

Utilisation d'une méthode de tirs de rayons pour la prédiction des pertes d'insertion des encoffrements

The use of ray-tracing method for the prediction of the insertion loss of enclosures

Nicolas Trompette,
Jacques Châtillon

Institut national de recherche et de sécurité (INRS)
Département « Ingénierie des équipements de Travail »
Laboratoire « Réduction du Bruit au Travail »
Rue du Morvan
CS 60027
54519 Vandoeuvre Les Nancy Cedex
France
Tél. : 03 83 50 85 64
E-mail : nicolas.trompette@inrs.fr
Tél. : 03 83 50 98 70
E-mail : jacques.chatillon@inrs.fr

Résumé

L'encoffrement est une technique très utilisée de réduction du bruit. La prévision de la perte par insertion d'un encoffrement est donc une préoccupation importante. Un modèle numérique a été développé. Il est basé sur la technique du tir de rayons, qui consiste à déterminer le chemin acoustique d'un rayon et à évaluer sa perte d'énergie tout au long de ce chemin. Dans notre modèle, la diffraction a été négligée et les sources sont supposées omnidirectionnelles. Le modèle permet de calculer à la fois la perte par insertion et la pression acoustique à l'extérieur de l'encoffrement. Pour le valider, une série d'essais a été réalisée en chambre semi-anéchoïque sur différents encoffrements. Une bonne précision est obtenue sur le calcul de la perte par insertion et des pressions extérieures pour la bande fréquentielle [250 Hz-4 kHz]. Toutefois le modèle tend à surestimer les niveaux de pression aux basses fréquences et à les sous-estimer aux hautes fréquences. Le tir de rayons apparaît donc comme un bon outil pour prévoir le comportement acoustique global des encoffrements. Mais il est imprécis aux basses fréquences car il ne prend pas en compte le comportement modal des ondes dans les cavités et les parois. Les écarts aux hautes fréquences peuvent s'expliquer par les fuites et le fait que la diffraction a été négligée.

Abstract

Among the various noise control techniques, enclosures are widely used. Predicting their insertion loss is therefore an important issue. A numerical model was developed which uses a conventional ray-tracing method that consists in determining the paths of acoustic rays and evaluating the energy loss along these paths. In our model, diffraction is not taken into account and the sources inside the enclosure are assumed to be omnidirectional. The model allows calculation of both the insertion loss and the sound pressure outside the enclosure. For validation purposes, a series of tests was run in a semi-anechoic chamber for different enclosures. The predictions of the insertion loss and the pressures outside the enclosure over the entire frequency range [250 Hz-4 kHz] were satisfactory. However, the model tends to overestimate the pressure levels for the lower frequency band and underestimate them for the upper frequency bands. Ray tracing has proven to be a good tool for predicting the overall acoustic behavior of enclosures, but is inaccurate at low frequencies as it does not take into account the modal behavior of cavities and leaves. The discrepancies at high frequencies can be explained by leaks and the fact that diffraction was not taken into account.



L' encoffrement est une technique de réduction du bruit largement utilisée dans l'industrie pour diminuer le niveau d'émission des sources. Il consiste en une boîte formée de panneaux acoustiques entourant la source, incluant généralement des ouvertures pour les entrées-sorties de matières, des vitres pour surveiller la production et des portes pour avoir accès à la machine. Si les installateurs d'encoffrements connaissent la performance acoustique des panneaux individuels, il leur est difficile de prévoir la perte par insertion du montage global, à cause en particulier des ouvertures et de l'hétérogénéité des différents panneaux (vitres, murs, portes).

De plus, les usages dans l'industrie française sont souvent, pour les utilisateurs finaux, de contrôler la réduction du bruit au poste de travail plutôt que de mesurer la perte par insertion, quand il s'agit d'évaluer l'efficacité de l'encoffrement installé. Cette réduction de la pression acoustique en un point est impossible à évaluer analytiquement quand on veut prévoir l'efficacité d'un encoffrement complexe. L'INRS a cherché à répondre à ce problème en développant un outil de calcul de l'efficacité acoustique des encoffrements. Les encoffrements ont déjà fait l'objet de travaux visant à développer des outils de calcul prévisionnels de leurs performances.

