

# ADRIENNE

## Une méthode européenne pour la qualification sur site des écrans antibruit

### Fabienne ANFOSSO-LÉDÉE

Ingénieur des travaux publics de l'État  
Section Acoustique routière et urbaine  
Division Gestion de l'entretien des routes  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées  
Centre de Nantes

### Massimo GARAI

Professeur  
Dipartimento di Ingegneria Energetica,  
Nucleare e del Controllo Ambientale  
Università di Bologna (Italie)

### Jean-Pierre CLAIRBOIS

Administrateur délégué  
Acoustical Technologies (A-Tech)  
Bruxelles (Belgique)

### RÉSUMÉ

« Adrienne » est une méthode issue d'un projet de recherche européen visant à mesurer *in situ* l'absorption et la transmission sonore de tout type de dispositif antibruit. Une méthode MLS (Maximum Length Sequence) est utilisée pour obtenir la réponse impulsionnelle de l'écran (mesure de l'absorption) avec un excellent rapport signal/bruit. De plus, la technique de soustraction améliore l'information en basses fréquences. Pour des écrans plans, la méthode a donné de très bonnes corrélations avec des modèles reconnus ou autres méthodes expérimentales. Pour les écrans non plans, des simulations numériques ont permis de définir une méthodologie basée sur un moyennage des résultats obtenus pour plusieurs positions de source et de récepteurs. Les comparaisons mesures/calculs obtenues sont encourageantes. Des essais croisés sur un mur expérimental ont permis de valider en outre la reproductibilité de la méthode.

**MOTS CLÉS :** Bruit - Route - Mesure - Essai - Écran antibruit - Absorption - Véhicule - *In situ* - Diffraction - Réflectivité - Onde - Europe - Transmission (transfert) - Diminution - Analyse comparative interlaboratoire.

### Introduction

« Adrienne » est née de la rencontre entre des experts du CEN (Comité européen de normalisation) et des chercheurs de plusieurs laboratoires, le tout avec le soutien de l'Union Européenne (DG XII). Sous ce joli nom se cache en fait une méthode expérimentale destinée à qualifier sur site les performances acoustiques intrinsèques des dispositifs de réduction du bruit routier.

Il est reconnu par la communauté internationale que les écrans antibruit sont des outils efficaces de lutte contre le bruit routier et qu'il faut encourager leur utilisation [1]. Leur efficacité dépend essentiellement de paramètres géométriques tels que la hauteur, la longueur ou la position relative à la route, mais il faut pour cela que la transmission sonore à travers le matériau ne soit pas trop importante. Il est également admis que l'emploi de matériaux absorbants pour ces écrans présente un intérêt dans certains cas : ils réduisent les renforcements sonores dus aux réflexions multiples entre deux écrans en vis-à-vis ou entre un écran et la caisse de véhicules volumineux. Il est donc important de disposer d'une méthode permettant de quantifier l'absorption acoustique des écrans et de vérifier que la transmission sonore au travers de ceux-ci est limitée.

De plus, si l'on souhaite vérifier ces grandeurs sur l'ouvrage réellement construit, ou si l'on souhaite suivre leur évolution dans le temps, il est important que la méthode puisse se pratiquer *in situ*. Pour ces raisons, le CEN/TC226/WG6 « Équipements de la route - Dispositifs de réduction du bruit » a inscrit dans son programme la rédaction d'une norme définissant une telle méthode. Un consortium de neuf partenaires européens s'est constitué afin de développer cette méthode baptisée provisoirement « Adrienne ». L'objet de cet article est de décrire les différentes étapes ayant abouti à définir la méthode, de présenter les principaux résultats et d'en apprécier les perspectives.

## Contexte et objectifs de la méthode

### Contexte normatif

Si la caractérisation *in situ* des écrans antibruit est clairement réclamée, elle ne fait pas actuellement partie des pratiques européennes. Plusieurs pays européens se contentent de tester en laboratoire le matériau utilisé pour l'écran antibruit : on mesure en salle réverbérante l'absorption et la transmission du son par un échantillon d'écran, avec la même procédure que celle utilisée pour qualifier les cloisons et plafonds utilisés dans un bâtiment. Cette méthode fait d'ailleurs l'objet d'une norme européenne [2]. Son inconvénient majeur est de ne pas tester un écran dans des conditions représentatives de son fonctionnement : en réalité, l'écran antibruit n'est pas soumis à un champ sonore réverbéré diffus (le son provient de toutes les incidences) comme en laboratoire, mais à un champ libre provenant des véhicules circulant sur la voie. De plus, contrairement à une méthode *in situ*, la mesure en laboratoire ne permet pas de détecter les défauts de mise en œuvre sur l'ouvrage en place (fuites acoustiques aux jonctions, fentes, etc.).

Seule la France pratique des mesures de réception d'ouvrage antibruit *in situ* et s'appuie sur une méthode faisant l'objet d'une norme nationale [3]. Cette méthode basée sur une technique impulsionnelle n'a cependant pas été retenue par les experts européens. Les raisons invoquées sont :

- l'utilisation pour générer l'impulsion sonore d'un pistolet qui délivre un signal trop peu répétable,
- une réponse trop limitée en hautes et basses fréquences,
- et la restriction de la méthode aux écrans relativement plans (décrochements inférieurs à 10 cm).

### Objectifs de la méthode

■ L'**objectif essentiel** du projet est donc de développer une méthode permettant de caractériser *in situ* les propriétés d'absorption et de transmission acoustique de tout type d'écran antibruit installé au bord d'une route. La mesure de transmission posant *a priori* moins de problèmes physiques et métrologiques, les efforts se sont concentrés sur la caractérisation de l'absorption acoustique. C'est d'ailleurs de l'absorption dont il sera principalement question dans cet article.

■ La **première qualité** recherchée pour la méthode est d'être **réaliste**, en traduisant les performances de l'écran en absorption et transmission dans des conditions représentatives des conditions réelles d'utilisation. En particulier, les incidences de source doivent être géométriquement représentatives d'un trafic routier circulant à proximité de l'écran, et les fréquences de mesure considérées devront correspondre à celle du spectre de bruit routier : du tiers d'octave centré sur 100 Hz à celui centré sur 5 kHz.

■ Un **autre objectif important** de cette méthode est d'être **valable pour tous les types de dispositifs de réduction du bruit routier**, sans se limiter aux seuls écrans droits et plans. En effet, le terme « écran » englobe également des structures particulières, telles que des buttes, des écrans végétalisés ou de formes complexes, toutes d'un grand intérêt architectural, économique ou écologique, et couvrant une partie non négligeable du marché. Il est impératif de pouvoir tester ces structures au même titre qu'un écran plan classique, et de leur permettre ainsi de circuler librement dans le marché européen.

■ Par ailleurs, la **méthode développée** doit être **opérationnelle sur site**. Ceci implique qu'elle soit portable, facile et rapide à mettre en œuvre, qu'elle s'adapte à toutes configurations de terrain, et surtout qu'elle soit peu sensible aux perturbations extérieures : bruit de fond, bruit et perturbations aérodynamiques du trafic avoisinant, météorologie, etc.

La durée du projet débuté en 1995 était fixée à trois ans [4, 5]. La coordination administrative et scientifique était assurée par la Société ATech (Bruxelles, Belgique). Cinq laboratoires avaient pour rôle de développer la méthode, définir le matériel nécessaire, la méthodologie et le post-traitement : IBP (Stuttgart, Allemagne), ENTPE (Lyon, France), DIENCA (Université de Bologne, Italie), CSTB (Grenoble, France), LCPC (Nantes, France). Trois autres laboratoires devaient valider la méthode et tester son applicabilité : Instituto de Acustica (Madrid, Espagne), FIGE (Herzogenrath, Allemagne), CEDIA (Université de Liège, Belgique).

## Le choix d'une méthode impulsionnelle : MLS

### Critères de choix et sélection de la méthode

Plusieurs types de méthode ont été considérés. Le choix d'une méthode de type transitoire s'est rapidement imposé. En effet, si l'on utilise un signal sonore continu, il est impossible, par une simple mesure de pression sonore, de séparer la partie réfléchiée par le sol de celle réfléchiée par l'écran. Le signal reçu est un mélange entre toutes ces réflexions et/ou diffractions, ce qui ne répond pas à l'objectif de caractériser l'écran uniquement. L'intensimétrie acoustique, qui consiste à mesurer un flux d'énergie sonore autour d'un objet, permettrait de distinguer l'énergie réfléchiée par l'écran. Mais cette méthode nécessite une mesure de différence de phase entre deux microphones, ce qui, du fait des turbulences existant en milieu extérieur, s'avère extrêmement délicat et peu fiable, notamment aux basses fréquences. De plus, elle suppose une stationnarité du bruit de fond, ce qui est rarement vérifié au bord d'une route.

Une méthode transitoire consiste à envoyer une impulsion sonore devant l'écran. Un microphone, placé entre la source et l'écran, capte l'onde incidente puis, quelques instants plus tard, l'onde qui a subi une réflexion sur l'écran (fig. 1).

Le signal de pression sonore  $p(t)$  obtenu au microphone (réponse impulsionnelle de l'écran) est ensuite analysé : les ondes incidente et réfléchiée sont séparées entre elles et du reste du signal par fenêtrage (fig. 2).

Puis le contenu du signal dans chacune de ces fenêtres est analysé dans le domaine fréquentiel par transformée de Fourier. Le facteur de réflexion peut être établi pour une fréquence  $f$ , comme étant le rapport entre les modules de la pression réfléchiée et de la pression incidente, corrigé par l'atténuation géométrique  $K_r$  (rapport des distances parcourues par l'onde réfléchiée et l'onde incidente) :

$$r(f) = \frac{F[p(t) \cdot w_r(t)]}{F[p(t) \cdot w_i(t)]} K_r$$

où

- $F$  représente la transformée de Fourier,
- $w_i$  et (resp.  $w_r$ ) sont les fenêtres d'analyses pour l'onde incidente (resp. réfléchiée).

