

→ N. Trompette, T. Loyau,
G. Lovat, Département Ingénierie
des équipements de travail, INRS,
Centre de Lorraine, Nancy

Encoffrements de machine

Aide à la conception : règles de base et mise en œuvre expérimentale

ASSISTANCE WITH MACHINERY ENCLOSURE DESIGN:

BASIC RULES AND EXPERIMENTAL
APPLICATION

Enclosures are the most frequently used means of reducing machine noise radiation. INRS has carried out some work on this subject, with the aim of quantifying the influence of a number of parameters by testing different types of enclosures, and clarifying the principal mechanisms underlying these tests through elementary analytical models.

The experimental work studied the importance of the shape and nature of the walls and panels as well as the impact of the position of the machine and the volume enclosed. It also highlighted the influence of openings and leakage, and allowed the establishment of both a description and efficiency quantification of the different types of treatment that can be applied. Following these tests, general design rules were established.

The analytical models used for enclosure dimensioning are described. They were applied to the enclosures tested and the results compared to those obtained experimentally.

These models proved to be adapted to predicting the acoustic performance of enclosures of simple design, and allow an assessment in the case of more sophisticated designs. In both cases, they can be used at the preliminary design stage.

● machinery ● noise
● sound radiation ● enclosure
● design ● dimensioning
● modelling ● acoustic performance

Les encoffrements constituent le moyen de réduction du bruit rayonné par des machines le plus fréquemment utilisé. A ce titre, l'INRS a conduit différents travaux sur ce sujet, avec pour objectifs de quantifier l'influence d'un certain nombre de paramètres au moyen d'essais sur différents types d'encoffrement et d'explicitier les principaux mécanismes en jeu lors de ces essais au travers de modèles analytiques élémentaires.

Les travaux expérimentaux ont permis d'étudier l'importance de la forme et de la nature des parois ainsi que l'impact de la position de la machine et du volume encoffré, de montrer l'influence des ouvertures et des fuites, de décrire les traitements qui peuvent leur être appliqués et de quantifier leur efficacité. A l'issue de ces essais, un certain nombre de règles de conception générales ont pu être définies.

Les modèles analytiques utilisés pour le dimensionnement d'encoffrement sont décrits. Ils ont été mis en œuvre sur les encoffrements testés et les résultats ont été comparés à l'expérimentation. Ces modèles se sont avérés adaptés à la prévision de l'efficacité acoustique d'encoffrements de conception simple et permettent une évaluation lors de conception plus sophistiquée. Ils sont, dans tous les cas, utilisables au stade de l'avant-projet.

● machine ● bruit ● encoffrement ● conception ● dimensionnement
● modélisation ● efficacité acoustique

Les encoffrements constituent le moyen le plus fréquemment utilisé de réduction du bruit rayonné par des machines. Ils présentent en effet un certain nombre d'avantages :

■ Ils sont souvent efficaces, quelle que soit la solution retenue, sauf dans le cas particulier des basses fréquences pour lesquelles ils sont en général moins performants.

■ Même s'ils perturbent parfois le procédé, ils constituent une solution correctrice applicable sans modification importante de la machine, ce qui n'est pas le cas des actions de réduction du bruit à la source, qui doivent généralement être entreprises dès le stade de la conception.

■ Leur efficacité est permanente, elle n'évolue pas dans le temps, sauf du fait de détériorations, et elle assure une protection collective contre les risques de surdité.

Néanmoins, l'expérience montre que le calcul de leurs performances dépend de nombreux paramètres, qu'il faut optimiser en fonction des différents mécanismes de fonctionnement.

L'INRS a donc conduit différents travaux sur ce sujet, avec pour objectifs de quantifier l'influence d'un certain nombre de paramètres, au moyen d'essais sur différents types d'encoffrement, et d'explicitier les principaux mécanismes en jeu lors de ces essais au travers de modèles analytiques.

Ce document présente les résultats de ces travaux : après un bref rappel des généralités et la définition de la terminologie, les types d'encoffrements testés, leurs configurations possibles et la méthodologie utilisée pour mesurer leur efficacité sont décrits. Les résultats expérimentaux obtenus dans chacune des configurations sont comparés : l'influence de la ou des modifications apportées est ainsi évaluée.

A l'issue de ce travail expérimental, des modèles analytiques, basés sur des hypothèses simplificatrices rarement vérifiées dans la pratique, sont utilisés pour modéliser certaines configurations d'encoffrements. Des comparaisons calcul-mesure permettent alors de vérifier la pertinence de ces modèles.

Les travaux ont permis d'étudier l'importance de la forme et de la nature des parois ainsi que l'impact de la position de la machine et du volume encoffré, de montrer l'influence des ouvertures et des fuites et de décrire les traitements qui peuvent leur être appliqués. Les règles analytiques de dimensionnement se sont avérées adaptées à la prévision de l'efficacité acoustique d'encoffrements de conception simple, et sont donc susceptibles d'apporter une aide, soit dans des cas similaires, soit au stade d'un avant projet.

1. Généralités

1.1. Mise en application et limites

Les encoffrements ont pour fonction de réduire le bruit aérien émis par une machine bruyante. Ils sont constitués d'une enceinte qui enveloppe le plus complètement possible la machine considérée.

Ils ne contribuent pas à la réduction du bruit transmis par voie solide (ondes se propageant par les structures, par opposition à voie aérienne). De plus, leur efficacité est limitée par les fuites au niveau des ouvertures fonctionnelles (porte, vitres, accès matière...) et au niveau des liaisons avec les auxiliaires (alimentation, tuyauteries, arbres...).

Ils peuvent même provoquer une augmentation du bruit ambiant. En effet, le champ acoustique à l'intérieur de l'encoffrement peut être augmenté du fait des réflexions sur les parois de l'encoffrement et de l'influence des modes acoustiques de cavité. D'autre part, les vibrations de la machine sont susceptibles d'exciter les parois de l'encoffrement qui vont alors rayonner.

L'efficacité d'un encoffrement sur le bruit global généré par une machine dépend donc :

- de la proportion du bruit aérien rayonné directement par la machine dans le bruit global,

ENCADRE N° 1

TERMES ET DÉFINITIONS

Encoffrements

Une structure recouvrant partiellement ou complètement une source de bruit (machine) pour la protection contre le bruit dans l'environnement de cette source.

Perte par insertion

D_w [dB (A)] : perte de puissance acoustique liée à l'insertion de l'encoffrement. Différence en dB (A) entre la puissance acoustique d'une source mesurée sans l'encoffrement et la puissance acoustique d'une source mesurée avec l'encoffrement, en bande d'octave ou de tiers d'octave.

Indice d'affaiblissement

R [dB (A)] : indice d'affaiblissement acoustique de panneau. Différence en dB (A) entre la puissance acoustique incidente, en bande d'octave ou de tiers d'octave, et la puissance acoustique transmise. Dans des conditions de champ diffus, l'indice d'affaiblissement acoustique R est lié à D_w par la relation :

$$D_w = R + 10 \log_{10}(\bar{\alpha})$$

où $\bar{\alpha}$ = coefficient moyen d'absorption des parois de l'encoffrement.

Transparence

τ Adimensionnel : transparence acoustique d'un panneau. Rapport entre la puissance acoustique transmise et la puissance acoustique incidente. Mesuré conformément à la référence [2]. Lié à l'indice d'affaiblissement acoustique R par la relation :

$$R = 10 \log_{10}(1/\tau)$$

Coefficient d'absorption

α : rapport entre le flux d'énergie acoustique absorbé par une paroi et le flux d'énergie acoustique incident. Ce coefficient dépend en général de l'angle d'incidence.

Le coefficient moyen d'absorption $\bar{\alpha}$ d'une surface S s'exprime en fonction du coefficient d'absorption α de chaque surface ds :

$$\bar{\alpha} S = \iint \alpha ds$$

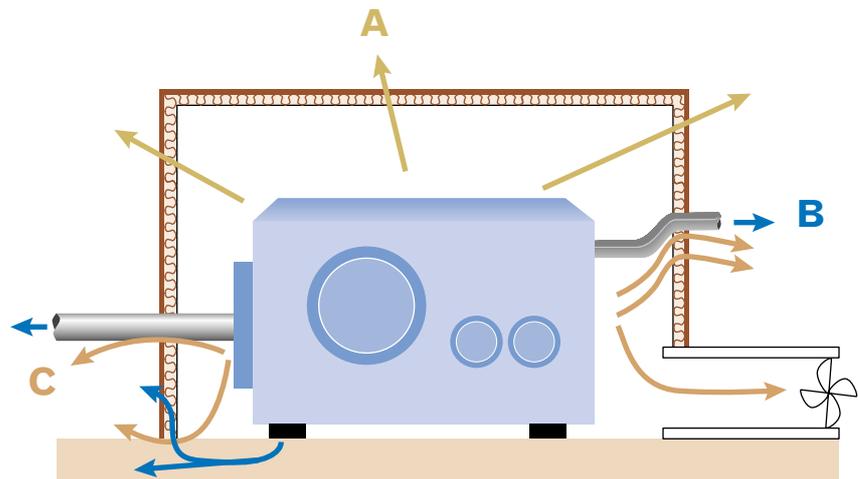
Fig. 1. Différentes voies de transmission sonore d'un encoffrement -

The various sound transmission paths of an enclosure

Path A: Airborne transmission of sound by the walls of the enclosure

Path B: Transmission of machine vibration by solid couplings and subsequent radiation of the structures excited, e.g. the walls of the enclosure

Path C: Transmission via leakage and openings (in this case, the ventilation system)



Chaque couleur symbolise un mode de transmission différent:

Voie A : transmission aérienne du son par les parois de l'encoffrement,

Voie B : transmission des vibrations de la machine par les liaisons solides et rayonnement des structures ainsi excitées, comme par exemple les parois de l'encoffrement,

Voie C : transmission par les fuites et les ouvertures (ici, la ventilation).

- du ratio entre la surface interne de l'encoffrement et la surface des ouvertures,
- du traitement des ouvertures, par exemple au moyen de silencieux ou de joints,
- de l'absence d'excitation des parois de l'encoffrement par les vibrations générées par la machine, et dans le cas contraire du facteur de rayonnement des parois,
- du revêtement absorbant des parois de l'encoffrement, qui a pour fonction d'éviter une augmentation du champ acoustique interne.

La *figure 1* résume schématiquement les différentes voies de transmission sonore d'un encoffrement. Celui-ci permet de limiter les transmissions par la voie A.

L'énergie acoustique aérienne délivrée par la source se répartit en :

1. une énergie réfléchiée par la paroi, ce qui augmente la pression acoustique dans l'encoffrement et diminue son efficacité,
2. une énergie absorbée par le revêtement réparti sur la paroi interne,
3. une énergie transmise.

L'efficacité sur le bruit transmis par la voie A dépend de ces trois composantes.

L'efficacité globale de l'encoffrement sera ensuite diminuée au prorata de la transmission de l'énergie acoustique par les voies B et C.

1.2. Exigences de conception

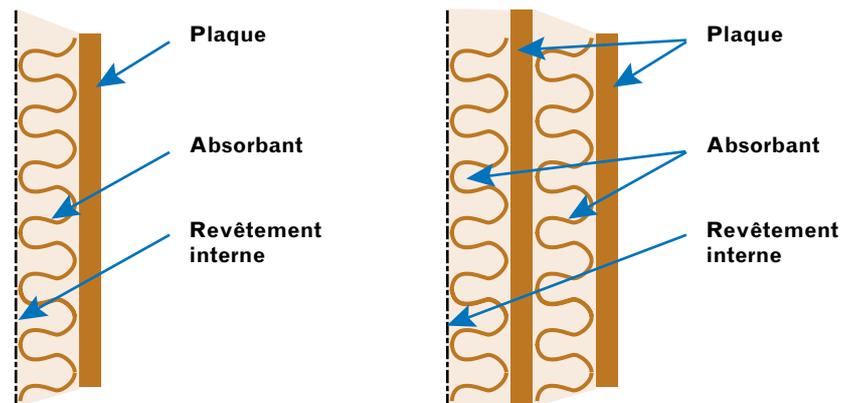
La conception des encoffrements dépend d'abord des normes, en particulier de sécurité, qui s'appliquent pour l'équipement encoffré, et bien sûr des fonctionnalités exigées par la machine.

Les normes imposent, pour la sécurité des opérateurs, une distance minimale entre les parties tournantes ou d'entraînement d'une machine et les plus proches parois [5 à 10].

Les fonctionnalités de la machine sont en règle générale :

- les accès, à la fois à l'intérieur de l'encoffrement et autour de la machine pour toutes les opérations de réglage, maintenance, manutention, etc.
- la surveillance en fonctionnement,
- la protection contre les projections, les bris d'outils, etc., qui peut être contraignante pour le dimensionnement des panneaux,
- l'alimentation de la machine, en particulier en matière, et l'évacuation des produits fabriqués ou traités,
- les entrées et sorties d'air, l'évacuation des poussières, la ventilation...

Fig. 2. Principaux éléments constitutifs d'un encoffrement - The main elements making up an enclosure



Du point de vue de l'acoustique, deux exigences facilement applicables sont à retenir.

■ L'efficacité à basses fréquences dépend de la distance entre la machine et les parois de l'encoffrement. Cette distance peut être calculée en fonction de la plus basse fréquence pour laquelle une atténuation est recherchée :

$$d \geq \frac{2 \cdot 10^4}{m \cdot f^2}$$

avec :

d : distance minimum [m].

m : masse surfacique de la paroi [kg/m²].

f : plus basse fréquence pour laquelle une atténuation est recherchée [Hz].

