

EFFICACITÉ D'UN ÉCRAN ACOUSTIQUE DANS UN LOCAL INDUSTRIEL

Étude expérimentale et théorique d'un cas réel

par J. JACQUES, S. GARKOVA*, M. CAFAXE, D. ROBINET,
centre de recherche de l'INRS.

I.N.R.S.
30, rue Olivier-Noyer
75680 Paris Cedex 14

ND 1365-108-82

CDU 628.517

Parmi les moyens divers permettant de réduire l'exposition au bruit des personnes dans le cadre de leur activité professionnelle, l'écran acoustique constitue celui dont la mise en œuvre est, en général, la plus facile et le coût le plus faible.

Quelle efficacité peut-on attendre d'un écran acoustique placé dans un local industriel ?

Comment évolue cette efficacité avec la distance séparant le récepteur de l'écran ?

Il n'existe pas actuellement de réponse simple, précise et universelle à ces questions car le « mode de fonctionnement » des écrans est complexe et les phénomènes physiques en jeu sont nombreux et font intervenir de multiples paramètres. L'objet de cette note est d'apporter des éléments de réponse à ces questions à partir de l'étude expérimentale, puis théorique, d'un cas réel, abordée suivant les techniques prévisionnelles développées à l'INRS [1].

1. HISTORIQUE ET ÉTAT DES CONNAISSANCES

Historiquement, les écrans ont constitué un champ d'investigation idéal du phénomène de diffraction des ondes électro-magnétiques et sonores dont la formulation théorique par KIRCHHOFF puis SOMMERFELD découle du principe de HUYGHENS-FRESNEL [2]. Dans le domaine de l'acoustique, les applications sont tout d'abord apparues pour la protection de l'environnement. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées pour évaluer l'efficacité d'écrans de forme et de nature diverses en champ libre sur sol plus ou moins réfléchissant [3, 4]. Simultanément étaient recherchées des techniques de calcul automatique des effets de diffraction. La théorie géométrique de la diffraction proposée par KELLER [5, 6] s'est avérée dans ce domaine extrêmement utile. Ainsi, l'acousticien

dispose actuellement de formulations, abaques et techniques de calcul, permettant d'évaluer, et par conséquent de prévoir, l'efficacité d'un écran en espace libre [3, 4, 7].

Ce n'est que plus récemment que les écrans sont apparus comme un moyen de réduction du bruit dans les locaux de travail. En espace clos, le son émis par une source parvient à un récepteur placé derrière un écran par les chemins qu'il emprunterait en espace libre (transmission au travers de l'écran et diffraction par les arêtes de ce dernier) mais aussi par réflexion sur les parois du local (sol, murs et plafond). A moins qu'ils n'aient fait l'objet d'un traitement acoustique, les locaux industriels sont réverbérants et on conçoit donc que cette dernière voie de propagation ne soit pas négligeable et puisse être la cause d'une chute de l'efficacité de l'écran.

(*) Stagiaire bulgare au centre de recherche.

La figure 1 illustre simplement ce qui précède. La face de l'écran tournée vers la source a été supposée absorbante. C'est là une des règles de conception des écrans acoustiques qui a pour but d'éviter une amplification du son dans l'espace « source » du fait de l'interposition de l'écran. Une autre règle consiste à réaliser l'écran dans un matériau ou un assemblage de matériaux présentant un indice d'affaiblissement acoustique élevé. Ceci autorise à négliger la voie de transmission ⑤ sur la figure 1.

Dans ces conditions, le champ sonore derrière un écran implanté dans un local industriel comprend :

- le champ direct provenant des machines et non masqué par l'écran;
- le champ réverbéré dû au couplage sources-parois, lui-même affecté par la présence de la paroi supplémentaire que constitue l'écran;
- le champ diffracté par les bords de l'écran.

L'efficacité de l'écran dépend de l'importance relative de chacune de ces composantes.

L'étude des écrans en espace clos a d'abord reposé sur l'hypothèse, rarement vérifiée dans les locaux industriels, d'un champ sonore diffus [8]. Cette approche, bien que ne permettant pas de bâtir une véritable méthode prévisionnelle, a fourni une indication qualitative importante : l'efficacité d'un écran chute considérablement lorsque ce dernier est placé dans un local réverbérant. D'autres approches plus élaborées [9, 10] reposent sur la théorie des images qui s'affranchit de l'hypothèse du champ diffus mais dont l'application est restreinte aux locaux de forme géométrique régulière (parallélépipède). Plus récemment, l'INRS a levé cette restriction en utilisant la technique des rayons sonores. Celle-ci, comme la technique des images, repose sur le concept de l'acoustique géométrique [11] et consiste à matérialiser l'énergie sonore en cours de propagation par des rayons ayant un comportement analogue à celui de rayons optiques. Cette technique autorise la prise en compte de tout obstacle plan présent dans le local, et notamment celle d'écrans de forme quelconque. Une approche incluant les effets de diffraction par les arêtes de l'écran a été tentée avec succès [12]. Elle fait appel à la fois à la théorie des images et à la théorie géométrique de la diffraction [6]

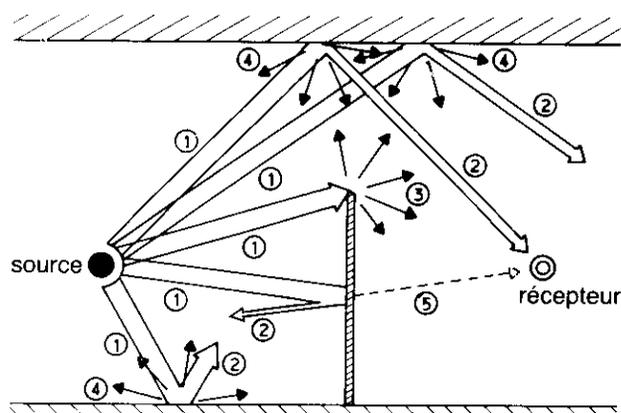


Fig. 1. — Voies de propagation aérienne entre une source et un récepteur séparés par un écran.

- ① Rayonnement direct de la source.
- ② Ondes sonores réfléchies.
- ③ Ondes sonores diffractées par les arêtes de l'écran.
- ④ Ondes sonores diffusées (diffraction multiple) par les parois.
- ⑤ Transmission au travers de l'écran

mais ne prend pas en compte, dans son état actuel, l'influence de toutes les parois du local. Parallèlement à ces descriptions théoriques, la littérature fournit des données expérimentales et des « recettes » fort utiles pour une évaluation sommaire de l'efficacité d'un écran en espace clos [13, 14].

Différentes approches sont donc actuellement disponibles pour estimer l'efficacité d'un écran dans un milieu clos. Le tableau I en décrit trois qui feront l'objet d'une évaluation dans cette note. La première est extraite des travaux précédemment cités sur les écrans employés à l'extérieur [6, 7, 12]. Dans le cadre de la présente étude, son intérêt est de représenter la cas limite où l'influence des parois du local est négligée. Elle est donc utilisée comme élément de comparaison pour les deux autres approches qui, elles, tiennent compte du local et diffèrent par la nature ou le nombre de phénomènes physiques pris en compte dans la modélisation de la propagation du son.

TABLEAU I
Trois approches actuellement disponibles
pour évaluer l'efficacité d'un écran acoustique dans un local

	Approche 1	Approche 2	Approche 3
Phénomènes pris en compte	— Diffraction par les bords de l'écran. — Masquage par l'écran.	— Diffraction par les bords de l'écran. — Masquage par l'écran. — Réflexion par le sol et le plafond.	— Réflexion par toutes les parois du local de forme quelconque (écran inclus). — Masquage par l'écran.
Phénomènes négligés	— Réflexion et diffusion du son par les parois du local et autres obstacles.	— Réflexion par les parois verticales du local. — Diffusion par les parois du local et autres obstacles.	— Diffraction par les bords de l'écran. — Diffusion du son par les parois et autres obstacles.
Situations pratiques couvertes	— Cas très rarement rencontré d'un local très absorbant.	— Locaux plats pour lesquels l'influence du local se limite à celle du plafond et du sol.	— Locaux industriels de forme quelconque, assez réverbérants, peu encombrés et à parois non diffusantes.
Théorie et/ou technique utilisée et références	— Abaques [7] ou théorie géométrique de la diffraction [6, 12].	— Théorie géométrique de la diffraction [6, 12] et technique des rayons sonores [11].	— Acoustique géométrique et technique des rayons sonores [1, 11].