D'autres types de signaux ont été considérés, Gauss Impulse Technique (méthode impulsionnelle de Gauss), par exemple. Les signaux de type « tir au pistolet » ont été exclus d'emblée en raison de leur trop faible répétabilité. D'autres méthodes

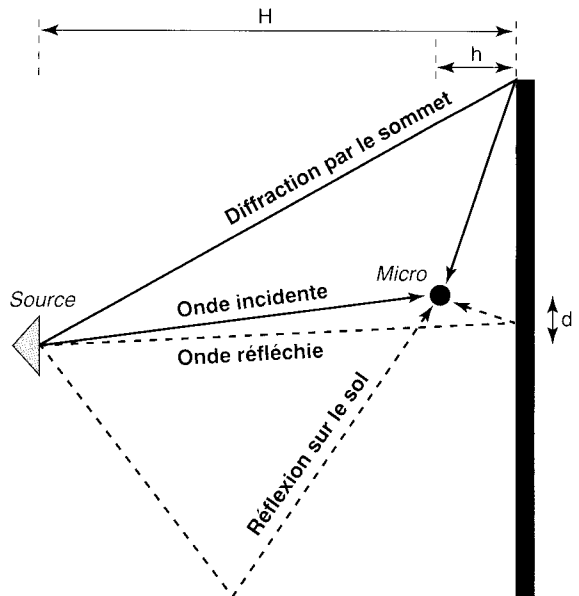


Fig. 1 - Principe d'une mesure impulsionnelle.

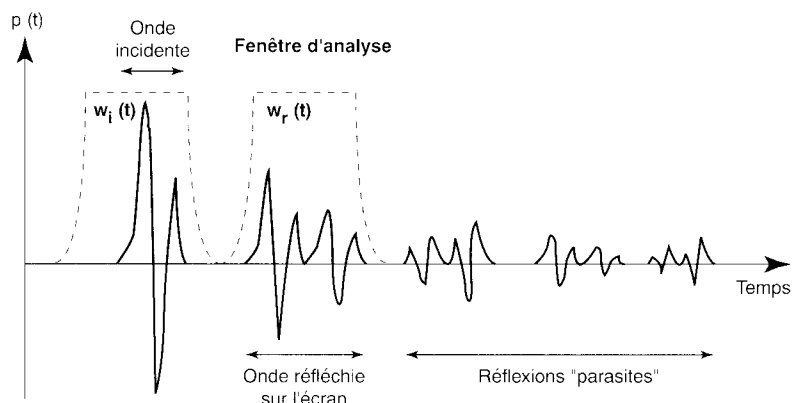


Fig. 2 - Exemple de réponse impulsionnelle acquise au microphone.

d'acquisition de réponse en fréquence ont également été envisagées, Time Delay Spectrometry (spectrométrie de retard de parcours), par exemple. C'est finalement la méthode « Maximum Length Sequence » (MLS) (séquence de longueur maximale) qui a été sélectionnée, principalement en raison de son excellent rapport signal/bruit [6].

### Principe de la méthode MLS

Un signal de type MLS (Maximum Length Sequence) est généré électriquement et envoyé dans le haut-parleur. Ce signal est constitué d'une séquence pseudo-aléatoire de valeurs binaires, générées de façon récursive par un registre digital à  $N$  étages [7].  $N$  est appelé l'ordre de la MLS. Le signal MLS est périodique, de période :

$$L = 2^N - 1$$

Une propriété importante de ce signal est de posséder un spectre quasi plat. En conséquence, pour chaque période, la fonction d'autocorrélation est pratiquement une fonction de Dirac. Une autre propriété est de présenter un bon rapport signal/bruit, sans nécessiter des facteurs de crête importants risquant de provoquer des non-linéarités.

La réponse du microphone au signal MLS envoyé par le haut-parleur est ensuite échantillonnée et périodiquement corrélée avec le signal généré : c'est grâce à cette opération que le rapport signal/bruit est élevé, puisque seule la partie cohérente du signal reçu avec ce qui a été émis est conservée. Le bruit de fond étant décorrélé du signal généré, il est en théorie totalement éliminé par l'intercorrélation (\*). En pratique, un bruit de fond résiduel peut persister et il convient de répéter plusieurs fois le cycle génération-échantillonnage-intercorrélation et faire la moyenne des réponses impulsionnelles obtenues afin d'améliorer le rapport signal/bruit. D'autres types de signaux synthétiques que la MLS auraient pu être utilisés, tels que des balayages en fréquence de courte durée (burst chirp).

(\*) En traitement du signal, on distingue, parmi les fonctions de corrélation, l'intercorrélation (cross-correlation) qui donne l'interspectre et l'auto-corrélation qui donne l'autospectre.

## Prise en compte des basses fréquences par une méthode de soustraction

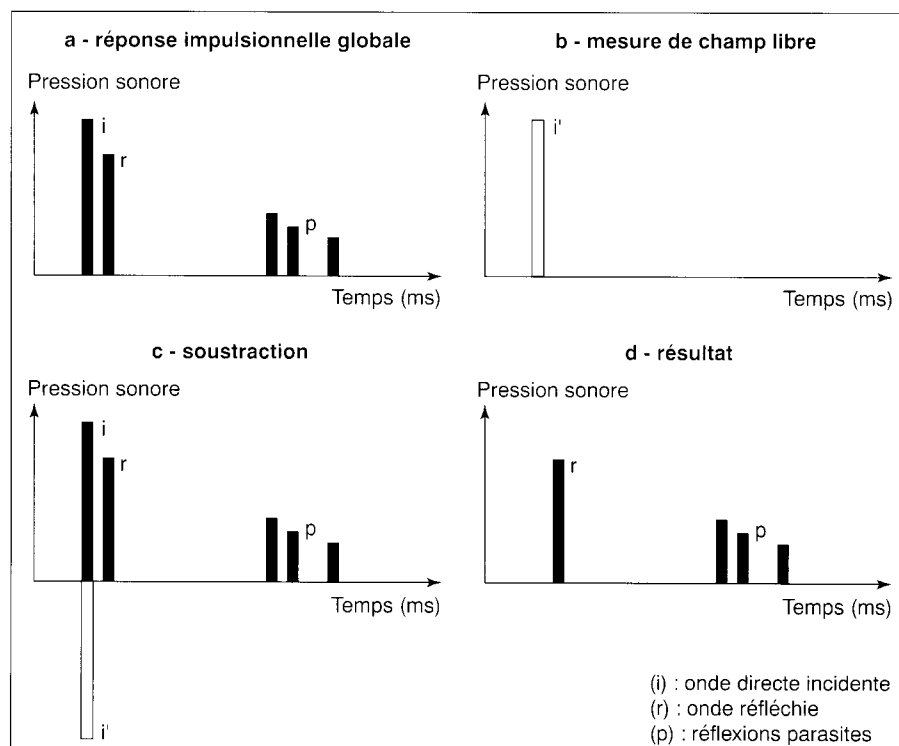
### La problématique des basses fréquences

La limitation de la méthode en basses fréquences résulte de la géométrie de la mesure. La réponse impulsionnelle de l'écran mesurée par le microphone fait apparaître l'onde incidente en provenance de la source, puis l'onde réfléchie par l'écran, que l'on doit séparer par fenêtrage d'un certain nombre de signaux inutiles pour nous, provenant de réflexions sur le sol ou de diffractions (cf. fig. 2). Or, plus la fenêtre d'analyse est grande dans le domaine temporel, plus le contenu en basses fréquences du signal transformé sera riche, pour une même fréquence d'échantillonnage : la fréquence minimale acceptée est estimée à l'inverse de la durée de la fenêtre d'analyse utilisée. Il faudrait donc, pour obtenir des résultats à 100 Hz, disposer d'une fenêtre d'analyse de 10 ms au moins, pendant laquelle aucune réflexion parasite n'apparaîtrait.

Si l'on considère une taille d'échantillon raisonnable (la méthode « Adrienne » a été développée pour une hauteur typique de 4 m), la seule solution pour éloigner ces réflexions parasites consiste à rapprocher le microphone le plus possible de la surface à tester.

**Fig. 3 - Schéma de principe de la technique de soustraction.**

*i* : onde directe incidente.  
*r* : onde réfléchie.  
*p* : réflexions parasites.



L'inconvénient est qu'alors l'onde incidente et l'onde réfléchie se rapprochent et ne peuvent plus être séparées par une fenêtre d'analyse de taille suffisante. Une solution cependant a été développée et appliquée avec succès par Mommertz [8] pour des applications en acoustique du bâtiment : la technique de soustraction.

### La technique de soustraction

Le principe est très simple. Il consiste à retrancher de la réponse impulsionnelle globale, la partie correspondant à l'onde incidente directe. Cette réponse impulsionnelle est constituée du signal incident, puis du signal réfléchi sur l'écran, pas nécessairement distinct du précédent si l'on se situe très près de l'écran, puis des signaux parasites (fig. 3a). On acquiert par ailleurs le signal incident (fig. 3b). En pratique, cette partie incidente doit être reproduite et mesurée strictement à l'identique avec la mesure devant l'écran, mais cette fois en l'absence de l'écran, et bien sûr de toute autre perturbation extérieure. Cette partie incidente est ensuite simplement soustraite de la réponse impulsionnelle globale (fig. 3c), ce qui laisse apparaître, dans le signal final, la partie réfléchie, puis les signaux parasites (fig. 3d).

