

Améliorer l'efficacité en diffraction des écrans antibruit : du couronnement à l'écran double

Jérôme Defrance,
CSTB,
24, rue Joseph Fourier,
38400 Saint-Martin-d'Hères,
tél. : 04 76 76 25 35,
fax : 04 76 44 20 46,
e-mail : j.defrance@cstb.fr

La première réalisation en France d'un couronnement ayant pour but l'amélioration acoustique d'un écran antibruit date de 1997. Quelques années plus tard, le marché français annuel du couronnement était d'environ 6 000 ml. Actuellement, une partie significative des appels d'offre présente à une clause relative à la mise en place d'un tel produit. De la simple couverture au dispositif complexe, les acteurs de l'aménagement routier utilisent de plus en plus fréquemment ce type de dispositif, que ce soit pour des raisons acoustiques, esthétiques ou pratiques. Du point de vue acoustique, le couronnement, s'il est composé d'un matériau suffisamment absorbant, permet d'augmenter l'efficacité de l'écran droit sur lequel il est disposé sans en augmenter sensiblement la hauteur. Pour ce qui est de l'esthétisme, le couronnement est l'objet qui adoucit et apporte une finition à la rupture franche de l'arête supérieure de l'écran droit. En ce qui concerne le côté pratique, couvrir la partie haute de l'écran est parfois nécessaire afin d'en assurer l'étanchéité vis-à-vis de la pluie.

De nombreuses publications [1-3] ont traité le thème du couronnement d'écran routier et de son efficacité acoustique. Cette dernière, et contrairement à la transmission et à l'absorption, n'est pas intrinsèque au diffracteur et dépend de nombreux paramètres dont :

- forme et dimensions du couronnement,
- matériau recouvrant le couronnement,
- hauteur totale de l'écran droit,

- éloignement de la source et du récepteur (c'est-à-dire le degré de pénétration dans la zone d'ombre en réception),
- angle de diffraction (sous quel angle est vue la source depuis le récepteur).

Aussi, vouloir caractériser l'efficacité d'un couronnement donné à l'aide d'un indice unique en dB(A) apparaît être une tâche très ardue.

Les différents types de couronnement

Les couronnements les plus courants en France

Le diffracteur ajouté en tête d'écran peut revêtir différentes formes (définies en Fig. 1 dans un plan perpendiculaire à l'écran) qui sont principalement : le té, le cylindre (ou boudin), le champignon et le couronnement asymétrique.

Ces diffracteurs sont généralement construits soit en béton poreux (bois-béton ou béton d'argile), soit d'un ensemble tôle perforée/laine de verre. Ils peuvent en outre contenir des résonateurs. De façon générale, l'utilisation d'un couronnement réfléchissant (c'est-à-dire en béton ou en tôle non-perforée) est à proscrire, car il peut conduire à une dégradation de l'efficacité acoustique globale de l'écran droit. Ceci est valable notamment pour la couverture (en forme d'accent circonflexe) et le cylindre [4].

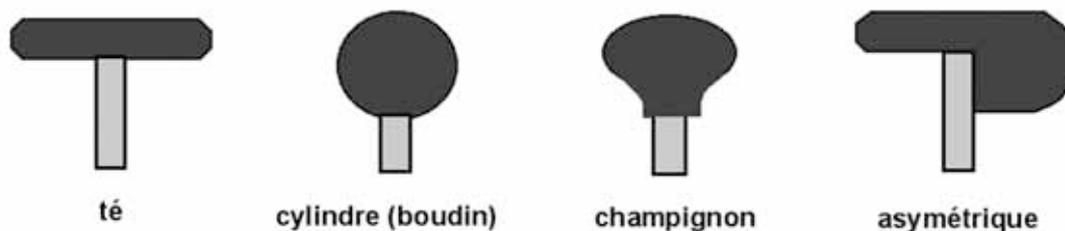


Fig. 1. Les couronnements les plus utilisés en France (vues en coupe)

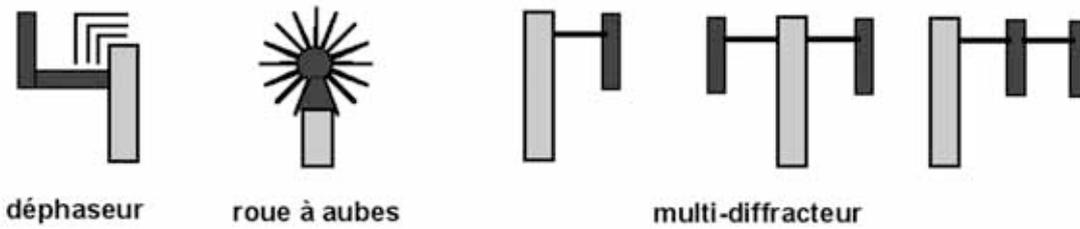


Fig. 2. D'autres types de couronnement (vues en coupe)

De récentes études ont montré [5, 6] que lors d'incidences obliques du son (la source ne se trouve pas « face » au récepteur mais sur le côté), l'efficacité du diffracteur généralement augmente. Ainsi, la longueur totale d'un couronnement conditionne son efficacité globale. Pour des couronnements absorbants dont l'envergure ne dépasse pas 1 mètre (efficacité comparée à un écran droit de même hauteur totale), cette efficacité est comprise entre 1 et 3 dB(A). Pour donner un ordre d'idée, le diffracteur en té [7] d'une largeur de 1 m peut engendrer en zone d'ombre un gain de l'ordre de 2-3 dB(A) par rapport à un écran droit de même hauteur totale, ce qui correspond, pour un écran droit de 3 m, à une augmentation en hauteur de 1 m.

