournit qu'un nombre restreint de valeurs partielles d'intensités, typiquement une par face ou une par élément de surface partielle balayée, alors que, pour la technique PF, on peut avoir 20, 30, voire plus, valeurs partielles d'intensités.

Seul Hojbjerg [15], considérant la technique BAL comme un simple échantillonnage spatial à des intervalles de temps réguliers (temps d'intégration), introduit l'indicateur  $F_4$ . Cependant, comme la plupart des études de cette bibliographie, celle-ci a été réalisée en utilisant une source de référence centrée à l'intérieur du volume enveloppe.

Aucune de ces études ne permet donc de conclure sur la combinaison des paramètres de la technique BAL à utiliser pour obtenir une précision comparable à celle obtenue avec la technique des points fixes quand la source rayonne sur la surface enveloppe des intensités très différentes.

Notre étude a pour but de calculer l'indicateur  $F_4$  (indicateur de qualité de l'échantillonnage spatial de la surface de mesure) en simulant à la fois la technique des points fixes et celle du balayage, dans des situations où la source est excentrée dans le volume enveloppe, ce qui est la réalité rencontrée lors des mesures sur des machines industrielles. Cette excentration de la source permet d'introduire un gradient d'intensité sur la surface enveloppe de plus de 15 dB.

Ainsi, elle valide certaines combinaisons de paramètres BAL en comparaison de la validation obtenue avec la technique PF.

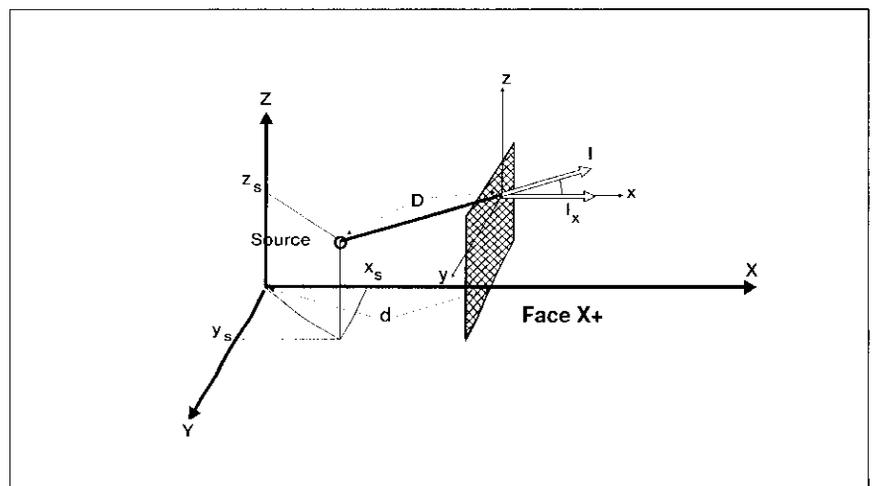


Fig. 1. Mesure de l'intensité acoustique sur un élément de surface (face X+) – Sound intensity measurement on a surface (face X+)

## 1. PROTOCOLE DE L'ETUDE

En faisant l'hypothèse que la technique BAL est un échantillonnage spatial, notre étude avait pour but de simuler et de réaliser des mesures de puissance pour dégager parmi les combinaisons de paramètres de la technique BAL celle qui conduit à la classe de précision 2.

Pour obtenir la bonne combinaison, on a commencé par déterminer le nombre de points fixes minimum pour respecter la classe 2. Une fois ce nombre minimum obtenu, on calcule l'écart de puissance acoustique (écart entre la valeur calculée et la valeur de référence). On recherche ensuite la combinaison des paramètres de mesure par la technique BAL qui conduit au même écart de puissance acoustique.

### 1.1. Protocole des simulations

Nous avons vu que les écarts entre résultats obtenus par la technique PF et par la technique BAL sont typiquement de 0,5 dB. Cette valeur est de l'ordre de grandeur de la précision de la méthode intensimétrique. Dans ces conditions, la simulation numérique permet de s'affranchir de l'incertitude de mesure liée à la méthode intensimétrique, de mieux contrôler, de façon indépendante, les différents paramètres et de ne conserver que l'écart apparaissant entre les deux techniques. On utilisera dans la suite du texte l'indice « Si » pour qualifier les simulations.

#### 1.1.1. Modélisation de la machine et de la surface de mesure

La machine a été choisie de forme parallélépipédique de dimensions  $2L$ ,  $2l$ ,  $h$ , « placée » sur un plan réfléchissant (fig. 2). Elle est modélisée par une source unique omnidirectionnelle, positionnée à l'intérieur du volume enveloppe de la machine, aux coordonnées  $(x_s, y_s, z_s)$ . On définit une surface de mesure également parallélépipédique située à la distance  $d$  de la surface de la machine. Pour créer artificiellement, à partir d'une source omnidirectionnelle, un champ acoustique hétérogène sur la surface de mesure, on a utilisé 3 positions extrêmes de la source à l'intérieur du volume enveloppe de la machine.

Le niveau de puissance acoustique partielle par face a été calculé analyti-

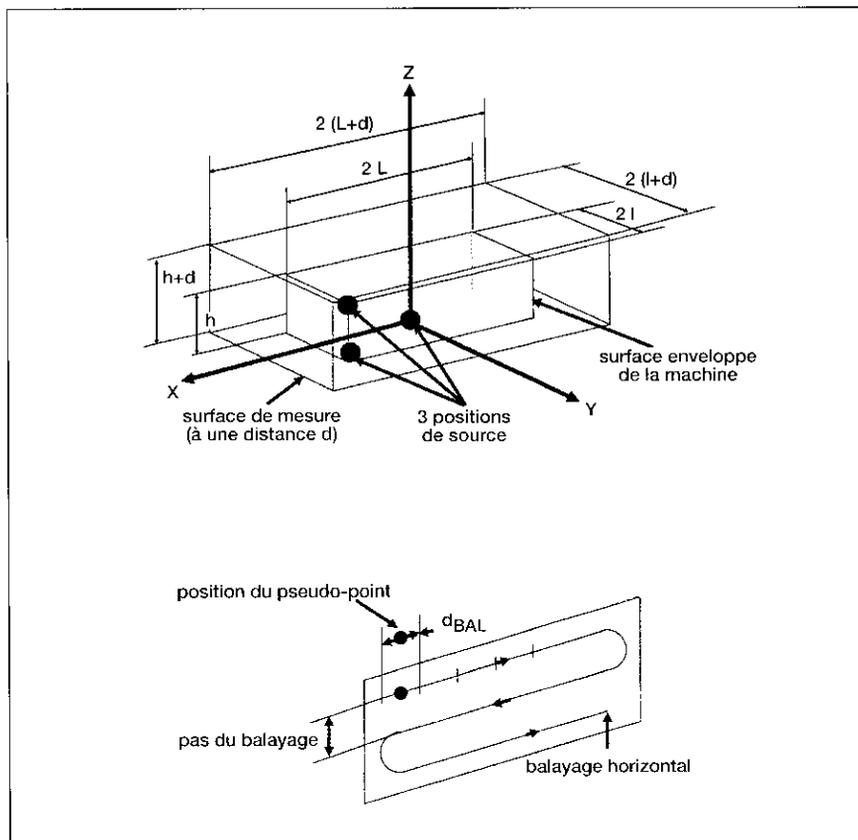


Fig. 2. Modélisation de la machine et du balayage (sur une face) – Modelling of machine and scanning (on one face)

quement (cf. annexe 1). La sommation des niveaux de puissance acoustique partielle des 5 faces du parallélépipède de mesure conduit au niveau  $L_{wc}$  de puissance acoustique totale intégrée sur la surface  $S$  de mesure, différent du niveau  $L_{wo}$  de puissance acoustique de la source (qui est une donnée du problème). La différence  $\Delta_c$  ( $\Delta_c = L_{wc} - L_{wo}$ ) donne l'expression analytique de l'erreur théorique introduite par la forme de la surface de mesure et par le décentrement de la source ( $\Delta_c$  tend vers 0 si la surface est hémisphérique et la source centrée, pour un champ libre sur plan réfléchissant).

