### Jérôme Defrance Marine Baulac Philippe Jean CSTB Département Acoustique et Eclairage 24, rue Joseph Fourier

24, rue Joseph Fourier 38400 Saint Martin d'Hères E-mail : jerome.defrance@cstb.ftr

### Eric Premat

Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (STRMTG) Domaine universitaire 1461, rue de la piscine 38400 Saint Martin d'Hères E-mail : eric.premat@equipement.gouv.fr

### Résumé

Après avoir rappelé, pour la modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur complexe, les principaux effets relatifs à la frontière du domaine, les grandes familles de méthodes prévisionnelles dédiées à la prise en compte de géométries complexes sont présentées, en s'attardant plus particulièrement sur la méthode des éléments de frontière (BEM) et ses extensions (Météo-BEM, BEM-PE). La performance de ce modèle est augmentée quand il est couplé à un algorithme génétique d'optimisation. Dans un dernier paragraphe, des exemples d'application à la réduction du bruit des transports terrestres sont donnés.

### Abstract

After a short review of the major boundary effects occurring in complex outdoor sound propagation, the main prediction methods families dedicated to complex geometries are presented, focusing on the Boundary Element Method (BEM) and its extensions (Meteo-BEM, BEM-PE). The performance of such a model is enhanced when coupled to an optimization genetic algorithm. In a last section, a few applications to ground transport noise abatement are given.

# Rappel des principaux effets acoustiques relatifs à la frontière du domaine

# Effet de sol

L'atténuation due à l'effet de sol est le résultat de l'interférence entre la part de l'onde réfléchie par la surface du sol et celle qui se propage directement de la source vers le récepteur. Elle est physiquement liée à la nature plus ou moins absorbante des terrains au-dessus desquels le son se propage. Cette caractéristique est décrite, dans les modèles numériques avancés, via une impédance complexe de surface, celle-ci étant exprimée en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques comme la résistivité au flux d'air et la porosité de la couche absorbante. Le phénomène d'effet de sol varie selon la fréquence, la nature du sol ainsi que les positions respectives de la source et du récepteur. En première approximation, on peut considérer que pour une propagation au-dessus d'un sol absorbant et dans le cas d'une atmosphère neutre, l'atténuation due à l'effet de sol est d'autant plus forte que la distance source récepteur est élevée et que le rayon direct source récepteur est proche du sol. Dans le cas d'une atmosphère inhomogène et à distances de propagation suffisamment élevées, l'effet de sol peut fortement augmenter (gradient vertical de vitesse du son négatif) ou, à l'inverse, totalement disparaître (gradient positif). Ces aspects météorologiques sont davantage présentés dans le papier de Cotté et Blanc-Benon [1] du présent magazine.

# Effets de diffraction

Les obstacles (comme une protection antibruit ou une butte) influencent de façon prépondérante la propagation de l'onde sonore. Lorsqu'une onde incidente rencontre un obstacle, sa propagation est perturbée. L'obstacle agit alors comme un ensemble de sources secondaires qui ont pour effet de diffuser l'énergie sonore autour de lui avec une directivité non-uniforme dépendant de sa forme et des conditions d'impédance à sa frontière ; il s'agit du phénomène de diffraction. Généralement, on observe une diminution des niveaux de pression derrière l'obstacle, dans la zone d'ombre géométrique. Comme pour l'effet de sol, la diffraction peut être modifiée en fonction des inhomogénéités atmosphériques (gradients de vitesse du son et turbulences).

# Effets de réflexion

Lorsqu'une onde acoustique arrive sur une surface, une partie de son énergie est réfléchie, une partie est transmise et une partie est absorbée. Si l'absorption et la transmission sont faibles, ce qui est généralement le cas pour les surfaces des bâtiments par exemple, la plus grande partie de l'énergie acoustique est réfléchie, et la surface est considérée comme acoustiquement rigide. Pour une surface recouverte d'un matériau absorbant tel qu'un écran antibruit traité, on utilise, comme dans le cas de l'effet de sol, l'impédance acoustique complexe de surface. En outre, pour qu'une réflexion soit complète, elle doit se produire sur une surface suffisamment grande par rapport à la longueur d'onde étudiée.