■ L'efficacité diminue avec l'encombrement à l'intérieur de l'encoffrement. En principe, l'encombrement doit être limité à 50 % du volume intérieur.

1.3. Constitution

Les principaux éléments constitutifs d'un encoffrement acoustique sont :

- des panneaux simples, constitués par l'assemblage d'une plaque porteuse, de matériau absorbant et d'un revêtement interne (*fig. 2a*) ;
- un châssis métallique sur lequel les panneaux sont vissés, soudés ou rivetés ;
- des ouvertures libres, connectées à des conduits ou équipées de portes, de fenêtres ou de silencieux.

La plaque porteuse peut être simplement une plaque homogène de bois ou d'acier, ou plus sophistiquée : tôle multicouche, panneau composite. Elle peut

également être alourdie par une couche de plomb ou amortie par un matériau viscoélastique. Elle a pour fonction de limiter la transmission aérienne. Pour une meilleure efficacité, on utilise également des plaques doubles, constituées de deux plaques homogènes séparées par un fluide, à l'instar des doubles vitrages (*fig 2b*).

L'absorbant est dans la plupart des cas constitué d'une couche de 50 à 100 mm de matériau fibreux léger (50 à 80 kg/m³) tel que la laine de roche ou de verre. Son rôle est de limiter l'amplification interne.

Le revêtement a pour objet de protéger le matériau fibreux. Il est souvent constitué d'une tôle perforée, de quelques 1/10^e de mm d'épaisseur, dont le taux de perforation est supérieur à 25 %.

Pour certaines applications pour lesquelles une protection contre les projections de fluide (huile, eau) est nécessaire, une couche protectrice de plastique (10 à 20 µm) ou de tissus de verre, peut être ajoutée.

L'étanchéité acoustique est très importante et doit être assurée, au niveau des assemblages et des ouvertures, par des dispositifs appropriés (silencieux, chicanes, tunnels, trappes, rideaux, manchons, bandes de caoutchouc, joints...).

Enfin, il peut être utile, pour éviter que les vibrations de la machine n'excitent les parois de l'encoffrement, de les désolidariser en découplant l'encoffrement de la machine.

Les dispositifs les plus courants sont des joints et des plots de suspension situés aux niveaux des liaisons.

2. Présentation des essais

2.1. Description des encoffrements utilisés

Quatre encoffrements ont été testés. Ils sont formés de panneaux à base de métal (acier) ou de bois, et diffèrent soit par leur forme géométrique, soit par la technologie des panneaux utilisés. Par la suite, ces encoffrements seront désignés par le nom du principal composant (métal ou bois), suivi de leur principale caractéristique :

- métallique simple,
- métallique en L,
- bois double paroi,
- bois simple paroi.

2.1.1. Métallique simple et métallique en L

Les encoffrements modulaires métalliques utilisés peuvent être considérés comme représentatifs de ce que l'on rencontre couramment aujourd'hui dans l'industrie.

La modularité a permis de travailler sur un encoffrement métallique simple et un encoffrement métallique en L. Les deux types de géométries testées sont présentés *figure 3*.

Les panneaux sont constitués d'une ossature en tubes carrés en acier, sur laquelle sont vissés des panneaux isolants de dimensions 1,35 x 2,00 m. Ceux-ci sont constitués d'un complexe :

- plaque support en acier (1 mm),
- laine de roche (50 mm),
- tôle perforée (0,8 mm, taux de perforation 33 %).

Une porte métallique vitrée ferme l'encoffrement en L à l'extrémité du module L3.

Les caractéristiques des matériaux sont fournies *tableau I*.

Ces encoffrements peuvent être modifiés de façon à étudier l'influence des modifications sur leur efficacité :

- Une ouverture de dimensions 0,4 x 0,2 m peut être aménagée dans un panneau. Elle est située sur l'extrémité latérale du côté du module L1, dans le cas de l'encoffrement métallique en L, et donc sur le panneau latéral gauche dans le cas de l'encoffrement métallique simple, qui est en fait le module L1 fermé.

- L'ouverture peut être équipée d'un silencieux acoustique de dimensions 0,4 x 0,2 x 0,6 m.

- L'entrée et la sortie du silencieux peuvent être munies d'un écran constitué de lamelles souples de masse surfacique égale à 3,88 kg/m².

L'influence de la position de la source (cf. § 2.2.2) a également été étudiée dans le cas de l'encoffrement métallique en L. A cet effet, la source a été successivement posée sur le sol au milieu de chacun des trois modules L1, L2 et L3 pour chaque configuration.

Enfin, il est important de noter que lors de l'installation de chacun des deux encoffrements, toutes les précautions ont été prises pour garantir l'étanchéité au sol et dans les angles.

2.1.2. Bois simple paroi (fig. 4)

Cet encoffrement a la particularité d'être en bois, et présente donc une alternative intéressante aux encoffrements métalliques du point de vue des applications.

Il est constitué d'une ossature en profilés d'aluminium sur lesquels sont maintenus, au moyen de pare-closes en plastique, des panneaux isolants de dimensions 1,25 x 2,50 m.

Ceux-ci sont constitués d'un complexe :

- plaque support en aggloméré (Novopan, 15 mm),
- laine de roche (25 mm),
- tôle perforée (1,2 mm, taux de perforation 35 %).

Les caractéristiques des matériaux sont fournies dans le *tableau II*.

Cet encoffrement est modulable, ce qui permet d'étudier l'influence sur son efficacité des changements apportés :

- Une ouverture de dimensions 0,48 x 0,24 m peut être aménagée dans le plafond. Celle-ci peut être équipée d'un silencieux acoustique de dimensions 0,48 x 0,24 x 1,2 m, qui se monte à l'intérieur de l'encoffrement. Ce type de montage n'est pas très réaliste, mais permet d'étudier l'influence du silencieux.

- Les parois latérales peuvent être remplacées par des parois comportant des doubles vitrages.

- De la même façon, le plafond peut être remplacé par des plaques de faux plafond en laine minérale et métal.

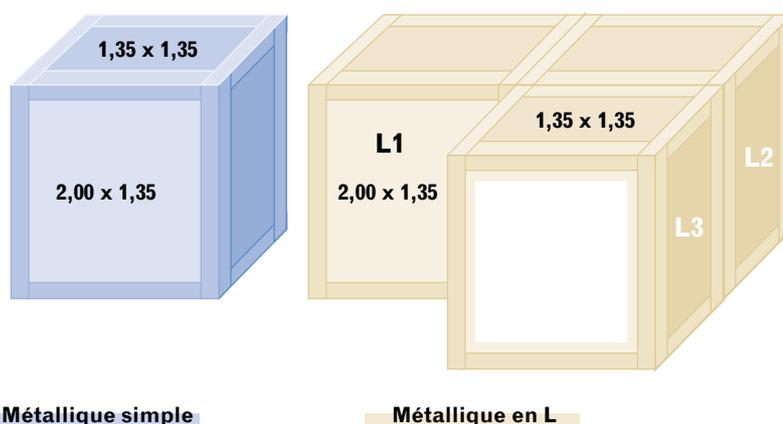
Les caractéristiques des vitrages et du faux-plafond sont données dans le *tableau III*.

2.1.3. Bois double paroi

Cet encoffrement est constitué de la même ossature en profilés d'aluminium sur lesquels sont maintenus, toujours au moyen de pare-closes en plastique, des panneaux isolants de dimensions 1,25 x 2,50 m. Les panneaux isolants sont constitués cette fois-ci d'un complexe :

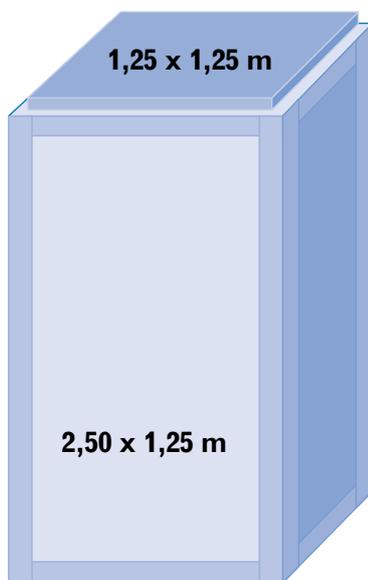
- plaque support en aggloméré (Novopan, 15 mm),
- laine de roche (25 mm),
- plaque support en aggloméré (Novopan, 15 mm).

Fig. 3. Encoffrements métalliques - Metal enclosures



Métallique simple

Métallique en L



Il ne s'agit pas de doubles parois au sens strict, car les plaques en aggloméré sont liées avec une forte rigidité par les pare-closes. Les caractéristiques des matériaux sont précisées au § 2.1.2.

Fig. 4. Encoffrement bois (simple paroi ou double paroi) -

Wooden enclosure, single or double panel

2.2. Description des essais réalisés

2.2.1. Mesures réalisées

Pour chaque configuration étudiée, une mesure de puissance acoustique par tiers d'octave dans une chambre semi-anéchoïque a été réalisée par une méthode intensimétrique.

La perte par insertion est obtenue par simple soustraction des niveaux de puissance (en dB) mesurés avec une source sonore de référence encoffrée dans la configuration étudiée et des niveaux de puissance (en dB) mesurés avec la source sonore de référence seule.

TABLEAU I

ENCOFFREMENTS MODULAIRES MÉTALLIQUES - CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIEAUX

MODULAR METAL ENCLOSURES: CHARACTERISTICS OF MATERIALS

Type	Epaisseur	module d'Young (N/m ²)	Coefficient de Poisson	Masse volumique [kg/m ³]	Masse surfacique [kg/m ²]	Amortissement γ
Acier	1 mm	2,1 ^e 11	0,3	7 800	7,8	2 ^e -3
Laine de roche	50 mm	-	-	66	-	-
Tôle perforée	1 mm perforée à 33 %	2,1 ^e 11	0,3	5 130	5,13	2 ^e -3

TABLEAU II

ENCOFFREMENT EN BOIS - CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIEAUX

SINGLE WOODEN PANEL ENCLOSURE: CHARACTERISTICS OF MATERIALS

Type	Epaisseur	module d'Young (N/m ²)	Coefficient de Poisson	Masse volumique [kg/m ³]	Masse surfacique [kg/m ²]	Amortissement γ
Novopan	15 mm	4,5 ^e 9	0,3	730	10,95	6 ^e -2
Laine de roche	25 mm	-	-	84	-	-
Tôle perforée	1,2 mm perforée à 38 %	2,1 ^e 11	0,3	4 836	5,8	2 ^e -3

TABLEAU III

CARACTÉRISTIQUES DES VITRAGES ET DU FAUX-PLAFOND

SINGLE WOODEN PANEL ENCLOSURE: CHARACTERISTICS OF GLAZED PANELS AND FALSE CEILING

Type	Epaisseur	module d'Young (N/m ²)	Coefficient de Poisson	Masse volumique [kg/m ³]	Amortissement γ
Double vitrage	6/10/8 mm	-	-	2 700	-
Faux-plafond	15 mm	-	-	233	-

Dans le cas de l'encoffrement métallique, la méthodologie employée est conforme à la norme NF EN ISO 9614-2 (Partie II) [13]. La bande d'analyse a été fixée à 50 Hz - 5 kHz.

Dans le cas de l'encoffrement bois, la méthodologie employée est conforme à la norme NF EN ISO 9614-2 (Partie I) [13].

La bande d'analyse a été fixée à 125 Hz - 5 kHz. Les surfaces de mesure sont systématiquement situées à 50 cm de distance des parois de l'encoffrement.

2.2.2. Sources sonores utilisées

Les sources utilisées sont des sources sonores de référence développées pour la caractérisation acoustique des locaux de travail par les CIMP (Centres interrégionaux de mesures physiques). Elles sont constituées d'une machine à frapper B&K®, montée sur une plaque et enveloppée par une demi-sphère en acier.

Elles peuvent être considérées comme omnidirectionnelles et permettent de délivrer entre 85 et 105 dB par tiers d'octave dans la bande fréquentielle d'intérêt, soit 50 Hz à 6,3 kHz.

2.2.3. Configurations étudiées

Toutes les configurations présentées sont spécifiées dans les *tableaux IV et V*. Elles correspondent aux séquences suivantes :

- un travail d'optimisation relatif aux ouvertures (effet d'une ouverture, traitement par un silencieux) sur le caisson métallique simple ;
- le même travail relatif aux ouvertures, mais également pour différentes positions de la source sur le caisson métallique en L ;
- un travail sur les fuites, avec les caissons bois double puis bois simple, complété par une comparaison entre ces deux caissons ;
- un travail de comparaison global.

3. Analyse des résultats expérimentaux

Tous les résultats relatifs aux encoffrements métalliques sont présentés en *annexe I*. Ceux relatifs aux encoffrements bois sont présentés en *annexe II*. Les comparaisons des performances entre les deux types d'encoffrement sont présentées en *annexe III*.

3.1. Efficacité des encoffrements fermés

L'efficacité en tiers d'octave des encoffrements fermés est illustrée *annexe I* (figs 1 et 7), *annexe II* (figs 1 et 2) et *annexe III* (fig. 1).

Les niveaux globaux sont présentés dans le *tableau VI*. Ces niveaux ont été calculés pour deux bandes distinctes, afin d'illustrer le fait que les fuites et les ouvertures ont un impact essentiellement sur les hautes fréquences.