L'intérêt de cette technique est de pouvoir se placer suffisamment près de l'écran pour éloigner les signaux parasites du signal réfléchi par l'écran, et donc de pouvoir analyser ce dernier pendant un temps suffisamment grand pour conserver l'information en basses fréquences. La principale contrainte est que, pour reproduire le signal incident avec une extrême précision, il est indispensable de conserver une position relative de la source et du microphone rigoureusement identique entre les deux mesures (distance, angle d'incidence, etc.).

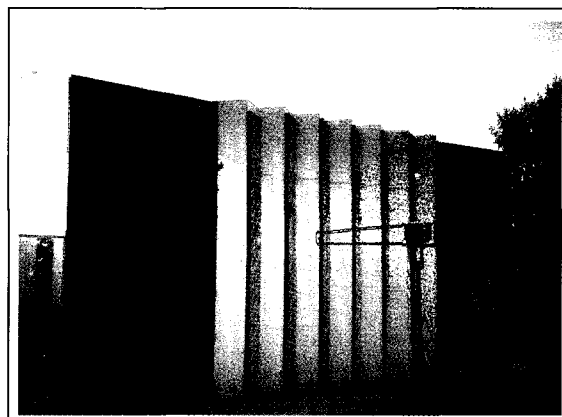
### Développement d'un matériel adapté

La source sonore est installée sur un pied de hauteur réglable, surmonté d'un support en acier en forme de « U » à l'intérieur duquel vient se fixer la caisse du haut-parleur (fig. 4a). Cette dernière peut alors effectuer des rotations verticales à l'intérieur du support, sur 300 degrés environ. De plus, le support pouvant pivoter dans l'axe du pied, une rotation complète du système dans le plan horizontal est assurée. De nombreuses incidences devant l'écran peuvent ainsi être envisagées, et il est possible de s'adapter à toutes les géométries d'écrans et de réaliser une mesure en champ libre sans déplacer le système, mais simplement en le faisant pivoter pour éloigner le microphone de l'influence de l'écran.

Le haut-parleur sélectionné est un JBL 2123H de 10 cm de diamètre, 250 W de puissance pour un bruit rose continu, sensibilité 101 dB à 1W/m,

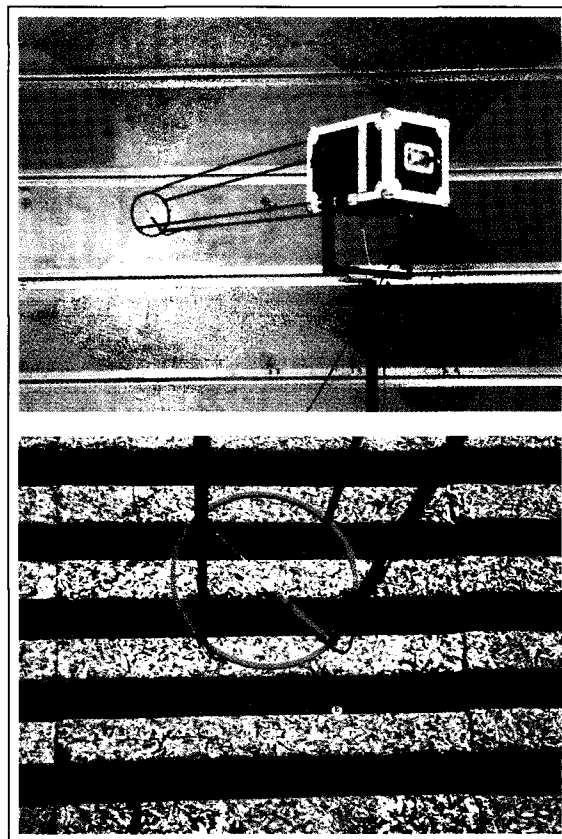
assurant une réponse en fréquences suffisamment plate dans la gamme de fréquences concernée (du tiers d'octave centré sur 100 Hz à celui centré sur 5 kHz).

Afin de garantir une position relative du microphone par rapport à la source rigoureusement identique d'une mesure à l'autre, il était nécessaire de concevoir un dispositif reliant physiquement les deux éléments. L'idée a été de monter le microphone sur un support relié à la caisse du haut-parleur par l'intermédiaire de quatre tubes (fig. 4). Le support du microphone est une fine tige métallique de 10 cm de long, formant le diamètre d'un anneau également métallique. C'est sur cet anneau que viennent s'insérer les quatre tubes dont les extrémités opposées sont introduites dans la caisse du haut-parleur.



**Fig. 4 -  
Matériel  
développé**

*a. Vue  
du système  
source +  
microphone  
placé à 1,5 m  
devant  
un écran  
de 4 m de haut.*



*b. Détail  
du microphone  
et de  
son support.*

Pour que le microphone ne dévie pas de l'axe du haut-parleur, il fallait que l'ensemble des éléments soit suffisamment léger, rigide et transparent d'un point de vue acoustique. Le choix s'est porté sur un microphone à électret de 4,75 mm de diamètre (Sennheiser type KE 4-211-2) en raison de sa légèreté (et de celle de la connectique associée) et de sa bonne réponse en fréquence, suffisamment plate dans la gamme de fréquences qui nous intéresse (fig. 5).

Les quatre tubes de 1,25 m de long ont été choisis en fibre de carbone pour la légèreté et la rigidité de ce matériau. Cette rigidité est renforcée par une légère précontrainte au niveau de l'anneau où les tubes sont plus rapprochés qu'au niveau du haut-parleur.

L'ensemble est piloté par un micro-ordinateur doté d'une carte d'acquisition numérique et d'un logiciel permettant l'émission de signaux MLS, la lecture des données acquises par la carte et le traitement de ces signaux. L'examen des réponses impulsionnelles est quasi instantané. Le traitement qui consiste en une soustraction, un fenêtrage puis l'analyse de Fourier est ensuite très rapide et permet une exploitation immédiate sur place.

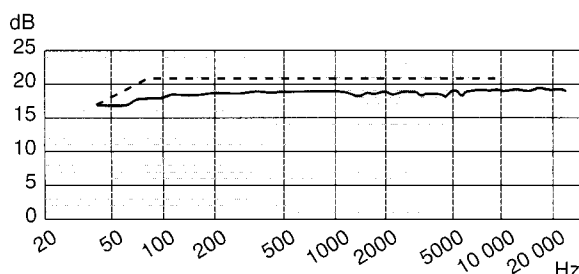


Fig. 5 - Réponse en fréquence du microphone Sennheiser type KE 4-211-2.

### Mise au point de la méthode

Un certain nombre d'essais préliminaires à la définition d'une méthode complète d'absorption ont été réalisés en laboratoire afin de mieux en définir les paramètres et de vérifier que les objectifs fixés initialement étaient remplis.

### Dispositions géométriques

Il existe un compromis entre la taille minimale de l'échantillon testé, les distances entre la source, le microphone et la surface de l'écran à tester, et ce afin de rester dans la gamme de fréquences souhaitée (cf. « La problématique des basses fréquences »). L'idéal serait de mesurer un échantillon le plus grand possible, mais la majorité des écrans routiers ne dépassant pas 4 m de haut, nous nous sommes limités à des échantillons de 4 m × 4 m. Ceci implique que l'ensemble source + microphone soit placé à 2 m de haut.

Le microphone est situé à 0,25 m de l'écran. La distance entre la source et le microphone est fixée à 1,25 m. Cette distance ne peut pas être trop importante pour garantir une rigidité suffisante du système de fixation source/microphone, mais elle ne peut pas non plus être trop courte afin que les signaux acquis ne soient pas perturbés par des réflexions parasites sur la caisse du haut-parleur.

### Paramètres de traitement de signal

#### Fréquence d'échantillonnage : $f_s$

La soustraction nécessite un sur-échantillonnage du signal de manière à faire coïncider parfaitement le maximum de l'onde incidente de la mesure d'absorption avec le maximum de l'onde incidente de la mesure en champ libre. Des tests ont montré que des erreurs pouvaient apparaître pour des fréquences d'échantillonnage relativement faibles (30 kHz) mais aucune différence significative n'est apparue entre 44 kHz et 75 kHz.

#### Fenêtre d'analyse

La définition de la fenêtre d'analyse résulte d'un certain nombre de compromis liés à la forme du signal (les maxima d'énergie arrivent brusquement), à la nécessité d'une fenêtre aussi grande que possible pour avoir une information consistante en basses fréquences, mais limitée par l'arrivée des réflexions parasites provenant du sol, des arêtes de l'écran ou de la caisse du haut-parleur. Finalement, la fenêtre utilisée est constituée d'une partie rectangulaire de 5,18 ms, fermée de part et d'autre par deux demi-fenêtres de Blackman-Harris, une fenêtre initiale de courte durée (0,5 ms), la finale plus longue (2,22 ms) (fig. 6). Par convention, le départ de la partie rectangulaire de la fenêtre (point D) est placé 0,2 ms avant le premier pic du signal à analyser. La longueur totale de la fenêtre est donc de 0,5 ms + 7,4 ms = 7,9 ms. Cette longueur permet d'éliminer les réflexions parasites d'un échantillon de 4 m × 4 m.

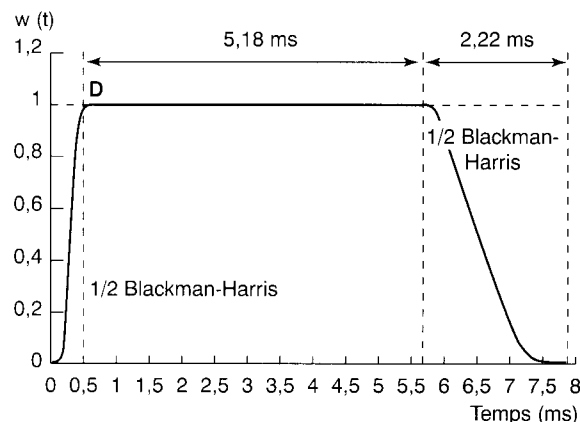


Fig. 6 - Fenêtre d'analyse spéciale « Adrienne ».