# Autres effets

Il s'agit notamment des effets atmosphériques tels que l'absorption moléculaire par l'air, la réfraction des ondes due aux gradients verticaux de vitesse du son et la turbulence atmosphérique. Ces phénomènes sont davantage abordés dans le papier de Cotté et Blanc-Benon [1] alors que le présent article est en priorité consacré aux effets de frontière.

# Méthodes prévisionnelles de référence

# Mesures sur modèles réduits

Un des moyens de prévoir la propagation acoustique en milieu extérieur complexe est d'avoir recours à des mesures sur modèles réduits [2], en appliquant les principes de similitude entre le problème à l'échelle 1 et celui à l'échelle maquette. Pour des maquettes à l'échelle de réduction 1/n, les dimensions doivent être divisées par n, les fréquences multipliées par n et les impédances de surface rester constantes.



Fig. 1 : Surfaces courbées utilisées pour des mesures de référence sur modèles réduits : la surface concave (premier plan) permet par analogie de prévoir la propagation pour un gradient constant positif de vitesse du son (downward refraction) sur sol plan, alors que la surface convexe (arrière-plan) est dédiée à la propagation pour un gradient constant négatif (upward refraction)

Pour de grandes distances de propagation, il est nécessaire de déshydrater fortement l'air afin de respecter l'analogie propre à l'absorption atmosphérique. On peut en outre courber les surfaces pour prendre en compte, de façon simplifiée, les effets météorologiques (Figure 1).

### Méthodes des rayons et des faisceaux

La méthode des rayons est une description Lagrangienne de la propagation du son. Elle consiste à suivre les points du front d'onde au cours du déplacement de ce dernier. Un rayon acoustique est alors obtenu par projection de certains points caractéristiques de la surface de l'onde. Dans une telle approche dite «géométrique», la principale hypothèse est que le milieu est faiblement variant, c'est-à-dire que la longueur d'onde doit rester petite devant l'échelle caractéristique du milieu, ce qui en fait une méthode «haute fréquence». Deux étapes sont nécessaires à sa mise en œuvre : la détermination des rayons par application de la loi de Snell ou de la méthode des caractéristiques, puis, dans un second temps, la détermination de la pression acoustique le long de chaque rayon par le biais de la théorie de Blokhintzev. Les deux principales limitations de cette méthode sont sa non-validité aux basses fréquences et ses hypothèses de base restrictives qui la rendent difficilement utilisable pour des géométries complexes et des problèmes de sauts d'impédances.

Les faisceaux sont une extension de la méthode des rayons. Il s'agit de tirer simultanément plusieurs rayons (classiquement trois) cohérents entre eux et dont la position de départ est définie par un angle solide. Il est possible de subdiviser les faisceaux pour augmenter la précision du tir dans des zones de discontinuité de forme ou d'impédance.

### Méthode des éléments finis de frontière (BEM)

La Méthode des éléments de frontière (Boundary Element Method, BEM) est une technique numérique développée au début des années 60 et basée sur la Théorie des équations

> intégrales de frontière. Par rapport à la Méthode classique des éléments finis, le domaine de propagation n'a pas à être maillé, ce qui réduit de 1 la dimension du problème et diminue de façon très sensible les temps de calcul. En effet, le champ acoustique dans le milieu fluide est alors déterminé uniquement à partir de la connaissance de la radiation des frontières.

> Ce modèle, développé dans le domaine fréquentiel, peut être implémenté en 2D (correspondant à une source linéaire cohérente) ou en 3D (source ponctuelle). Pour des simulations en 2D½ (source ponctuelle dans une géométrie 3D dont une composante reste constante dans une dimension), il est possible d'obtenir le champ de pression acoustique en tout point de l'espace par une intégration de type Fourier à partir des résultats de calculs 2D [3].

La BEM est une des méthodes numériques de référence les plus puissantes pour le calcul de la propagation sonore au-dessus de géométries complexes à impédance variable. Ses deux principales limitations sont la non-prise en compte des effets météorologiques (réfraction et turbulence atmosphériques) ainsi qu'un temps de calcul élevé pour les hautes fréquences (ce temps de calcul, qui dépend de la longueur de frontière maillée, est proportionnel à une valeur située entre le carré et le cube de la fréquence).

Beaucoup d'exemples d'application donnés ci-après sont issus du code de calcul MICADO basé sur la BEM et développé au CSTB [4].