TABLEAU IV

ENCOFFREMENT MÉTALLIQUE : LISTE DES CONFIGURATIONS ÉTUDIÉES

LIST OF CONFIGURATIONS STUDIED: METAL ENCLOSURES

Désignation	Panneaux verticaux	Plafond	Assemblage	Fuites
Métallique simple Config. 1	Simple paroi (1,3)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées
Métallique simple Config. 2	Simple paroi, panneau de gauche avec ouverture (5)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées
Métallique simple Config. 3	Simple paroi, panneau de gauche avec ouverture + silencieux (6)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées
Métallique simple Config. 4	Simple paroi, panneau de gauche avec ouverture + silencieux + lamelles (7)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées
Métallique en L Config. 1	Simple paroi (1,2,4)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées
Métallique en L Config. 2	Simple paroi, panneau de gauche du module L1 avec ouverture (5)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées sauf pour la porte
Métallique en L Config. 3	Simple paroi, panneau de gauche du module L1 avec ouverture + silencieux (6)	Simple paroi	Tubes acier carré	Traitées complètes
Métallique en L	Simple paroi, panneau de gauche du module L1 avec ouverture + silencieux + lamelles (7)	Simple paroi	Tubes acier carré y compris la porte	Traitées y compris la porte

(1) Les mesures ont été effectuées avec la source CIMPOJINRS (CIMPO : Centre interrégional de mesures physiques de l'Ouest, 35000 Rennes).

(2) La source a été placée successivement dans les modules 1, 2 et 3 pour chacune des 4 configurations avec l'encoffrement métallique en L, soit 3 mesures par configuration.

(3) Les parois simples sont décrites au § 4.1.

(4) La paroi de face du module L3 est constituée par l'assemblage d'un panneau simple paroi et d'une porte vitrée (double vitrage, épaisseur 4 x 6 x 8 mm).

(5) L'ouverture a été pratiquée paroi de gauche du module L1, au centre, et a pour dimensions 0,20 x 0,40 m.

(6) Le silencieux est un silencieux standard de dimensions 0,40 x 0,20 x 0,6 m, monté à l'extérieur du caisson L1. Il est constitué d'un complexe : plaque support en acier (1,3 mm) ; laine de roche (40 mm) ; tôle perforée (1,3 mm, taux de perforation 20 %).

(7) Les lamelles sont en caoutchouc (3,88 kg/m²) et sont de dimensions 300 x 30 x 2 mm.

TABLEAU V

ENCOFFREMENT BOIS : LISTE DES CONFIGURATIONS ÉTUDIÉES
LIST OF CONFIGURATIONS STUDIED: WOODEN ENCLOSURES

Désignation	Panneaux 1, 2, 3	Panneau vertical 4	Plafond	Assemblage	Fuites
Bois Config. 1	Double paroi ^(1,2)	Double paroi	Double paroi ⁽³⁾	Profilés aluminium	Non traitées
Bois Config. 2	Double paroi ^(1,2)	Double paroi	Double paroi	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 3	Simple paroi	Simple paroi	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 4	Simple paroi	Paroi simple	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 5	Simple paroi	Une paroi simple vitrée ⁽⁵⁾	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 6	Simple paroi	Une paroi avec porte ⁽⁶⁾	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées sauf porte
Bois Config. 7 et 8	Simple paroi	Une paroi avec porte	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées complètes
Bois Config. 9	Simple paroi	Une paroi simple avec porte	Simple paroi	Profilés aluminium + mousse	Traitées y compris la porte
Bois Config. 10	Simple paroi	Simple paroi	Rien	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 11	Simple paroi	Simple paroi	Faux plafond ⁽⁷⁾	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 12	Simple paroi	Simple paroi	Simple paroi + ouverture	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 13	Simple paroi	Simple paroi	Simple paroi + ouverture + silencieux ⁽⁸⁾	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 14	Simple paroi	Lamelles 100 % ⁽⁹⁾	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 15	Simple paroi	Lamelles 50 %	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées
Bois Config. 16	Simple paroi	Vide	Simple paroi	Profilés aluminium	Traitées

⁽¹⁾ Les mesures ont été effectuées avec la source CIMPE (Centre interrégional de mesures physiques de l'Est, Nancy). ⁽²⁾ Les parois simples et doubles sont décrites au § 4.1.

⁽³⁾ Le plafond en simple paroi ne comporte pas de protection en tôle perforée.

⁽⁴⁾ La paroi simple assemblée est constituée par l'assemblage à l'aide d'un profilé de deux panneaux simple paroi de demi-hauteur : 1410 et 1060 mm.

⁽⁵⁾ La paroi simple vitrée est constituée par l'assemblage d'un panneau simple paroi de demi-hauteur 985 mm et d'un double vitrage (épaisseur 6 x 10 x 8 mm).

⁽⁶⁾ La paroi avec porte est constituée de trois panneaux simple paroi, un monté sur charnières de 830 x 2030 mm, un panneau latéral de 150 x 2030 mm et un panneau haut de 1060 x 400 mm.

⁽⁷⁾ Le faux-plafond est constitué d'une plaque métallique recouverte de laine de roche e = 15 mm.

⁽⁸⁾ Le silencieux est un silencieux standard formé de parois de type « Métallique », de dimensions 480 x 240 x 1200, monté à l'intérieur du caisson.

⁽⁹⁾ Les lamelles sont les mêmes que pour l'encoffrement métallique, voir le tableau IV (partie 1).

TABLEAU VI

EFFICACITÉ DES ENCOFFREMENTS FERMÉS
EFFICIENCY OF ENCLOSURES WITHOUT OPENING

Atténuation [db (A)]	Métallique simple	Métallique L Source en 1	Métallique L Source en 2	Métallique L Source en 3	Bois double	Bois simple
Bande (125 Hz - 5 kHz)	38	38	38	34	45	35
Bande (125 Hz - 2 kHz)	37	37	36	33	46	34

L'encoffrement le plus efficace est l'encoffrement « bois double paroi » qui apporte une atténuation de 45 dB (A). Les encoffrements « métallique simple » et « métallique en L » sont également assez efficaces, mais seulement pour ce dernier lorsque la source est placée dans le module 1, c'est-à-dire le plus éloigné du panneau vitré.

Dans le cas de l'encoffrement « métallique en L », le déplacement de la source dans le module 3 entraîne une diminution de 4 dB (A) de l'efficacité.

L'encoffrement « bois simple » est un peu moins efficace que l'encoffrement « métallique simple », avec 35 dB (A) d'atténuation. Cet écart est probablement lié à la plus faible épaisseur de laine de roche (25 cm contre 50 cm).

3.2. Efficacité des encoffrements ouverts

3.2.1. Ouverture simple

L'influence d'une ouverture sur l'efficacité en tiers d'octave des encoffrements est illustrée en *annexe I* (fig. 2, 5 et 8), *annexe II* (fig. 7 et 9) et *annexe III* (fig. 2).

Le *tableau VII* présente les niveaux globaux. La présence d'une ouverture diminue bien entendu très sensiblement l'efficacité, et cette perte d'efficacité croît avec la fréquence.

Les performances de l'encoffrement chutent de plus de 10 dB (A), sauf lorsque la source est positionnée de façon à ne pas « voir » l'ouverture (cas du module « métallique en L » avec la source dans le module 3), auquel cas la perte de performance est très faible.

En principe, l'influence de l'ouverture dépend du rapport entre la surface de l'ouverture et la surface intérieure de l'encoffrement. Ainsi, l'ouverture la plus sévère devrait être celle pratiquée dans l'encoffrement « bois simple », puis dans l'encoffrement « métallique simple » et enfin dans l'encoffrement « métallique en L ». Ce principe n'est pas vérifié (*tableau VII*), l'impact de l'ouverture étant identique dans les trois cas.

Par contre, la position de la source est très importante, et il est évidemment très intéressant de la placer dans une zone d'ombre, afin qu'elle ne rayonne pas directement par l'ouverture (ce qui est le cas lorsqu'elle est positionnée dans le module 3 de l'encoffrement « métallique en L »).

3.2.2. Ouverture avec silencieux

L'amélioration apportée par un silencieux sur l'efficacité d'un encoffrement avec une ouverture est illustrée en *annexe I* (figs 2, 5, 9 et 10), *annexe II* (fig 10), et *annexe III* (fig 3).

Ces figures montrent très clairement l'apport du silencieux. En basses fréquences, son influence est modeste, mais celle de l'ouverture l'est également. En moyennes fréquences, il supprime et même améliore dans le cas des encoffrements de type « métallique » la perte par insertion, ce qui peut s'expliquer par l'ajout de masse et une absorption efficace.

Le *tableau VIII* montre d'ailleurs qu'entre 125 Hz et 2 kHz, les performances réalisées sont analogues à celles obtenues avec un encoffrement fermé.

En hautes fréquences, la géométrie du silencieux devient prépondérante : ainsi, le silencieux utilisé pour les encoffrements « métalliques », qui est rectangulaire, assez court et centré, voit son influence diminuer, en particulier lorsque la source est dans le module 1, alors que dans le cas de l'encoffrement « bois simple », le montage à l'intérieur du caisson permet de conserver une bonne efficacité.

Il faut cependant noter que ce montage n'est pas très réaliste.

3.3. Points particuliers

Devant le manque d'efficacité à haute fréquence des silencieux, des améliorations ont été apportées avec l'ajout de lamelles. Les résultats obtenus avec l'encoffrement « métallique simple » sont présentés au § 3.3.1.

TABLEAU VII

EFFICACITÉ DES ENCOFFREMENTS OUVERTS

EFFICIENCY OF ENCLOSURES WITH OPENING

Atténuation db (A)	Métallique simple	Métallique L Source en 1	Métallique L Source en 2	Métallique L Source en 3	Bois simple
Bande (125 Hz - 5 kHz)	23	24	27	31	22
Bande (125 Hz - 2 kHz)	23	25	27	31	24

TABLEAU VIII

EFFICACITÉ DES ENCOFFREMENTS OUVERTS AVEC SILENCIEUX

EFFICIENCY OF ENCLOSURES WITH OPENING AND SILENCER

Atténuation db (A)	Métallique simple	Métallique L Source en 1	Métallique L Source en 2	Métallique L Source en 3	Bois simple
Bande 125 Hz - 5 kHz	27	31	34	33	35
Bande 125 Hz - 2 kHz	34	35	36	32	35

D'autre part, les essais ont été effectués avec des encoffrements de géométrie simple – ce qui est cependant fréquemment le cas – et présentant des parois homogènes et parfaitement assemblées – ce qui est rarement le cas. Or l'encoffrement « bois simple » a fait l'objet d'essais très complets sur l'influence du montage et des accès, qu'il a paru intéressant d'exposer également.

3.3.1. Ouverture avec silencieux et lamelles

L'amélioration apportée par l'ajout d'un silencieux équipé de lamelles sur l'efficacité d'un encoffrement avec une ouverture est illustrée dans l'annexe I (figs 3 et 6).

Le principe, simple, est d'ajouter des lamelles à l'entrée et à la sortie du silencieux, pour améliorer l'efficacité de ce dernier en hautes fréquences. Elles permettent ici de ramener l'efficacité globale au niveau de celle obtenue avec un encoffrement fermé dans toutes les gammes de fréquences (39 dB (A) d'atténuation globale pour 38 dB (A) avec un encoffrement fermé). Cette influence peut se modéliser en calculant, par la loi de masse, la transparence des lamelles, puis en la combinant avec la transparence des parois, pour retrouver l'indice d'affaiblissement global de l'encoffrement.

3.3.2. Encombrement

Les règles régissant les distances entre les parois ont été discutées au § 1.2. La figure 4, annexe I, illustre l'influence de l'encombrement sur l'efficacité de l'encoffrement « métallique simple ». Elle confirme qu'il est préférable de limiter l'encombrement à 50 % du volume intérieur, l'efficacité évoluant significativement, avec des écarts supérieurs à 5 dB, au-delà de cette limite. Cependant, l'efficacité globale reste constante, égale à 37 dB (A).

3.3.3. Importance des fuites

Les figures 1 et 6 en annexe II présentent deux cas de fuites acoustiques avant, puis après traitement : dans le premier cas, il s'agit de fuites sous les parois, dans le second cas de fuites sous et autour d'une porte. Ces deux cas illustrent parfaitement la nécessité de traiter toutes les fuites et le soin à apporter à ce traitement : dans le premier cas, l'atténuation globale passe de 19 à 45 dB (A) en améliorant l'étanchéité au sol (« bois double paroi ») ; dans le second cas, l'atténuation globale passe de 26 à 29 dB (A) avec le traitement des fuites

autour d'une porte, puis de 29 à 32 dB (A) avec le traitement des fuites sous la porte (« bois simple paroi »).

3.3.4. Vitre de surveillance

La figure 3 en annexe II présente, en tiers d'octave, l'influence d'une paroi vitrée couvrant la moitié d'un panneau latéral. Il s'agit d'un double vitrage très épais, et son influence est nulle. Avec un double vitrage de plus faible épaisseur et couvrant pratiquement la totalité du panneau, l'influence constatée dans le cas du module « métallique en L » était beaucoup plus conséquente, avec une perte d'efficacité de 4 dB (A), de 38 à 34 dB (A).

3.3.5. Structure porteuse

L'encoffrement bois est assemblé au moyen de carrés en aluminium creux. Ces carrés ont été remplis de mousse et l'évolution de l'efficacité de l'encoffrement avec cette modification est présentée figure 4 en annexe II. La différence n'est pas significative (1 dB (A) en valeur globale).

3.3.6. Porte

Les figures 5 et 6 en annexe II, présentent les conséquences de l'ajout d'une porte. Bien que cette porte soit de constitution identique aux panneaux, elle diminue l'efficacité de l'encoffrement de 3 dB (A) en valeur globale. Il semble que d'une part elle provoque une diminution de la fréquence de coïncidence, entraînant une perte d'efficacité en moyennes fréquences, et que d'autre part, les fuites, bien que parfaitement traitées (cf. § 3.3.3), entraînent à leur tour une perte d'efficacité en hautes fréquences.