2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1. Méthodologie et mode opératoire (fig. 2).

L'étude expérimentale a utilisé la méthodologie et le matériel [1] mis au point par l'INRS en collaboration avec le CIMPO (*) pour caractériser un local du point de vue acoustique. La caractéristique mesurée est la courbe de décroissance qui décrit l'évolution du niveau sonore lorsqu'on éloigne le microphone d'une source sonore omnidirectionnelle fonctionnant seule dans le local. Toutes les mesures ont été effectuées avec une source de référence CIMPO-INRS [15] qui, dans tous les cas, était posée sur le sol. Cette source présente de bonnes caractéristiques d'omnidirectionnalité [15]. Elle délivre une puissance acoustique de 114,4 dB(Lin) et 114,3 dB(A). Son spectre de puissance par bandes d'octave est donné dans le tableau II.

Ces mesures de puissance acoustique ont été effectuées en chambre semi-anéchoïque conformément à la norme NF S 31-026.

Un chariot de mesure, spécialement conçu pour caractériser les locaux, permet le relevé continu du

(*) Centre interrégional de mesures physiques de l'Ouest, Caisse régionale d'assurance maladie de Bretagne.

TABLEAU II

Fréquence centrale en Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Puissance acoustique en dB	100,1	98,9	103,3	109,8	106,7	106,5	101,6

niveau sonore en fonction de la distance « source-microphone » [1].

L'efficacité de l'écran en fonction de la distance écran-microphone a été déduite, par différence, des courbes de décroissance relevées sur un même trajet avec et sans écran, ce dernier étant placé perpendiculairement à l'axe source-microphone comme indiqué sur la figure 3.

Le local a été également caractérisé par la mesure, plus traditionnelle, de sa durée de réverbération par bandes de fréquences.

Des mesures ponctuelles ont été effectuées à proximité immédiate de l'écran dans le local considéré et dans la chambre semi-anéchoïque de l'INRS soit

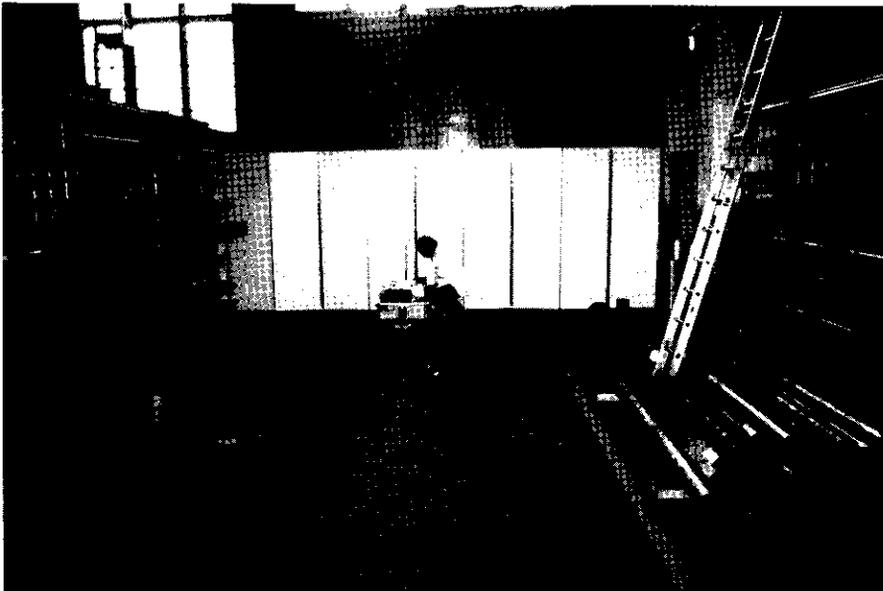
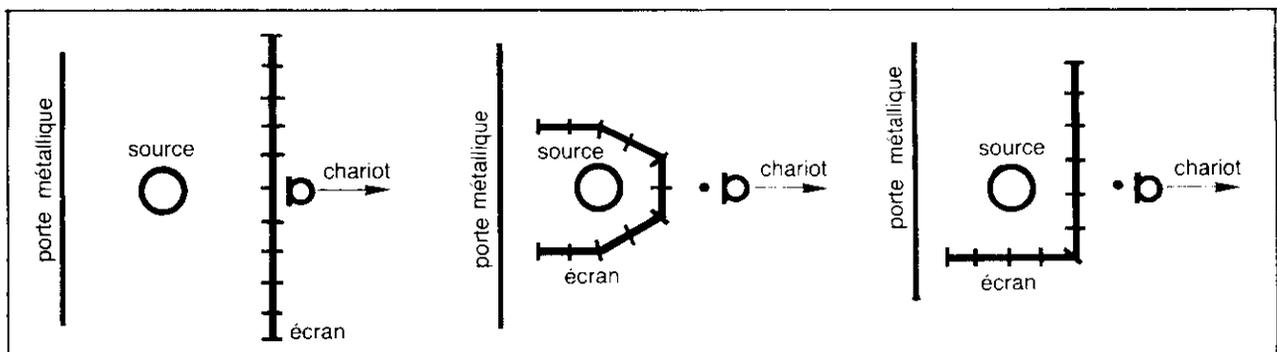


Fig. 2. — Écran et chariot de mesure en situation dans le local d'essais.

Fig. 3. — Dispositions possibles pour l'écran.



avec un sonomètre de précision, soit avec un enregistreur magnétique. Dans ce dernier cas, les niveaux sonores et les spectres étaient obtenus en laboratoire au moyen d'un analyseur en temps réel. Toutes les mesures ont été effectuées avec un microphone à condensateur 1/2" omnidirectionnel.

2.2. Caractéristiques de l'écran.

Il s'agit d'un écran du commerce, de fabrication française et d'emploi facile par sa mobilité (fig. 2). Son envergure maximale est de 6 m, sa hauteur de 2 m. Il est composé de 10 éléments de 60 cm de largeur articulés à la manière d'un accordéon. Ceci permet de lui donner une forme en L ou en U (fig. 3). Il est constitué de deux plaques métalliques dont une est perforée. L'espace entre ces deux plaques est rempli d'une laine minérale dense. Cette structure assure à l'écran une isolation phonique élevée et une bonne absorption sur sa face perforée placée en regard des sources sonores.

L'efficacité de l'écran a été caractérisée dans les conditions idéales de champ libre sur plan réfléchissant. Pour cela, l'écran et la source de référence ont été placés dans la chambre semi-anéchoïque de l'INRS. Les dimensions de la chambre (7 m x 10 m x 7 m) ont limité les mesures à une distance « récepteur-écran » de 2 m pour l'écran totalement déplié, et de 4 m pour l'écran plié en U (fig. 4).

2.3. Caractéristiques du local.

Les mesures ont été réalisées dans un local industriel typique. Il s'agit d'un atelier de mécanique de dimensions 41 m x 23 m x 6 m, comportant une large allée centrale et un décrochement à chacun de ses quatre angles (fig. 5). Son plafond est plat et recouvert de ciment floqué. Les parois longitudinales sont largement vitrées. Les parois latérales sont en béton, chacune comporte une porte métallique de 30 m². Le local peut être qualifié de moyennement encombré : on y trouve un ensemble de machines à tourner et à fraiser, des zones de montage, de traitement du métal et de stockage de matière première.

Les valeurs de la durée de réverbération par bandes d'octave sont indiquées au tableau III.