### Météo-BEM

On peut étendre l'application de la BEM à des cas d'atmosphère inhomogène où le gradient vertical de vitesse du son est constant. Dans ce cas météorologique particulier, deux approches distinctes peuvent être menées : premièrement, on peut appliquer le principe de transformée conforme et mener un calcul BEM en atmosphère homogène mais en courbant le sol (de façon concave ou convexe suivant le signe du gradient), ce qui équivaut à une simulation en atmosphère inhomogène à gradient constant mais sur sol non-courbé [5].

La seconde approche consiste à implémenter une BEM avec une fonction de Green qui prend en compte le caractère inhomogène du milieu de propagation, mais avec la contrainte numérique de devoir être numériquement dérivable [6]. Deux solutions implémentables (en fonction du signe du gradient) sont les modes normaux et la série des résidus.

## Méthode couplée BEM-PE

Une autre façon de mener des calculs à géométries complexes avec prise en compte d'effets météorologiques consiste à créer une méthode hybride à partir de deux modèles distincts dédiés chacun à une problématique de la propagation : la frontière complexe et l'atmosphère inhomogène [7]. Une solution est d'effectuer un couplage entre la BEM et l'équation parabolique, méthode adaptée à la prise en compte des effets de gradient vertical de vitesse du son et présentée en détail dans l'article de Cotté et Blanc-Benon [1] du présent magazine.

Un premier calcul est effectué en champ proche de la source sonore en atmosphère homogène (voir, en Figure 2, le cas d'une autoroute en tranchée avec semi-couverture ajourée) afin de déterminer les caractéristiques du champ vertical initial («starter») pour le calcul en champ lointain de la propagation en atmosphère inhomogène au-dessus d'une géométrie simple (ici, terrain plat impédant).

# Homogeneous Inhomogeneous BEM Starter GPFE Receiver

#### Fig. 2. : Principe de couplage entre la BEM et la PE



Fig. 3. : Principe de globalisation de l'optimisation

### Autres méthodes de références

Il existe de nombreuses autres méthodes dédiées à la prévision de la propagation acoustique en milieu inhomogène [8] mais pour des conditions relativement simples de frontière (tel un sol plan impédant) : le Fast Field Program, les faisceaux gaussiens, les équations d'Euler, l'équation parabolique... Nous renvoyons ici le lecteur à l'article de Cotté et Blanc-Benon [1] où certains de ces modèles sont présentés.

# Optimisations par algorithme génétique

### Principe

Il est nécessaire dans un premier temps d'utiliser une méthode directe d'optimisation adaptée à la recherche locale. Le choix s'est porté sur la méthode de Nelder Mead pour son efficacité dans la détermination de minimum locaux. Une globalisation de l'optimisation peut ensuite être effectuée par couplage avec une méthode stochastique d'optimisation (Figure 3).



Fig. 4. : Principe d'un algorithme évolutionnaire

2

Une autre possibilité de globalisation est de faire appel aux stratégies évolutionnaires. Dans l'approche développée par le CSTB pour l'étude des protections antibruit de forme complexe [9], il a été choisi d'appliquer un algorithme génétique sur une population (Figure 4). Ce couplage entre une recherche globale grossière et une recherche locale précise montre une très grande efficacité, notamment quand l'optimisation porte simultanément sur plus de deux paramètres.

### Exemples de résultat

En Figure 5, on donne deux exemples de résultats originaux obtenus par couplage d'un algorithme d'optimisation évolutionnaire et d'une BEM 2D : un couronnement à surface dite «réactive» [10] (c'est-à-dire une série de puits rigides, en tête d'écran de 3 m, dans un gabarit ici de 1,5 m sur 0,3 m) et une protection de faible hauteur [10] (dans un gabarit ici de 1 m sur 1 m). La solution optimisée dépend bien évidemment des caractéristiques (position, spectre) de la (ou des) source(s) et de l'emplacement du (ou des) récepteur(s).