3.3.7. Plafond

Pour des raisons de coût et de poids, il peut être intéressant de remplacer un plafond plein par un faux plafond constitué d'un matériau moins performant. Les figures 7 et 8 en annexe II, présentent les résultats obtenus après suppression du plafond puis son remplacement par un faux plafond standard. La perte d'efficacité est peu importante (1 dB (A) en valeur globale) et peut être acceptable suivant la bande de fréquence d'intérêt.

4. Modélisation

Cette partie présente différents modèles analytiques, permettant de calculer simplement l'indice d'affaiblissement de panneaux et donc l'efficacité que l'on peut attendre d'un encoffrement.

4.1. Transmission des parois

4.1.1. Loi de masse

La loi de masse est une loi simple qui permet d'exprimer l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi en fonction de sa masse par unité de surface et de la fréquence. Cette loi est basée sur l'hypothèse d'une paroi de dimensions infinies (in : [1], § 5) et s'applique en dessous de la fréquence critique (cf. définition § 4.1.2). Dans le cas où les deux milieux séparés par la plaque seraient identiques et en considérant une onde plane perpendiculaire à la paroi (incidence normale), l'indice d'affaiblissement R_0 s'exprime par :

$$R_0 = 20 \log \left[\frac{\pi M_s f}{\rho_i c_i} \right] [\text{dB}]$$

avec :

M_s : masse par unité de surface [kg/m²],

f : fréquence [Hz],

ρ_i, c_i : masse volumique du milieu et célérité du son dans le milieu.

Pour une incidence θ quelconque de l'onde acoustique, l'indice d'affaiblissement $R(\theta)$ devient :

$$R(\theta) = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi M_s f}{\rho_i c_i} \cdot \cos \theta \right)^2 \right]$$

La sommation de cette expression sur l'ensemble des angles d'incidence permet de formuler la loi de masse en champ diffus :

$$R_d = R_0 - 10 \log(0,23R_0)$$

Ceci revient à pondérer l'indice d'affaiblissement, sous incidence normale, par environ 5 dB pour obtenir l'indice d'affaiblissement en champ diffus.

4.1.2. Fréquence de coïncidence

Lorsqu'une paroi est excitée par une onde acoustique de longueur d'onde λ et d'incidence θ , cela revient à lui imposer une flexion de longueur d'onde :

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{\sin(\theta)}$$

S'il y a à la fois coïncidence spatiale (entre les longueurs d'onde) et fréquentielle (entre les fréquences) entre l'onde acoustique qui excite la plaque et les ondes naturelles de flexion de la plaque, la réponse de cette dernière devient maximale et par conséquent, l'indice d'affaiblissement chute.

C. Lesueur [1] établit que cette coïncidence se produit dans le cas d'une plaque homogène de dimensions infinies pour :

$$k_{\text{fluide}} = k_{\text{plaque}} \text{ et } \omega_{\text{fluide}} = \omega_{\text{plaque}}$$

soit :

$$f_{\text{coin}}(\theta) = \frac{c_i^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{M_s}{D}} \text{ [Hz]}$$

$$\text{où } D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

avec :

M_s : masse par unité de surface [kg/m²],
 c_i : célérité du son dans le fluide [m/s],
 E : module d'Young [N/m²],
 ν : coefficient de Poisson,
 h : épaisseur de la paroi [m].

La fréquence de coïncidence à incidence rasante ($\theta = \pi/2$) est la plus faible, et elle est dite fréquence critique et notée f_c . Au-dessus de cette fréquence, l'effet de sommation fait disparaître (effet de moyenne) les fréquences de coïncidence pour les angles d'incidence plus élevés.

La fréquence critique sépare deux zones :

- pour $f < f_c$, la transmission est contrôlée par la masse ;
- pour $f > f_c$, la transmission est contrôlée par la raideur et par les effets de coïncidence.

4.1.3. Réponse au-dessus de la fréquence critique

Pour une onde plane d'incidence normale, au-dessus de la fréquence critique, une formulation analytique est proposée [1] :

$$Rd = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi f M_s}{\rho_i c_i} \right)^2 \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right)^2 \right] \text{ [dB]}$$

avec f_c : fréquence critique de la paroi.

En champ diffus, au-dessus de la fréquence critique, le comportement de la paroi s'obtient par calcul numérique à partir de l'expression intégrale de l'intensité du champ diffus (in : [1], § 5).

Cependant, une formulation analytique été proposée toujours dans le cas d'une plaque homogène de dimensions infinies (in : [2], § 4) :

$$Rd = 20 \log \left(\frac{\pi f M_s}{\rho_i c_i} \right) + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) + 10 \log \left(\frac{2\eta}{\pi} \right) \text{ [dB]}$$

avec :

η : facteur de perte de la paroi,
 f_c : fréquence critique de la paroi.

L'atténuation augmente donc de 9 dB par doublement de fréquence, de 6 dB par doublement de la masse surfacique et de 3 dB par doublement de l'amortissement structural.

4.1.4. Transmission à travers les ouvertures

La transmission d'une onde sonore à travers une ouverture dépend de sa longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. Suivant la taille de l'ouverture, la transmission peut être négligeable en basse fréquence pour évoluer vers une transmission totale dans les hautes fréquences. La transparence acoustique de la paroi avec ouverture s'exprime par :

$$\tau_{\text{tot}} = \sum \frac{\tau_i S_i}{S_{\text{tot}}}$$

où τ_i est la transparence de la surface S_i et S_{tot} , la surface totale.

Nous avons, pour ces applications, considéré une transparence totale ($\tau = 1$) de l'ouverture, quelle que soit la fréquence.

4.2. Limites des modèles

En toute rigueur, les modèles présentés s'appliquent à des parois de dimensions infinies soumises à une onde plane d'incidence normale ou à un champ diffus. Ces conditions ne sont pas toujours remplies. De plus, aucune loi n'est disponible à et autour de la fréquence critique.

4.2.1. Parois de dimensions infinies

La *figure 2 annexe IV* présente l'évolution du nombre de modes élastiques d'une paroi latérale en fonction de la fréquence pour chaque type d'encoffrement, dans l'hypothèse d'appuis simples aux bords des parois.

Les parois de type « Métallique » présentent une centaine de modes avant 100 Hz, ce qui rend le comportement des parois très proches d'une paroi infinie et valide

cette hypothèse. Les parois de type « Bois » présentent une densité modale inférieure, et un comportement modal en basse fréquence (en dessous de 200 Hz) est à prévoir, la loi de masse s'appliquant au-delà de cette bande d'octave.

4.2.2. Champ diffus

Le champ diffus est obtenu lorsque le nombre de modes de cavité par bande de tiers d'octave est supérieur à 1 mode par Hertz et pour une cavité avec des parois réfléchissantes (in : [1], § 5 et [3], § 9).

La *figure 1 annexe IV* présente l'évolution du nombre de modes de cavité par bande de tiers d'octave pour chaque type d'encoffrement, suivant les formulations analytiques de Morse et Ingard (in : [3], § 9). A partir de l'octave 630 Hz, la densité de modes de cavité permet de valider l'hypothèse du champ diffus, mais il faut tenir du compte du fait que les parois sont revêtues de matériau absorbant. En pratique, les calculs ont été effectués pour les deux types d'excitation, à savoir l'onde plane d'incidence normale et le champ diffus.

4.2.3. Fréquence critique

A la fréquence critique et autour de celle-ci, aucune loi élémentaire ne s'applique. Nous avons appliqué la loi de masse pour les basses fréquences jusqu'à $f_c / \sqrt{2}$, la loi au-delà de la fréquence critique à partir de f_c (cf. § 4.1.3), et une régression linéaire entre les deux.

4.3. Comparaison calcul-mesure

4.3.1. Préambule

Les modèles élémentaires permettent le calcul de l'indice d'affaiblissement R ou R_d . Les essais ont permis la mesure de la perte par insertion D_{wv} . Pour les comparaisons, l'indice d'affaiblissement mesuré est déduit de la perte par insertion au moyen de la relation présentée dans l'*encadré 1* (cf. § 1). Le coefficient moyen d'absorption $\bar{\alpha}$ retenu est un coefficient approximatif issu de mesure en salle et pour une laine de roche standard, soit 0,5. Cette approximation est acceptable entre [500 Hz - 4 kHz] et revient à augmenter de 3 dB la perte par insertion mesurée pour obtenir l'indice d'affaiblissement.

4.3.2. Encoffrements fermés

Les comparaisons calcul/mesure sont présentées *figures 3 à 6 (annexe IV)*.

L'encoffrement « métallique simple » (fig. 3) obéit à la loi de masse en incidence normale sur tout le domaine fréquentiel. L'hypothèse de champ diffus est clairement invalidée.

L'encoffrement « bois simple » (fig. 4) obéit également à la loi de masse en incidence normale en dessous de 1 kHz.

Il présente une fréquence de coïncidence théorique à 1 650 Hz, qui est un peu supérieure (~ 2 kHz) et très amortie dans la réalité. Au-dessus de cette fréquence, l'encoffrement obéit à nouveau à la loi simple au-dessus de la fréquence critique (cf. § 4.1.3), mais cette fois-ci en champ diffus.

L'encoffrement « bois double » est constitué de doubles parois, dont le comportement est plus complexe que celui d'une paroi simple. Certains mécanismes interviennent dans leur comportement [1, 2] :

- en deçà d'une fréquence dite « de respiration », elles peuvent être modélisées comme deux parois simples superposées ;
- la « fréquence de respiration » correspond à un phénomène de résonance des plaques sur leur raideur de liaison. A cette fréquence, la transparence de la double paroi devient très élevée ;
- au-delà de cette fréquence, l'indice d'affaiblissement augmente avec une pente double de celle obtenue avec des parois simples.

Les relations présentées au § 4.1 ne permettent pas de modéliser ce type de parois, et le comportement de cet encoffrement a dans un premier temps (fig. 5) été modélisé, dans toute la gamme de fréquence, comme deux parois simples superposées, en supposant l'absence de couplage entre les deux parois et donc, l'absence de fréquence de respiration. L'atténuation ainsi calculée est sous-estimée, mais les pentes obtenues sont exactes.

Un modèle numérique [2] a ensuite été utilisé, en ajustant les paramètres de ce modèle afin d'obtenir une fréquence de respiration à 2,5 kHz. Le calcul se rapproche alors en basses fréquences des résultats expérimentaux, du fait de la prise en compte de l'absorption apportée par la laine de roche, la perte d'efficacité à 2,5 kHz étant imputable à la fréquence de respiration (fig. 6). Mais au delà de cette fré-

quence, les pentes ne coïncident pas, ce qui invalide ce second modèle.

Il apparaît donc que cette paroi double peut être modélisée comme la superposition de deux parois simples, sachant que l'indice d'affaiblissement global calculé sera sous-estimé.

4.3.3. Encoffrements ouverts

Les comparaisons calcul/mesure sont présentées *annexe IV (figs. 7 et 8)*. Les calculs sont effectués en supposant la transparence de l'ouverture totale ($\tau = 1$). La perte d'efficacité est calculée avec une précision de ± 5 dB, pour un indice d'affaiblissement de l'ordre de 20 dB, ce qui semble tout juste acceptable dans le cas de l'encoffrement « métallique simple », et non représentatif dans le cas de l'encoffrement « bois simple ».

CONCLUSION

L'objectif des travaux était de quantifier expérimentalement l'influence sur l'efficacité acoustique d'encoffrements d'un certain nombre de leurs paramètres de dimensionnement, puis d'explicitier les principaux mécanismes mis en jeu à l'aide de modèles analytiques simples. L'indice d'affaiblissement est l'indicateur retenu pour qualifier l'efficacité acoustique d'un encoffrement. Plus l'indice d'affaiblissement est élevé, plus l'encoffrement est efficace.

Il ressort de l'analyse des résultats expérimentaux un certain nombre de règles de conception générales à retenir :

- Les mesures mettent en évidence la grande importance des fuites et de l'homogénéité des parois. Il apparaît comme fondamental de garantir l'absence de fuites.
- Les portes doivent avoir les mêmes qualités acoustiques que les panneaux fixes.
- Les ouvertures doivent être équipées de silencieux, et ces silencieux doivent eux-mêmes être équipés de lamelles afin d'étendre leur efficacité aux hautes fréquences.
- Les vitrages doivent être doubles, et d'épaisseur minimale 4 mm pour la vitre la plus fine. Leur surface doit être la plus limitée possible, car ils diminuent l'absorption à l'intérieur de l'encoffrement.
- Il faut éviter que la fréquence critique des parois ne corresponde à des fré-

quences émergentes dans le spectre du bruit émis par la source encoffrée.

Ces résultats soulignent l'importance de certaines règles de conception des encoffrements. Le cas des fuites, au niveau du sol ou autour d'une porte par exemple, pour l'encoffrement « bois double », montre bien l'intérêt de disposer de comparaisons quantifiées.

L'indice d'affaiblissement peut être évalué par calcul moyennant certaines hypothèses à l'aide de modèles analytiques simples. En basses fréquences, l'indice d'affaiblissement dépend de la loi de masse des parois. En hautes fréquences, l'indice d'affaiblissement dépend de la masse et de l'amortissement des parois. Entre ces deux zones, du fait de la présence d'une fréquence critique liée aux caractéristiques des matériaux employés, l'indice d'affaiblissement devient très faible.

■ En basses fréquences, la comparaison entre calculs et mesures donne des résultats acceptables: dans le cas des encoffrements « Métallique » et « Bois simple », l'atténuation mesurée est très proche de celle obtenue par la loi de masse en incidence normale. Dans le cas de l'encoffrement « Bois double », la loi de masse en incidence normale minimise l'atténuation.