#### 1.1.2. Simulation de la mesure par la technique PF

On peut qualifier la mesure en calculant l'indicateur F4 dont le résultat combiné avec le nombre  $N$  de points de mesure permettra de connaître la classe de précision de cette « mesure » (cf. annexes 2 et 3). De façon inverse, on peut rechercher le nombre  $N$  de points fixes pour obtenir

une classe de précision donnée. Ainsi, par simulation, nous avons recherché le nombre  $N$  minimum de points fixes nécessaire pour garantir un résultat de « mesure » de classe 2. Un fois ce nombre obtenu, on a calculé l'écart  $\Delta_{SiPF}$ , qui caractérise la justesse de la mesure par la technique PF.

#### 1.1.3. Simulation de la mesure par la technique BAL

L'hypothèse de base sur laquelle repose la simulation numérique est de considérer la technique BAL comme un échantillonnage spatial. On assimile donc cette technique à une succession de pseudo-points fixes  $i$  situés sur la trajectoire de la sonde à espacements réguliers  $d_{BAL}$ , distance de balayage entre deux pseudo-points :

$$d_{BAL} = V \times T$$

$V$  : vitesse de déplacement de la sonde

$T$  : temps d'intégration

TABLEAU I

Paramètres liés à la géométrie de la machine	
Taille de la machine : la dimension de base « a » a pris les valeurs ci-contre	0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,25 ; 1,5 ; 2 ; 3 m
Forme de la machine (fig. 3) (pour toutes ces formes, on a respecté la limitation : $Max [2L, 2l, h] \leq 3 m$ )	cubique ( $2L = a, 2l = a, h = a$ ) linéaire horizontale ( $2L = 3a, 2l = a, h = a$ ) linéaire verticale ( $2L = a, 2l = a, h = 3a$ ) plate horizontale ( $2L = 3a, 2l = 3a, h = a$ ) plate verticale ( $2L = 3a, 2l = a, h = 3a$ )
Paramètres liés au rayonnement de la machine	
Trois positions (ou décentrement) de la source de bruit à l'intérieur du volume de la machine (fig. 2)	décentrement nul, $x_s = 0, y_s = 0, z_s = 0$ décentrement au sol, $x_s = L, y_s = l, z_s = 0$ décentrement supérieur $x_s = L, y_s = l, z_s = h$
Paramètres liés au balayage et à la surface de mesure	
Distance (la distance de balayage est le résultat du produit vitesse de déplacement x temps d'intégration, fig. 2)	d de mesure (0,25 m) $d_{BAL}$ de balayage : 0,125 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 m

On calcule, à chaque pseudo-point  $i$ , la valeur de la composante normale  $I_{ni}$  du vecteur intensité. On calcule ensuite le niveau  $L_{wSIBAL}$  de puissance acoustique à partir de ces valeurs d'intensité  $I_n$  en chaque pseudo-point. On peut ainsi déterminer par simulation, comme pour la technique PF, l'écart  $\Delta_{SIBAL}$  qui représente l'écart apporté par la technique BAL ( $\Delta_{SIBAL} = L_{wSIBAL} - L_{wO}$ ), écart que l'on étudiera en fonction des paramètres propres au balayage, pour une population de machines et de surfaces de mesure.

### 1.1.4. Domaine de variation des paramètres étudiés

Les paramètres étudiés peuvent être répartis en 3 familles présentées dans le tableau I.

### 1.2. Protocole de l'expérimentation

La simulation précédente, qui prenait en compte le paramètre distance de balayage  $d_{BAL}$ , ne permettait pas de séparer les paramètres V et T. L'expérimentation a permis de les séparer. Elle a consisté à mesurer, par les deux techniques, la puissance acoustique partielle traversant un plan de  $1 m \times 1 m$  situé au-dessus (à 0,10 m ; 0,20 m et 0,40 m) d'une source dipolaire (deux hauts-parleurs assemblés dos à dos et alimentés en opposition de phase par un signal dont la compo-

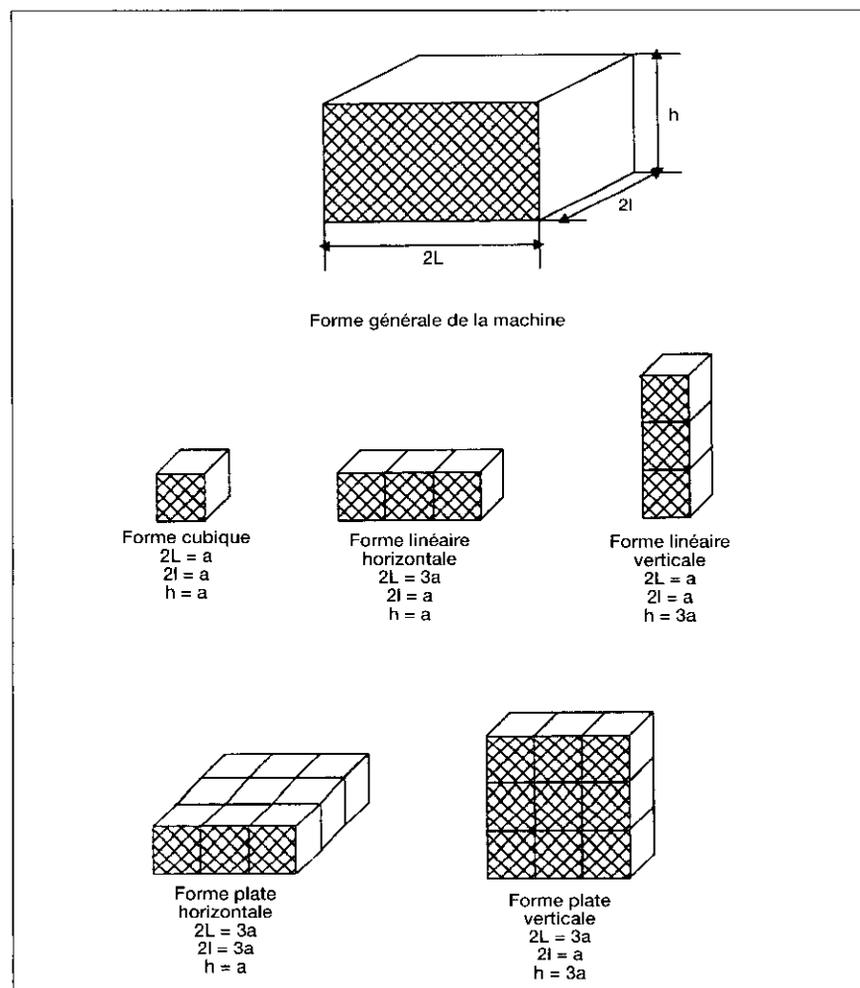
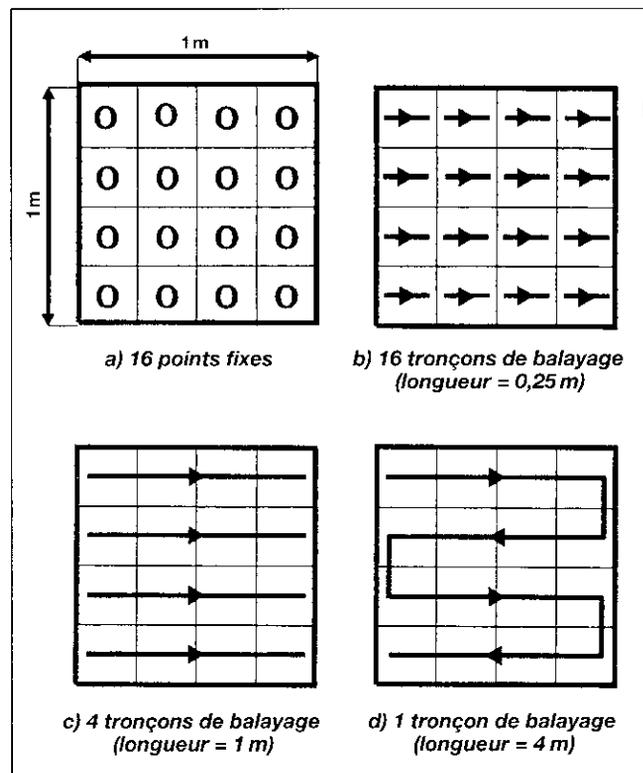