Fig. 5. : Résultats d'optimisation par algorithme évolutionnaire couplé à MICADO (BEM 2D) : cas d'un couronnement à surface réactive (gauche) et d'une protection de faible hauteur (droite)

# Application à la réduction du bruit des transports terrestres

### Couronnements d'écran

Les principaux profils de couronnements d'écran sont le T, le L retourné et le cylindre. D'autres formes ont été mises au point, mais restent encore peu utilisées en France, comme le



Fig. 6. : Efficacité acoustique en dB(A), pour une source routière, d'un multi-diffracteur à 2 baffles absorbants inclinés, par rapport à l'écran droit de même hauteur totale. Calcul MICADO (BEM)

# Écrans à relief

de 3 m.

récepteur).

Un certain nombre de protections antibruit et murs de soutènement offrent des formes géométriques à fortes irrégularités. Les ondes acoustiques y sont réfléchies de façon complexe et l'hypothèse généralement retenue d'une réflexion spéculaire n'est plus applicable. La BEM est alors la seule méthode numérique opérationnelle capable de prédire

multi-diffracteur. Le résultat présenté en Figure 6 concerne la

famille des multi-diffracteurs à 2 baffles absorbants inclinés

et est issu d'une optimisation globale [11] telle que décrite

Le couronnement est généralement construit en béton poreux

ou formé d'un assemblage tôle perforée / laine minérale /

tôle pleine. Il peut 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 prohiber, car il peut conduire à une dégradation de l'efficacité sonore

globale de l'écran droit. En plus du type de matériau utilisé,

le gain apporté par le couronnement dépend fortement de la

position du récepteur derrière l'écran (c'est-à-dire son degré

de pénétration dans la zone d'ombre, partie de l'espace

où l'infrastructure routière n'est plus visible) et de l'angle

de diffraction (sous quel angle est vue la source depuis le

De récentes études ont montré que lors d'incidences obliques

du son (la source ne se trouve pas «face» au récepteur mais sur le côté), l'efficacité du couronnement généralement augmente [12,13]. Aussi la longueur totale d'un couronnement

conditionne-t-elle son efficacité globale. En toute généralité, pour une envergure du dispositif de l'ordre du mètre, le

gain apporté par un couronnement suffisamment long peut atteindre 4 dB(A) en zone d'ombre profonde (c'est-à-dire pour

un récepteur proche de l'écran ce qui est le cas, par exemple,

d'habitations en contrebas d'une route en remblai), partie de l'espace où le couronnement manifestera davantage son rôle

protecteur. Pour comparaison, cette situation correspond à une augmentation en hauteur de 1,20 m d'un écran droit

dans le précédent paragraphe.

finement le comportement de tels ouvrages [14]. On donne en Figure 7 un exemple de résultat, à 500 Hz, de l'indice de perte en réflexion  $\alpha$ (équivalent à un coefficient d'absorption) fonction de l'angle incident  $\theta$ s (par rapport à la verticale) de l'onde sur un écran de type "sapin de Noël» et de son angle de réflexion  $\theta$ r vers le récepteur.

Aux basses fréquences (bandes d'octave de 63, 125 et 250 Hz), le comportement de telles protections irrégulières reste très proche de celle d'un écran plan équivalent dont l'inclinaison serait identique au fruit moyen des éléments superposés. Aux moyennes fréquences (bandes de 500 et 1000 Hz), le comportement des écrans devient plus complexe. La longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la rugosité de l'écran. Les écrans ayant des faces verticales renvoient de plus en plus d'énergie, vers les récepteurs d'angle r faible, quand la fréquence augmente. Aux hautes fréquences (bandes de 2000 et 4000 Hz), la réflexion globale de l'écran irrégulier est dictée par l'orientation des facettes





Fig. 7 : Indice de perte en réflexion a calculé à 500 Hz en fonction des angles incident et réfléchi, θs et θr, pour le cas du «sapin de Noël» végétalisé de 4 m de hauteur. Calculs MICADO (BEM)

des éléments le constituant. Les écrans à relief comportant des facettes verticales ont le même comportement que les écrans droits. Les autres écrans à relief ont une accentuation d'énergie vers les récepteurs les plus bas. Les écrans ayant une grande frontière absorbante ont une bonne atténuation en réflexion.