D'autres types de couronnement intéressants

D'autres types de couronnement, tout aussi intéressants, ont été mis au point mais restent peu ou pas utilisés en France, comme par exemple le couronnement déphaseur [8], le couronnement de type « roue à aubes » [9], ou le couronnement multi-diffracteur [10, 11] (voir Fig. 2).

Le couronnement déphaseur, dont les dimensions en coupe sont d'environ 0,7 m x 0,7 m avec une surélévation de l'écran droit de 0,2 m, peut apporter un gain de l'ordre de 2 dB(A) quand la partie verticale en regard des chicanes d'interférences est recouverte d'un bon absorbant acoustique. Cependant, seulement une faible partie de cette efficacité semble provenir du principe invoqué de destruction énergétique par interférences.

Le couronnement de type « roue à aubes », dont le diamètre est de l'ordre de 0,7 m, permet d'obtenir un gain de 10 dB mais dans une seule bande de fréquence dépendant de la profondeur des creux et de la densité des ailettes. Sur d'autres bandes de fréquences, il y a dégradation de l'efficacité du dispositif et il n'est pas certain que dans une situation réelle, cette solution soit satisfaisante en terme d'efficacité globale.

Parmi les classes de couronnements à découvrir, l'une des plus prometteuses semble être le dispositif « multi-diffractant » à un ou plusieurs éléments verticaux, de préférence absorbant pour la (les) partie(s) en regard vers l'écran droit. Pour un couronnement multi-diffracteur qui ajoute deux arêtes de diffraction supplémentaires à l'écran droit et dont l'envergure en coupe est de 2 m (largeur) x 1 m (hauteur), le gain peut atteindre 4 dB(A).

Un exemple d'investigation théorique et expérimentale sur un couronnement absorbant « en té »

Une série d'études a été menée par le CSTB [5, 6] sur un couronnement composé d'un matériau fibreux de type bois-béton. Ce couronnement est appelé « en té » car une fois positionné en tête d'écran, il confère à l'ensemble du dispositif antibruit une forme de T majuscule. Les dimensions de l'élément de base qui compose le diffracteur sont données en Fig. 3.

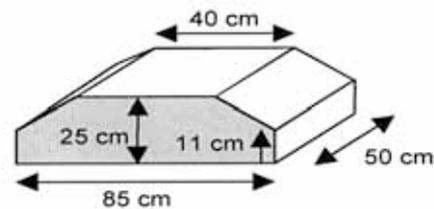


Fig. 3. Géométrie d'un élément diffractant « en té »

Approche expérimentale « 2D »

Le but de cette partie est de déterminer par la mesure l'efficacité acoustique du couronnement pour un couple source-récepteur donné. Pour ce faire, le couronnement a

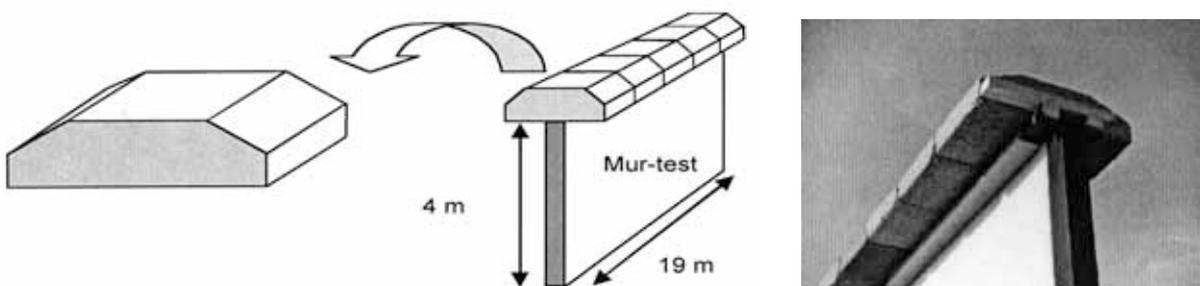
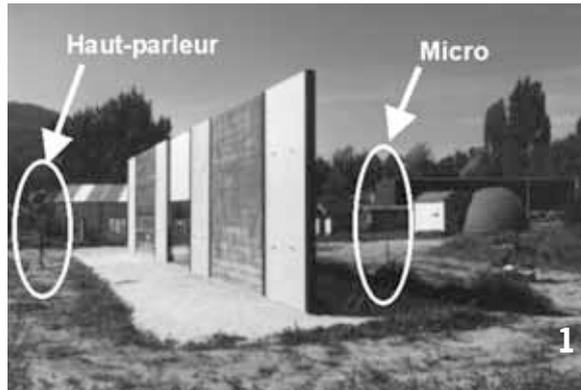