Des méthodes analytiques ont été proposées ([1] & [2] ou [3]). Elles sont capables de prédire avec une bonne précision la perte par insertion des encoffrements de formes simples. Elles trouvent vite leurs limites dès que l'encoffrement prend une forme géométrique plus complexe [2]. Plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser la méthode SEA [4] à [6]. Tous atteignent un niveau satisfaisant de prédiction. Les récents travaux de Sgard [6] montrent que cette méthode permet une prise en compte précise de l'influence de la position de la source et donc de la forme de l'encoffrement. De même, l'impact d'une ouverture ou de différences entre les panneaux est bien modélisé par la SEA. Néanmoins, comme les méthodes analytiques, la SEA ne calcule pas la pression acoustique au poste de travail.

Un nouveau modèle numérique a donc été développé. Il est basé sur la technique conventionnelle du tir de rayon. Cette technique est beaucoup utilisée pour les locaux industriels ([7] & [8]). Elle consiste à déterminer le trajet d'un rayon et à évaluer la perte en énergie acoustique tout au long de son trajet. Lorsque le rayon rencontre une paroi, il est divisé en un rayon transmis et un rayon réfléchi. Le rayon transmis est suivi et son énergie est affectée aux points de réception qu'il rencontre à l'extérieur de l'encoffrement. C'est une méthode, a priori, mal adaptée aux petits volumes car elle ne prend pas en compte les singularités liées aux modes des volumes ou des parois. Néanmoins elle permet de calculer la pression acoustique rayonnée en n'importe quel point et donc en particulier au poste de travail. La perte par insertion est, elle, obtenue classiquement en effectuant le bilan énergétique entre l'énergie de la source et l'énergie rayonnée.

Le modèle a été validé au moyen d'une série de tests effectués en chambre semi-anechoïque sur deux types d'encoffrements. Plusieurs configurations ont été testées pour un même type d'encoffrement (ajout d'ouverture, de paroi vitrée, changement des caractéristiques d'une paroi, changement de la géométrie). La perte par insertion a été mesurée par intensimétrie par balayage. Les pressions acoustiques ont été relevées en plusieurs points autour de l'encoffrement afin de les comparer aux pressions calculées.

Le modèle théorique est présenté dans les paragraphes suivants suivi de la description des cas tests expérimentaux et enfin des résultats des comparaisons entre les modèles et les expériences.

Description du modèle

La technique de tir de rayon consiste à émettre des rayons depuis chaque source de bruit et à suivre leurs différentes transmissions et réflexions jusqu'à un récepteur.

Modélisation de la source

Si l'on considère une source omnidirectionnelle, l'énergie E émise par cette source est uniformément distribuée dans l'espace par un ensemble de N rayons. Une énergie $e = E/N$ est attribuée à chaque rayon dont la direction dans l'espace est donnée par un vecteur unitaire U défini en coordonnées sphériques par la relation :

$$U = (\cos\theta \cos\phi, \sin\theta \cos\phi, \sin\phi) \quad (1)$$

Où θ et ϕ désignent respectivement la longitude et la latitude du vecteur U . Pour garantir que la source soit omnidirectionnelle, θ varie entre 0 et 2π et $\cos(\phi)$ entre -1 and +1.

Modélisation des panneaux : réflexion et transmission

Le tir de rayon prend en compte la géométrie réelle de l'encoffrement. Chaque panneau (aussi bien périphérique qu'interne) est décrit par l'équation d'un plan et, comme le panneau n'est pas infini, par des contraintes sur les coordonnées pour tenir compte de ses dimensions.

$$\begin{aligned} ax + by + cz = d \\ x_{\min} < x < x_{\max}, \quad y_{\min} < y < y_{\max}, \\ z_{\min} < z < z_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

Il est donc possible de décrire des géométries d'encoffrements de formes complexes, les panneaux non plans pouvant être approchés par des assemblages de plans élémentaires. De plus, si un panneau présente une absorption ou une transmission non uniforme, il peut être modélisé en plusieurs parties élémentaires présentant des caractéristiques (absorption, transmission) différentes.