■ La fréquence critique est au-dessus de la bande d'analyse dans le cas de l'encoffrement « Métallique ». Elle est mal calculée dans le cas de l'encoffrement « Bois simple ».

■ En hautes fréquences, au-dessus de la fréquence critique, les calculs analytiques donnent à nouveau de très bons résultats dans le cas de l'encoffrement « Bois simple », mais avec une hypothèse de champ diffus et minimisent l'atténuation dans le cas de l'encoffrement « Bois double ».

Globalement, les modèles analytiques simples permettent une bonne approximation des performances acoustiques d'un encoffrement constitué de parois simples, métalliques ou en bois, mais sous évaluent l'efficacité dans le cas de parois doubles.

Ces résultats doivent être tempérés par le fait qu'il s'agit de géométries simples, de parois homogènes et de sources parfaites. Ils valident cependant les lois élémentaires et démontrent qu'elles peuvent être utilisées pour le dimensionnement d'encoffrements simples ou le pré-dimensionnement d'encoffrements plus complexes.

BIBLIOGRAPHIE

Références générales

1. LESUEUR C. - Rayonnement acoustique des structures. Paris, Ed. Eyrolles, 1988.
2. FAHY F. - Sound and structural vibration. London, Academic Press, 1985, 309 p.
3. MORSE P.M., INGARD K. - Theoretical acoustics. New York, Ed. Mc Graw-Hill, 1964, 927 p.
4. BERANEK L.L. - Noise and vibration control. New York, Ed. INCE, 1988, 832 p.

Normes

5. EN 349 - Sécurité des machines. Ecartements minimaux pour prévenir les risques d'écrasement de parties du corps humain. Paris - La Défense, AFNOR, 1993, 7 p.

6. EN 418 - Sécurité des machines. Equipement d'arrêt d'urgence. Aspects fonctionnels. Principes de conception. Paris - La Défense, AFNOR, 1993, 10 p.
7. EN 547-1 - Sécurité des machines. Mesures du corps humain. Partie 1 : Principes de détermination des dimensions requises pour les ouvertures destinées au passage de l'ensemble du corps dans les machines. Paris - La Défense, AFNOR, 1997, 16 p.
8. EN 547-2 - Sécurité des machines. Mesures du corps humain. Partie 2 : Principes de détermination des dimensions requises pour les orifices d'accès. Paris - La Défense, AFNOR, 1997, 26 p.
9. EN 547-3 - Sécurité des machines. Mesures du corps humain. Partie 3 : Données anthropométriques. Paris - La Défense, AFNOR, 1997, 10 p.

10. ISO 6385 - Principes ergonomiques de la conception des systèmes de travail. Paris - La Défense, AFNOR, 1981, 4 p.
11. NF EN ISO 11546-1 - Acoustique. Détermination de l'isolement acoustique des encoffrements. Partie 1 : Mesurages dans des conditions de laboratoire (aux fins de déclaration) Paris - La Défense, AFNOR, 1996, 24 p.
12. NF EN ISO 11546-2 - Acoustique. Détermination de l'isolement acoustique des encoffrements. Partie 2 : Mesurage sur site (aux fins d'acceptation et de vérification). Paris - La Défense, AFNOR, 1996, 26 p.
13. NF EN ISO 9614 - Acoustique. Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance émis par des sources de bruit. Partie 1 : Mesurage par points. Partie 2 : Mesurage par balayage. Paris - La Défense, AFNOR, 1996, 55 p.

ANNEXE I

ENCOFFREMENTS « MÉTALLIQUES »

METAL ENCLOSURES

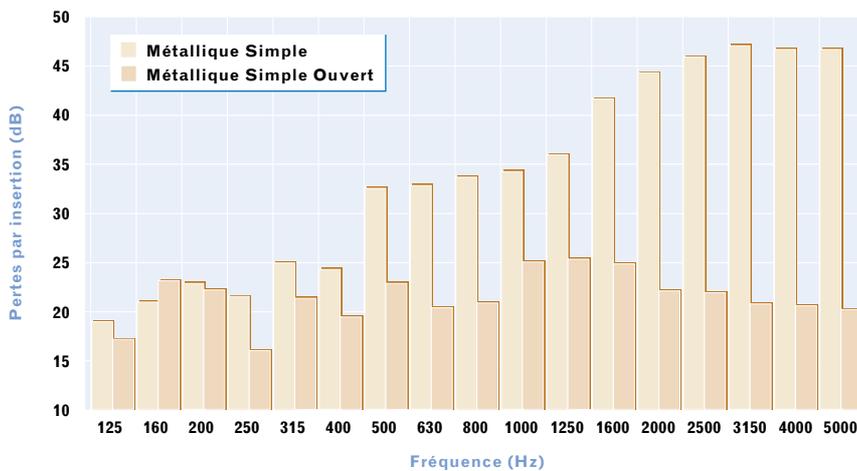


Fig. 1. Encoffrement fermé puis avec une ouverture. Comparaison des résultats pour deux configurations d'encoffrement : métallique simple fermé puis avec une ouverture 200 x 400 mm -
Enclosure without, then with an opening. Comparison of the results for two configurations: without opening, then with a 200 x 400 mm opening

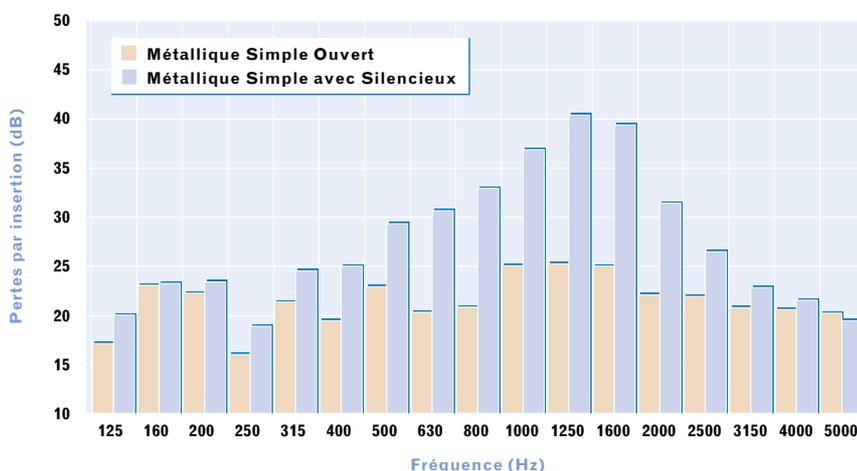


Fig. 2. Encoffrement ouvert puis équipé d'un silencieux. Comparaison des résultats pour 2 configurations d'encoffrement : métallique simple avec ouverture, sans puis avec silencieux -
Enclosure with opening, then with silencer. Comparison of the results for two configurations: without silencer, then with silencer

ANNEXE I (SUITE)

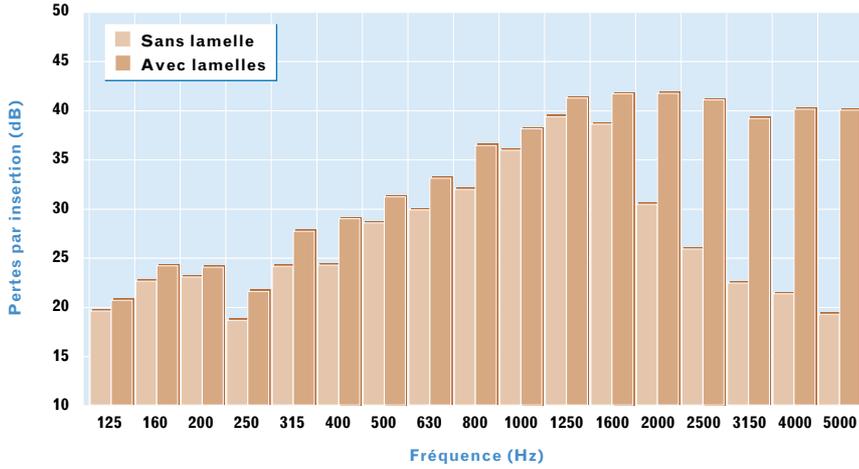


Fig. 3. Influence des lamelles en sortie de silencieux. Efficacités comparées de l'encoffrement métallique simple ouvert avec silencieux avant puis après l'ajout de lamelles - *Influence of the strips at the outlet of the silencer. Compared performances of single open metal enclosure with silencer before and after addition of strips*

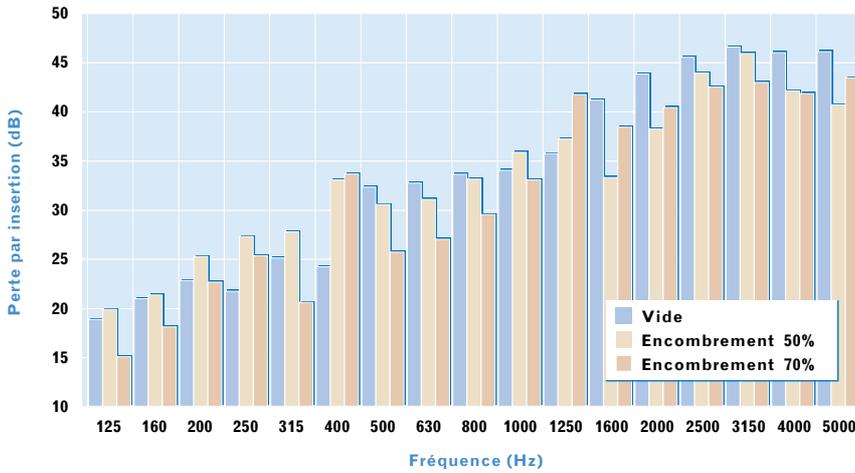


Fig. 4. Encoffrement métallique simple - Influence de l'encombrement. Efficacités comparées de l'encoffrement métallique simple fermé vide puis avec un encombrement de 50 et 70 % - *Single metal enclosure: influence of occupied space. Compared performances of enclosure empty, then with 50% to 70% occupied space*

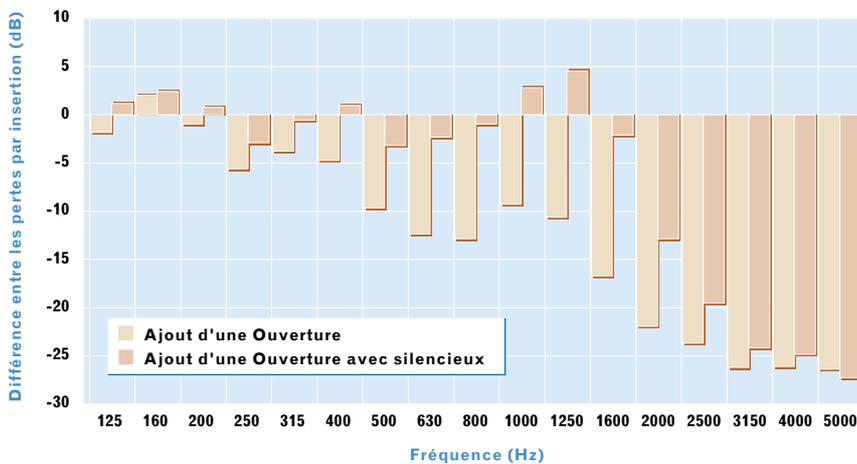


Fig. 5. Evolution de l'efficacité avec l'ajout d'une ouverture puis d'un silencieux. Référence : configuration fermée. Evolution : ajout d'une ouverture, ajout d'un silencieux sur l'ouverture - *Change in efficiency with the addition of an opening, then a silencer. Reference: closed configuration. Change: addition of an opening, addition of a silencer to the opening*

ANNEXE I (SUITE)

ENCOFFREMENTS « MÉTALLIQUES » - METAL ENCLOSURES

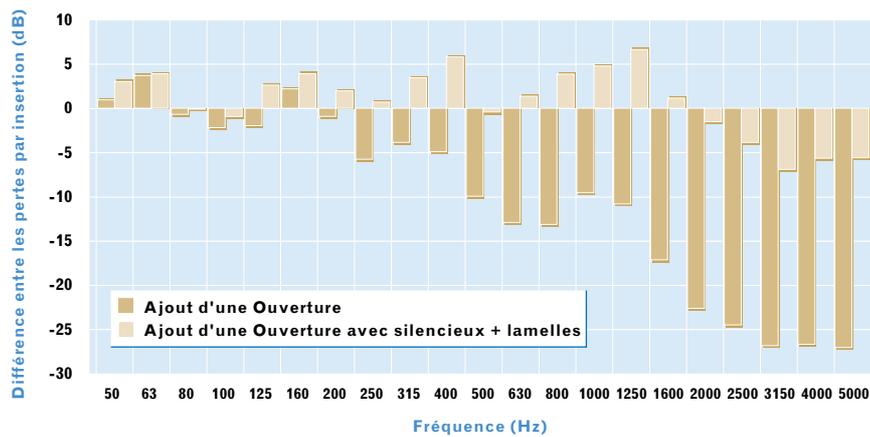


Fig. 6. Evolution de l'efficacité avec un silencieux muni de lamelles. Référence : configuration fermée. Evolution : ajout d'un silencieux muni de lamelles -

*Change in efficiency with a silencer with strips
Reference: closed configuration
Change: addition of an opening, addition of a silencer with strips*