TABLEAU III

Fréquence centrale en Hz	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Durée de réverbération en s	2,9	2,9	2,7	2,2	1,7	0,9

La position de la source sonore et le trajet du microphone, placé à une hauteur de 1 m, sont indiqués sur la figure 5.

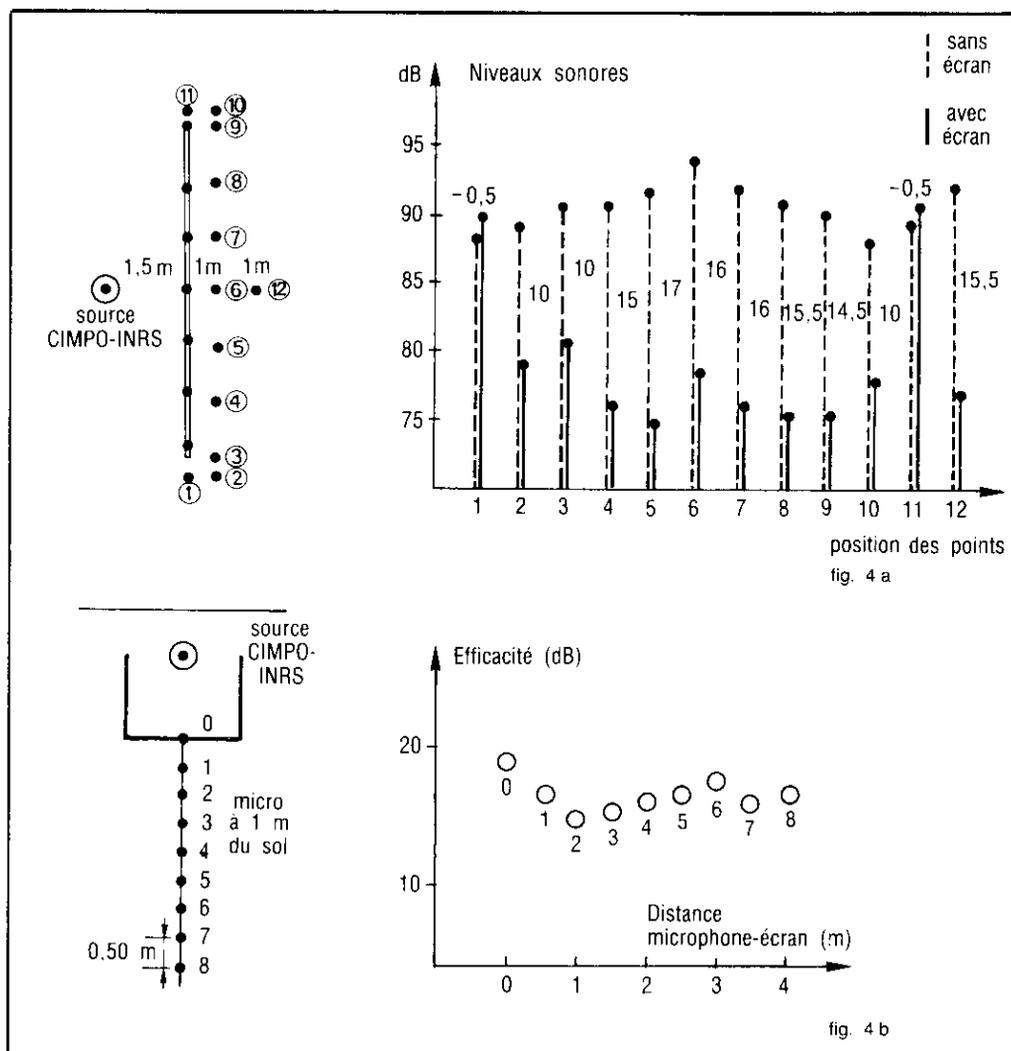


Fig. 4. — Efficacité de l'écran à faible distance dans la bande d'octave de 1000 Hz (mesures effectuées en chambre semi-anéchoïque).

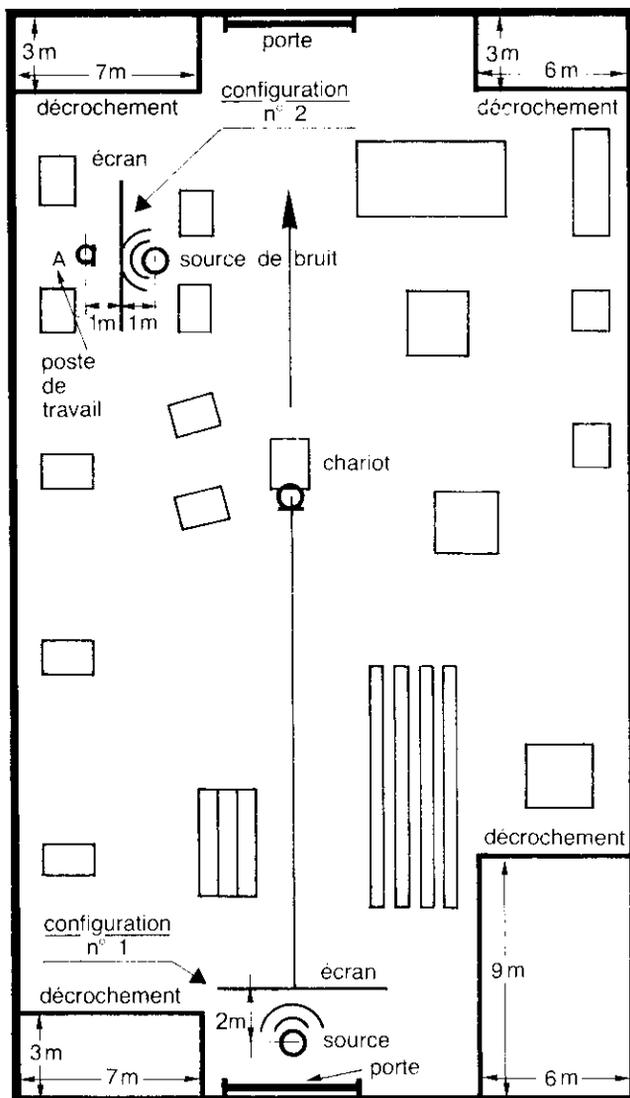


Fig. 5. — Schéma du local avec indication des configurations d'essais et du trajet suivi pour la mesure des courbes de décroissance (les parois latérales du local comportant les portes sont en béton, les parois longitudinales sont constituées principalement de vitrage).

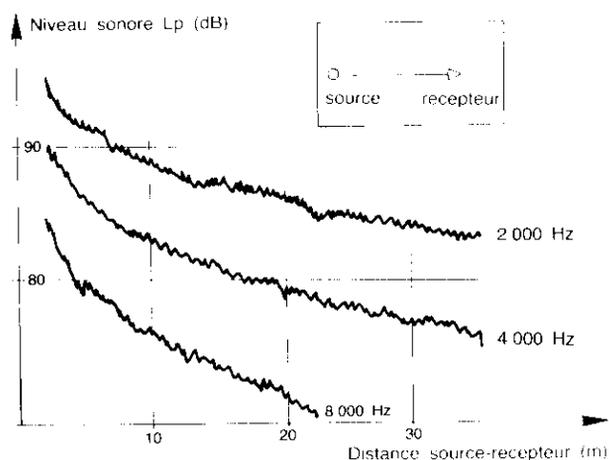
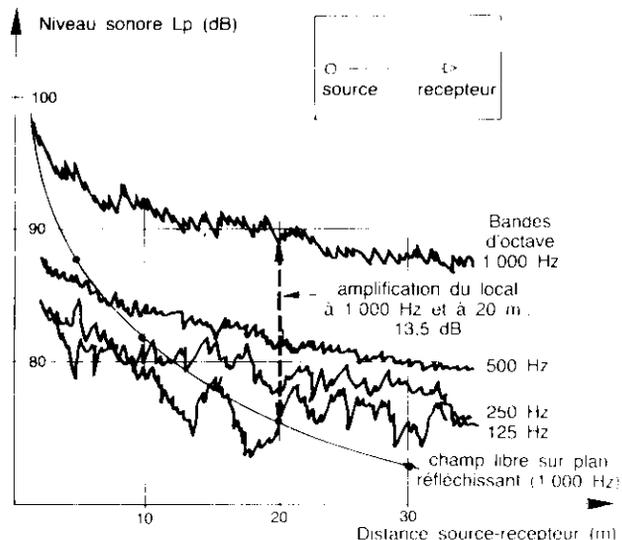


Fig. 6. — Courbes de décroissance caractéristiques du local pour différentes bandes d'octave.