Fig. 4. Géométrie du couronnement placé sur le mur-test



Photos 1 et 2. Manipulation sans et avec couronnement



été placé, sur le site du CSTB de Grenoble, en tête d'un mur test d'une hauteur de 4 m et d'une longueur de 19 m (voir Fig. 4). Le terme « 2D » signifie que l'étude est menée pour une propagation perpendiculaire à l'écran. Le mur test, bien que composé de différents matériaux, a montré lors de manipulations préliminaires, une perte par transmission suffisante pour qu'il puisse être considéré, dans le cadre de nos manipulations et dans la plage de bandes de fréquence étudiées (de 125 à 4 000 Hz), comme un écran droit réfléchissant acoustiquement opaque.

La technique de la MLS (Maximum Length Sequence) [12] a été utilisée afin d'obtenir des données sous la forme de réponses impulsionnelles. Cette méthode présente un très bon rejet au bruit de fond ce qui permet des mesures en extérieur de bonne qualité à condition cependant que la distance source-récepteur ne soit pas trop grande. Une séquence périodique pseudo-aléatoire d'impulsions binaires de taille maximale fixée est émise à l'aide d'un haut-parleur de diamètre 25,4 cm (côté « route ») orienté vers l'arête de diffraction. Les signaux sont enregistrés de l'autre côté du mur test (côté « récepteur ») en utilisant un microphone demi-pouce. Chaque mesure est effectuée dans le cas sans couronnement, puis dans la configuration écran + couronnement (voir photos 1 et 2).

Pour un couple source-récepteur donné, chaque réponse impulsionnelle a été obtenue après le moyennage de 32 mesurages effectués avec une fréquence d'échantillonnage de 48,1 kHz.

Le mur test étant de longueur réduite et proche d'autres bâtiments, il a fallu travailler à proximité de l'écran afin de pouvoir isoler, lors de l'analyse spectrale, uniquement l'énergie diffractée par l'arête supérieure du dispositif. Cette contrainte nous a obligés à placer le haut-parleur à

4 m de l'écran en S1, ce point se trouvant sur une ligne passant par le point d'émission arbitraire situé entre la deuxième et la troisième voie de circulation d'une autoroute conventionnelle (point noté S1', de hauteur nulle) et par le sommet de l'écran (noté Q).

De même, côté récepteur, afin d'obtenir un résultat relatif à un point situé à 50 m de l'écran à une hauteur de 1,5 m (point noté R1'), il a été choisi de placer le microphone en deux points R1 et R2 situés sur la ligne Q-R1', à respectivement 6 et 12 m de l'écran (voir Fig. 5). Dans cette approche expérimentale, seule la propagation perpendiculaire à l'écran est étudiée. Ainsi, la source et les récepteurs se situent dans un même plan vertical normal à l'écran.

Pour un couple source-récepteur donné, l'efficacité du couronnement « en té » (c'est-à-dire de l'écran avec couronnement comparé à l'écran sans couronnement) pour la ième bande d'octave en donnée en dB par :

$$Eff_i = 10 \log_{10} \frac{\int_{\Delta f_i} |FFT[p_{ref}(t) \times W(t - \tau_{ref})]|^2 df}{\int_{\Delta f_i} |FFT[p_{cap}(t) \times W(t - \tau_{cap})]|^2 df}$$

où :

p_{ref} est la réponse impulsionnelle de référence (écran sans couronnement),

p_{cap} est la réponse impulsionnelle quand l'écran possède le couronnement,

W est la fenêtre FFT d'analyse (décrite ci-après),

Δf_i est la largeur de la ième bande d'octave,

τ_{ref} et τ_{cap} sont des constantes de temps choisies telles que la fenêtre d'analyse FFT commence 0,7 ms avant le pic prédominant de la réponse impulsionnelle, relativement à p_{ref} et p_{cap} .

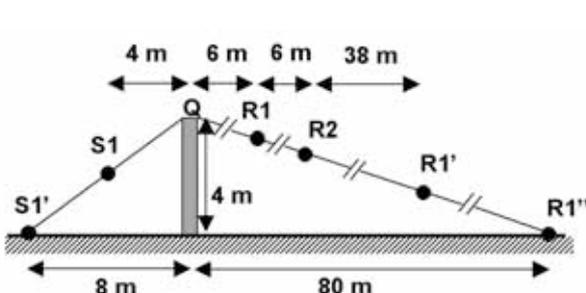


Fig. 5. Position de la source et des récepteurs

La fenêtre d'analyse FFT (aussi appelée fenêtre « Adrienne » [12]) est composée de 3 parties successives : une demi-fenêtre de 0,5 ms de type Blackman, une fenêtre rectangulaire et une demi-fenêtre de type Blackman.