### Comparabilité de la méthode

Des mesures d'absorption en incidence normale sur échantillons de type laine de verre ou béton de bois ont montré une bonne corrélation avec des résultats de mesures obtenus au tube de Kundt, ou avec le modèle bien connu de Delany et Bazley, dans la gamme de fréquences commune. Un exemple pour un échantillon de laine de verre est présenté sur la figure 7.

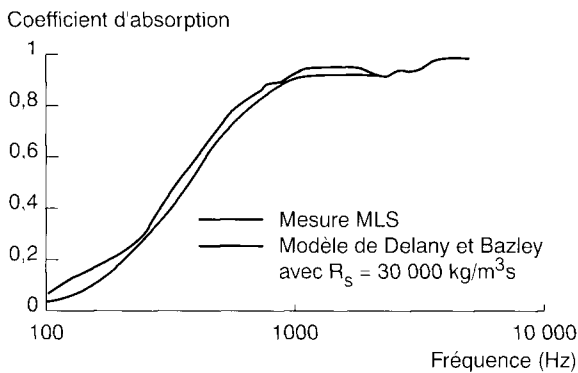


Fig. 7 - Coefficient d'absorption d'un échantillon de laine de verre. Comparaison mesure/modèle.

### Sensibilité aux facteurs externes

La sensibilité de la méthode a pu être testée en laboratoire. Des mesures effectuées en milieu bruyant ont montré la bonne immunité de la méthode au bruit de fond. Des mesures en présence de vent produit par un ventilateur, et sous différentes conditions de températures, ont montré des différences négligeables par rapport aux résultats en atmosphère stable et standard. La stabilité mécanique du système microphone + haut-parleur a également été testée en secouant légèrement le système. Aucune différence significative n'a été observée. À noter qu'en général les mesures acoustiques par mauvais temps (pluie ou vent supérieur à 5 m/s) sont fortement déconseillées.

Il convient d'ajouter que la précision requise pour la mesure des champs incident et réfléchi est moins importante pour estimer un fort coefficient d'absorption que pour un faible coefficient. À titre d'exemple, une erreur aléatoire sur le niveau sonore de 0,5 dB, provoque 50 % d'erreur sur l'estimation d'un coefficient d'absorption de 0,2, contre moins de 10 % d'erreur pour un coefficient de 0,7. La méthode étant en principe destinée au test d'échantillons absorbants, une précision courante pour la mesure de niveaux sonores en milieu extérieur est donc suffisante.

## Spécificités des écrans non plans

### Un champ acoustique interférentiel

Un objectif important recherché pour cette méthode était de pouvoir s'appliquer à tous les types d'écrans rencontrés, en particulier ceux pour lesquels aucune méthode de caractérisation n'existe à ce jour : les écrans fortement non plans ou présentant des hétérogénéités de matériaux. La difficulté apportée par les écrans à face non plane est que le champ réfléchi n'est plus régulier comme pour les écrans plans. Pour les fréquences les plus élevées, ou plus précisément pour des longueurs d'ondes petites par rapport aux non planités de l'écran, des réflexions multiples et des phénomènes de diffusion rendent interférentiel le champ acoustique devant l'écran. Il n'est donc pas concevable de faire une mesure du champ réfléchi en un seul point, pour une seule position de source, comme cela pouvait être fait pour les écrans plans.

On considère en fait qu'un écran à face non plane se comporte comme un écran à face plane en dessous d'une fréquence  $f_{\max}$  :

$$f_{\max} = \frac{c}{4e}$$

où

- $c$  (m/s) est la vitesse du son dans l'air,
- $e$  (m) est la profondeur de la non-planité [3].

Au-dessus de cette fréquence, le champ sonore devient interférentiel.

On voit donc que, pour utiliser la méthodologie définie ci-dessus (sous une seule incidence normale) jusqu'au tiers d'octave centré sur 5 kHz, dont la fréquence supérieure est 5 623 Hz, la face de l'écran ne doit pas présenter de décrochement de plus de 15 mm de profondeur...

### Simulations numériques du champ sonore réfléchi par un écran en « zigzag »

Une recherche plus théorique de la configuration du champ sonore réfléchi par un écran non plan a été menée. L'objectif était de savoir jusqu'à quelles distances s'étendent les interférences, si une grandeur significative de l'absorption par l'écran peut en être déduite, à partir de plusieurs points de mesure par exemple, et si oui combien de points sont nécessaires et quelles en sont les positions optimales. L'écran choisi pour ces investigations est un « zigzag » dont la géométrie est donnée sur la figure 8.

Une méthode d'éléments de frontières en dimension 2 a été utilisée pour effectuer ces modélisations, au moyen du code CÉSAR-LCPC [9]. Son principe repose sur la résolution numérique

## Simulations numériques du champ sonore réfléchi par un écran en « zigzag »

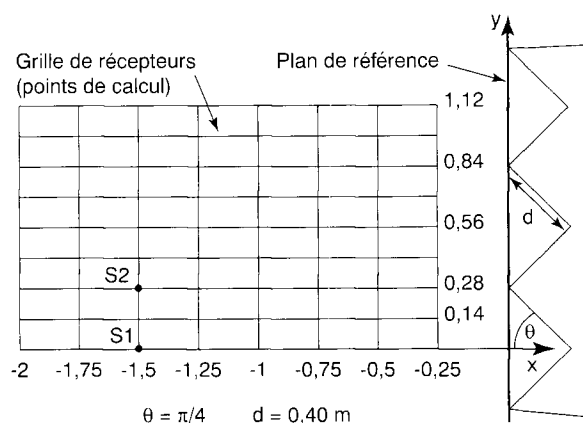


Fig. 8 - Géométrie de la face en « zigzag » simulée.

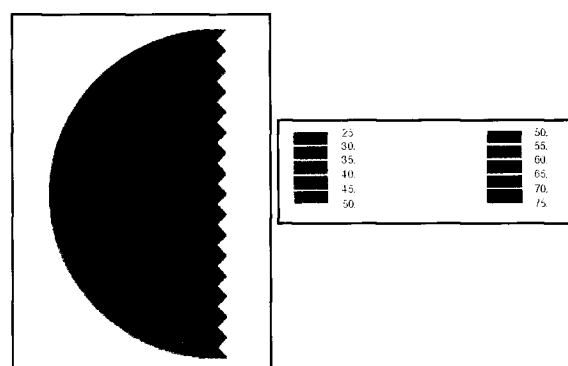


Fig. 9 - Calcul du niveau de pression réfléchi par un « zigzag » réfléchissant à 1 kHz (dB).

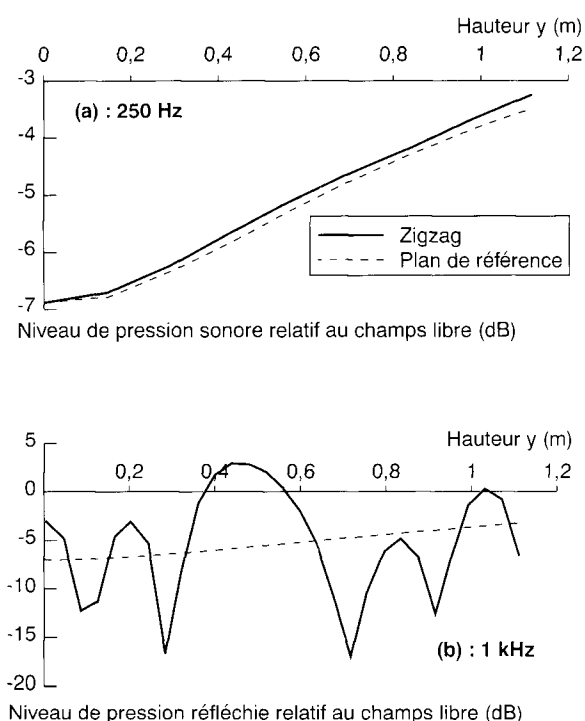


Fig. 10 - Niveau de pression réfléchi calculé à 1 m devant un « zigzag » réfléchissant pour des fréquences pures : (a) 250 Hz et (b) 1 kHz (source à 1,50 m).

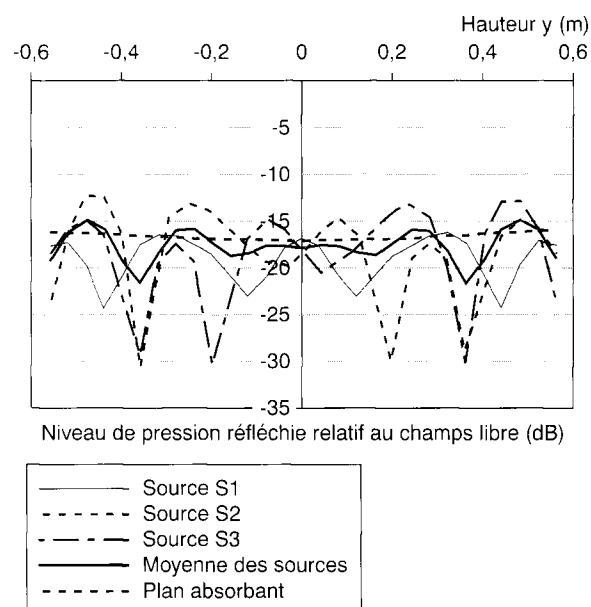


Fig. 11 - Niveau de pression sonore réfléchi relative au champ libre calculé à 1 m devant un « zigzag » absorbant, 1/3 octave 1kHz.