La réflexion et la transmission par un panneau sont modélisées comme suit : quand un rayon rencontre un panneau, il est réfléchi (réflexion spéculaire) et son énergie est réduite d'un facteur $(1 - \alpha)(1 - 1/\tau)$, où α est le coefficient d'absorption du panneau et τ sans transparence. Les coefficients d'absorption et de transmission sont supposés indépendants de l'angle d'incidence du rayon. Un rayon secondaire est généré pour tenir compte de la transmission à travers le panneau. Son énergie est celle du rayon incident réduite d'un facteur $1/\tau$, et sa direction est identique à celle du rayon incident.

Cellules de réception

Pour calculer l'énergie acoustique en différents points extérieurs à l'encoffrement, le modèle utilise des cellules de réception sphériques qui peuvent avoir des dimensions différentes. Pour chaque rayon sortant, le modèle détermine quelles cellules sont traversées et la trajectoire du rayon à travers ces cellules. L'énergie reçue dans une cellule E_{cell} est alors calculée à partir de celle du rayon traversant E_{ray} comme suit :

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{ray}} \times d/V_{\text{cell}} \quad (3)$$

où V_{cell} est le volume de la cellule et d la distance parcourue à travers la sphère par le rayon. La validité de la relation (3) est montrée dans la référence [8], sous l'hypothèse du tir d'un relativement grand nombre de rayons.

Limitations du modèle

Ce modèle est très simple et facile à implémenter numériquement. Il a montré sa fiabilité en acoustique des locaux, quand l'encombrement n'influence pas trop le champ acoustique. Néanmoins, certaines simplifications peuvent affecter la précision des résultats : en particulier, la diffraction des rayons par les bords des ouvertures est négligée et l'encombrement à l'intérieur de l'encoffrement n'est pas pris en compte. De plus, les sources sont considérées comme ponctuelles et omnidirectionnelles, bien qu'une source complexe puisse être modélisée par une distribution de sources élémentaires.

Pour finir, cette méthode nécessite le tir d'un grand nombre de rayons pour assurer la convergence des niveaux calculés ; ceci implique des temps de calcul assez longs (jusqu'à une heure pour nos cas de tests) et exige l'utilisation de ressources mémoires importantes.

Comparaisons expérimentales

Configurations de test

La méthode a été testée sur trois encoffrements et deux types de panneaux. Le premier encoffrement était de forme carrée au sol (1,25 m x 1,25 m) et constitué de panneaux d'acier de 1,5 mm d'épaisseur et de 2,1 m de haut, l'intérieur étant traité en absorption avec de la laine de roche de 50 mm d'épaisseur protégée par un panneau perforé (33 % de perforations). Le second encoffrement était en forme de L au sol (1,25 m x 2,5 m), composé des mêmes panneaux sauf à une extrémité où l'on trouvait une porte vitrée. À l'autre extrémité, il était possible de placer une ouverture rectangulaire (400 mm x 200 mm). Le dernier encoffrement testé était de forme rectangulaire au sol (2 m x 3 m), constitué de deux parois en feuilles d'acier de 0,6 mm et 1 mm de 2,25 m de haut séparées par 30 mm de laine de verre. Le panneau interne était perforé à 27 % pour que l'absorption par la laine de verre soit effective. Les différentes configurations sont synthétisées dans le tableau 1. La figure 1 montre une photographie d'un des encoffrements, avec des détails sur la source et les panneaux employés.

Données du calcul

Le calcul exige de connaître les coefficients d'absorption et de transparence des panneaux. Pour les panneaux simple-paroi, ces données sont issues de la littérature car ce sont des panneaux très connus. Pour la porte, les données du constructeur ont été utilisées. Pour les panneaux doubles parois, les caractéristiques ont été mesurées conformément à la norme ISO 354 pour l'absorption et la norme ISO 140-3 pour la transparence.