La Fig. 6 montre un exemple de réponse impulsionnelle obtenue pour le couple S1-R1 avec et sans couronnement, ainsi que les fenêtres FFT associées.

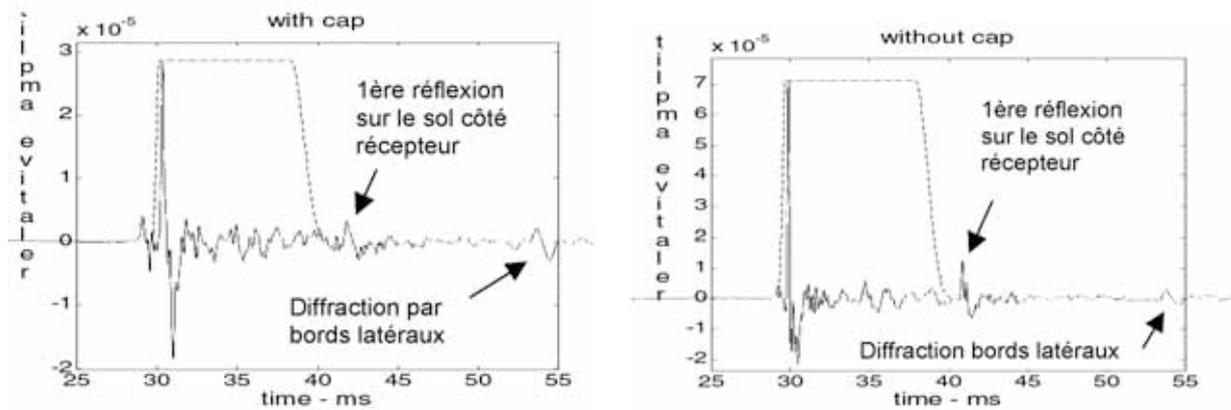


Fig. 6. Réponses temporelles (lignes continues) et fenêtres FFT (pointillés) pour le couple S1-R1, dans les deux situations avec et sans couronnement

Afin d'isoler le seul phénomène de diffraction par l'arête supérieure, la longueur totale de la fenêtre d'analyse a été choisie de façon à éliminer les contributions énergétiques relatives aux diffractions latérales et aux réflexions sur le sol. Côté source cependant, il n'était nécessaire d'éliminer la réflexion sur le sol car le haut-parleur était suffisamment directif.

Approche théorique « 2D »

Le terme « 2D » signifie ici que la source est ponctuelle avec une propagation perpendiculaire à l'écran, ou bien qu'il s'agit d'une source linéaire cohérente, la configuration géométrique du problème étant décrite dans un plan vertical contenant source, écran et récepteurs. Dans les deux cas, les résultats exprimés en termes d'efficacité sont très proches.

Le CSTB a développé un logiciel basé sur la Méthode des Éléments de Frontière (BEM) appelé MICADO [13] (Méthode Intégrale de Calcul Acoustique de la Diffraction par des Obstacles). Ce code de calcul permet de modéliser des écrans antibruit de forme élaborée tout en prenant en compte les effets de sol complexes (sol rigide ou absorbant, discontinuité d'impédance, topographie irrégulière) et de connaître le champ acoustique en une position quelconque.

Pour pouvoir comparer les résultats de MICADO avec les mesures effectuées selon le protocole précédemment explicité, il faut éliminer les réflexions parasites sur le sol (considéré comme parfaitement réfléchissant). Pour ce faire, on place la source et le récepteur au niveau du sol, c'est-à-dire en S1' pour la source (position définie précédemment) et en R1" pour le récepteur, R1" étant aligné avec R1', R1 et Q (voir Fig. 5).

Ainsi, on prend pour hypothèse que le couronnement aura quasiment la même efficacité acoustique pour les couples S1-R1, S1'-R1' et S1"-R1".

L'efficacité calculée par MICADO est donnée pour chaque bande d'octave par :

$$Eff = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum |p_{ref}|^2}{\sum |p_{cap}|^2} \right)$$

où sont les sommes énergétiques sur la bande de fréquence considérée des pressions acoustiques relatives respectivement à l'écran sans et avec couronnement.

Comparaison calcul/mesures

La comparaison des calculs MICADO « 2D » et des mesures MLS est faite en Fig. 7 pour les configurations S1'-R1" (calcul) et S1-R1/S1-R2 (mesures).