TABLEAU I  
Niveau de pression sonore réfléchi  
calculé à 0,5 m devant un « zigzag »  
réfléchissant 1/3 octave 1 kHz

Moyennes sur récepteurs	Source			Moyenne des sources
	S1	S2	S3	
	(dB)			(dB)
29 récepteurs (espacement $\approx \lambda/8$ )	74,2	75	75	74,8
15 récepteurs (espacement $\approx \lambda/8$ )	74,3	76,6	72,8	74,8
8 récepteurs (espacement $\approx \lambda/4$ )	74,3	76,5	73,2	74,9
4 récepteurs (espacement $\approx \lambda/2$ )	74,6	76,5	73,2	75
2 récepteurs (espacement $\approx \lambda$ )	74,7	75,6	74,1	74,8



par éléments finis de frontière d'une formulation intégrale du problème, qui permet de calculer le champ de pression en tout point de l'espace, dès lors qu'il est connu sur les frontières, c'est à dire sur les contours de l'écran. La résolution numérique du problème permet en outre d'envisager une géométrie de l'écran tout à fait quelconque et des propriétés locales d'absorption acoustique des matériaux variables.

Un exemple de résultat à 1 kHz est présenté sur la figure 9, sur laquelle est représenté le champ réfléchi devant l'écran en « zigzag » dont la géométrie a été définie sur la figure 8, et dont les matériaux ont des propriétés acoustiques de réflexion parfaite. Cette représentation montre que le champ est très interférentiel (malgré l'absence d'effet de sol dans le problème modélisé) et que ces interférences ne sont pas simplement localisées à proximité de la face de l'écran.

Outre ces résultats qualitatifs, les simulations ont été poursuivies pour chercher un éventuel indicateur pertinent à partir du niveau de pression réfléchi en plusieurs points de l'espace. Sur la figure 10 sont représentés les résultats de calcul du champ réfléchi par le « zigzag », calculé à 1 m devant le plan de référence de l'écran, pour une source linéique située à 1,50 m de ce plan. Les résultats sont comparés à ceux d'un écran parfaitement réfléchissant situé sur le plan de référence de l'écran équivalent, c'est-à-dire défini par les points les plus saillants du « zigzag ».

Ces résultats confirment qu'à 250 Hz, le champ réfléchi par l'écran « zigzag » est quasi identique à celui réfléchi par un plan de même matériau. À plus haute fréquence (ici 1 kHz), le champ réfléchi devient interférentiel. La fréquence limite entre les deux types de réaction est ici :

$$f_{\max} = c/4e = 300 \text{ Hz } (e = 28 \text{ cm})$$

L'idée retenue a été d'effectuer la moyenne quadratique de résultats en plusieurs points, ou avec plusieurs excitations. C'est d'ailleurs ce que prévoit la méthode normalisée française [3] au-delà de  $f_{\max}$ , lorsque l'écran ne peut plus être considéré comme plan.

De nombreuses simulations ont été effectuées pour tenter de dégager des critères pour ces moyennes. Un exemple est donné dans le tableau I pour l'écran « zigzag » parfaitement réfléchissant. La moyenne quadratique du champ sonore réfléchi est calculée en plusieurs récepteurs situés selon une droite parallèle à la face de l'écran, à 0,5 m de celle-ci. Selon le nombre de points récepteurs considérés, un espacement entre ces récepteurs est déterminé en fonction de la longueur d'onde. Ces calculs sont répétés pour trois positions verticales différentes de la source (S1, S2, S3). Enfin la moyenne quadratique pour ces trois sources est

calculée. On observe que, d'une source à l'autre, les résultats peuvent être très différents (jusqu'à presque 4 dB d'écart). Le moyennage aux points récepteurs n'est pas suffisant pour conduire à un résultat stable et représentatif, mais il doit être complété par un moyennage pour plusieurs positions de sources.

Les résultats de simulations sur écran « zigzag » en matériau absorbant sont plus réguliers et une convergence est obtenue avec moins de points récepteurs. Un exemple de lissage des résultats par moyennage sur plusieurs positions de source est montré sur la figure 11. Le champ réfléchi pour les trois positions de sources est représenté, ainsi que la moyenne quadratique qui lisse les courbes mais qui ne permet pas, malgré tout, de retrouver un résultat d'écran plan de même matériau.

Ces simulations numériques auront donc permis de vérifier la complexité du champ réfléchi, voire diffusé par un écran non plan. Du fait des interférences, nombreuses en haute fréquence, le niveau sonore réfléchi par un écran non plan peut s'avérer en certains endroits supérieur à celui réfléchi par un plan de même matériau et conduire théoriquement à un coefficient de réflexion supérieur à 1 (ce qui n'est pas très concevable physiquement). Le moyennage des niveaux sonores en plusieurs points récepteurs et pour plusieurs excitations permet d'obtenir une représentation plus homogène du champ acoustique.

### La problématique de l'atténuation géométrique

Jusqu'à présent, pour les écrans non plans, nous n'avons exprimé que le champ sonore réfléchi, c'est-à-dire le niveau de pression par rapport au champ libre incident. Ce niveau relatif est évidemment fonction de la position géométrique source/point récepteur/écran. Pour s'affranchir de cette dépendance, il faut introduire l'atténuation géométrique de l'onde et définir ainsi un coefficient de réflexion, de la même manière que pour les écrans plans.

L'onde parvenant au microphone après réflexion sur l'écran a parcouru plus de chemin que l'onde directe incidente. Elle a donc subi, en plus de l'absorption sur l'écran, une atténuation due à sa propagation de type sphérique. Il est donc nécessaire de connaître cette atténuation, dite géométrique, pour la séparer des effets d'absorption par l'écran. Dans le cas où la réflexion se produit de façon spéculaire sur une surface plane, l'atténuation géométrique  $K_r$  est facilement calculable avec les notations de la figure 1) :

$$K_r = \frac{d_r}{d_i} \sqrt{\frac{d^2 + (H + h)^2}{d^2 + (H - h)^2}}$$

Par contre, lorsque la surface de réflexion n'est pas plane, les chemins de propagation sont multiples et il n'est plus possible de calculer cette correction d'atténuation géométrique.

Une solution consiste à effectuer cette correction de façon continue sur la réponse impulsionnelle mesurée : la partie de signal arrivant sur le microphone à l'instant  $t$  a parcouru une distance  $d(t) = ct$ , où  $c$  est la vitesse du son dans l'air, et où l'on considère que le temps  $t = 0$  correspond au début de l'émission sonore par la source (fig. 12).

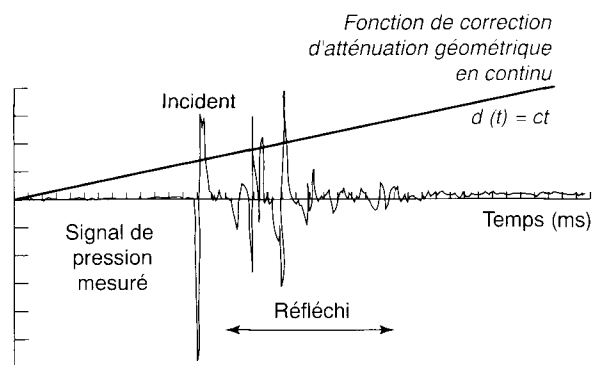


Fig. 12 - Réponse impulsionnelle type et correction d'atténuation géométrique appliquée.

Le coefficient de réflexion se calcule alors par :

$$r(f) = \frac{F [p(t) \cdot w_r(t) \cdot d_r(t)]}{F [p(t) \cdot w_i(t) \cdot d_i(t)]}$$

Cette expression est une généralisation de celle des écrans plans car dans ce cas, les pics d'énergie de l'onde incidente ou réfléchie sont suffisamment courts et le signal quasi nul en dehors de ces pics, pour approcher  $d_r(t)$  et  $d_i(t)$  par une valeur constante, égale à la distance parcourue par l'onde respectivement réfléchie et incidente.

Cette correction continue présente l'intérêt d'être plus exacte que le calcul théorique du trajet parcouru par l'onde mais, en revanche, exige une grande précision sur l'élimination des réflexions parasites tardives car elle tendrait à renforcer l'importance de leur contribution.

## Les essais croisés de validation

### Description de l'écran expérimental

Afin de tester réellement la méthode, un mur expérimental a été construit sur le site du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) à Grenoble. Ce mur a été conçu pour permettre d'accueillir des échantillons d'écrans « classiques » en absorption (plan réfléchissant, plan absorbant et absorbant faiblement non plans) et d'autres moins traditionnels (« zigzag » fortement non plan) ne pouvant être testés par aucune autre méthode, et

présentant par ailleurs des performances en transmission sonore faible, moyenne et forte. Le mur peut recevoir six échantillons d'écrans de 4 m de large sur 4 m de haut, répartis en trois modules (fig. 13a). Chaque module est séparé du voisin par un parement de 2 m de large en parpaings de béton. Des parements identiques ont été placés aux extrémités de l'écran pour éviter les effets de bord (fig. 13b et 13c). Au total, six écrans peuvent être testés en absorption et trois en transmission.

■ L'échantillon central est constitué de deux panneaux plans en Plexiglas, matériau de propriétés acoustiques totalement réfléchissantes et de transmission sonore moyenne à relativement élevée à la jonction entre les panneaux.

■ L'échantillon de droite est un écran constitué de caissons métalliques remplis de laine minérale et protégés en face avant par une plaque métallique perforée (« Mice »). Ce type d'écran est considéré comme plan et absorbant sur sa face avant.