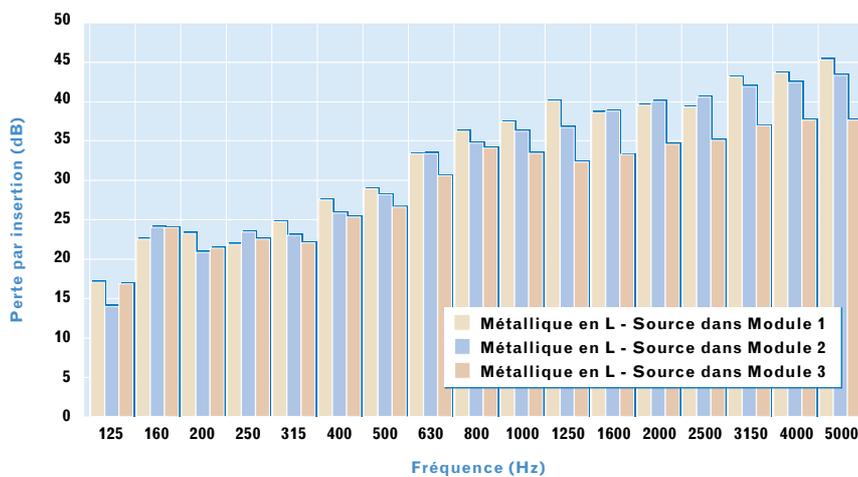


Fig. 7. Efficacité des encoffrements fermés. Comparaison des résultats avec le module métallique en L pour différentes positions de la source -

*Efficiency of enclosures without opening
Comparison of the results with the metal L-shaped module for different source positions*

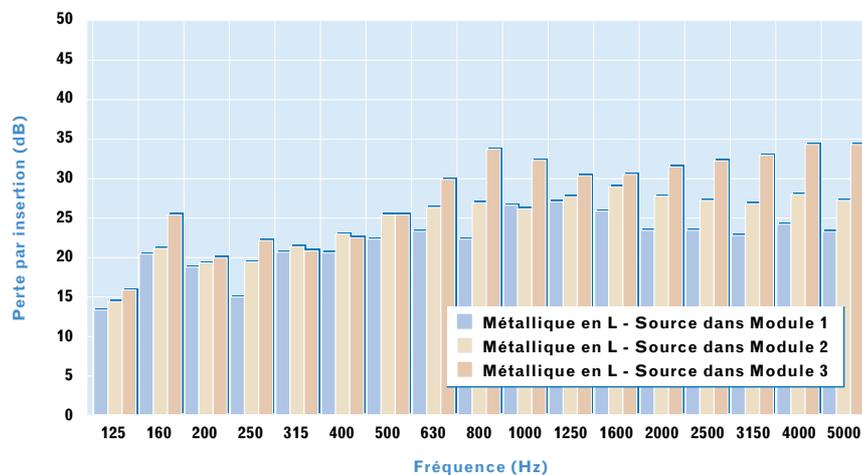


Fig. 8. Efficacité des encoffrements ouverts. Comparaison des résultats avec le module métallique en L pour différentes positions de la source (l'ouverture est sur une des faces du module 1)

*Efficiency of enclosures with opening
Comparison of the results with the L-shaped metal module for different source positions (opening on one of the sides of module 1)*

ANNEXE I (SUITE)

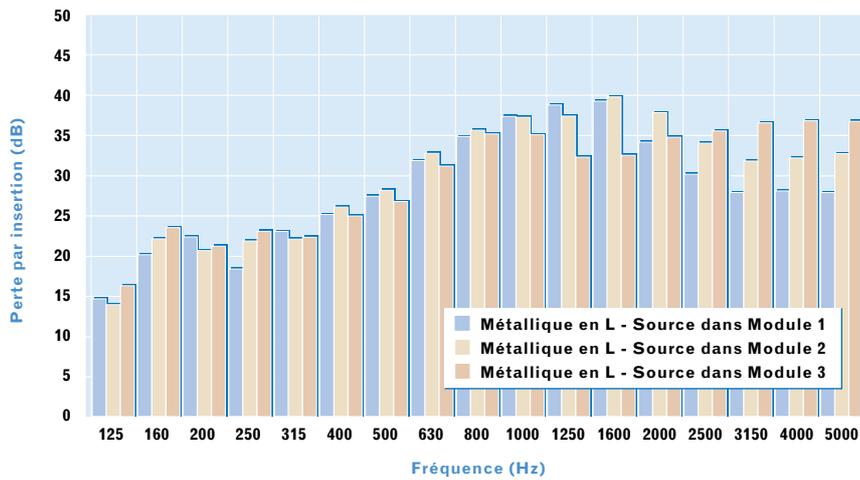


Fig. 9. Efficacité des encoffrements ouverts avec silencieux. Comparaison des résultats avec le module métallique en L pour différentes positions de la source (le silencieux est sur une des faces du module 1)

*Efficiency of enclosures with opening and silencer
Comparison of results with the L-shaped metal module
for different source positions (silencer on one of the
sides of module 1)*

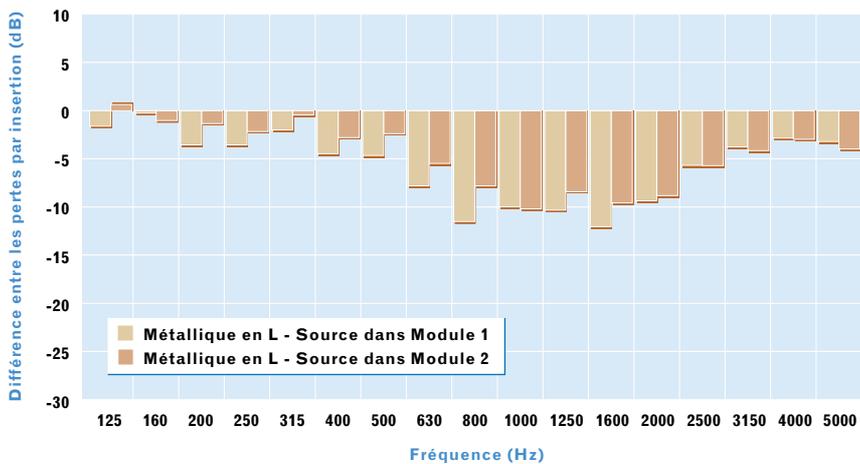


Fig. 10. Evolution de l'efficacité avec l'ajout d'une ouverture munie d'un silencieux pour deux positions de la source. Référence : configuration fermée. Evolution : ajout d'une ouverture équipée d'un silencieux

*Change in efficiency with the addition of an opening
with silencer for two
source positions
Reference: closed configuration
Change: addition of an opening with silencer*

ANNEXE II

ENCOFFREMENTS « BOIS » - WOODEN ENCLOSURES

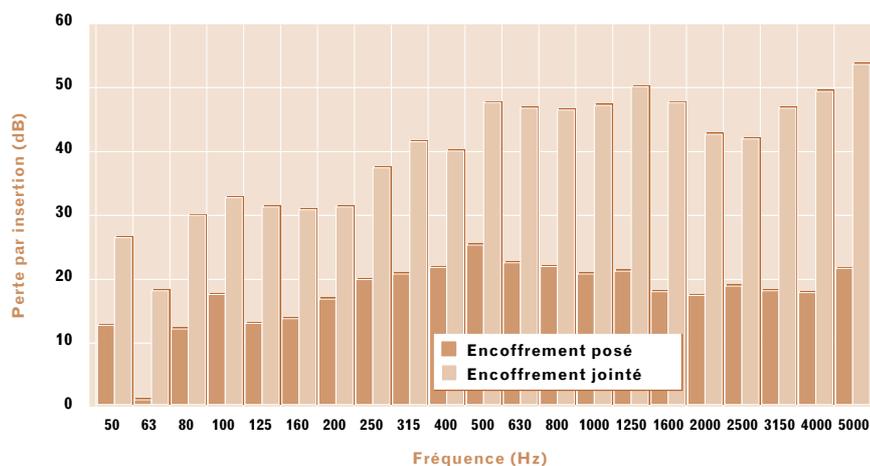


Fig. 1. Encoffrement bois double paroi : efficacité de l'encoffrement fermé et importance des fuites. Evolution de l'efficacité après la pose d'un joint d'étanchéité au sol (mousse à cellules fermées collées à l'aide d'un joint bitume) -

Double wooden panel enclosure: efficiency of enclosure and importance of leakage. Change in efficiency after sound insulating treatment of the floor (closed-cell foam stuck with a bitumen seal)

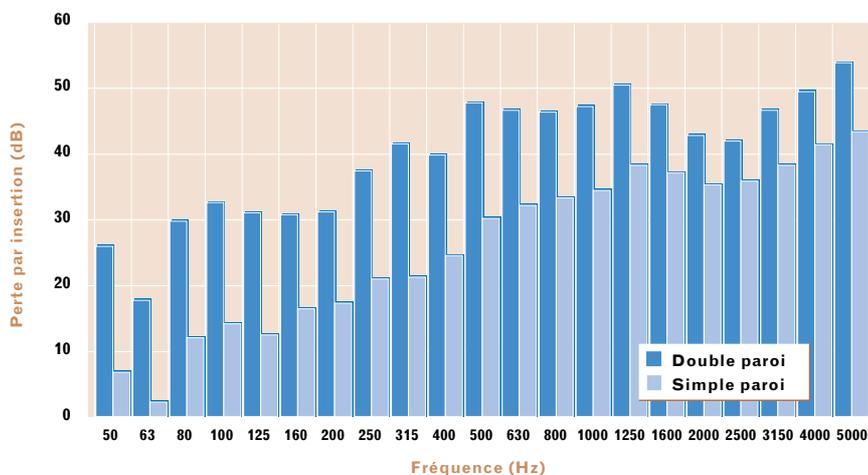


Fig. 2. Encoffrement bois simple et double paroi : efficacité de l'encoffrement fermé et comparaison entre les deux types de parois -

Single and double wooden panel enclosure: efficiency of enclosure and comparison between the two types of panels

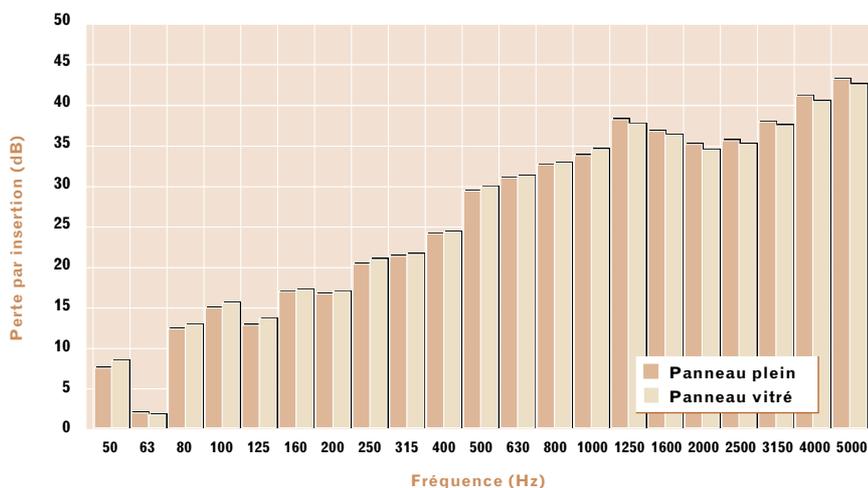


Fig. 3. Encoffrement bois simple paroi. Impact de l'ajout d'un panneau vitré : comparaison entre un encoffrement 4 panneaux pleins et un encoffrement 3 panneaux pleins et un vitré (double vitrage d'épaisseur 6 x 10 x 8 mm) -

Single wooden panel enclosure: impact of adding a glazed panel. Comparison between an enclosure with four solid panels and an enclosure with three solid panels and one glazed panel (thickness of double glazing 6 x 10 x 8 mm)

ANNEXE II (SUITE)

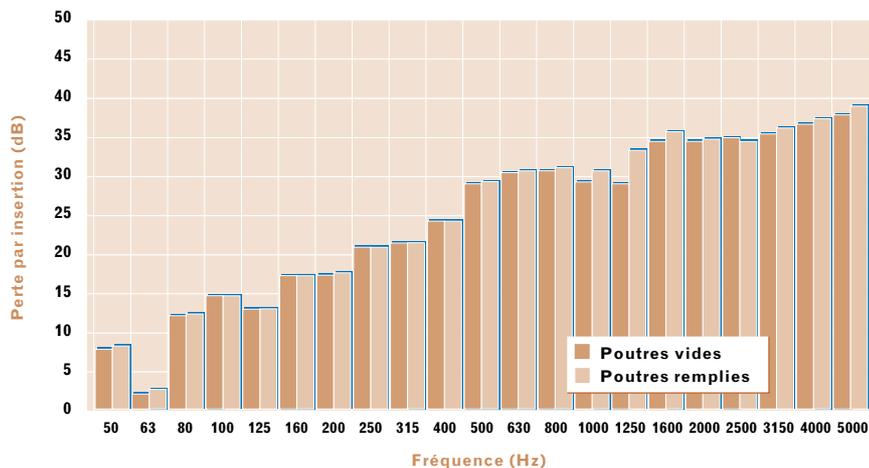


Fig. 4. Encoffrement bois simple paroi. Impact de la structure porteuse sur l'efficacité de l'encoffrement fermé. Comparaison entre deux encoffrements identiques, mais avec des poutres porteuses (carrés aluminium) vides puis remplies de mousse

Single wooden panel enclosure: impact of the supporting structure on efficiency of enclosure. Comparison between two identical enclosures, but with different supporting beams (aluminum square sections), empty, then filled with foam