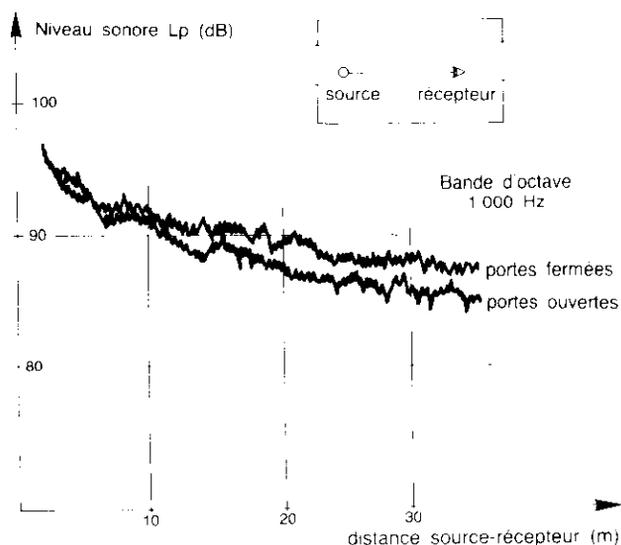


Fig. 7. — Influence de l'ouverture des portes latérales sur la décroissance longitudinale du son.

Les courbes de décroissance relevées en continu avec le chariot de mesure sont reportées sur la figure 6.

La figure 7 montre l'influence de l'ouverture des portes métalliques latérales sur la décroissance du son dans l'axe longitudinal du local. Le fait d'ouvrir les portes est équivalent à revêtir la surface (2 m × 30 m) occupée par celles-ci par un matériau parfaitement absorbant.

2.4. Résultats expérimentaux.

2.4.1. Efficacité de l'écran à faible distance (protection de postes de travail proches d'une source de bruit).

La configuration d'essais est celle repérée 2 (poste de travail A) sur la figure 5. Les mesures ont été effectuées pour une position « source » et une position « récepteur » uniques (1 m de part et d'autre de l'écran).

La figure 8 donne les spectres de bruit et les niveaux globaux mesurés avec et sans écran au poste de travail A, toute activité étant interrompue dans l'atelier, et le tableau IV l'efficacité de l'écran par bandes d'octave. L'efficacité globale de l'écran pour le spectre considéré est 6 dB.

TABLEAU IV

Fréquence centrale de la bande, d'octave (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Efficacité de l'écran (dB)	1,7	6,8	5,4	5	7,2	9,1	7,9

2.4.2. Efficacité de l'écran à grande distance (protection de postes de travail éloignés d'une source de bruit).

La configuration d'essais est celle repérée 1 sur la figure 5. Les mesures ont été effectuées pour plusieurs formes de l'écran, précisées à la figure 3. Les résultats obtenus sont donnés figure 9 sous la forme de courbes de décroissance mesurées sans et avec écran totalement déployé (ou en L puis en U pour la bande d'octave 1 000 Hz). L'écart entre chaque couple de courbes représente l'efficacité de l'écran.

La figure 10 montre, dans la bande d'octave de 1 000 Hz, comment l'ouverture des portes simulant un traitement partiel, mais parfait, des parois latérales du local, affecte l'efficacité de l'écran.

2.5. Analyse des résultats.

L'examen des résultats montre que lorsqu'on passe de la situation idéale où l'écran est posé sur un plan réfléchissant en l'absence de tout autre obstacle à la situation réelle d'un local industriel réverbérant, l'efficacité de l'écran à un mètre derrière lui chute de 15 dB à 5 dB environ dans la bande d'octave de 1 000 Hz (fig. 4 et 8). Cette perte d'efficacité laisse toutefois subsister une atténuation substantielle qui permet une réduction très sensible du niveau de bruit à un poste de travail très proche de l'écran.

Lorsque la distance récepteur-écran augmente, l'efficacité de l'écran déployé décroît jusqu'à une distance de 3 m environ, pour laquelle elle se stabilise à une valeur voisine de 2 dB, pour augmenter légèrement au-delà de 20 m (fig. 9). Ces observations sont valables dans toute la plage de fréquences explorée avec une très légère augmentation de l'efficacité avec la fréquence. A moyenne et grande distance derrière l'écran, la protection qu'il apporte est donc faible.

On notera que l'efficacité est augmentée de 2 à 4 dB, au-delà de 3 m et dans la bande de 1 000 Hz, lorsque l'écran est plié en U ou en L autour de la source (fig. 9). L'absence d'écart mesurable entre ces deux dernières configurations s'explique par la forme du local dans la zone où est placé l'écran (fig. 5). L'ouverture des portes, qui simule un traitement acoustique parfait de 40 % de la surface des parois latérales du local, a un effet mesurable : l'efficacité de l'écran est augmentée d'environ 1 dB au-delà de 3 m (fig. 10 a). La conjonction de la mise en place de l'écran et de ce traitement simulé permet d'obtenir une réduction de niveau de bruit d'environ 4 dB à 20 m et 5 dB à 30 m (fig. 10 b). On vérifie que l'atténuation totale ainsi obtenue est la somme des atténuations partielles mises en évidence par les figures 7 et 10 a.

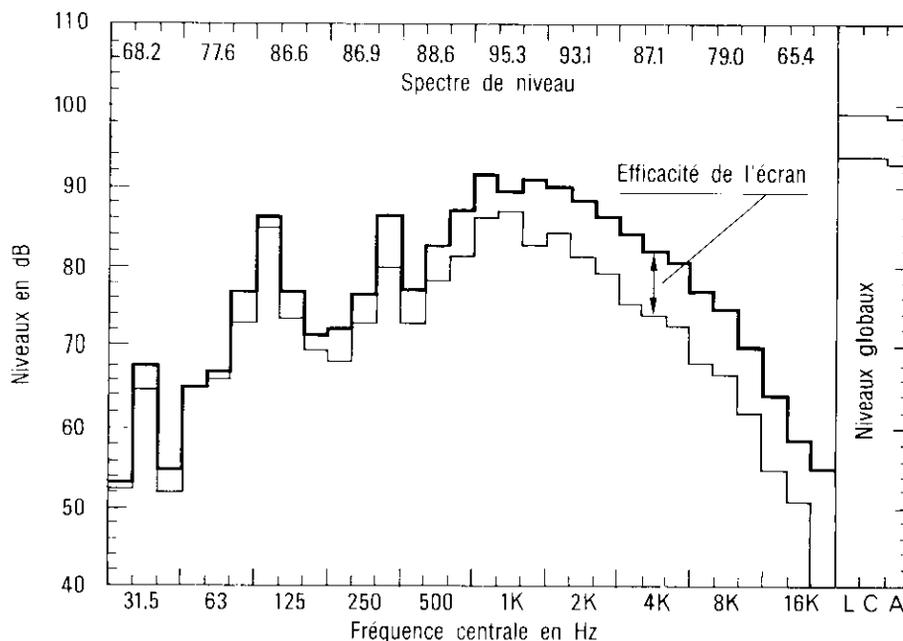


Fig. 8. — Efficacité de l'écran à faible distance (configuration d'essais n° 2 de la figure 5).