Fig. 3. Formes et dimensions des machines simulées - Shapes and dimensions of machines simulated

TABLEAU II

Points fixes	
Maillages	Temps d'intégration
100 points (10 x 10)	T = 1 s et T = 8 s
16 points (4 x 4)	T = 1 s et T = 8 s
Balayage	
Trajets	Temps d'intégration
16 tronçons de balayage : $d_{BAL} = 0,25 \text{ m}$ ; $p = 0,25 \text{ m}$	T = 1 s et T = 8 s
4 tronçons de balayage : $d_{BAL} = 1 \text{ m}$ ; $p = 0,25 \text{ m}$	T = 4 s et T = 32 s
1 seul balayage : $d_{BAL} = 4 \text{ m}$ ; $p = 0,25 \text{ m}$	T = 16 s et T = 124 s

Fig. 4. Paramètres de mesure utilisés lors de l'expérimentation - Measurement parameters used in the experiment



sition fréquentielle est celle d'un bruit rose). Pour recréer les conditions de notre simulation (et augmenter la précision des mesures), celles-ci ont été effectuées dans une chambre semi-anechoïque. Ainsi, nous avons éliminé le bruit de fond et la présence de sources perturbatrices.

Les paramètres de mesure (tableau II), sont présentés sur la figure 4.

Les vitesses de déplacement de la sonde sont identiques pour chaque configuration et sont respectivement de 0,25 m/s pour le premier temps d'intégration et 0,0625 m/s pour le second.

## 2. RESULTATS ET DISCUSSION

### 2.1. Résultats de la simulation par la technique PF

Un premier résultat, presque paradoxal, a été obtenu grâce à cette simu-

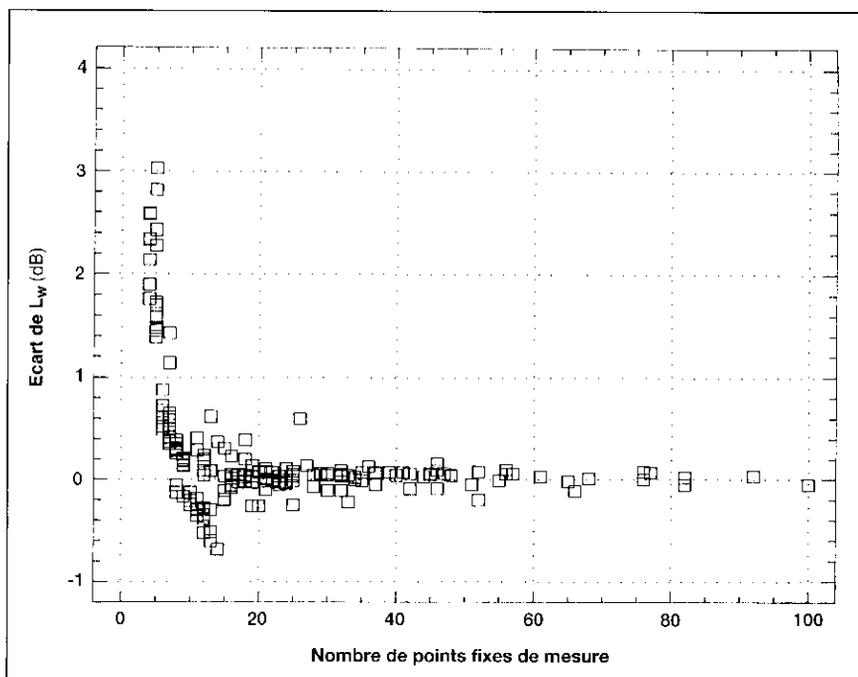
lation. Lorsque la source est omnidirectionnelle et centrée dans la surface de mesure (source centrée au sol), il suffit d'un seul point de mesure situé au centre de chacune des 5 faces pour que le critère d'adéquation du maillage soit satisfait. En effet, la variance obtenue entre les 5 valeurs d'intensité tend vers 0 (indicateur F4) et le nombre de points de mesure est suffisant au sens du critère d'adéquation du maillage, bien que dans ce cas, la valeur mesurée de la puissance acoustique soit supérieure de 3 dB à la valeur vraie. Cette erreur est liée au choix de la surface de mesure  $S_1$ , parallélépipédique, qui aurait dû se porter sur une surface hémisphérique  $S_2$ . La différence entre les deux termes correctifs de surface ( $10 \text{ Log } S_1$  et  $10 \text{ Log } S_2$ ) est de 2,82 dB. Ce résultat est confirmé par Laville, qui obtient par simulation une erreur de 3 dB lors d'une mesure avec 5 points fixes d'une source centrée dans un parallélépipède [17].

Dans ce cas précis, le critère d'adéquation du maillage est mis en défaut.

Une première conclusion importante est donc la nécessité de réaliser au moins 2 points fixes de mesure par face, soit une dizaine de points fixes. La technique BAL présente l'intérêt de réaliser systématiquement au moins cette condition.

Cette conclusion est illustrée par la figure 5, où on constate bien qu'un faible nombre de points fixes (inférieur à 10) peut conduire à des écarts de puissance acoustique de 3 dB et, qu'au-delà de 10 points fixes, l'écart de puissance acoustique est inférieur à 1 dB, ce qui est conforme à la classe de précision 2 retenue pour notre simulation.

La figure 6 montre que, pour l'ensemble des cas où la source est décentrée à l'intérieur du volume enveloppe (simulation d'une forte directivité), le respect du critère d'adéquation du maillage peut demander d'effectuer plusieurs centaines de points de mesures. Ce grand nombre de points de mesure justifie bien l'utilisation de la technique BAL.



**Fig. 5. Evolution de l'écart de puissance acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) en fonction du nombre de points fixes de mesure (pour l'ensemble des sources centrées)** – Changes in the difference between real and measured SPL depending on the number of fixed measuring points (for all centred sources)

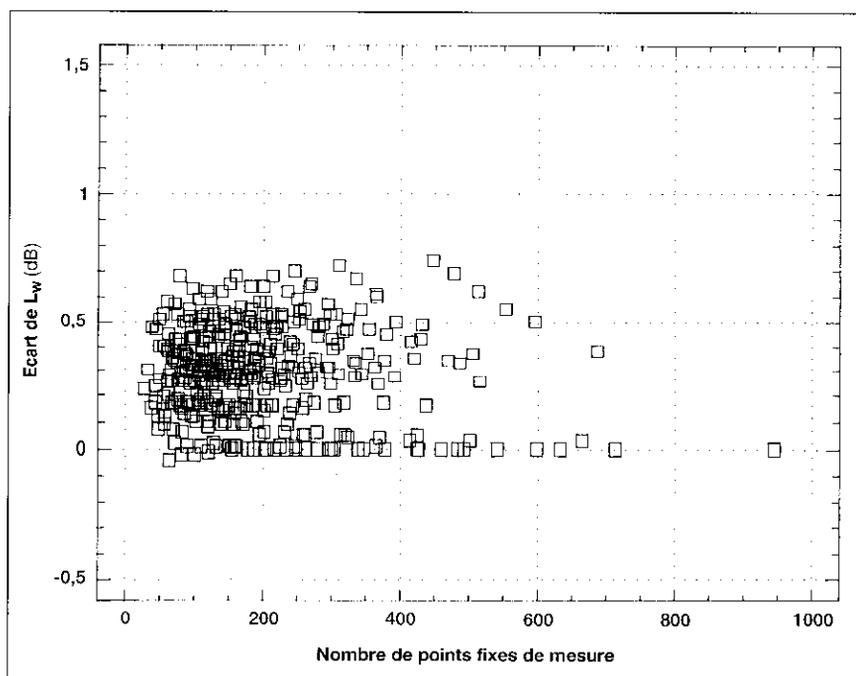
**Fig. 6. Evolution de l'écart de puissance acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) en fonction du nombre de points fixes de mesure (pour l'ensemble des sources décentrées)** – Changes in the difference between real and measured SPL depending on the number of fixed measuring points (for all uncentred sources)