### Couvertures ajourées

Les performances acoustiques des couvertures ajourées dites «à lamelles» (baffles positionnés dans une direction privilégiée) peuvent être déterminées par calcul, en utilisant une BEM 2D ou 2D½. Par contre, pour les couvertures ajourées dites «en damier» (baffles positionnés dans deux ou trois directions principales), le calcul par BEM 3D impliquant des temps de résolution beaucoup trop élevés pour les fréquences étudiées, on a recours à des mesures sur modèles réduits (échelle de réduction de 1/10 ou 1/20) tels que ceux qui sont montrés en Figure 8. Une importante étude paramétrique a été récemment menée au CSTB, avec le soutien de l'ADEME, en couplant mesures sur modèles réduits et simulations par BEM 2D (code MICADO). La première conclusion est qu'un maximum d'efficacité acoustique est généralement observé autour d'un axe incliné d'une dizaine de degrés par rapport à l'horizontale tangente à la partie supérieure de la couverture (Figure 9). Selon la géométrie des enceintes acoustiques, leur caractéristique en absorption, leur nombre, leur positionnement et arrangement, la performance due à l'ajout de la couverture ajourée est comprise entre 5 et 15 dB(A), pour un récepteur positionné à une cinquantaine de mètres de l'infrastructure et situé au minimum au R+3 (10 m). Pour les étages inférieurs, l'efficacité de la couverture reste toujours limitée, mais les niveaux sonores sans couverture y sont plus faibles car la diffraction par les écrans latéraux (ici d'une hauteur de 7 m) est maximale dans cette zone (voir figure 9 page suivante).

# Protections de faible hauteur

La politique actuelle, notamment celle affichée au Grenelle de l'Environnement, est de réduire les nuisances sonores en ville pour améliorer la qualité de vie des citadins. En outre, la récente directive européenne 2002/49/CE impose aux grandes agglomérations de déterminer dès 2008 des plans d'action pour réduire l'impact des bruits routiers, ferroviaires et industriels. Cependant, en milieu fortement urbanisé, l'utilisation d'écrans antibruit conventionnels est inadéquate. C'est pourquoi, des protections de faible hauteur sont actuellement étudiées (Figure 10). L'évaluation de leur performance acoustique, par calcul BEM et par mesures sur modèles réduits, montre qu'il s'agit d'une solution particulièrement adaptée à la protection des piétons et des usagers des pistes cyclables vis-à-vis du bruit routier et du bruit de tram.



Fig. 8. : Modèles réduits (échelle 1/20) utilisés pour la mesure par éclateur électrostatique de la performance acoustique d'une couverture ajourée à 2 (gauche) et à 3 (droite) directions principales des baffles, au Centre des Maquettes du CSTB de Grenoble



Fig. 9. : Efficacité en dB(A), pour une source autoroutière, d'une couverture ajourée (composée d'éléments absorbants parallèles de 1 m de hauteur distants de 1 m) par rapport au cas des deux écrans de 7 m sans couverture. Calcul MICADO (Eléments Finis de Frontière)



Fig. 10. : Concept de protections innovantes de faible hauteur en milieu urbain. Les carrés gris indiquent le gabarit dans lequel l'optimisation sur les formes et les matériaux doit être menée

Des simulations numériques [15] menées avec le code MICADO ont permis de montrer qu'une protection acoustique, absorbante et d'une hauteur maximale de 1 m, peut présenter, si elle est optimisée et placée sur un linéaire suffisamment important, une efficacité d'environ 6 dB(A) pour un récepteur à hauteur d'oreille humaine et à 2 m en retrait.

30

20

### Protections en bord de viaducs

Insertion Losses

(dB(A))

-5

10

15

Le rayonnement acoustique d'une infrastructure routière sur viaduc est très sensiblement différent de celui d'une route au niveau du terrain naturel. On donne pour exemple, en Figure 11, l'effet (obtenue par calcul BEM) de l'ajout d'un

> écran de faible hauteur (1 m) en bordure d'une autoroute située à une hauteur de 0 m (terrain naturel), 5 m (remblai) 10 m et 20 m (viaducs). On observe que si l'écran de 1 m n'a qu'un effet faible ou nul dans le premier cas, il atténue fortement le niveau de pression acoustique dans le cas du viaduc, et ceci dans une large zone située de part et d'autre de la ligne d'altitude de celui-ci (efficacité de l'écran supérieure à 6 dB(A)).