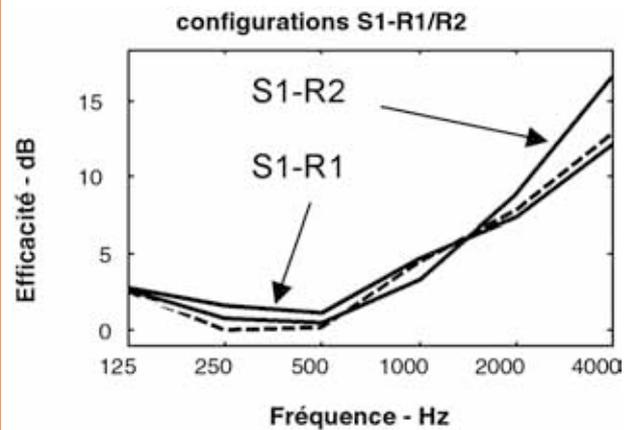


Fig. 7. Efficacité du couronnement en té par bande d'octave : comparaison calcul (—) / mesure (- - -)

L'accord est très bon entre le calcul et la mesure, ce qui valide partiellement les hypothèses de départ où l'on considérait que le couronnement aurait la même efficacité acoustique pour les couples S1-R1, S1-R2 et S1'-R1".

Approche théorique « 3D »

Le logiciel MICADO permet en outre de faire des calculs « 3D » [14, 15], c'est-à-dire dans le cas d'une source ponctuelle dont la position est quelconque, la propagation n'étant plus perpendiculaire à l'écran mais en biais, avec un angle de diffraction q (voir Fig. 8). L'écran est considéré comme infiniment long.

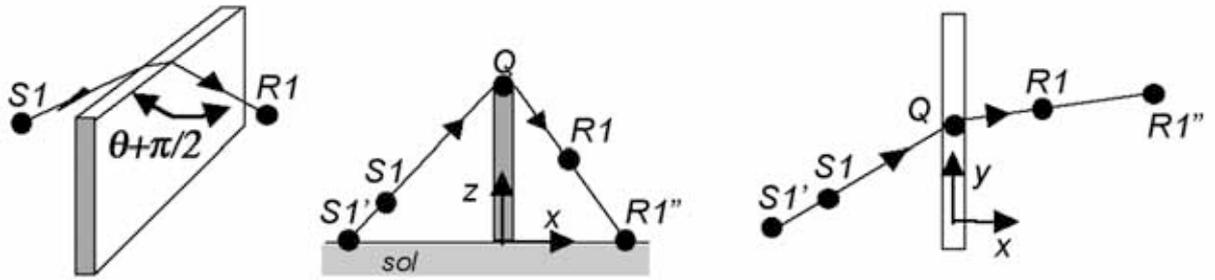


Fig. 8. Trajet acoustique en biais. Vues en perspective, de côté et de haut (écran infiniment long)

La première application de ce développement « 3D » est le calcul de l'efficacité du couronnement pour une source linéaire incohérente, somme infinie de sources ponctuelles incohérentes entre elles, et qui modélise mieux le trafic routier qu'une source linéaire cohérente [15] (calculs « 2D » précédemment présentés). En Fig. 9, on donne, par bande d'octave et en dB(A) les résultats de comparaison, pour le couple S1'-R1", entre source linéaire incohérente (3D-inc), source linéaire cohérente (2D-coh) et source ponctuelle (2D-pnt), les deux derniers donnant des résultats très proches.

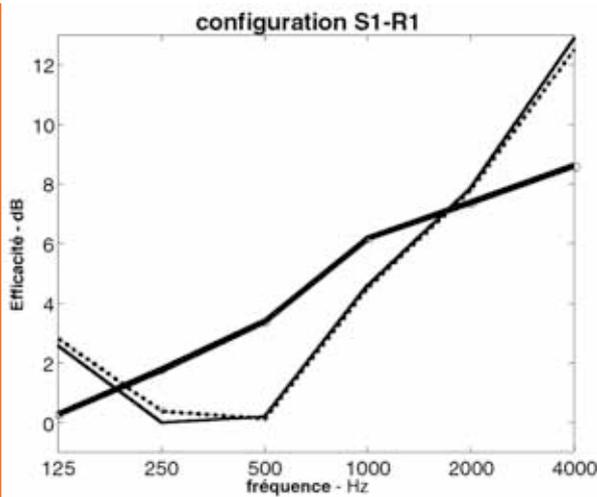


Fig. 9. Efficacité du couronnement par bande d'octave pour une source linéaire cohérente (- - -), ponctuelle (—) et linéaire incohérente (□)

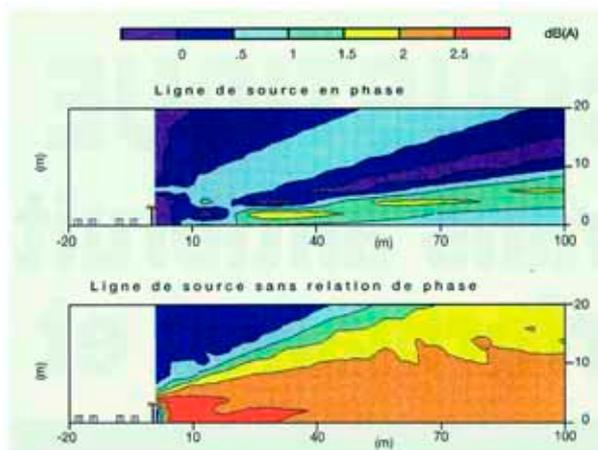


Fig. 10. Efficacité d'un couronnement en té pour 4 lignes sources cohérentes (carte du haut) et incohérentes (carte du bas)

On remarque que dans le cas de la source linéaire incohérente, le « creux » d'efficacité disparaît et la valeur globale de l'efficacité est plus élevée. Cette tendance est vérifiée dans une grande partie de l'espace derrière l'écran comme le montre la carte de bruit verticale en Fig. 10, correspondant au calcul d'efficacité d'un couronnement en té recouvert de laine de verre.