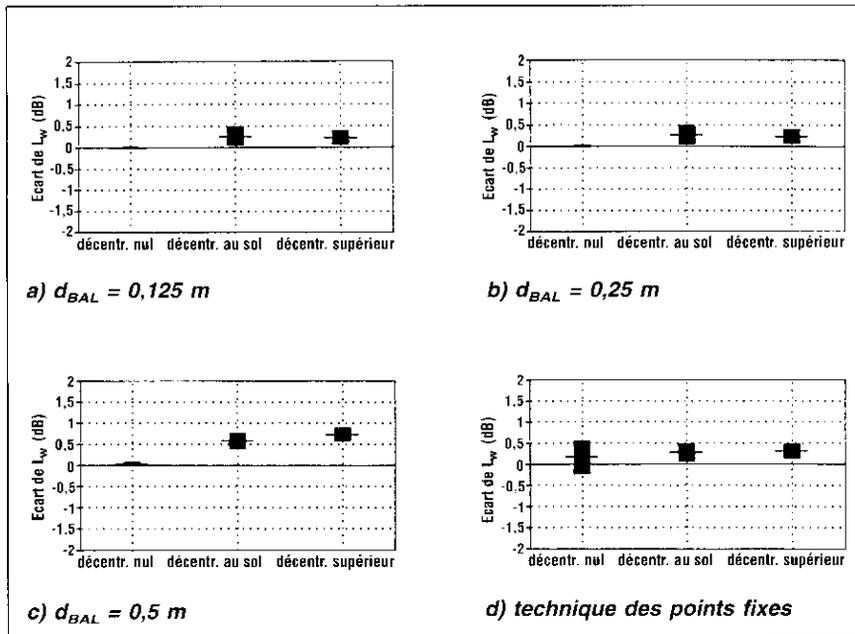
## 2.2. Résultats de la simulation par la technique BAL

On compare dans ce paragraphe les écarts  $\Delta_{SIBAL}$  de la puissance acoustique  $L_{WSIBAL}$  obtenus par simulation de la technique BAL avec les écarts  $\Delta_{SIPF}$  de la puissance acoustique  $L_{WSIPF}$  obtenus par simulation de la technique PF ; cette comparaison porte sur les trois ensembles de paramètres que nous rappelons :

- rayonnement de la source : directivité obtenue par décentrement,
- géométrie de la machine : forme et dimensions,
- échantillonnage de la surface : distance de balayage, pas et distance de mesure.

Parmi tous les résultats obtenus en fonction de ces différents paramètres, il est intéressant d'exploiter et de montrer ceux qui permettent de bien discriminer une valeur particulière des paramètres.



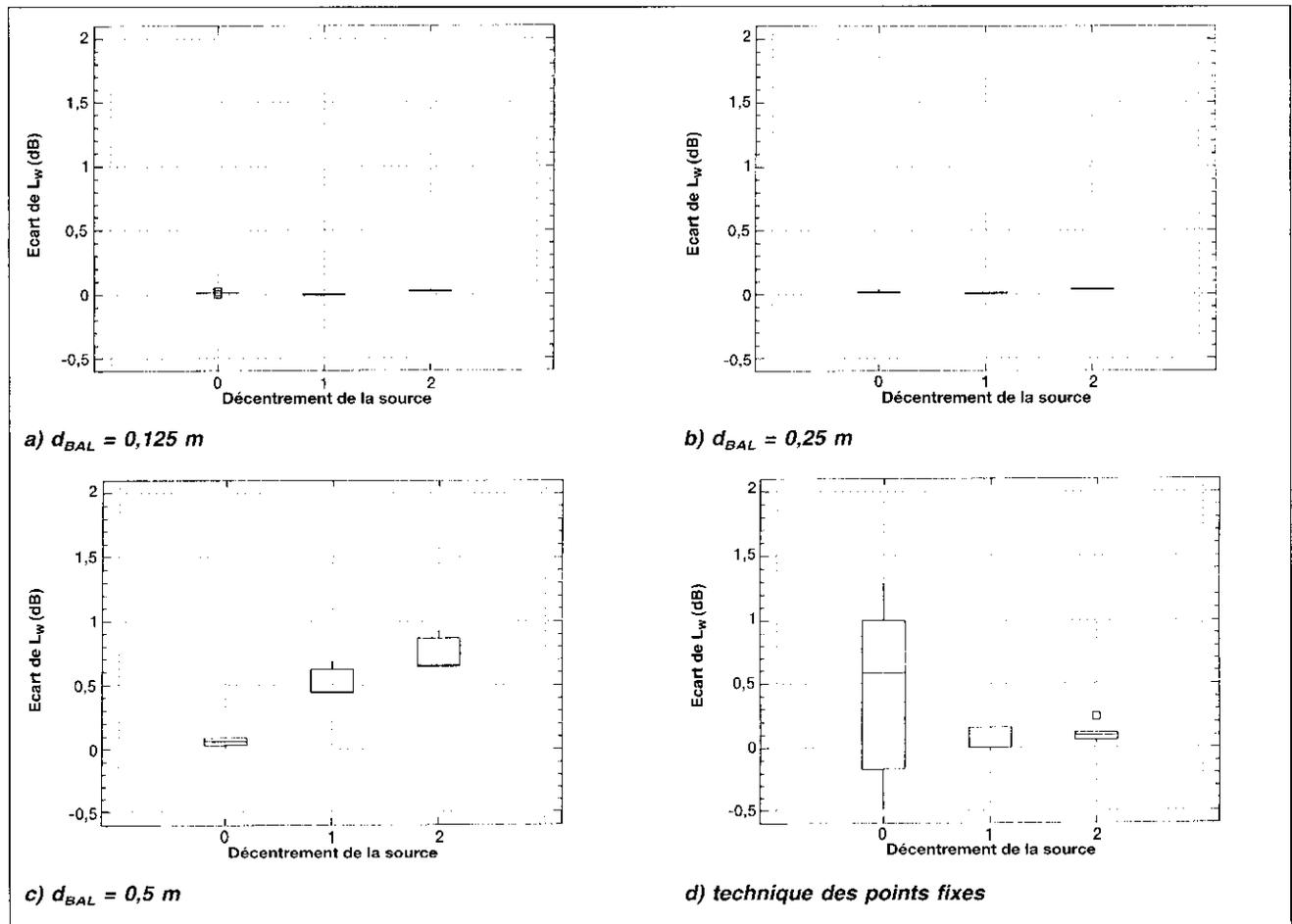


**Fig. 7. Etude du paramètre « décentrement » pour l'ensemble des machines étudiées. Valeur moyenne et écart-type de l'écart acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) – Study of the « uncentring » parameters for all machines studied. Mean and standard deviation of difference between real and measured SPL**

La figure 7 présente les résultats en termes d'écart de puissance acoustique (valeur moyenne et écart-type) en fonction du paramètre « décentrement » pour l'ensemble de la population des machines étudiées. On constate que :

1) quand la source est centrée (décentrement nul), les écarts de puissance acoustique obtenus par balayage sont pratiquement nuls alors que ceux obtenus par points fixes sont de l'ordre de 0,5 dB ;

2) quand la source est décentrée (forte directivité de la source), les écarts de puissance acoustique obtenus par balayage avec les distances de balayage de 0,125 m (fig. 7a) et de 0,25 m (fig. 7b) sont égaux à ceux obtenus par points fixes (fig. 7d). Il n'en est pas de même pour  $d_{BAL} = 0,5$  m (fig. 7c), où la technique BAL conduit à des écarts plus grands que ceux obtenus par points fixes.