■ Enfin, la troisième partie est recouverte d'un côté par des dalles de béton de bois et de l'autre côté par un prototype de « zigzag » en bois. Le béton de bois est un matériau de propriétés acoustiques absorbantes, et les dalles présentent une face faiblement non plane, avec des ondulations de 10 cm de profondeur. Le « zigzag » est un prototype construit par assemblage de panneaux en bois peints, selon les dimensions définies pour la modélisation (cf. fig. 8). Il constitue donc un parement fortement non plan, qui peut être totalement réfléchissant si utilisé brut, très absorbant si tous les panneaux sont recouverts de laine minérale, ou partiellement absorbant si une partie seulement des panneaux est recouverte. La transmission sonore est extrêmement faible à travers cette troisième partie.

Tous ces tests ont été réalisés successivement et indépendamment par les huit laboratoires. Trois systèmes différents d'acquisition et de traitement du signal ont été utilisés, l'équipement acoustique haut-parleur et microphone étant de même conception.

## Procédures de mesure

### Mesure d'absorption

Les conditions géométriques décrites précédemment sont adoptées (cf. « Mise au point de la méthode »). Une moyenne des résultats en neuf positions de capteurs est effectuée. Pour des raisons pratiques, ces positions sont définies à égale distance du haut-parleur, en effectuant une rotation autour de celui-ci. Ainsi les neuf positions correspondent à des rotations du système haut-parleur + microphone de - 40 degrés à + 40 degrés par rapport à la normale à l'écran (0 degré), avec un point d'acquisition tous les 10 degrés (fig. 14).

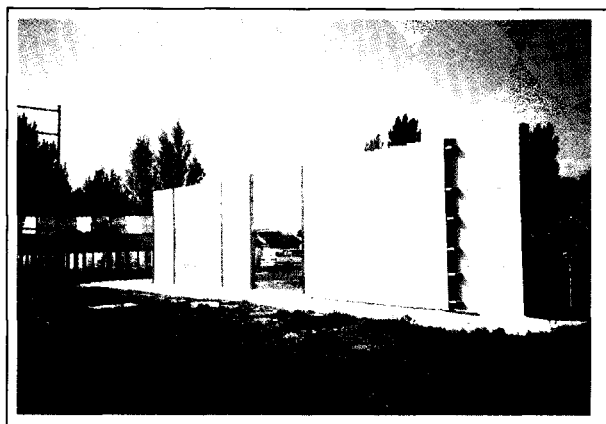
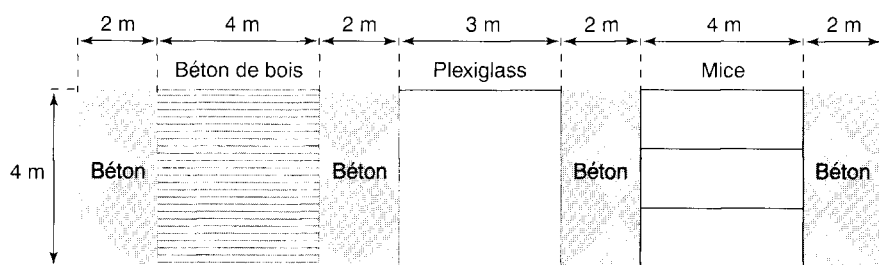
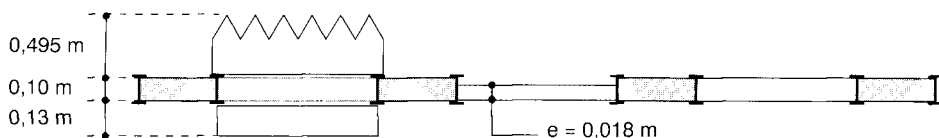


Fig. 13 - Le mur expérimental

a. Vue de la face ouest.



b. Schéma de la face est.



c. Vue de dessus.

Ecran

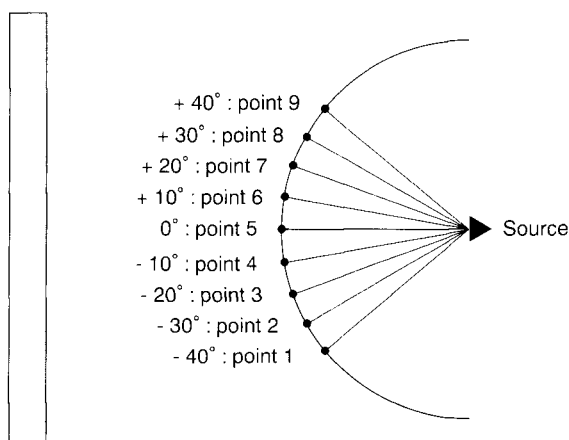


Fig. 14 - Les neuf points de mesure relatifs à une position de source pour la mesure d'absorption.

Lorsque l'écran est plan, une seule rotation est nécessaire. Lorsque l'écran est non plan ou non homogène, plusieurs rotations correspondant à des positions de source différentes sont effectuées.

Ainsi, pour l'écran « zigzag » par exemple, trois rotations sont effectuées, pour des positions de source respectivement face à un pic, face à un creux et entre les deux. Pour prendre en compte ces différentes mesures, on détermine un indice moyen RI (pour Reflection Index) défini par bande de tiers d'octave par :

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\int_{\Delta f_j} |F[d_r(t) \cdot p_{r,k}(t) \cdot w_r(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[d_i(t) \cdot p_i(t) \cdot w_i(t)]|^2 df}$$

où

- n est le nombre total de points récepteurs,
- $\Delta f_j$  est la jème bande de tiers d'octave (parmi les dix-huit bandes entre 100 et 5 kHz),
- F indique la transformée de Fourier,
- $p_i$  est la pression incidente mesurée en champ libre,
- $p_{r,k}$  est la pression réfléchie mesurée au kème point,

- $d_i$  (resp.  $d_r$ ) est la fonction continue de correction d'atténuation géométrique de l'onde incidente (resp. réfléchi),
- $w_i$  (resp.  $w_r$ ) est la fenêtre temporelle d'analyse du signal incident (resp. réfléchi) (cf. fig. 6).

Les moyennes effectuées sur les différentes positions source/microphone permettent de caractériser une partie significative de l'écran (taille de l'échantillon) à partir de la réponse d'une partie très localisée de l'écran (ce qui est physiquement réfléchi dans la période de la fenêtre d'analyse). Un indice unique peut aussi être défini de façon classique [2] sur l'intégralité du spectre, par référence à un spectre type de bruit routier.

### Mesure de transmission

Pour la mesure de transmission sonore, le même principe est utilisé. Un signal MLS est généré devant l'écran. Un microphone placé de l'autre côté de l'écran relève le signal temporel, dans lequel apparaît l'onde transmise, puis l'onde diffractée par l'arête supérieure de l'écran et d'autres contributions. L'onde transmise est extraite du signal par fenêtrage, puis analysée dans le domaine fréquentiel. Le microphone est suffisamment proche de l'écran (0,25 m) pour séparer plus facilement l'onde transmise du reste du signal. Afin de prendre en compte les éventuelles hétérogénéités de l'écran, une moyenne sur neuf positions de microphone est effectuée (fig. 15).

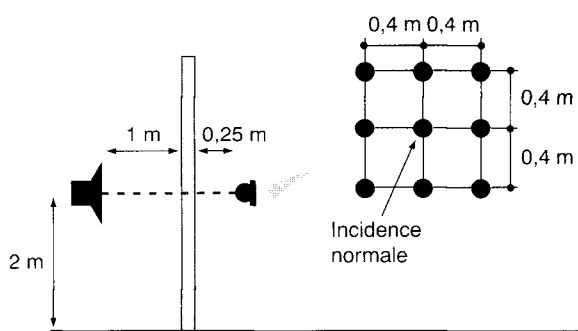


Fig. 15 - Schéma de principe de la mesure de transmission sonore.

Pour définir la transmission, il est nécessaire de se référer à une mesure de champ libre que l'on effectuera, par ailleurs, en un endroit non perturbé par des surfaces ou obstacles. Contrairement à la mesure d'absorption, il n'est pas nécessaire de conserver une distance strictement identique entre les mesures de transmission et celle de champ libre, car on n'effectue pas de soustraction. Il suffit de corriger l'atténuation géométrique de l'onde sonore par le rapport des distances source / microphone parcourues par les ondes transmises et

champ libre. On détermine ainsi un indice d'isolation sonore SI (pour Sound Insulation Index) défini par bande de tiers d'octave par :

$$SI(\Delta f_j) = -10 \lg_{10} \left( \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\Delta f_j} |F[p_{t,k}(t) \cdot w_i(t)]|^2 df \left(\frac{d_k}{d_0}\right)^2}{\int_{\Delta f_j} |F[p_i(t) \cdot w_i(t)]|^2 df} \right)$$

où

- $n$ ,  $\Delta f_j$ ,  $F$  et  $p_i$  sont définis comme pour l'absorption,
- $p_{t,k}$  est la pression transmise mesurée au même point,
- $d_0$  (resp.  $d_k$ ) est la distance entre la source et le microphone pour la mesure de champ libre (resp. de transmission au même point),
- $w_i$  (resp.  $w_t$ ) est la fenêtre temporelle d'analyse du signal incident (resp. transmis).

De la même manière que pour l'absorption, un indicateur global faisant référence à un spectre type de bruit routier peut être défini [2].

### Résultats des essais

De ces essais croisés, un certain nombre d'enseignements peuvent être tirés, relatifs aux objectifs de départ. Tout d'abord, de l'avis général, la méthode est relativement facile et rapide à mettre en œuvre, du moins dans un site bien maîtrisé (il restera à tester la véritable commodité de la méthode sur site routier réel). Son immunité au bruit de fond a pu être vérifiée, les bruits avoisinants de tondeuse à gazon et autres bruits industriels n'ayant pas perturbé les mesures.