Forme	Panneau	Traitement acoustique	Position source	O
Carrée	Acier 1,5 mm	Laine de roche 50 mm		N
Carrée	Acier 1,5 mm	Laine de roche 50 mm		O
Rectangulaire	Acier 1 mm – Laine de verre 30 mm – Acier 0,6 mm	Laine de verre 30 mm		N
L	Acier 1,5 mm + Verre 4 mm	Laine de roche 50 mm		N
L	Acier 1,5 mm + Verre 4 mm	Laine de roche 50 mm		N
L	Acier 1,5 mm + Verre 4 mm	Laine de roche 50 mm		N
L	Acier 1,5 mm + Verre 4 mm	Laine de roche 50 mm		O
L	Acier 1,5 mm + Verre 4 mm	Laine de roche 50 mm		O
L	Acier 1,5 mm + Verre 4 mm	Laine de roche 50 mm		O

Tabl. 1 : Liste des configurations de test [O = ouverture ; 'N' pas d'ouverture, 'O' ouverture de 400 mm x 200 mm]
List of test configurations [O = opening ; 'N' no opening, 'O' opening 400 mm x 200 mm]

Résultats

Les comparaisons sont présentées figure 2 et 3 (page suivante) et dans l'ordre des diverses configurations détaillées dans le tableau 1.



Fig. 1 : Photographie d'un des encoffrements installé en chambre sourde avec vues de détail des matériaux intérieurs et de la source utilisée
Picture of one of the enclosures in the anechoic chamber together with details of inner materials and source used

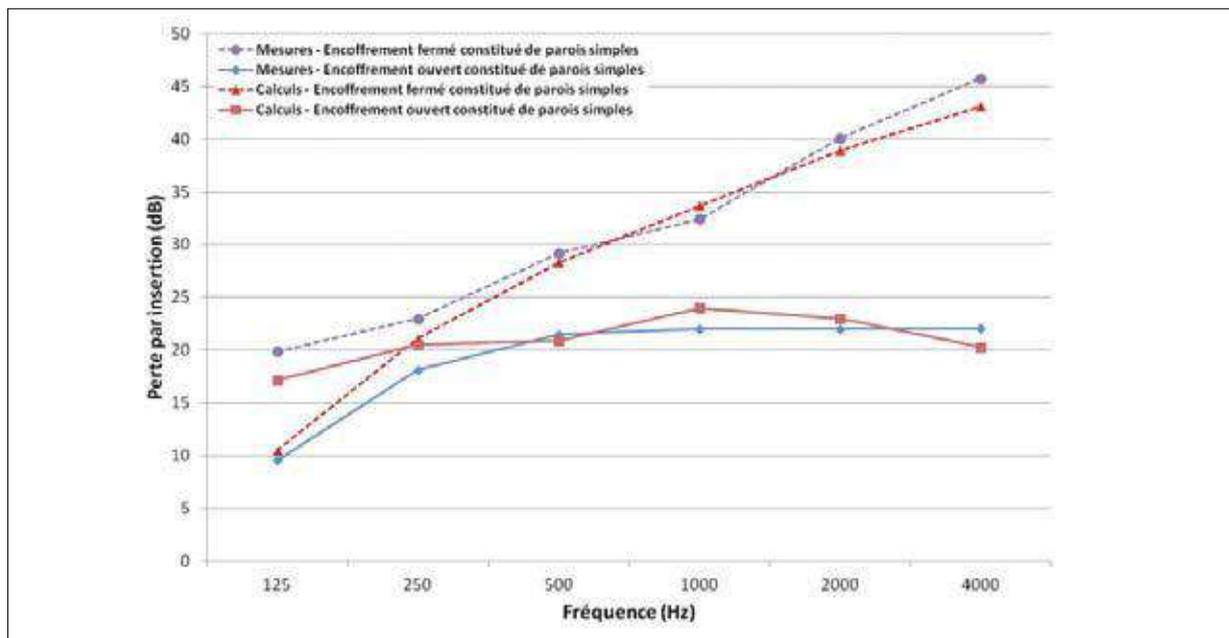


Fig. 2: Perte par insertion des encoffrements rectangulaires – comparaisons entre les calculs et les mesures
Insertion loss of rectangular enclosures – comparisons between measurements and calculations