**Fig. 8. Etude du paramètre « décentrement » pour les machines plates horizontales de hauteur 1 m. Valeur moyenne et écart-type de l'écart acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) – Study of the « uncentring » parameter for flat horizontal machines 1 m high. Mean and standard deviation of difference between real and measured SPL**

La figure 8 présente les résultats analogues à la figure 7 (écart de puissance acoustique, en fonction du paramètre décentrement) limités à une forme particulière de machine (« machine plate horizontale » de hauteur 1 m). Ils montrent que les écarts de puissance acoustique sont presque nuls pour les deux distances de balayage de 0,125 m et de 0,25 m et inférieurs à ceux obtenus avec la technique des points fixes. Pour la distance de balayage de 0,5 m, on constate également des écarts de puissance acoustique plus grands que ceux obtenus par la technique PF.

De l'ensemble des deux figures 7 et 8, deux conclusions se dégagent :

- 1) la distance de balayage de 0,5 m conduit à des écarts-types plus grands,
- 2) la technique BAL est préférable quand la source est centrée.

La figure 9 présente les résultats de l'écart de puissance acoustique (valeur moyenne et écart-type) en fonction du paramètre « forme de la machine » pour l'ensemble de la population des machines étudiées. On constate que :

- 1) les écarts de puissance acoustique obtenus par balayage avec les distances de balayage de 0,125 m (fig. 9a) et de 0,25 m (fig. 9b) sont inférieurs ou égaux à ceux obtenus par points fixes (fig. 9d). Il n'en est pas de même pour  $d_{BAL} = 0,5$  m (fig. 9c), où la technique BAL conduit à des écarts plus grands que ceux obtenus par la technique PF ;

- 2) les plus grands écarts de puissance acoustique sont obtenus avec la technique PF (fig. 9d), pour les machines plates horizontales ;

- 3) pour les machines plates horizontales, la technique BAL conduit à des écarts de puissance acoustique plus petits que ceux obtenus avec la technique PF.

L'étude du paramètre « forme de machine » ne change pas les conclusions tirées précédemment pour le paramètre « décentrement » :

- 1) la distance de balayage de 0,5 m est à éviter,
- 2) la technique BAL est préférable pour certaines formes de machine.

La figure 10 présente des résultats analogues à la figure 9 (écart de puissance acoustique), mais limités aux

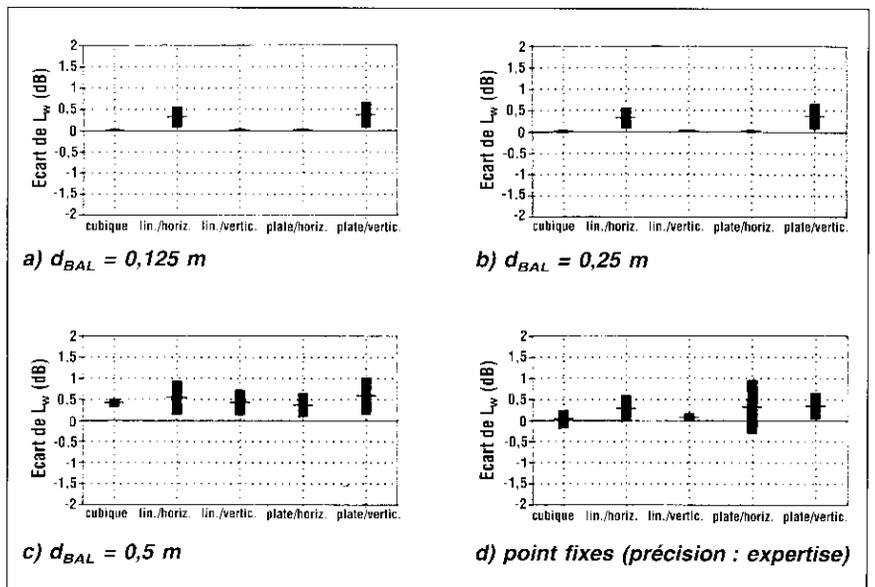


Fig. 9. Etude du paramètre « forme de la machine » pour l'ensemble des machines étudiées. Valeur moyenne et écart-type de l'écart acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) – Study of the « machine shape » parameter for all machines studied. Mean and standard deviation of difference between real and measured SPL

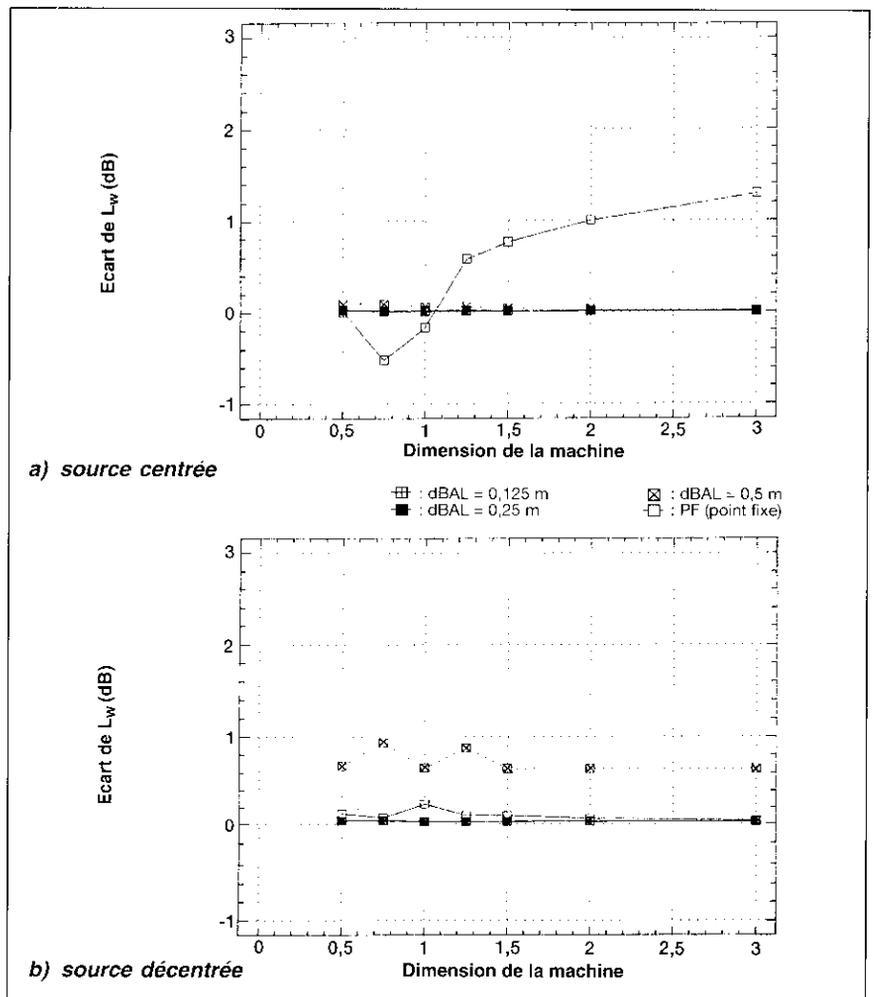


Fig. 10. Evolution de l'écart de puissance acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) en fonction de la dimension de base des machines – Changes in the difference between real and measured SPL as a function of machine basic size

machines de forme « plate horizontale », qui conduisaient aux plus grands écarts de puissance acoustique. Le paramètre d'analyse est la dimension de base de la machine et on a distingué deux ensembles : source centrée (fig. 10a), source décentrée (fig. 10b). On constate que la technique BAL conduit à de meilleurs résultats quand la source est centrée et que  $d_{BAL} = 0,5$  m ne convient pas dans le cas des sources décentrées.