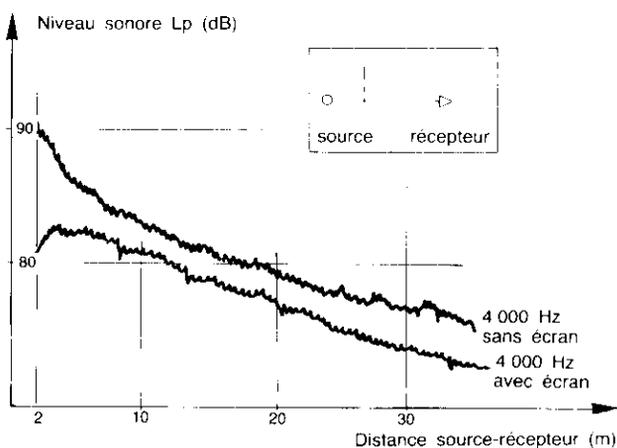
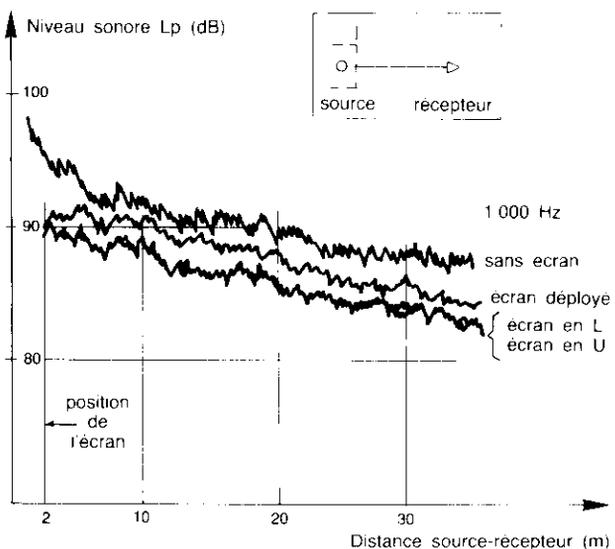
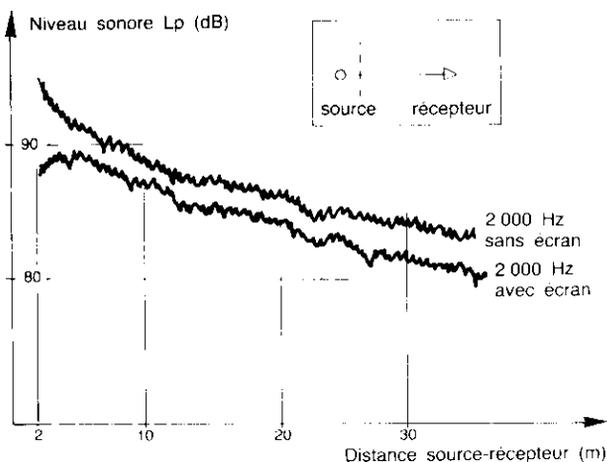
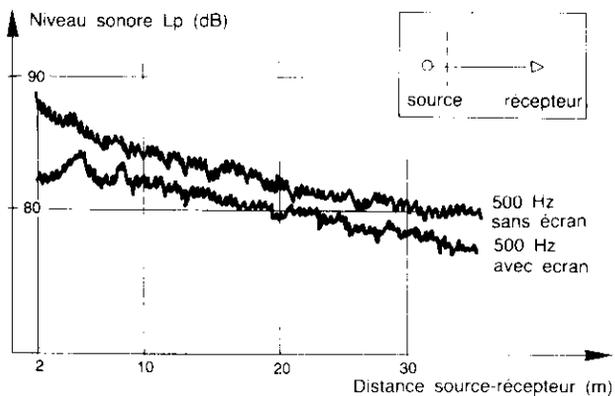


Fig. 9. — Efficacité de l'écran par bandes d'octave (configuration d'essais n° 1 de la figure 5).

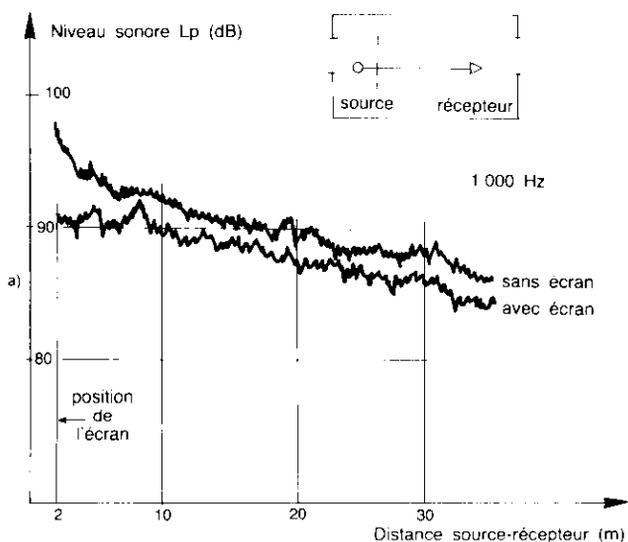


fig 10 a : efficacité de l'écran, portes ouvertes.

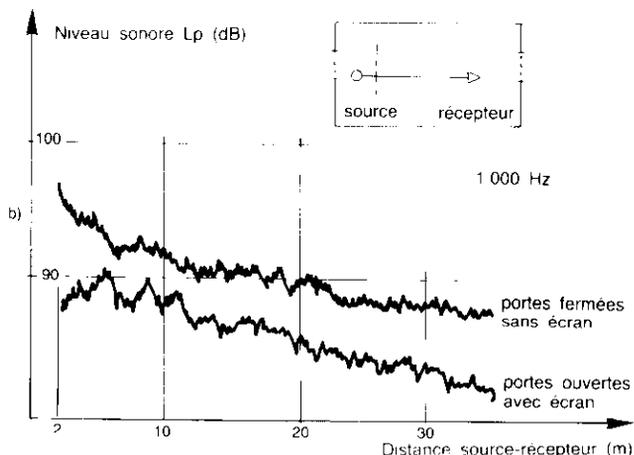


fig. 10 b : effets conjugués de l'écran et de l'ouverture des portes.

Fig. 10. — Influence de l'ouverture des portes latérales sur l'efficacité de l'écran dans la bande d'octave de 1000 Hz.

3. ÉTUDE THÉORIQUE

3.1. Méthodologie.

La méthodologie est celle maintenant couramment utilisée à l'INRS pour prévoir les niveaux de bruit dans les locaux industriels [1]. L'approche mise en œuvre est celle repérée 3 dans le tableau I. Elle repose sur l'acoustique géométrique et sur la technique de calcul qui consiste à tirer des rayons sonores, uniformément dans l'espace et depuis chaque source, et à suivre leur trajectoire dans le local. Un rayon atteignant une paroi, ou tout obstacle plan, est supposé subir une réflexion spéculaire et une atténuation fonction du coefficient d'absorption de la paroi. Ceci signifie que les phénomènes de diffraction et de diffusion du son sont négligés et que seuls les trajets 1 et 2 de la figure 1 sont pris en compte (rayonnement direct de la source et ondes sonores réfléchies par les parois).

Chaque fois qu'un rayon traverse une maille du quadrillage horizontal virtuel, ici choisi à une hauteur de 1 m, dans lequel on veut calculer les niveaux de bruit, l'énergie transportée par ce rayon est mémorisée. La précision du calcul est fonction de l'énergie sonore injectée dans le local et du nombre de fois que chaque rayon est laissé se réfléchir. Pour obtenir une précision élevée, on a tiré 100 000 rayons depuis l'unique source et suivi chacun d'eux sur 15 réflexions.

De la sommation des énergies sonores ayant traversé une cellule donnée, on déduit aisément le niveau sonore dans cette cellule et, pour l'ensemble du local, une carte de bruit. La prévision ainsi effectuée ne dépend de la fréquence que par le biais du coefficient d'absorption des parois. Ici ont été utilisées des valeurs de coefficient d'absorption caractéristiques de la bande d'octave de 1 000 Hz. Toutefois, pour un spectre de bruit industriel typique, à large bande et riche en fréquence moyenne (250 Hz à 2 000 Hz), les résultats théoriques obtenus peuvent être acceptablement interprétés en dB(A).