# Perspectives

Les outils de prévision présentés dans cet article, avec leurs améliorations les plus récentes, peuvent contribuer efficacement à

Spécial " 5es Assises sonore Acoustique 🕲 Techniques n° 51 23

2

height (m) 10 10 50 100 150 200 100 150 200 distance (mi 40 30 30 20 20 10 150 100 200 Ð 50 100 150 200

30

20

Fig. 11. : Efficacités en dB(A) d'un écran absorbant de 1 m de hauteur situé en bordure de plateforme routière, en fonction de son élévation (0, 5, 10 et 20 m). Calculs MICADO (BEM)

Acoustique @ Techniques n° 51
Spécial " 5es Assises sonore "

répondre à un certain nombre de problèmes sociétaux propres au bien-être des citadins, tels que :

 Quel type de mobilier urbain innovant peut-on développer et mettre en œuvre afin de créer en ville, pour le piéton, des lieux et des corridors à caractère «tranquille» ?

- Comment peut-on diminuer de façon efficace l'impact acoustique du fret ferroviaire en milieu urbain ?

 Quelles solutions techniques originales peut-on envisager pour mieux protéger, notamment du bruit de circulation, des zones sensibles tels les bancs publics, les arrêts de bus, les sorties des écoles, les squares...?

- Comment peut-on davantage protéger le cycliste du bruit routier et du bruit de tram le long des principaux axes de déplacement des deux roues dans les grandes villes ?

- Comment peut-on mettre en perspective le confort acoustique du piéton et du cycliste avec d'autres critères de qualité environnementale (voire de santé publique) tels que la pollution de l'air, la sécurité, l'éclairage, le confort thermique et aéraulique..., ceci afin de développer une véritable approche globale de la qualité environnementale et sanitaire des espaces publics et des axes de déplacement des modes doux ?

# Références bibliographiques

 Cotté B., Blanc-Benon P. "Modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur complexe : effets atmosphériques", Acoustiques et Technique 51 (2007)

[2] Premat E., Defrance J., Mos A., Chartier H., «Towards an experimental benchmark test cases database for the validation of numerical models for outdoor sound propagation», Acta Acustica 89(6), 992-997 (2003)

[3] Duhamel D. «Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier», Journal of Sound and Vibration 197(5), 547-571 (1996)

[4] Jean P. «A variational approach for the study of outdoor sound propagation an application to railway noise», Journal of Sound and Vibration 212(2), 275-294 (1998)

[5] Defrance J., Aballéa F., Priour M., Premat E., Blanc-Benon P. "Sound propagation over non-flat terrain with realistic meteorological effects using the Parabolic Equation: New theoretical developments and comparisons with wind tunnel experiments", 11th International Symposium on Long Range Sound Propagation, Fairlee, VT, USA, (2-3 June 2004)

[6] Premat E., Defrance J., «Sound propagation above an impedance discontinuity in the presence of meteorological effect, using a BEM formulation», 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italy (2-7 Sep. 2001)

[7] Premat E., Defrance J., Priour M., Aballéa F., «Coupling BEM and GFPE for complex outdoor sound propagation», EuroNoise, Napoli, Italy (19-21 May 2003) and Acta Acustica, 89, Suppl.1, S71 (2003)

[8] Defrance J., Noordhoek I., Salomons E., Heimann D. et al "Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project", Acta Acustica 93(2), 213-227 (2007)

[9] Baulac M. "Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe", Mémoire de Thèse de Doctorat, Université du Maine, 172p (octobre 2006)

[10] Baulac M., Defrance J., Jean P. "Optimisation with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface", à paraître dans Applied Acoustics

[11] Baulac M., Defrance J., Jean P. " Optimisation of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a Nelder Mead local search", Journal of Sound and Vibration 300, 71-87 (2007)

[12] Jean P., Defrance J., Gabillet Y., «The importance of source type on the assessment of noise barriers», Journal of Sound and Vibration 226(2), 201-216 (1999)

[13] Defrance J., Jean P., «Integration of the efficiency of noise barrier caps in a 3D ray tracing method. Case of a T-shaped diffracting device», Applied Acoustics 64(8), 765-780 (2003)

[14] Defrance J., Teytu M., Jean P. «Diffused sound reflection effect of non flat noise barriers», InterNoise, Istanbul, Turkey (2007)

[15] Baulac M., Defrance J., Jean P., Minard F. "Efficiency of low height noise protections in urban areas: Predictions and scale model measurements", Acta Acustica 92(4), 530-539 (2006)