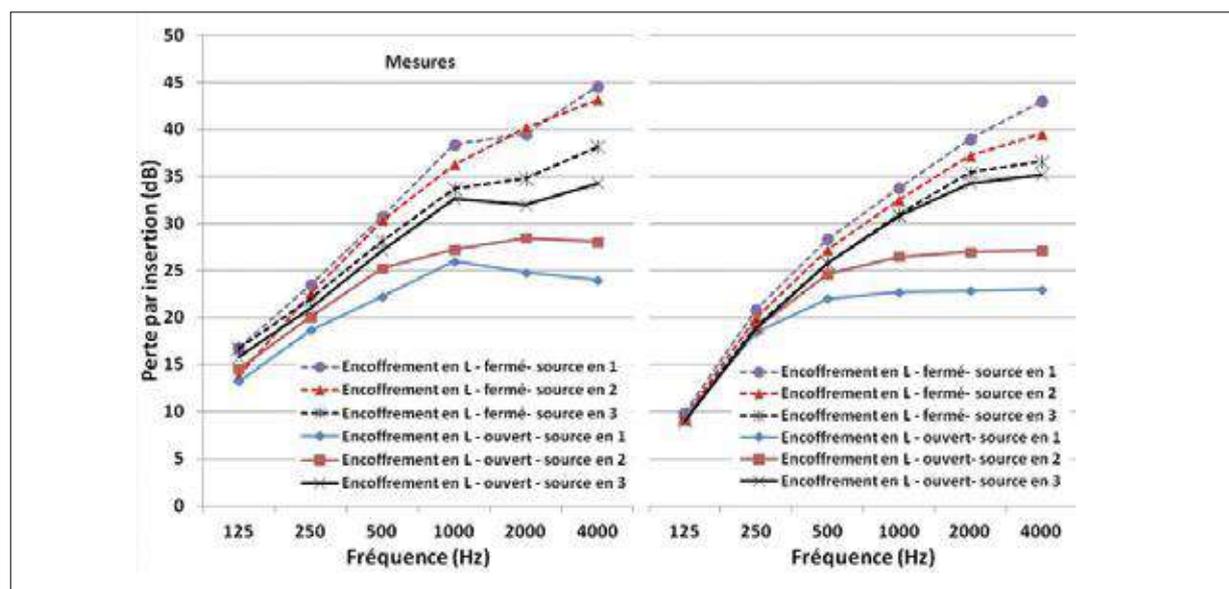


Fig. 3: Perte par insertion de l'encoffrement en L pour différentes configurations – comparaisons entre les calculs et les mesures
Insertion loss of the L-shaped single-leaf enclosure for various configurations – comparisons between measurements and calculations

Pour les encoffrements fermés de forme rectangulaire, les comparaisons montrent que la méthode permet une prédiction assez précise de la perte par insertion que ce soit dans le cas des panneaux constitués de parois simples ou de ceux constitués de parois doubles. Les calculs permettent aussi une prédiction très précise de l'impact d'une ouverture. Dans le cas des parois simples, les différences calculs-mesures sont assez importantes en basse fréquence (125 Hz). Ce résultat montre une des limites de la méthode : elle ne prend pas en compte le comportement modal de la structure. Cette divergence est accentuée en basse fréquence par la petite taille de l'encoffrement.

Pour l'encoffrement constitué de parois doubles, ces différences sont moins importantes du fait de sa plus grande taille mais des écarts apparaissent aux hautes fréquences (2 et 4 kHz), pour lesquelles on mesure une diminution de la perte par insertion. Ces écarts montrent qu'il y avait quelques fuites acoustiques malgré les précautions prises pour le montage de l'encoffrement. Ces fuites auraient pu être prises en compte dans le modèle, mais elles n'ont été détectées qu'après les tests et n'ont donc pas été caractérisées. Pour l'encoffrement en forme de L, les comparaisons calcul-mesure démontrent également la bonne précision des calculs.

Type de l'encoffrement	Ecart entre calculs et mesures (dB)					
	Parois simples – fermé 8 points de mesure		Parois simples – ouvert 8 points de mesure		Parois doubles – fermé 9 points de mesure	
	Octave (Hz)	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne
125	12,9	4	7,1	4	3,4	2,8
250	4,4	1,2	5	2,7	1,9	1,7
500	1,3	1,5	7	5,2	1,6	2
1000	2	1,2	5,5	4,3	2,7	2,1
2000	2,1	1,8	4,1	4,4	4,8	1,2
4000	3,7	1,4	3,7	3,8	4,6	1,2
SPL dB(A)	5	1,3	3,2	2,9	1,1	1,8

Tabl. 2 : Différences entre les pressions acoustiques mesurées et calculées – valeurs moyennes et écarts types
Difference between measured and calculated pressure – mean value and standard deviation

À l'exception de l'octave 125 Hz, les différences calculs-mesures sont faibles (entre 1 et 3 dB avec un écart-type de 1 dB). En particulier, les différences liées à la position de la source par rapport au panneau vitré sont bien mises en évidence par le modèle. La méthode permet donc un calcul très précis de la perte par insertion et prend bien en compte la présence d'une ouverture et la position de la source.