TABLEAU V
Coefficients d'absorption utilisés pour l'étude théorique

	Traitements acoustiques hypothétiques				
	Local actuel	Plafond traité		Plafond et certaines parois traités	
		Cas 0	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Plafond	0,20	0,50	0,80	0,50	0,80
Sol	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Parois latérales	0,15	0,15	0,15	0,50	0,50
Parois longitudinales	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Décrochements	0,15	0,15	0,15	0,50	0,50
Face « source » de l'écran	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Face « récepteur » de l'écran	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Note : La simulation d'un traitement acoustique des parois longitudinales ne serait pas réaliste puisqu'il s'agit de surfaces vitrées.

L'objectif étant la prévision de l'efficacité de l'écran expérimenté pour divers cas simulés de traitement acoustique des parois du local, une représentation analogue à celle retenue pour l'étude expérimentale a été adoptée. Ce sont donc des courbes de décroissance théoriques, calculées pour la configuration n° 1 de la figure 5, qui sont présentées et non pas des cartes de bruit. Pour l'étude théorique, l'écran a été toujours supposé totalement déployé.

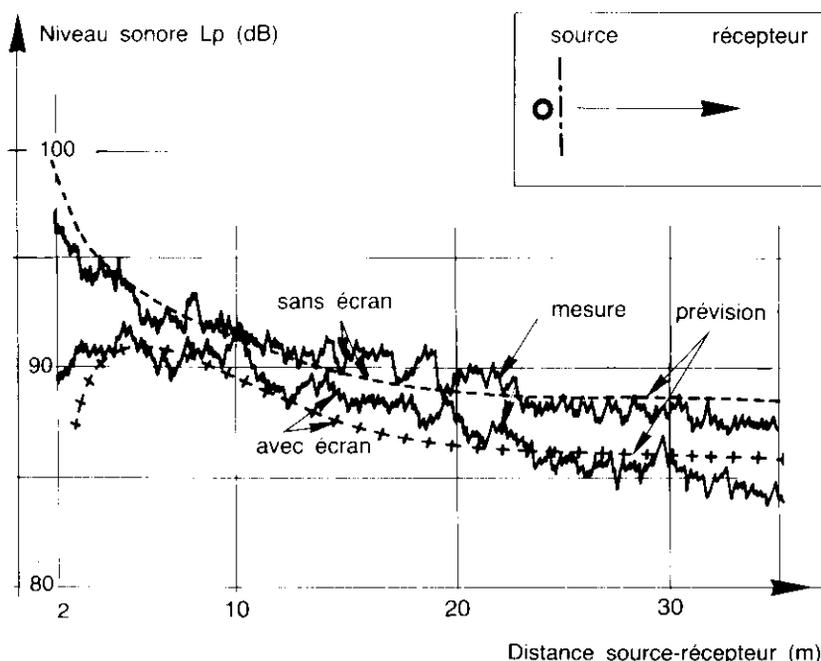


Fig. 11. — Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques pour le local actuel avec et sans écran et pour la bande d'octave de 1 000 Hz.

3.2. Cas traités.

Le calcul théorique a été réalisé pour les conditions d'absorption du local actuel et pour des conditions hypothétiques représentatives de divers degrés de traitement acoustique des parois. Pour le local actuel, le coefficient d'absorption de chacune des parois a été estimé à partir de la connaissance du ou des matériaux les constituant. Les valeurs retenues pour les différents cas considérés sont rassemblées dans le tableau V.

3.3. Comparaison théorie-expérience.

Sur la figure 11, ont été représentées les courbes de décroissance expérimentales et théoriques obtenues avec et sans écran. On constate que l'accord théorie-expérience est bon; l'écart n'excède jamais 2 dB. En terme d'efficacité de l'écran, l'accord est excellent au-delà d'une distance de 3 m. En effet, à 10 m et 20 m, le calcul donne respectivement à l'écran une efficacité de 2 et 2,5 dB, valeurs identiques à celles mesurées. A faible distance de l'écran, la prévision surestime son efficacité. Cette confrontation positive permet de conclure que l'approche choisie est valable pour la situation considérée et que le phénomène de réflexion spéculaire sur les parois du local l'emporte sur les autres phénomènes physiques en jeu.

Ce résultat confirme l'ensemble des résultats acquis par le passé qui montrent que la précision de la prévision des niveaux de bruit par la méthode utilisée ici est meilleure que 3 dB [16] si le local n'est ni de forme très complexe, ni très encombré ou très diffusant ce qui est le cas du local industriel étudié ici. Source et local

étant modélisés de la même façon lors du calcul des niveaux sonores avec et sans écran, la précision du résultat, en termes d'efficacité de l'écran, se trouve encore accrue.

3.4. Efficacité théorique de l'écran dans le local supposé traité.

Les figures 12 et 13 fournissent les décroissances calculées, avec et sans écran, respectivement pour les cas 1 et 2 du tableau V (plafond muni d'un traitement plus ou moins poussé) et pour les cas 3 et 4 (même traitement du plafond assorti d'un traitement partiel des parois verticales).

Tout d'abord, on constate qu'un traitement modéré du plafond ($\alpha = 0,5$) n'affecte de façon mesurable l'efficacité de l'écran qu'à moins de 3 m derrière lui où elle augmente de 2 dB. Au-delà, l'accroissement de l'efficacité n'excède pas 1 dB.

Quant au traitement poussé du plafond (cas 2, $\alpha = 0,8$), il n'augmente que de 1 à 2 dB l'efficacité de l'écran qui avoisine alors 4 dB aux moyennes et grandes distances.

La comparaison des cas 2 et 3 indique que traiter fortement le plafond seul ou modérément le plafond et les parois latérales est sensiblement équivalent. Seule la conjugaison d'un traitement poussé du plafond et modéré des parois latérales (cas 4) confère à l'écran une efficacité élevée (8 dB à 3 m de l'écran, 4,5 dB à 10 m, 6 dB à 20 m et au-delà).

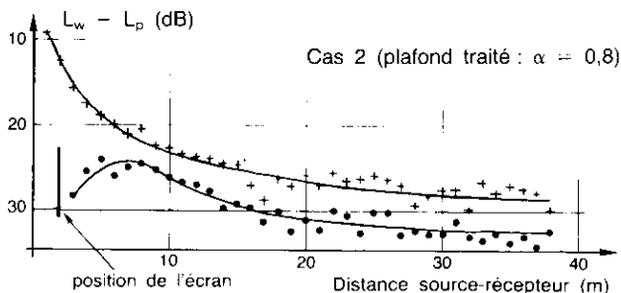
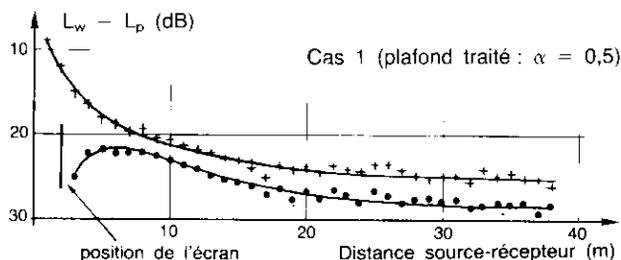


Fig. 12. — Influence du traitement du plafond sur l'efficacité de l'écran dans la bande d'octave de 1 000 Hz. Calcul théorique.

L_p : niveau sonore en dB
 L_w : puissance acoustique de la source en dB
 +---+ : sans écran
 : avec écran.