### Plexiglas

Les résultats obtenus sont cohérents tant en absorption qu'en isolation. Ainsi, par exemple, le facteur de réflexion de l'écran de Plexiglas est voisin de 1. De même, la mesure de transmission sonore a montré qu'il était possible de détecter des fuites. En effet, l'échantillon était détérioré à proximité d'une jonction de poteau. La différence entre la mesure d'isolation au droit du poteau et la mesure au centre de l'échantillon permet de visualiser nettement cette fuite (fig. 16). Mais même au centre de l'échantillon, cette fuite est détectable dans la réponse impulsionnelle et, en adaptant la longueur de fenêtre, il est possible de la supprimer de l'analyse (courbe rouge). On retrouve alors très bien les résultats théoriques de la loi de masse.

Pour les autres échantillons tels que « Mice » et dalles de béton de bois, les résultats se sont montrés également cohérents avec ce qui était connu avec la méthode AFNOR, par exemple, tant en isolation qu'en absorption.

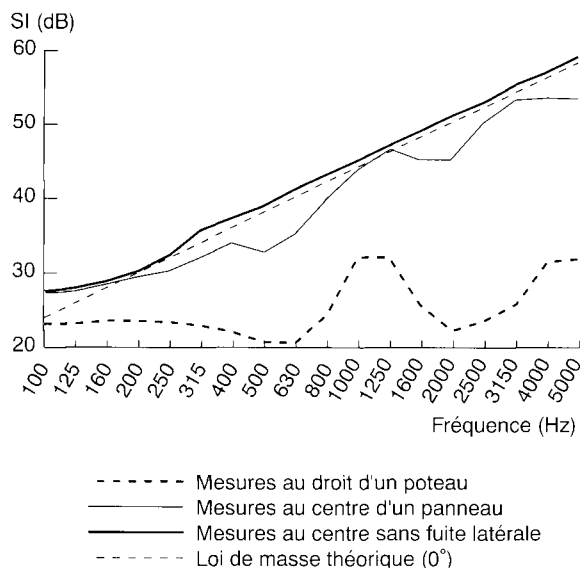


Fig. 16 - Détection de fuite en transmission à travers l'écran plexiglas. Mesures au droit d'un poteau, au centre d'un panneau, au centre sans fuite latérale, et loi de masse théorique (0°).

### « Zigzag »

Pour l'écran fortement non plan (« zigzag »), les résultats sont cependant plus délicats à interpréter, d'autant qu'il n'existe pas d'autre méthode servant de référence. Dans le cas du « zigzag » parfaitement réfléchissant, comme le prévoyaient les simulations numériques, le caractère fortement interférentiel du champ réfléchi par l'écran conduit à des mesures de niveau réfléchi localement plus élevé que le niveau incident, ce qui se traduit par un facteur de réflexion supérieur à 1. Ce résultat se retrouve aussi bien par la mesure que par les simulations (fig. 17). La comparaison entre les mesures et les calculs présente des écarts certains, mais les tendances sont cependant bien retrouvées, comme le montre la figure 18 pour les trois configurations d'écran « zigzag » : totalement réfléchissant, totalement recouvert d'absorbant et à moitié recouvert d'absorbant.

Ces écarts peuvent néanmoins s'expliquer. En basses fréquences, la méthode « Adrienne » n'est théoriquement pas applicable telle quelle en dessous de 250 Hz en raison de :

- la longueur limitée de la fenêtre d'analyse (7.4 ms),
- la rotation du microphone, qui force à rapprocher ce dernier des bords de l'échantillon testé.

Nous ne considérerons donc que les résultats au-dessus de 250 Hz. Ailleurs, les calculs ont globalement tendance à surestimer le facteur de réflexion. Cela peut s'expliquer par une plus grande sensibilité des calculs aux interférences, qui se produisent à des fréquences précises en des points très précis et pour lesquelles le découpage en éléments de frontière est très influent sur l'application des conditions aux limites. Les

mesures en principe intègrent mieux ces interférences du fait de la taille du microphone et de la source, qui sont des surfaces vibrantes et non des points. L'écart mesure/calcul peut être également dû à la considération différente de l'atténuation géométrique : les mesures corrigent en continu cette atténuation, comme expliqué précédemment ; les calculs font une correction forfaitaire qui correspond à une réflexion spéculaire du son sur le plan de référence. La conséquence est que les calculs surestiment les réflexions précoces et sous-estiment les réflexions tardives. Enfin, en hautes fréquences, l'augmentation de l'écart entre les mesures et le calcul peut aussi être attribué à la directivité du haut-parleur qui a pour effet de sous-estimer la réflexion.

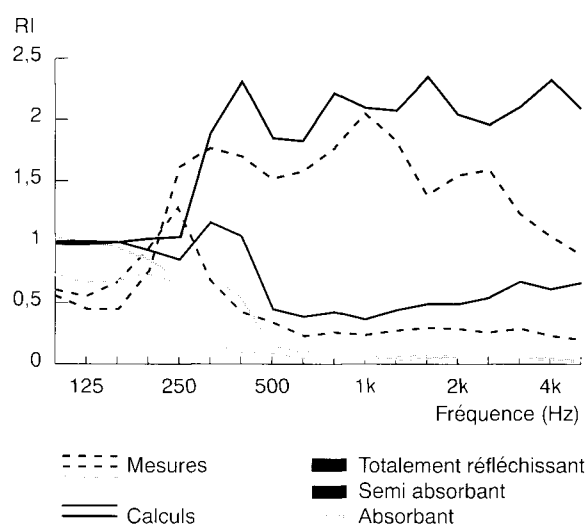


Fig. 17 - Comparaison mesure/calcul pour l'absorption de l'écran « zigzag ».

### Reproductibilité

Enfin, sur l'ensemble des mesures réalisées pas les huit laboratoires, une bonne reproductibilité a été constatée. L'exemple de la mesure d'absorption sur l'échantillon de dalles de béton de bois est présenté sur la figure 18. Si l'on ne considère que les résultats au-dessus de 250 Hz, les écarts sont faibles à l'exception d'un laboratoire vers 1 kHz. Pour les autres échantillons, les écarts entre laboratoires sont également faibles à partir de 250 Hz, même dans le cas plus délicat du « zigzag » réfléchissant, où ils restent acceptables. Ceci peut se confirmer par l'examen des valeurs globales.

### Résultats globaux

Les résultats de mesure de tous les laboratoires sur tous les échantillons sont regroupés en valeurs globales  $DL_{R1}$  et  $DL_{S1}$  exprimés en décibels (dB) sur l'ensemble du spectre à partir de 250 Hz (soit sur 14 tiers d'octave).

$$DL_{RI} = -10 \lg_{10} \left| \frac{\sum_{j=1}^{14} RI(\Delta f_j) 10^{0,1 L_j}}{\sum_{j=1}^{14} 10^{0,1 L_j}} \right|$$

et

$$DL_{SI} = -10 \lg_{10} \left| \frac{\sum_{j=1}^{14} 10^{-0,1 SI(\Delta f_j)} 10^{0,1 L_j}}{\sum_{j=1}^{14} 10^{0,1 L_j}} \right|$$

Les  $L_j$  sont les valeurs par tiers d'octaves d'un spectre de référence normalisé de bruit routier que l'on trouvera en [2]-partie 3. Plus l'écran est absorbant, plus le  $DL_{RI}$  est élevé. Plus il est isolant, plus le  $DL_{SI}$  est élevé.

Ces résultats regroupés dans le tableau II montrent que les indicateurs définis sont cohérents et que la méthode présente une bonne reproductibilité.

Pour la réflexion et à l'exception du « zigzag » réfléchissant, les résultats globaux sont logiques, et cohérents entre laboratoires. Pour le « zigzag » réfléchissant, les valeurs négatives de l'indice ne sont pas réalistes, mais le problème a déjà été évoqué précédemment.

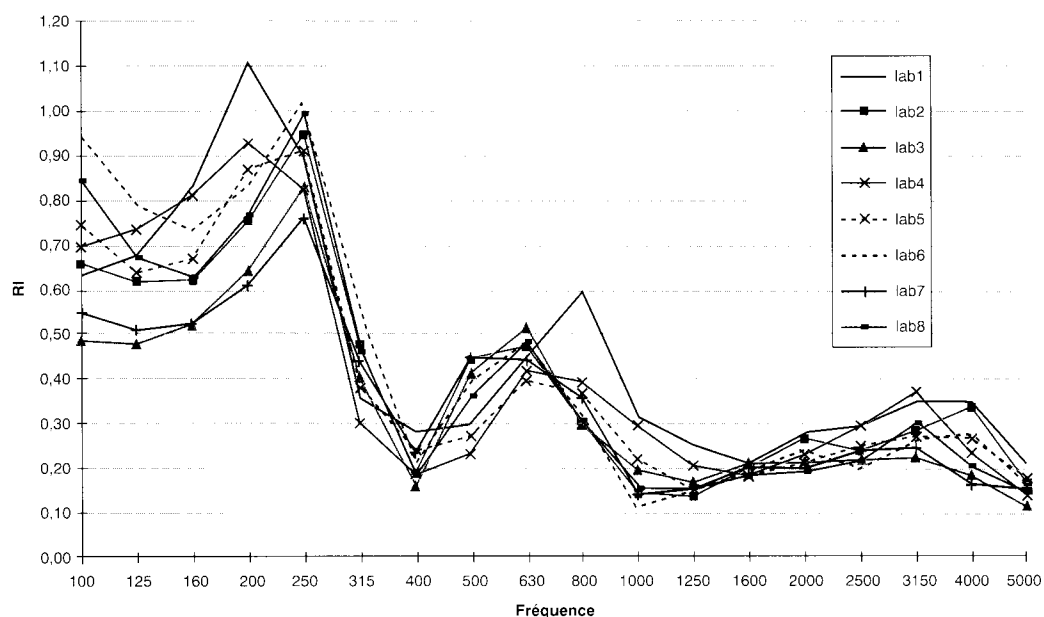


Fig. 18 - Comparaison entre les huit laboratoires des mesures de réflexion sur dalles de béton de bois.