Mais son intérêt majeur est qu'elle permet le calcul des pressions extérieures en différents points à l'extérieur de l'encoffrement, et donc au poste de travail. Pour vérifier la précision de ce calcul, les pressions acoustiques calculées à différents points uniformément distribués autour de l'encoffrement ont été comparées aux pressions mesurées aux mêmes points, dans le seul cas des encoffrements rectangulaires. Les comparaisons sont présentées dans le tableau 2.

Les différences sont plus grandes que dans le cas des comparaisons de la perte par insertion, mais elles demeurent très acceptables pour les encoffrements fermés, sauf dans le cas de l'encoffrement simple paroi et pour l'octave 125 Hz. Cette divergence a déjà été expliquée auparavant. En revanche, dans le cas de l'encoffrement de forme carré avec une ouverture, les écarts entre le calcul et la mesure sont élevés. Une analyse des résultats point par point des mesures de la pression acoustique extérieure montre que les calculs s'éloignent beaucoup des mesures pour les points qui font face à l'ouverture. C'est donc le comportement de l'ouverture qui est mal modélisé. Le calcul rend l'ouverture plus directive qu'elle ne l'est dans la réalité. Ce problème pourrait être évité en prenant en compte la diffraction aux bords de l'ouverture. Ce point n'avait pas d'impact sur le calcul de la perte par insertion car le bilan énergétique global reste exact.

tionnement de la source. L'absence de la modélisation du comportement modal des panneaux et de l'intérieur de l'encoffrement entraîne cependant des écarts aux basses fréquences, d'autant plus que le volume de l'encoffrement est petit. Un des intérêts de cette méthode était de permettre le calcul des pressions en des points particuliers (par exemple au poste de travail) à l'extérieur de l'encoffrement. Ces pressions acoustiques sont calculées avec précision pour les encoffrements fermés, mais les écarts avec les mesures augmentent nettement dans le cas de l'encoffrement ouvert. La modélisation de l'ouverture n'est pas correcte, en particulier en ce qui concerne sa directivité. Ce problème a été imputé à l'absence de prise en compte de la diffraction sur les bords de l'ouverture. Il sera donc nécessaire d'introduire la diffraction dans le modèle pour calculer avec précision les pressions acoustiques extérieures dans le cas d'encoffrements ouverts.

Références bibliographiques

- [1] J.B. Moreland, "Low frequency noise reduction of acoustic enclosures", *Noise Control Engineering Journal*, vol. 23. p. 140-149 (1984).
- [2] N. Trompette, T. Loyau and G. Lovat, "Encoffrements de machine – Aide à la conception: règles de base et mise en oeuvre expérimentale", *Cahier de notes documentaires, INRS, Hygiène et sécurité du travail*, vol. 182. p. 49-72 (2001).
- [3] D.J. Oldham, S.N. Hillarby, « The acoustical performance of small close fitting enclosures, part 1: theoretical models », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 150(2), p. 261-281 (1991).
- [4] Lyon RH., "Noise reduction of rectangular enclosures with one flexible wall", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35(11), p. 1791-7 (1963).
- [5] Ming R, Pan J., "Insertion loss of an acoustic enclosure." *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116(6), p. 3453-9 (2004).
Sgard F., Nélisse H., Atalla N., Amedin C. K., Oddo R., "Prediction of the acoustical performance of enclosures using a hybrid statistical energy analysis: image source model", *J. Acoust. Soc. Am.*, 127(2), p. 784-795, 2010.
- [6] A. Krokstad, S. Strom, S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 8, pp. 118-125 (1968).
- [7] A.M. Ondet, J.L. Barbry, "Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, pp. 787-796 (1989).

Conclusion

La méthode permet donc de calculer avec une très bonne précision la perte par insertion d'un encoffrement et de prendre en compte la présence d'ouvertures et le posi-