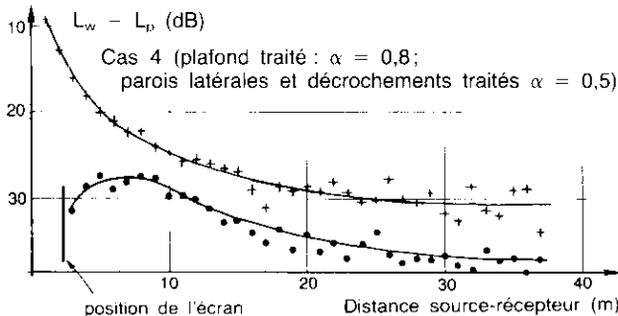
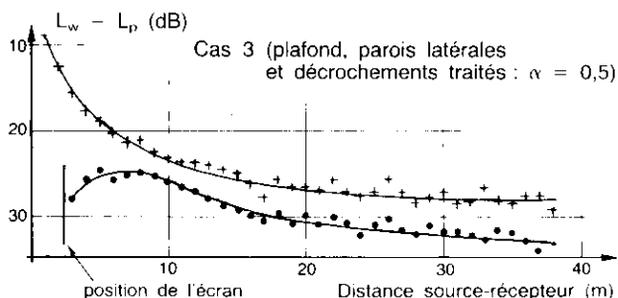


Fig. 13. — Influence d'un traitement conjugué du plafond et des parois latérales sur l'efficacité de l'écran dans la bande d'octave de 1 000 Hz. Calcul théorique.

L_p : niveau sonore en dB
 L_w : puissance acoustique de la source en dB
 +---+ : sans écran
 : avec écran.

4. COMPARAISON DE DIFFÉRENTES APPROCHES PRÉVISIONNELLES

4.1. Approches et cas considérés (tableau VI).

Ce chapitre est consacré à une quantification de l'influence relative des phénomènes de réflexion par les parois du local et de diffraction par les arêtes de l'écran. Cette quantification est effectuée à l'aide des trois approches prévisionnelles décrites au chapitre 2 (tableau I), décomposées en cinq situations pour trois traitements du local :

- cas 0 = local actuel
- cas 1 = plafond traité ($\alpha = 0,5$)
- cas 2 = plafond traité ($\alpha = 0,8$)

L'approche n° 1, rudimentaire en ce sens qu'elle néglige totalement l'influence du local, a été décomposée en deux : une première repérée 1 a, très sommaire car reposant sur l'emploi d'un abaque général [7], une seconde repérée 1 b, plus évoluée car décrivant finement le champ diffracté derrière un écran de largeur finie [12].

L'approche n° 2 constitue une situation intermédiaire entre les approches 1 et 3, cette dernière négligeant les effets de diffraction mais tenant compte de l'ensemble des parois du local, y compris des réflexions par chacune des faces de l'écran.

La comparaison de l'approche 2 avec l'approche 3 a permet d'étudier la contribution relative de la diffraction et de la réflexion.

L'efficacité de l'écran en fonction de la distance « source-récepteur », mesurée pour la configuration 1 de la figure 5, est donnée figure 14 pour les situations du tableau VI et pour différents traitements du local.

Les approches incluant la diffraction sont fonction de la fréquence, les autres le sont aussi mais seulement par l'intermédiaire du coefficient d'absorption des parois. La confrontation présente est valable à la fréquence de 1 000 Hz.

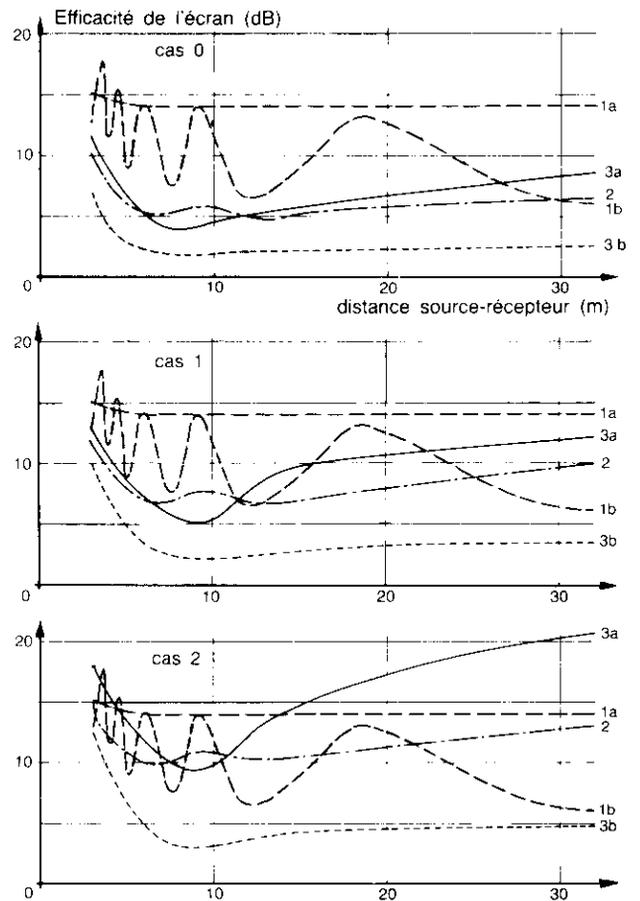


Fig. 14. — Efficacité de l'écran pour les approches prévisionnelles et les cas de traitement du local.

- 1 a et 1 b : diffraction par les arêtes de l'écran, local négligé.
- 2 : diffraction par les arêtes et influence du plafond et du sol.
- 3 a : influence du plafond et du sol, diffraction négligée.
- 3 b : influence de la totalité des parois du local, diffraction négligée.

TABLEAU VI

Tableau synthétique des situations retenues pour étudier l'influence relative des phénomènes de réflexion et de diffraction

Approche et description sommaire	1 Influence du local négligée		2 Calcul du champ diffracté par les arêtes de l'écran et prise en compte des réflexions par le sol et le plafond	3 Diffraction négligée Prise en compte des réflexions par :	
	Abaque général	Calcul du champ diffracté par les arêtes de l'écran		le sol et le plafond	toutes les parois
			1 a	1 b	3 a
Repère des courbes de décroissance prévisionnelles (fig. 14).....	1 a	1 b	2	3 a	3 b

4.2. Comparaison des efficacités prévisionnelles de l'écran.

Pour le local dans son état actuel (fig. 14, cas 0), l'erreur commise en négligeant l'influence des parois est considérable (12 dB en moyenne au-delà de 5 m). En négligeant les réflexions par les parois verticales, d'une part on surestime l'efficacité de 3 à 6 dB suivant la distance, d'autre part on constate un écart faible entre les courbes 2 et 3 a donnant l'efficacité de l'écran lorsque la diffraction est prise ou non en compte. Ceci démontre le rôle négligeable que joue la diffraction par les arêtes de l'écran dans le local actuel, même lorsque ses parois verticales sont supposées totalement transparentes au son.

Lorsque le plafond est supposé modérément absorbant (fig. 14, cas 1), les réflexions par les parois continuent à jouer un rôle déterminant. Les négliger entraîne une surestimation de l'efficacité de l'écran supérieure en moyenne à 7 dB. Par contre, si les parois verticales étaient effectivement négligeables, alors l'effet de diffraction par les arêtes commencerait à se manifester. On constate en effet que les courbes 2 et 3 a s'écartent, notamment au-delà 8 m. Ce phénomène s'accroît encore lorsque le plafond est supposé très absorbant (fig. 14, cas 2); les courbes 2 et 3 a divergent fortement au-delà de 10 m. Par ailleurs, les approches 1 a, 1 b et 2, qui toutes tiennent compte de la diffraction par les arêtes de l'écran, conduisent à des valeurs relativement voisines de l'efficacité. Toutefois c'est l'approche 3 b qui continue à fournir l'efficacité la plus faible.

Ainsi, même si le plafond est très absorbant, l'influence des parois latérales et du sol demeure telle que l'effet de diffraction a encore une contribution secondaire. Celle-ci devient toutefois prépondérante si les parois verticales sont, elles aussi, fortement absorbantes.