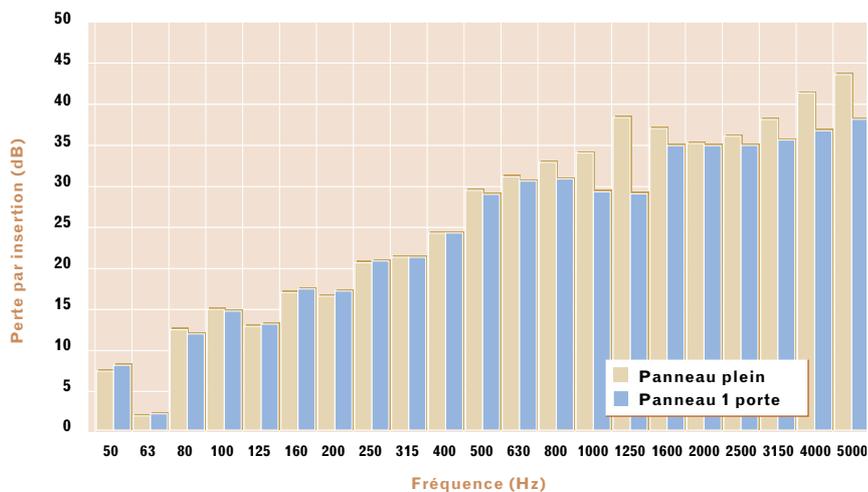


Fig. 5. Encoffrement bois simple paroi. Impact de l'ajout d'une porte : comparaison entre un encoffrement 4 panneaux pleins et un encoffrement 3 panneaux pleins et un équipé d'une porte

Single wooden panel enclosure: impact of adding a door. Comparison between an enclosure with four solid panels and an enclosure with three solid panels and the fourth fitted with a door

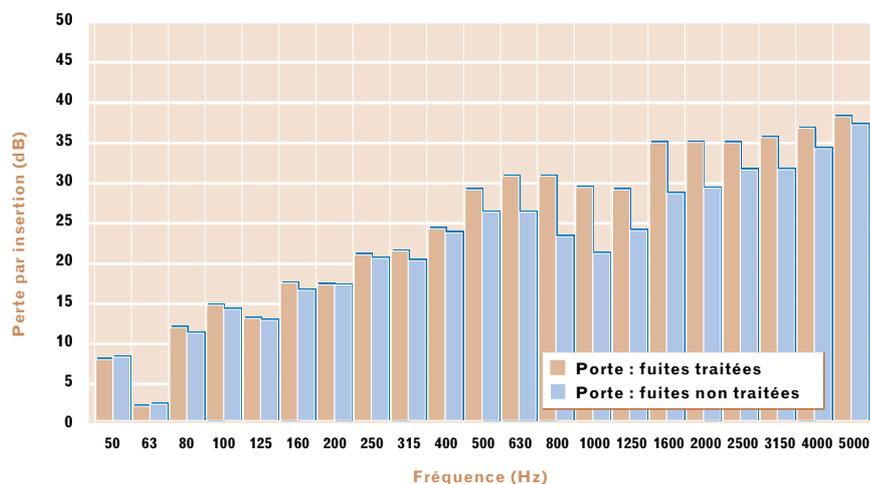


Fig. 6. Encoffrement bois simple paroi. Importance des fuites lors de l'ajout d'une porte. Fuites sous la porte traitées, et ajout d'un joint autour de la porte

Single wooden panel enclosure: importance of leakage when adding a door. Leaks below the door treated and addition of a seal around the door

ANNEXE II (SUITE)

ENCOFFREMENTS « BOIS » - WOODEN ENCLOSURES



Fig. 7. Encoffrement bois simple paroi. Impact de la suppression du plafond. Comparaison entre deux encoffrements identiques, 4 parois pleines, le premier avec un plafond rigide, la second sans plafond -

Single wooden panel enclosure: impact of removing the ceiling. Comparison between two identical enclosures composed of four solid panels, the first with a rigid ceiling, the second with no ceiling

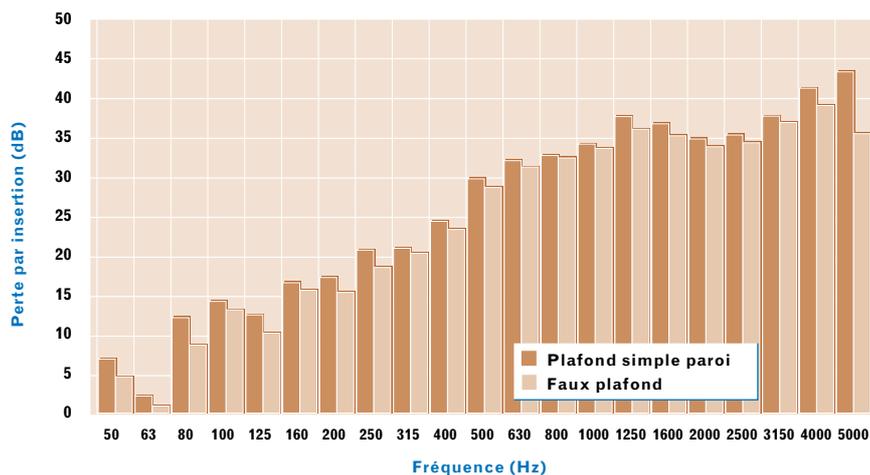


Fig. 8. Encoffrement bois simple paroi. Impact de la modification du plafond. Comparaison entre deux encoffrements identiques, 4 parois pleines, le premier avec un plafond rigide, le second avec un plafond grossièrement étanchéifié (faux plafond) -

Single wooden panel enclosure: impact of modifying the ceiling. Comparison between two identical enclosures composed of four solid panels, the first with a rigid ceiling, the second with a roughly sealed ceiling (false ceiling)

ANNEXE II (SUITE)

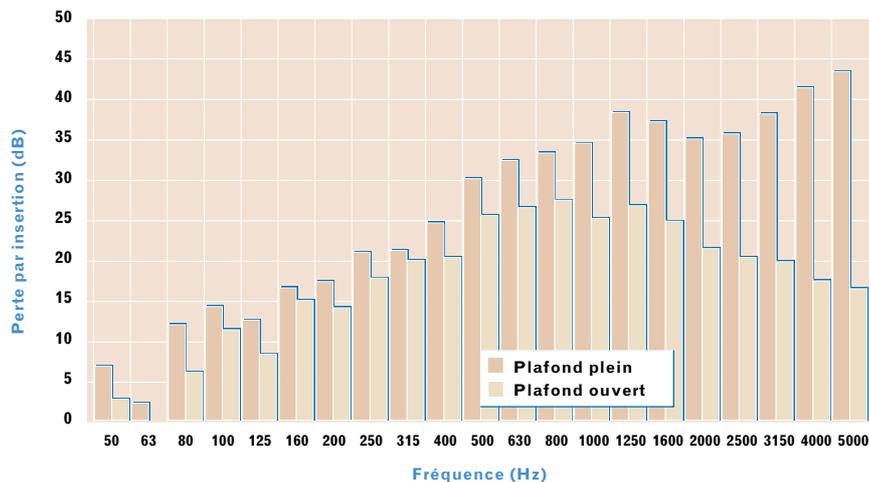


Fig. 9. Encoffrement bois simple paroi. Impact de l'ajout d'une ouverture. Comparaison entre deux encoffrements identiques, 4 parois pleines, le premier avec un plafond plein, le second avec une ouverture (0,48 x 0,24 m) dans le plafond

Single wooden panel enclosure: impact of adding an opening. Comparison between two identical enclosures composed of four solid panels, the first with a solid ceiling, the second with a 0.48 x 0.24 m opening in the ceiling

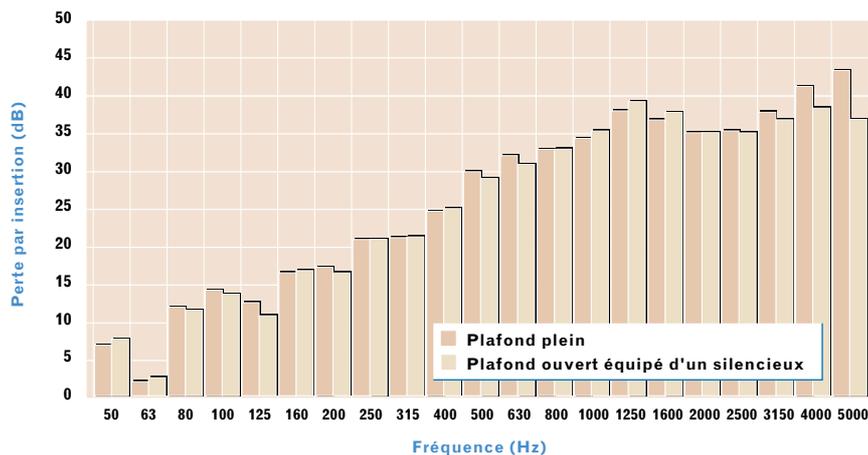


Fig. 10. Encoffrement bois simple paroi. Influence d'une ouverture équipée d'un silencieux. Comparaison entre deux encoffrements 4 parois pleines, le premier avec un plafond plein, le second avec une ouverture (0,48 x 0,24 m) équipée d'un silencieux dans le plafond

Single wooden panel enclosure: influence of an opening with silencer. Comparison between two enclosures composed of four solid panels, the first with a solid ceiling, the second with a 0.48 x 0.24 m opening with silencer in the ceiling

ANNEXE III

COMPARAISONS ENTRE LES DIFFÉRENTS TYPES D'ENCOFFREMENTS - COMPARISONS BETWEEN THE DIFFERENT TYPES OF ENCLOSURES

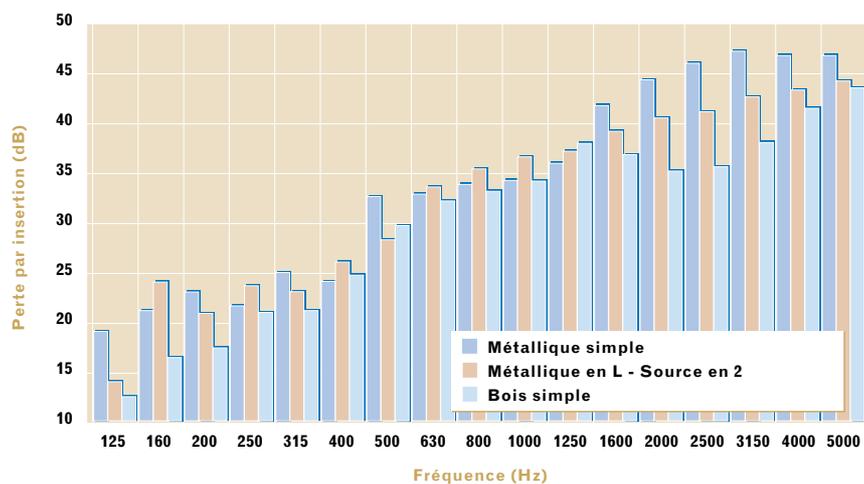


Fig.1. Comparaison entre les différents types d'encoffrements en configuration « fermé ».

Comparaison des résultats pour trois configurations d'encoffrement : métallique simple, métallique en L avec la source dans le module 2 et bois -

Comparison between the different types of enclosures without opening. Comparison of the results for three enclosure configurations: single metallic, L-shaped metallic with the source in module 2, and wooden

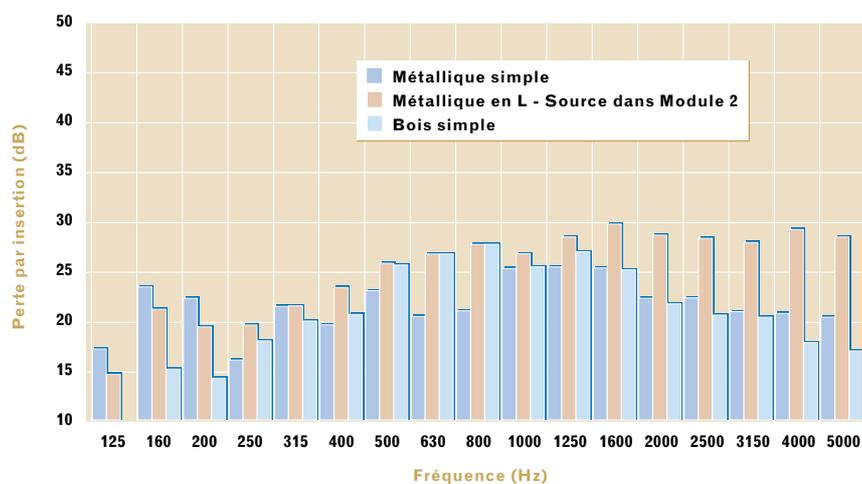


Fig.2. Comparaison entre les différents types d'encoffrements en configuration « ouvert ».

Comparaison des résultats pour trois configurations d'encoffrement : métallique simple, métallique en L avec la source dans le module 2 et bois -

Comparison between the different types of enclosures with opening. Comparison of the results for three enclosure configurations: single metallic, L-shaped metallic with the source in module 2, and wooden

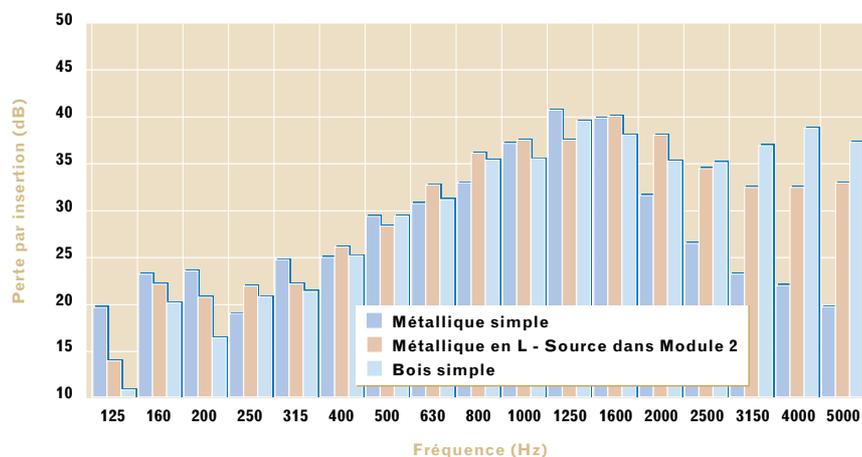


Fig.3. Comparaison entre les différents types d'encoffrements en configuration « ouvert » après ajout d'un silencieux.