En Fig. 11, on donne les résultats de calcul de l'efficacité du couronnement, en tiers d'octave, pour différents angles de diffraction (0° correspondant à une propagation perpendiculaire à l'écran), avec une source ponctuelle au sol située à 12 m de l'écran et un récepteur au sol à 50 m de l'écran.

Comme on pouvait s'y attendre, l'efficacité du couronnement dépend fortement de l'angle de diffraction. Aux faibles angles (20° et 40°), le couronnement présente un « creux » d'efficacité autour de 400 Hz. Aux angles plus élevés (correspondant à des incidences du son plus en biais), ce « creux » disparaît et l'efficacité globale augmente. Cette approche « par angle » permet d'introduire dans le calcul l'absorption atmosphérique du son lors de son trajet, et d'estimer l'efficacité globale d'un couronnement de longueur finie dans une situation réaliste (avec prise en compte de l'effet de sol absorbant côté récepteur) en utilisant une méthode classique de tir de rayons. Le tableau 1 résume les valeurs calculées de l'efficacité globale en dB(A) du couronnement en té pour un écran droit de référence de 4 m de haut et une autoroute conventionnelle 2x2 voies, ceci pour différentes longueurs du dispositif antibruit IB. Le récepteur est à

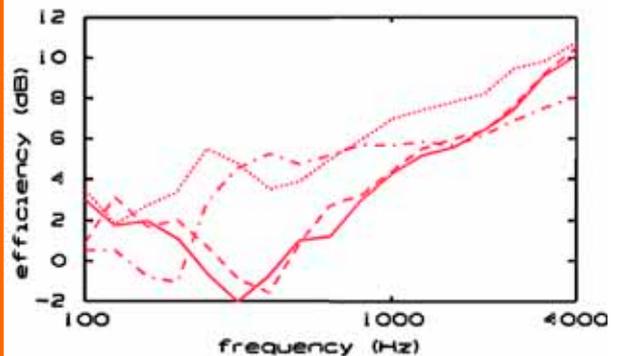
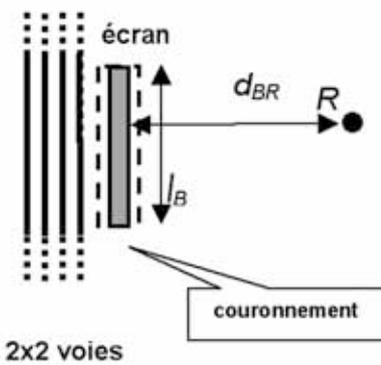


Fig. 11. Efficacité du couronnement pour un point source à l'émission et pour différents angles de diffraction : 20° (—), 40° (- - -), 60° (.....), et 80° (- . - .). Distance normale source-écran = 12 m ; distance normale écran-récepteur = 50 m 1 fréquence par bande de tiers d'octave



		Longueur de l'écran l_B (m)			
		200	1 000	2 000	∞
d_{BR} (m)	30	2.1	2.1	2.1	2.6
	125	1.0	1.2	1.3	2.2
	250	0.7	1.3	1.6	1.9

Tableau 1. Efficacité globale du couronnement en dB (A) pour différentes situations réalistes

1,5 m de hauteur et est situé à différentes distances dBR derrière l'écran. Le sol est plat et couvert, côté récepteur, d'herbe avec une résistivité au passage de l'air de 300 kPa s m-2.

pas horizontale, mais volontairement irrégulière à la manière de dents de scie aléatoirement dissymétriques [16, 17] (Fig. 12)

Conclusions

Pour le cas du couronnement en té étudié ici, les différents résultats présentés permettent d'élaborer les conclusions suivantes :

- Depuis le récepteur, si l'angle masqué est supérieur à 140°, les calculs 2D (correspondant aux mesures 2D) donnent des résultats jusqu'à 1,4 dB(A) inférieurs à ceux obtenus par une approche 3D incohérente : l'efficacité du couronnement est sous-estimée.
- Si l'angle masqué est inférieur à 120°, l'approche 2D donne des résultats similaires aux calculs 3D : les efficacités mesurées (source ponctuelle dans un plan perpendiculaire à l'écran) sont satisfaisantes et peuvent être utilisées dans un calcul plus général.
- Dans une situation réaliste, l'efficacité d'un tel couronnement est comprise entre 1 et 3 dB(A), cette valeur dépendant fortement de l'angle masqué par l'écran et de la différence de marche du rayon diffracté le plus court. Toutes les valeurs d'efficacité données dans ce chapitre correspondent à une comparaison écran + couronnement et écran seul. La différence de hauteur entre les deux dispositifs est de 0,25 m, hauteur du diffracteur, et la correction à apporter pour se ramener à un écran de même hauteur totale est d'environ -0,4 dB(A).