La figure 11 donne les résultats de l'écart de puissance acoustique (valeur moyenne et écart-type) obtenus avec 2 pas de balayage, (fig. 11a pour  $p = 0,25$  m ; fig. 11b pour  $p = 0,5$  m pour les sources décentrées). On constate que  $p = 0,5$  m conduit à des écarts plus importants que ceux obtenus avec  $p = 0,25$  m.

Enfin, la figure 12 présente le nombre de points de mesure nécessaire en fonction du paramètre distance de mesure pour l'ensemble des machines étudiées. Ainsi, pour  $d = 0,5$  m, on est conduit à effectuer en moyenne 50 points fixes de mesure, contre 150 points de mesure pour  $d = 0,25$  m.

L'ensemble des résultats présentés permettent d'apporter les conclusions générales suivantes :

1) en absence de sources perturbatrices, la distance  $d$  de mesure (distance entre surface enveloppe de la machine et surface de mesure) doit être la plus grande possible (on sait qu'elle doit être compatible avec d'autres critères notamment ceux de réactivité de champ) ;

2) la valeur du pas  $p$  doit être inférieure (au plus égale) à la distance  $d$  de mesure,

3) la combinaison de la vitesse de déplacement  $V$  et du temps d'intégration  $T$  (qui donne la distance de balayage  $d_{BAL}$ ) doit être de l'ordre de grandeur du pas  $p$ . En d'autres termes, la maille doit être carrée.

### 2.3. Résultats expérimentaux

#### 2.3.1. Validation des simulations

Ont été comparés dans ce cas les résultats de puissance acoustique obtenus par la technique BAL avec des tronçons élémentaires, au résultat de mesure en 100 points fixes qui a été pris comme référence. On a affecté, au point central du tronçon élémentaire

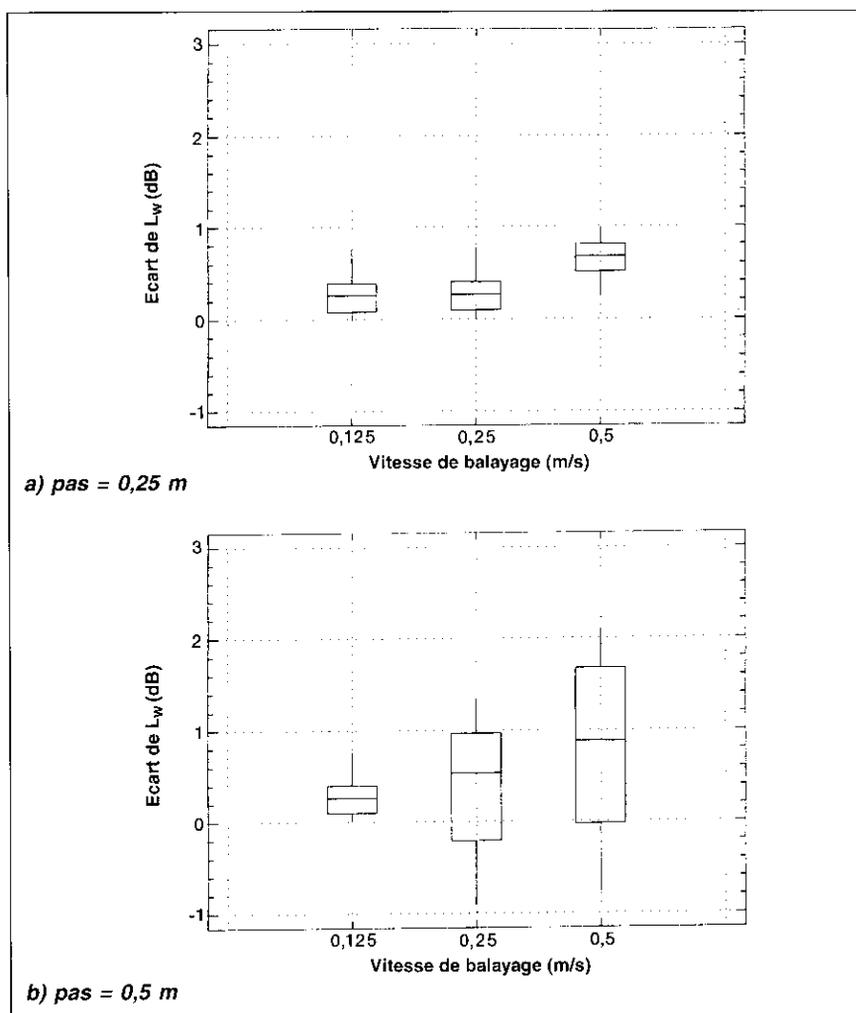


Fig. 11. *Écarts de puissance acoustique (entre valeur mesurée et valeur vraie) pour deux pas de balayage* – Differences between real and measured SPL values for two scanning distances

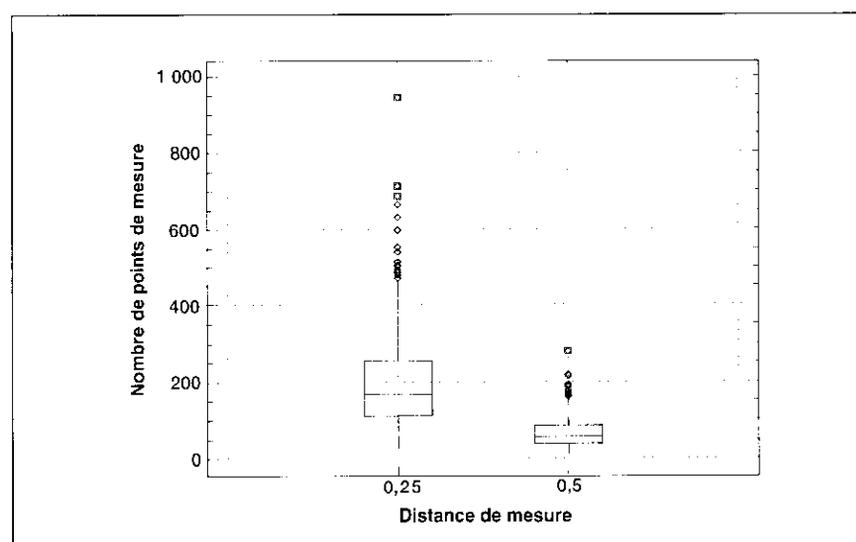


Fig. 12. *Nombre de points de mesure nécessaires en fonction de la distance de mesure* – Number of measuring points needed as a function of measuring distance

parcouru par la sonde, l'intégrale de l'intensité mesurée sur ce tronçon ; l'indicateur de maillage de ces pseudo-points a été calculé avec la même formule que celle utilisée par la technique des points fixes.

La figure 13 donne les résultats des écarts de puissance acoustique ( $\Delta_w = L_{WBAL} - L_{WPF}$ ) entre les résultats obtenus avec 4 tronçons de longueur 1 m, espacés d'un pas de 0,25 m, décrits à la vitesse de 0,25 m/s et avec un temps d'intégration de 4 s, ce qui correspond à une  $d_{BAL}$  de 1 m et ceux obtenus avec 100 points fixes. Comme le pas de balayage est de 0,25 m, les conclusions de notre simulation nous indiquent que la distance  $d$  de mesure devrait être au moins de 0,25 m. On constate que les hauteurs du plan de mesure de 0,20 m et 0,40 m (ceci correspond à la distance de mesure) conduisent à des résultats meilleurs que ceux obtenus avec la hauteur plus faible. La différence entre valeur de puissance acoustique par PF et par BAL reste limitée à 1 dB ; elle est de l'ordre de grandeur de l'incertitude de mesure (sauf pour l'octave de 2 000 Hz et la hauteur de 0,20 m).