Comparaison des résultats pour trois configurations d'encoffrement : métallique simple, métallique en L avec la source dans le module 2 et bois -

Comparison between the different types of enclosures with opening with silencer added. Comparison of the results for three enclosure configurations: single metallic, L-shaped metallic with the source in module 2, and wooden

ANNEXE IV

**COMPARAISONS CALCUL-MESURE -
COMPARISON OF CALCULATION AND MEASUREMENT**

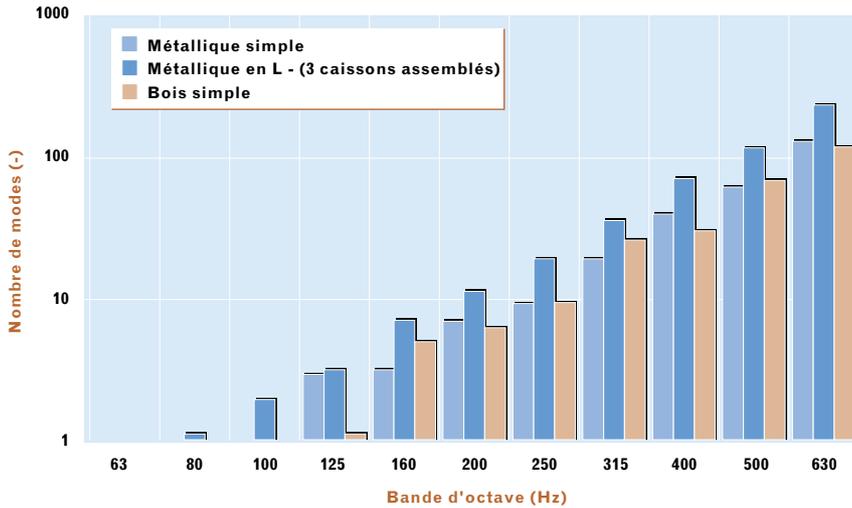


Fig. 1. Validité des hypothèses de calcul : évolution du nombre de modes acoustiques de cavité par bandes de tiers d'octave

Validity of the calculation hypotheses: change in the number of acoustic cavity modes per third octave band

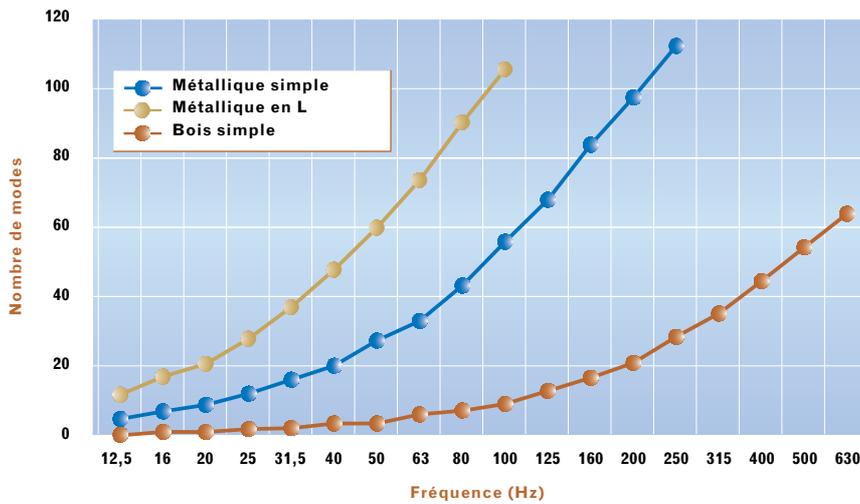


Fig.2. Validité des hypothèses de calcul : évolution du nombre de modes élastiques des parois de l'encoffrement avec la fréquence

Validity of the calculation hypotheses: change in the number of enclosure panel structural modes with frequency

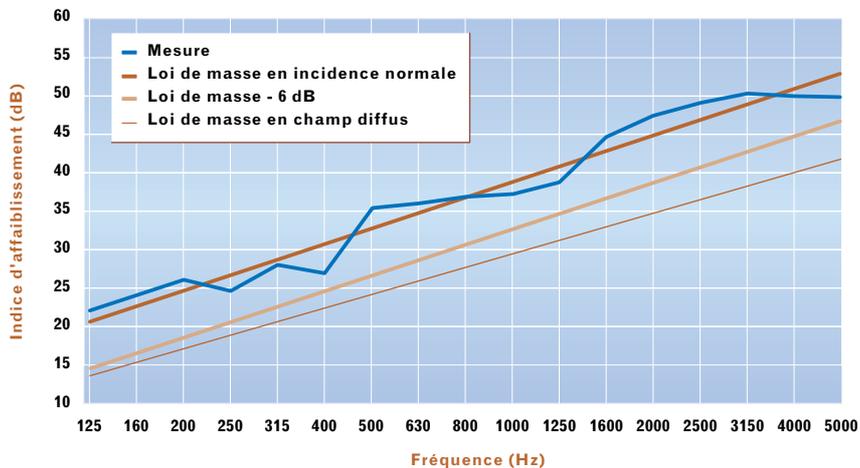
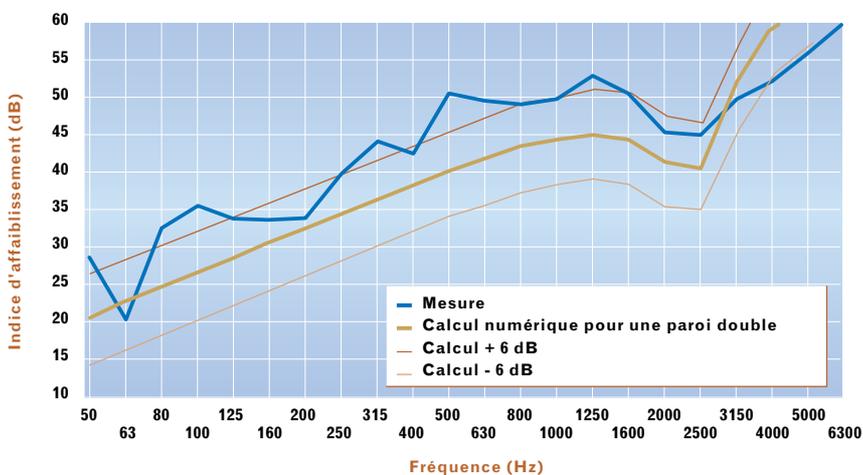
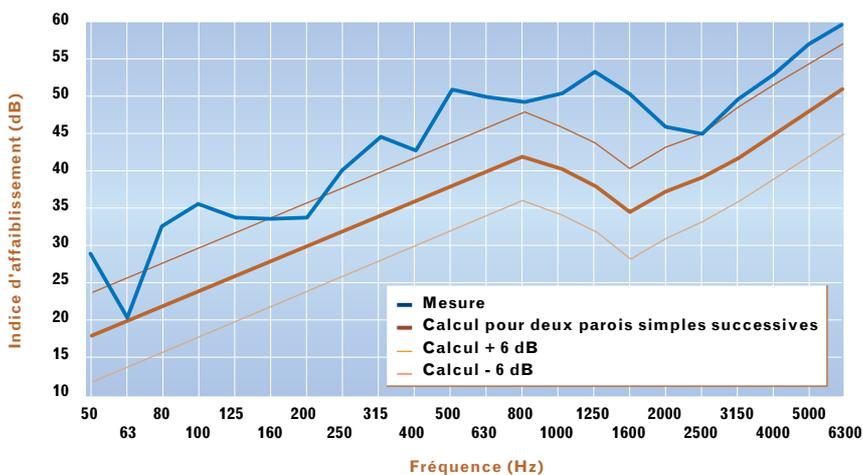
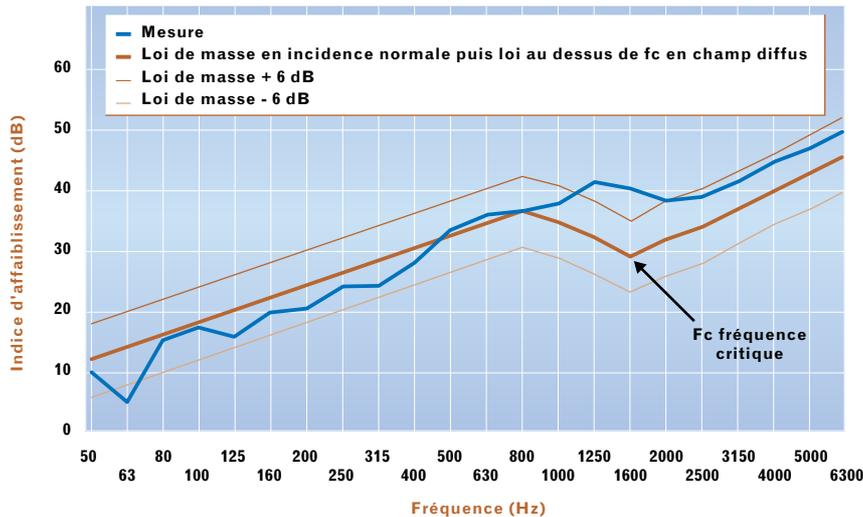


Fig.3. Comparaison calcul-mesure : efficacité calculée par la loi de masse comparée à l'efficacité mesurée. Cas de l'encoffrement métallique simple -

Comparison of calculation and measurement: efficiency calculated by the normal incidence mass law compared to efficiency measured. Single metal enclosure

ANNEXE IV (SUITE)

COMPARAISONS CALCUL-MESURE - COMPARISON OF CALCULATION AND MEASUREMENT



ANNEXE IV (SUITE)

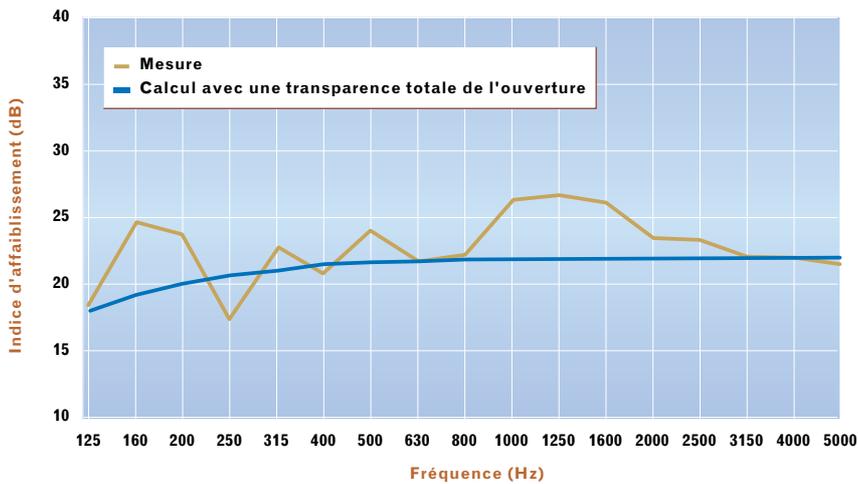


Fig. 7. Comparaison calcul-mesure : efficacité calculée analytiquement comparée à l'efficacité mesurée. Encoffrement avec ouverture. Cas de l'encoffrement métallique simple avec ouverture

Comparison of calculation and measurement: efficiency calculated analytically compared to efficiency measured. Enclosure with opening: single metal panel enclosure

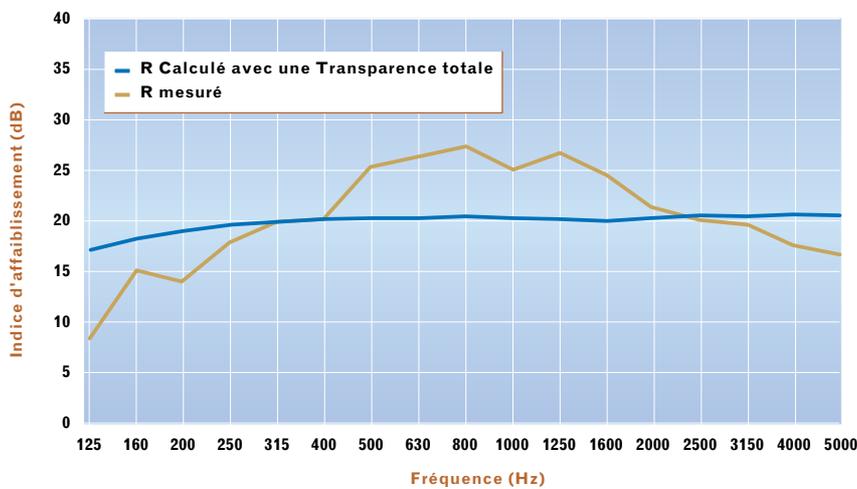


Fig. 8. Comparaison calcul-mesure : efficacité calculée analytiquement comparée à l'efficacité mesurée. Encoffrement avec ouverture. Cas de l'encoffrement bois simple paroi avec ouverture -

Comparison of calculation and measurement: efficiency calculated analytically compared to efficiency measured. Enclosure with opening: single wooden panel enclosure

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 1^{er} trimestre 2001, n° 182 - ND 2144 - 1 200 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-1030-0