4.3. Discussion.

Les résultats obtenus, bien que non généralisables quantitativement, sont caractéristiques. Ils confirment que, sauf dans le cas très exceptionnel dans l'industrie où le local est fortement absorbant, il est indispensable de tenir compte des réflexions par les parois du local pour estimer l'efficacité d'un écran. Si le local est assez réverbérant à faiblement absorbant, le phénomène de diffraction par les arêtes de l'écran est négligeable. Ce n'est que lorsque le plafond est absorbant et les parois verticales peu influentes, car traitées ou de surface faible (plafond bas), qu'il faut prendre en compte simultanément la diffraction et la réflexion.

Une comparaison telle que celle présentée ici, facile à réaliser avec les techniques prévisionnelles actuellement disponibles, permet de déterminer, pour chaque cas, si on a ou non le droit de négliger la diffraction lorsqu'on calcule l'efficacité d'un écran.

Il n'est pas surprenant que les trois arêtes diffringentes d'un écran n'influencent pas considérablement la structure du champ sonore à l'intérieur d'un local. Toutefois, dans la réalité, les machines, matières et matériels stockés, canalisations diverses, baffles suspendus, constituent autant d'objets diffringents. La diffusion sonore qui résulte de la superposition des champs diffractés par ces objets pourrait bien altérer la structure du champ sonore et ceci même dans un local réverbérant. C'est là une voie de recherche qui pourrait fournir l'explication des écarts entre la prévision, telle qu'on est en mesure de la faire actuellement, et l'expérience, notamment dans le cas des locaux très encombrés.

5. CONCLUSION

L'étude présentée met en évidence, quantitativement et pour le cas réel d'un local industriel typique, l'efficacité d'un écran conçu suivant les règles de l'art. Hormis ses qualités d'absorption du bruit sur la paroi prévue à cet effet, qui sont figées par construction, un écran acoustique n'a d'autres caractéristiques que celles qui lui sont conférées par sa géométrie et sa disposition vis-à-vis de la source de bruit. Son efficacité ne dépend plus que des caractéristiques du local : forme, dimensions, nature des parois, matériels et objets implantés ou en stationnement.

Lorsqu'on passe de la situation idéale (champ libre, écran posé sur un plan réfléchissant) à celle d'un milieu clos (local comportant des parois plus ou moins réfléchissantes), on constate une perte d'efficacité, particulièrement significative à faible distance. Toutefois, dans un local réverbérant, tel que celui présenté ici, immédiatement derrière l'écran, une réduction importante (supérieure ou égale à 5 dB dans la plage de fréquences 500 Hz - 4 000 Hz) du niveau de bruit est obtenue. Mais, à moyenne et grande distance, cette réduction n'excède pas 2 dB. Si le local est traité, à la réduction de son amplification vient s'ajouter une efficacité accrue de l'écran. Par conjugaison des deux effets, une réduction importante du niveau de bruit peut être obtenue même à moyenne et grande distance de

l'écran. Toutefois, le gain supplémentaire apporté par l'écran demeure assez faible (de l'ordre de 4 dB) à moins qu'un traitement très poussé des parois du local ne soit entrepris, cas qui demeure exceptionnel.

Le présent document montre également la portée considérable des techniques prévisionnelles actuellement disponibles pour quantifier a priori ce que l'on peut attendre de telle ou telle technique de réduction du bruit. Les paramètres étant multiples et les phénomènes physiques complexes, la constitution d'abaques simples, universels et précis pour le calcul de l'efficacité conjuguée d'un traitement acoustique et d'écrans n'est pas concevable. Le recours à des programmes de calcul est nécessaire. Ceux mis au point au laboratoire d'acoustique de l'INRS permettent une description quantitative assez complète et fine du comportement des écrans en milieu clos. La comparaison de différentes approches actuellement disponibles met bien en lumière le rôle joué par le phénomène de diffraction, rôle qui n'est prépondérant que si le local est très absorbant. Le niveau actuel des connaissances permet de quantifier ce rôle. Enfin, on retiendra que parmi les divers moyens disponibles pour soustraire les travailleurs au bruit, les écrans constituent une solution dont la mise en pratique nécessite une étude préalable conduite avec beaucoup de discernement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LEBLOND H. et coll. — Caractéristiques acoustiques des locaux industriels. Calcul prévisionnel des niveaux sonores en atelier. *Cahiers de notes documentaires*, 1^{er} trimestre 1978, n° 90, note ND 1094.
- [2] JESSEL M. — Acoustique théorique - Propagation et holophonie. Paris, Masson, 1973.
- [3] MAEKAWA Z. — Environmental sound propagation. Communication présentée au 8^e Congrès international d'acoustique, Londres, 1974, pp. 29-46.
- [4] KURZE U.J. — Noise reduction by barriers. *Journal of the Acoustical Society of America*, mars 1974, vol. 55, n° 3, pp. 504-518.
- [5] KELLER J.B. — Geometrical theory of diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, n° 2, pp. 116-130.
- [6] LECOCQ J.L. et LEBLOND H. — La théorie géométrique de la diffraction appliquée à l'étude d'écrans industriels. Note scientifique et technique de l'INRS, n° 30, août 1980, 13 p.
- [7] HARRIS C.M. — Handbook of noise control. New York, McGraw-Hill., 1979, 2^e édition.
- [8] MORELAND J.B. — Use of barriers for in plant noise control. Communication présentée à Noise Con. 73. Poughkeepsie (New York), Institute of Noise Control Engineering, 1973, pp. 348-356.
- [9] MOULIN M. — Calcul du niveau sonore dans les ateliers - Influence des écrans. Dans : Recueil des communications du 1^{er} Congrès européen d'acoustique (FASE 75). Lannion, GALF, Département « Études et techniques acoustiques », pp. 314-320.
- [10] CZARNECKI S., GLINSKA E. — Noise control in industrial halls using acoustic barriers. Dans : Recueil des communications du 1^{er} Congrès européen d'acoustique (FASE 75). Lannion, GALF, Département « Études et techniques acoustiques », pp. 321-326.
- [11] LEBLOND H., LECOCQ J.L. — Applications de l'acoustique géométrique à l'étude de la distribution des niveaux sonores dans les locaux industriels. Note scientifique et technique de l'INRS, n° 22, septembre 1979, 10 p.
- [12] LECOCQ J.L. — Contribution à l'étude de l'efficacité des écrans acoustiques dans les locaux. Thèse de 3^e cycle, Université Pierre et Marie-Curie, Le Mans, 1977, 164 p.
- [13] KURZE U.J. — Efficacité des écrans antibruit dans les ateliers. Traduction d'un article paru dans *Moderne Unfallverhütung* - Heft 23. *Cahiers de notes documentaires*, 2^e trimestre 1981, n° 103, note ND 1319.
- [14] KURZE U.J. et coll. — Expérience acquise dans l'utilisation des écrans acoustiques dans les locaux de travail. Extrait de Forschungsbericht n° 168, Dortmund 1977, 33 pages (traduction INRS n° 518-79).
- [15] BENARD M., DAMONGEOT A. — La source de référence CIMPO-INRS. *Revue d'acoustique*, 1975, n° 35, pp. 75-79.
- [16] HO M.T., LEBLOND H. — Calcul prévisionnel des niveaux sonores dans les ateliers. Comparaison avec des résultats de mesures. Compte rendu du 9^e Congrès international d'acoustique, Madrid, 1977, F 38, p. 258.

Attenuation efficiency of noise screens in industrial premises.

Experimental and theoretical study of a real-life case

After a summary of knowledge concerning acoustic screening, the experimental part of the study is presented. To facilitate evaluation of sound attenuation at little and at great distance behind the screen, two typical screen locations were chosen : 1) between the workplace and a nearby machine; 2) between a noisy machine located at one end and the rest of the room where relatively no-noise tasks were being carried out.

The theoretical part of the study consisted in a computer simulation of different cases of acoustic treatment of the room surfaces and an evaluation of the attenuation provided by the same screen. Several predictive approaches for the same room and for two cases of acoustic treatment were compared, showing the rôle of screen diffraction, which is the most important factor in premises with a very high sound absorption factor.