TABLEAU II  
Résultats globaux (spectre à partir de 250 Hz) des essais croisés

Échantillon	Laboratoire							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Indice global de réflexion ( $DL_{RI}$ ) (dB)								
Plexiglas	1	0	0	0	0	0	0	1
Mice	6	6	6	7	6	6	6	6
Béton de bois	4	6	6	5	6	6	6	6
« Zigzag » réfléchissant	-2	-4	-2	-2	-2	-2	-2	-3
« Zigzag » absorbant	12	**	12	11	12	11	10	12
« Zigzag » semi-absorbant	5	**	5	5	5	5	5	5
Indice global d'isolation (centre des panneaux) ( $DL_{SI}$ ) (dB)								
Plexiglas	39	39	40	38	39	37	41	39
Mice	45	45	43	45	44	43	43	45
« Zigzag » + béton + béton de bois	63	64	64	69	56	52	74	59
Indice global d'isolation (au droit des poteaux) ( $DL_{SI}$ ) (dB)								
Plexiglas	**	26	25	24	24	25	25	24
Mice	**	31	32	31	33	31	33	33
« Zigzag » + béton + béton de bois	**	41	40	44	39	42	46	41

Pour l'isolation, les valeurs globales sont conformes aux performances attendues, notamment au droit des poteaux où les indices sont plus faibles. La corrélation entre les laboratoires est en général très bonne. Les écarts notés pour le Plexiglas s'expliquent probablement par la présence de fuites qui provoquent des erreurs : le signal diffracté est perturbé par les fuites, ce qui peut modifier la longueur de la fenêtre d'analyse du signal transmis. Les écarts importants pour l'écran « zigzag » + béton + dalles de béton de bois sont dus à la très faible transmission par ce

complexe : le signal transmis est si faible, malgré l'excellent rapport signal/bruit de la MLS, que la mesure est erronée. Il n'est pas choquant d'annoncer que la méthode ne permet pas de mesurer des indices d'isolation supérieurs à 50 dB : le but de la méthode est de vérifier que l'indice d'isolation est suffisamment élevé (c'est-à-dire la transmission faible) pour que seule la diffraction par le sommet conditionne l'efficacité de l'écran. Que l'indice d'isolation de l'écran soit de 50 dB ou davantage ne modifie pas le niveau sonore perçu derrière l'écran.

## Conclusions et perspectives

L'utilisation de la méthode MLS pour la mesure *in situ* des propriétés d'absorption et d'isolation sonores des écrans antibruit offre de bonnes perspectives. Ses principales qualités sont l'excellente immunité au bruit de fond, sa répétabilité, la rapidité de la mesure et des procédures d'analyse. De plus, l'introduction d'une technique de soustraction a permis de fournir des résultats à partir de 250 Hz. Les bons résultats des essais croisés laissent préjuger de la fiabilité de la méthode. Dans le cas des écrans plans, les mesures ont conduit à des résultats cohérents : bonne corrélation avec des prévisions théoriques ou d'autres méthodes de mesure lorsqu'elles existent.

La méthode « Adrienne » est très proche dans ses principes de l'actuelle méthode AFNOR [3], mais les nouveautés acquises au cours de ce projet sont une meilleure répétabilité, une meilleure immunité au bruit de fond, une meilleure prise en compte des basses fréquences. À cela il convient d'ajouter une plus grande rigueur dans la méthodologie d'acquisition (position des capteurs) et de traitement (type et taille des fenêtres d'analyse). Enfin, et ce n'est pas à négliger, la méthode proposée sera plus consensuelle au niveau européen. À noter qu'une méthode s'inspirant des mêmes principes fait l'objet d'une norme ISO [10] pour la mesure de l'absorption des revêtements de chaussée. L'acousticien pourra donc disposer de méthodes cohérentes pour l'évaluation des techniques de lutte contre le bruit routier.

Pour le cas des écrans non plans, même si des progrès sensibles ont été réalisés, il est clair que des problèmes subsistent, surtout dans le cas de matériaux parfaitement réfléchissants (même si ceux-ci présentent peu d'intérêt en pratique puisque la méthode vise à estimer l'absorption et ne concerne donc pas *a priori* les écrans réfléchissants). Les comparaisons mesures/calculs sont cependant acceptables, les ordres de grandeur retrouvés et la répétabilité entre labo-

ratoires est bonne, ce qui montre que l'on mesure bien une réalité physique. Il reste cependant à montrer que la grandeur mesurée est caractéristique du couple forme/matériau. Une des difficultés de validation réside dans l'absence de référence : les comparaisons avec des mesures en salle réverbérante seraient hasardeuses car les sollicitations sont différentes (champ diffus), et de plus, ce type de mesure n'est pas non plus bien maîtrisé pour les écrans fortement non plans.

Des développements complémentaires seront également nécessaires si l'on veut atteindre les objectifs initiaux de résultats en basses fréquences (inférieures à 250 Hz). L'intérêt réside dans le fait que les voies à forte circulation de poids lourds ont des spectres riches en basses fréquences. Une voie possible serait le découpage du spectre en deux parties : une partie hautes fréquences pour laquelle le caractère interférentiel du champ sonore nécessite un moyennage mais pour laquelle une grande fenêtre d'analyse ne s'impose pas ; une partie basses fréquences pour laquelle une fenêtre d'analyse aussi grande que possible est nécessaire, mais pour laquelle le moyennage n'est pas indispensable.

On peut estimer que, d'ores et déjà, la méthode issue de la recherche constitue une base solide pour l'écriture d'une norme permettant la qualification et la réception sur site des écrans antibruit au sein de la communauté européenne. Les connaissances acquises au cours de ce projet ont été transmises au CEN/TC226/WG6 en vue de l'écriture de la norme pr EN 1793-1. Les experts en normalisation vont donc pouvoir examiner ces méthodes dans leurs pays respectifs. En attendant, certaines équipes de LRPC, qui ont souhaité anticiper sur l'adoption d'une norme, vont se former et appliquer l'actuelle méthode « Adrienne » sur site réel. Cela permettra en outre de tester l'applicabilité opérationnelle réelle de la méthode.

- [1] International Institute of Noise Control Engineering (1998), *Draft Report, Technical assessment of the effectiveness of noise walls*, Working Party on the Effectiveness of Noise Wall, I-INCE publication 98-1, Noise/News International, vol. 6, 1, mars.
- [2] EN 1793 (1997), *Dispositifs de réduction du bruit de trafic routier - Méthode d'essai pour la détermination de la performance acoustique*.  
Partie 1 : *Caractéristiques intrinsèques relatives à l'absorption acoustique*.  
Partie 2 : *Caractéristiques intrinsèques relatives à l'isolation aux bruits aériens*.  
Partie 3 : *Spectre sonore normalisé de la circulation*.
- [3] AFNOR, Norme **NF S 31089** (1990), *Acoustique, Code d'essai pour la détermination des caractéristiques acoustiques d'écrans installés en champ libre*.
- [4] European Commission (1998), DGXII-SMT Project MAT1-CT94049 Final Report, *Test Methods for the acoustic performance of Road Traffic Noise Reducing Devices*, 1st Edition, février.
- [5] CLAIRBOIS J.-P., BEAUMONT J., GARAI M., SCHUPP G. (1998), *A new in situ method for the acoustic performance of road traffic noise reducing devices*, International Congress on Acoustics (ICA'98), Seattle.
- [6] GARAI M. (1993), Measurement of the sound-absorption coefficient *in situ* : the reflection method using periodic pseudo-random Sequences of Maximum Length, *Applied Acoustics*, **39**, pp. 119-139.
- [7] SCHROEDER M.R. (1979), Integrated impulse method measuring sound decay without impulses, *J. Acoust. Soc. Am.*, **66**, pp. 497-500.
- [8] MOMMERTZ E. (1995), Angle-Dependent in situ Measurements of Reflection Coefficients Using a Subtraction Technique, *Applied Acoustics*, **46**, pp. 251-263.
- [9] ANFOSSO-LÉDÉE F. (1997), *Application de la méthode des équations intégrales à la modélisation du bruit aux abords des routes : interaction chaussée/écran antibruit*, Études et Recherches des LPC, **EG14**, 212 pages.
- [10] ISO/DIS 13472-1 (1999), *Acoustics, Procedure for measuring sound absorption properties of road surfaces in situ - part 1 : extended surface method*.

#### ABSTRACT

##### ADRIENNE

##### A European method to qualify road noise barriers on site

F. ANFOSSO-LÉDÉE, M. GARAI, J.-P. CLAIRBOIS

« Adrienne » is a method developed in a European research project, the aim of which was the measurement on site of sound absorption and sound transmission of any road noise barrier. In order to get the impulse response of the device (absorption measurement), a M.L.S. (Maximum Length Sequence) method was selected mainly for its excellent signal/noise ratio. The introduction of a subtraction technique improves the low frequency information. For flat barriers, measurement results showed a good agreement with well-known models or other experimental methods. For non flat barriers, numerical predictions resulted in the requirement of an averaging performed on many source and receiver positions. An encouraging agreement between measurements and predictions was found. Round robin tests on a specially built platform proved a good repeatability of the method.

##### ADRIENNE

Une méthode européenne pour la qualification sur site des écrans antibruit