Avec une même expérimentation conduite par le CETIM, Bockhoff conclut de façon identique [18]. En particulier, pour la hauteur de 0,10 m, un balayage à vitesse lente réduit les écarts observés particulièrement en hautes fréquences. Enfin d'autres résultats expérimentaux suivant un protocole analogue confirment que l'écart de puissance acoustique (différence entre valeur mesurée et valeur de référence) augmente (de l'ordre de 2 dB), quand le pas  $p$  entre deux trajectoires parallèles est supérieur à la distance  $d$  de mesure [19].

### 2.2.2. Influence séparée de la vitesse et du temps d'intégration

Cette expérimentation a permis de séparer l'influence de ces deux paramètres, ce qui était impossible dans le cas des simulations numériques. En général, le temps d'intégration est fixé par l'appareillage de mesure et dépend de la largeur du spectre d'émission et d'analyse. Dans l'expérimentation, nous avons conservé la même distance de balayage ( $d_{BAL} = 1$  m) et en faisant varier conjointement les paramètres vitesse  $V$  et temps d'intégration  $T$ .

Deux cas ont été envisagés :

$V = 0,25$  m/s et  $T = 4$  s,

$V = 0,03125$  m/s et  $T = 16$  s.

La figure 14 complète la figure 13 et donne les résultats pour une vitesse plus faible et un temps d'intégration plus long. Les résultats montrent que lorsque la vitesse diminue et que le temps d'intégration augmente, l'écart de puissance acoustique diminue ; ils

restent cependant dans la fourchette  $\pm 1$  dB. Les résultats expérimentaux rapportés par Tachibana [19] confirment également une légère dégradation de la précision lorsque la vitesse atteint 0,50 m/s pour une distance de mesure de 0,2 m.

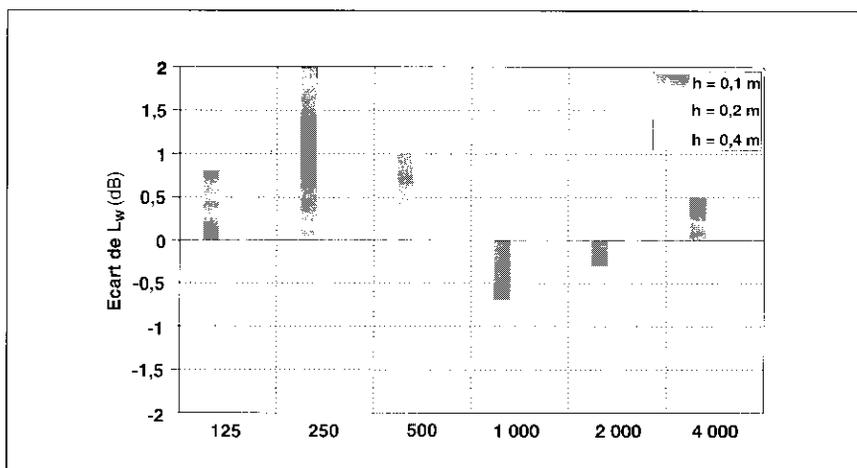


Fig. 13. Ecart de  $L_w$  : comparaison des résultats expérimentaux obtenus par les deux techniques (4 trajets de 1 m,  $V = 0,25$  m/s,  $T = 4$  s) – Difference between  $L_w$  : comparison of experimental results obtained using the two techniques (4 trajectories of 1 m,  $V = 0,25$  m/s,  $T = 4$  s)

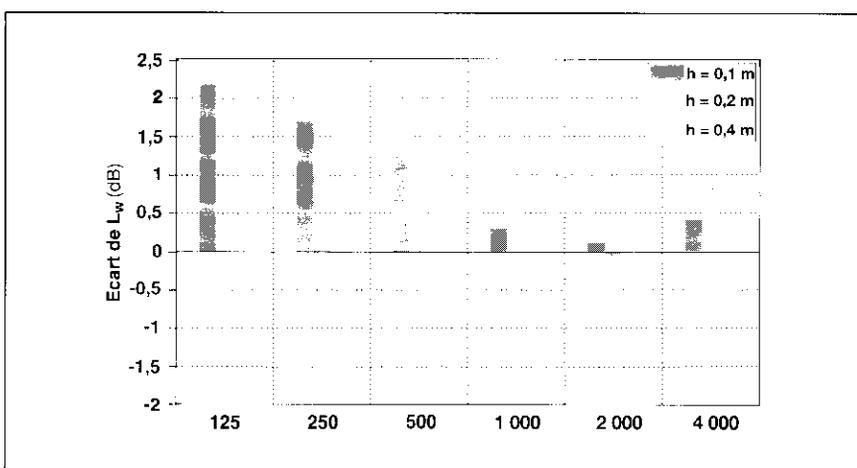


Fig. 14. Ecart de  $L_w$  : comparaison des résultats expérimentaux des deux techniques (4 trajets de 1 m,  $V = 0,03125$  m/s,  $T = 32$  s) – Difference between  $L_w$  values : comparison of experimental results obtained using the two techniques (4 trajectories of 1 m,  $V = 0,03125$  m/s,  $T = 32$  s)

## 4. CONCLUSION

L'étude réalisée repose sur une simulation numérique à l'aide d'un modèle de calcul et sur une expérimentation qui, d'une part, a confirmé les résultats de la simulation et d'autre part la prise en compte du paramètre temporel qui ne pouvait être simulé.

Ainsi, on retiendra les principes suivants :

1) choisir la distance  $d$  de mesure la plus grande possible, en relation avec les indicateurs F2 et F3 ;

2) choisir une valeur de pas  $p$  au plus égale à la distance  $d$  de mesure ;

3) choisir un temps minimal d'intégration  $T$  en relation avec la variabilité temporelle (indicateur F1) ;

4) choisir pour la distance  $d_{BAL}$  de balayage, une valeur proche du pas  $p$ .

En d'autres termes, **la maille doit être carrée.**

Si ces conditions sont respectées, la précision de la mesure par la technique de balayage est au moins égale à celle de la technique des points fixes ; elle peut être estimée avec les mêmes critères que ceux utilisés par la technique des points fixes.

La technique de balayage devient alors utilisable sur site, essentiellement parce qu'elle est plus rapide que la technique des points fixes ; sa précision est de classe 2 (expertise), ce qui est suffisant pour la plupart des besoins de détermination de la puissance acoustique des machines dans le cadre de la déclaration bruit.