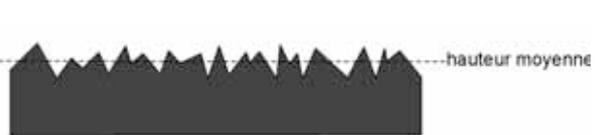


Fig. 12. Écran à arête aléatoirement irrégulière

Physiquement, en redirigeant l'énergie acoustique derrière l'écran dans une zone où l'infrastructure routière n'est plus vue de façon directe (zone d'ombre), le bord horizontal supérieur d'un écran droit agit comme une source linéaire cohérente. L'ajout d'irrégularités le long de ce bord va augmenter l'incohérence de cette source linéaire et ainsi améliorer sensiblement l'efficacité du dispositif. Cependant, cette amélioration dépend fortement de l'emplacement du point de récepteur et il est moins évident qu'elle soit si élevée de façon globale. Ainsi, selon la position de ce point, on peut observer une amélioration aussi bien qu'une dégradation de plusieurs dB (A). De plus, les résultats encourageants proviennent de mesures sur maquettes et il manque des validations en grandeur réelle pour affirmer la réalité de ce phénomène physique appliqué au bruit des infrastructures de transports terrestres.

La seconde recherche concerne le contrôle actif du bruit routier [18]. Pour le cas d'une source isolée stationnaire et immobile, le principe de ce système de réduction du bruit réside dans la destruction par interférences du champ de pression au niveau du récepteur.

Cette opération est réalisée par une source secondaire (haut-parleur) placée proche de l'arête de diffraction du côté route (Fig. 13).

Côté récepteur, un (ou plusieurs) microphone de contrôle permet de calculer le signal à envoyer au niveau de la source secondaire pour annuler au mieux le champ de

Des solutions prometteuses

Des recherches plus récentes ont été entreprises dans le même but d'augmenter l'efficacité acoustique d'un écran antibruit sans en augmenter la hauteur totale. La première concerne l'écran dont l'arête supérieure n'est

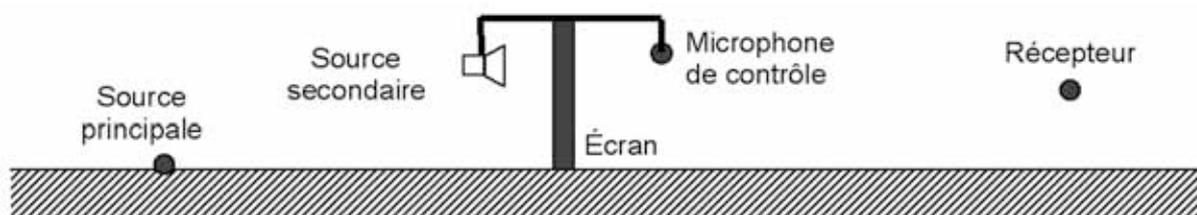


Fig. 13. Principe du contrôle actif en tête d'écran

pression au récepteur. Ce procédé, peu sensible aux conditions météorologiques, s'est avéré efficace pour une source stationnaire immobile. Cependant, des études supplémentaires seraient nécessaires afin de démontrer l'applicabilité de la méthode à un ensemble de sources principales en mouvement. Notamment, il semble indispensable qu'un nombre minimum de 3 haut-parleurs par mètre (soit 1 haut-parleur par demi-longueur d'onde à 500 Hz) soit nécessaire à l'utilisation d'un tel système.

Enfin, une dernière solution d'aménagement est l'implantation sur l'un des côtés de l'infrastructure de deux écrans proches parallèles [3]. Cette solution, peu utilisée car assez onéreuse et gourmande en place, semble donner des résultats très prometteurs pour peu que la distance entre les deux écrans droits soit suffisante (plusieurs mètres), et qu'au moins une des deux faces en regard soit recouverte d'un absorbant acoustique efficace aux moyennes fréquences. La bande « perdue » pourrait être utilisée pour le passage d'une piste cyclable ou l'aménagement d'un espace paysager.

Conclusions

Dans ces conditions, on a vu que l'efficacité du diffracteur pouvait atteindre 2 – 2,5 dB (A) en zone d'ombre suffisamment profonde.

Pour des dimensions plus grandes ou pour des systèmes faisant appel à des multi-réflexions, on peut obtenir un gain supérieur à 4 dB (A) dans cette même zone. Sur le même principe, et même s'il ne constitue pas un couronnement à proprement parler, l'écran double semble une solution très prometteuse dans le cas où l'espace libre le long de l'infrastructure est suffisamment large. Un important travail de recherche reste cependant à effectuer pour déterminer et tester de nouvelles formes de diffracteur tout en mariant esthétique et acoustique.

Ici, les valeurs d'efficacité données correspondent au comportement acoustique du couronnement en zone d'ombre de réception.

Dans un cas général, c'est dans cette partie de l'espace que le diffracteur manifestera son rôle protecteur.

Enfin, les couronnements ont été caractérisés sans prendre en compte les effets météorologiques qui deviennent non négligeables à grande distance. Des études supplémentaires, utilisant par exemple une méthode d'éléments finis de frontière couplée à des modèles de propagation en milieu inhomogène [19], pourraient être prochainement menées à cette fin.

Références bibliographiques

- [1] D. N. MAY, M. M. OSMAN, The Performance of Sound Absorptive, Reflective and T-Profile Noise Barriers in Toronto, *Journal of Sound and Vibration*, 71 (1), pp. 65-71
- [2] D. N. MAY, M. M. OSMAN, Highway Noise Barriers : New Shapes, *Journal of Sound and Vibration*, 71 (1), pp. 73-101
- [3] G.R. WATTS, Acoustic Performance of Traffic Noise Barriers. A State-of-the-Art Review, EuroSymposium, Nantes, pp. 223-250
- [4] L. BOITHIAS, Propagation des Ondes Radioélectriques dans l'Environnement Terrestre, CENT-ENST, Ed. Dunod (1983) 309 p, Fig. 7 15 p. 182
- [5] J. DEFRANCE, Ph. JEAN, Y. GABILLET, Acoustic Performance of a T-Shaped Barrier Cap, EuroNoise 98, Munchen, 4-7 Oct. 1998, pp. 1123-1126
- [6] J. DEFRANCE, Y. GABILLET, Ph. JEAN, Integration of the Real Efficiency of Absorbing Road Barrier Caps in a Ray Tracing Method, 6 th Internat. Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, July 1999, pp. 699-704
- [7] D. C. HOTHERSALL, D. H. CROMBIE, S. N. CHANDLER-WILDE, The Performance of T-Profile and Associated Noise Barriers, *Applied Acoustics*, 32, pp. 269-287
- [8] G.R. WATTS, P.A. MORGAN, Acoustic Performance of an Interference-Type Noise-Barrier Profile, *Applied Acoustics*, 49 (1), pp. 1-16
- [9] T. OKUBO, K. FUJIWARA, Efficiency of a Noise Barrier on the Ground with an Acoustically Soft Cylindrical Edge, *Journal of Sound and Vibration*, 216 (5), pp. 771-790
- [10] D. H. CROMBIE, D.C. HOTHERSALL, S. N. CHANDLER-WILDE, Multiple-Edge Noise Barriers, *Applied Acoustics*, 44, pp. 353-367
- [11] G.R. WATTS, Acoustic Performance of a Multiple Edge Noise Barrier Profile at Motorway Sites, *Applied Acoustics*, 47, pp. 47-66
- [12] M. GARAI, P. GUIDORZI, European Methodology for Testing the Airborne Sound Insulation Characteristics of Noise Barriers in situ : Experimental Verification and Comparison with Laboratories Data, *J. Acoust. Soc. Am.*, 108 (3), pp. 1054-1067
- [13] Ph. JEAN, A Variational Approach for the Study of Outdoor Sound Propagation and Application to Railway Noise, *Journal of Sound and Vibration*, 212 (2), pp. 275-294
- [14] D. DUHAMEL, P. SERGENT, Sound Propagation Over Noise Barriers with Absorbing Ground, *Journal of Sound and Vibration*, 218 (5), pp. 799-823
- [15] Ph. JEAN, J. DEFRANCE, Y. GABILLET, The Importance of Source Type on the Assessment of Noise Barriers, *Journal of Sound and Vibrations*, 226 (2), pp. 201-216
- [16] S. S. T. HO, I. J. BUSCH-VISHNIAC, D. T. BLACKSTOCK, Noise Reduction by a Barrier Having a Random Edge Profile, *J. Acoust. Soc. Am.*, 101 (5), pp. 2669-2676
- [17] P. MENOUNOU, I. J. BUSCH-VISHNIAC, Jagged Edge Noise Barrier, *Building Acoustics*, 7 (3), pp. 179-200
- [18] D. DUHAMEL, P. SERGENT, C. HUA, D. CINTRA, Measurement of Active Control Efficiency Around Noise Barriers, *Applied Acoustics*, 55 (3), pp. 217-241
- [19] E. PREMAY, Y. GABILLET, A New Boundary-Element Method for Predicting Outdoor Sound Propagation and Application to the Case of a Sound Barrier in the Presence of Downward Refraction, *J. Acoust. Soc. Am.*, to be published in Dec. 2000



PUB
ISOVER