### Bibliographie

1. NF S 31-100 – Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit (mesurage par points). Paris – La Défense, AFNOR, déc. 1988 (*Remplacée depuis 1995 par NF EN ISO 9614-1*).
2. NF EN ISO 9614-1 – Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit. Partie 1 : mesurage par points. Paris – La Défense, AFNOR, juin 1995, 27 p.
3. TACHIBANA H., YANO H., HIDAKA Y. – The scanning method in sound power and sound insulation measurements by intensity technique. In : Actes Inter-Noise, 1991, pp. 1041-1044.
4. DANIERE P., SUEUR J. – Comparaison de deux méthodes de mesure de la puissance acoustique par intensimétrie : points fixes et balayage. In : Actes du 1<sup>er</sup> Congrès français d'acoustique, 1990, pp. C2/225-C2/228.
5. TANDON N. – The effect of sound intensity measurement parameters on sound power determination. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, 132, 3, pp. 451-455.
6. PETERSEN O.K.O., NEWMANN M.J. – An intensity method for determining sound power in situ. *Noise Control Engineering Journal*, 1988, 31, 2, pp. 93-100.
7. BROCK M. – Sound power measurements using different scanning techniques. In : Actes du Nordic Acoustical Meeting, 1988, pp. 117-120.
8. DANIERE P., SUEUR J. – Contribution towards a measurement method of the acoustic power of machines via intensity. In : Actes Inter-Noise, 1988, pp. 1117-1120.
9. RASMUSSEN P. – Sound power measurements by different operators. In : Actes Inter-Noise, 1986, pp. 1121-1124.
10. JACOBSEN F. – Random errors in sound power determination based on intensity measurement. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, 131, 3, pp. 475-487.
11. POPE J. – Evaluation of accuracy of sound power determination using space-averaged intensity measurements. In : Actes Noise-Con, 1988, pp. 459-462.
12. WU M.Q., CROCKER M.J. – The properties of the estimation error of sound power measurement using intensity techniques. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 85, pp. 1182-1190.
13. SHIRAHATTI U.S., CROCKER M.J. – Studies on sound power measurements using the sound intensity technique. *Noise Control Engineering Journal*, 1993, 41, 2, pp. 323-330.
14. BOCKHOFF M. – Some remarks on the continuous sweeping method in sound power determination. In : Actes Inter-Noise, 1984, pp. 1173-1176.
15. HOJBJERG K., GADE S., SCHACK T. – ISO 9614 field indicators and scan measurements. In : Actes Inter-Noise, 1990, pp. 665-668.
16. JACOBSEN F. – Spatial sampling errors in sound power estimation based upon intensity. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 145, 1, pp. 129-149.
17. LAVILLE F., NICOLAS J. – The standardization of sound power determination using sound intensity measurements : an analysis based on a computer simulation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 93, p. 2309.
18. BOCKHOFF M., JIRICEK O. – Sound power determination by manual scanning of acoustic intensity. In : Proceedings, Second International Congress on recent developments in air and structure-borne sound and vibration, 1992, pp. 1293-1298.
19. TACHIBANA H., YANO H., YAMAGUCHI K. – The accuracy of scanning sound intensity method in sound power level determination. In : Actes Inter-Noise, 1993, pp. 357-362.

Reçu en octobre 95, accepté en février 96

### Calcul du niveau de puissance acoustique sur la surface parallélépipédique

Pour calculer la puissance acoustique sur la surface parallélépipédique, il suffit d'additionner les puissances partielles calculées sur chacune des 5 faces du parallélépipède (fig. 1 et 2).

On considère une source de puissance  $W_0$ , placée sur un plan réfléchissant au point de coordonnées  $x_s, y_s, z_s$ .

La composante normale à la face  $X+$  (c'est la face placée du côté positif de l'axe  $X$ ) du vecteur intensité acoustique s'écrit :

$$I_{X-} = \frac{W_0}{4\pi \cdot D^2} \cos \theta$$

La puissance partielle  $W_{X+}$  est l'intégrale de surface suivant les axes  $Oy$  et  $Oz$  de  $I_{X+}$ .

$$W_{X+} = \int_{y,z} I_{X+} \cdot dy \cdot dz$$

en tenant compte de la source image, par le sol réfléchissant, il vient :

$$I_{X-} = \frac{W_0}{4\pi \cdot D_i^2} \cos \theta_i + \frac{W_0}{4\pi \cdot D_r^2} \cos \theta_r$$

avec :

$$D_i^2 = [(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2] \text{ et } D_r^2 = [(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z + z_s)^2]$$

$$\text{et } \cos \theta_i = \frac{L + d - x_s}{D_i} \text{ et } \cos \theta_r = \frac{L + d - x_s}{D_r}$$

en prenant  $W_0 = 1$ , (puissance unité)

$$I_{X+} = \frac{(L + d - x_s)}{4\pi \cdot D_i^3} + \frac{(L + d - x_s)}{4\pi \cdot D_r^3}$$

d'où

$$W_{X+} = \frac{1}{4\pi} (L + d - x_s) \int_{y,z} \left\{ \frac{dy \cdot dz}{[(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2]^{3/2}} + \frac{dy \cdot dz}{[(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z + z_s)^2]^{3/2}} \right\}$$

Pour :

$$-(\ell + d) \leq y \leq (\ell + d) \text{ et } 0 \leq z \leq (h + d)$$

on obtient :

$$W_{X+} = \frac{1}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} \text{Arctg} \left[ \frac{(\ell + d - y_s)(h + d - z_s)}{(L + d - x_s) \sqrt{(L + d - x_s)^2 + (\ell + d + y_s)^2 + (h + d - z_s)^2}} \right] + \\ \text{Arctg} \left[ \frac{(\ell + d + y_s)(h + d - z_s)}{(L + d - x_s) \sqrt{(L + d - x_s)^2 + (\ell + d + y_s)^2 + (h + d - z_s)^2}} \right] + \\ \text{Arctg} \left[ \frac{(\ell + d - y_s)(h + d + z_s)}{(L + d - x_s) \sqrt{(L + d - x_s)^2 + (\ell + d - y_s)^2 + (h + d + z_s)^2}} \right] + \\ \text{Arctg} \left[ \frac{(\ell + d + y_s)(h + d + z_s)}{(L + d - x_s) \sqrt{(L + d - x_s)^2 + (\ell + d + y_s)^2 + (h + d + z_s)^2}} \right] \end{array} \right\}$$

Cette expression est celle de la puissance partielle calculée sur la face  $X+$ . De même, les puissances partielles sur les autres faces se calculent de la même manière, sauf pour la face supérieure, où l'intégrale double conduit à une somme de 8 termes en Arctg, au lieu de 4 termes pour les faces verticales. L'explication tient dans le fait que pour les faces verticales, les bornes d'intégration sont symétriques en  $Ox$  ou  $Oy$   $[-(L + d), (L + d)]$  ou  $[-(\ell + d), (\ell + d)]$  et sont asymétriques en  $Oz$   $[0, (h + d)]$ , alors que pour la face supérieure, les bornes d'intégration sont toutes symétriques en  $Ox$  et en  $Oy$ .

## ANNEXE 2

### Indicateurs de champ

**Indicateur de variabilité temporelle du champ acoustique**

$$F1 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2}$$

$\bar{I}_n$  est la valeur moyenne de M échantillons  $I_{nk}$  intégrés sur de courts intervalles de temps, calculée suivant l'équation suivante :

$$\bar{I}_n = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_{nk}$$

**Indicateur d'écart global de champ**

$$F2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|n|} - 10 \log \frac{\rho c l_0}{p_0^2}$$

$\bar{L}_p$  est le niveau de pression acoustique surfacique, calculé selon l'équation suivante :

$$\bar{L}_p = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{pi}/10} \right]$$

**Contrôle de l'adéquation de l'appareillage de mesure**

Les relations suivantes doivent être satisfaites :

$$L_D > F2$$

$$F3 - F2 < 3 \text{ dB}$$

$L_D$  est la capacité dynamique de l'appareillage de mesure.

$\bar{L}_{|n|}$  est le niveau surfacique de la norme de l'intensité acoustique normale, calculée suivant l'équation suivante :

$$\bar{L}_{|n|} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{pi}/10} \right]$$

**Indicateur de bruit parasite global**

$$F3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|n|} - 10 \log \frac{\rho c l_0}{p_0^2}$$

$\bar{L}_p$  est le niveau de pression acoustique surfacique,

$\bar{L}_{|n|}$  est le niveau surfacique de l'intensité acoustique normale.

**Indicateur d'hétérogénéité du champ**

$$F4 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - \bar{I}_n)^2}$$

$\bar{I}_n$  est l'intensité acoustique normale surfacique, calculée selon l'équation suivante :

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{nk}$$

## ANNEXE 3

### Critères de qualification

**Indication de non-stationnarité du champ**

La relation suivante doit être satisfaite :

$$10 \log (1 + F1) > 2 \text{ dB}$$

**Contrôle de l'adéquation du maillage choisi**

La relation suivante doit être satisfaite :  $N > CF4^2$

N est le nombre de points fixes de mesure.

C est un coefficient dont la valeur est choisie dans le tableau suivant.

Fréquence	C		
	Contrôle	Expertise	Laboratoire
Bandes octaves			
63-125	-	8	15
250-500	-	15	28
1 000-4 000	-	28	90
8 000	-	10	15
A	6	-	-