

SIMULATION ULTRASONORE
DE L'IMPACT ACOUSTIQUE DES AUTOROUTES

M. Jean Gabriel MIGNERON Ing. Ph.D.

Directeur du Centre de recherches en aménagement
et développement et responsable du laboratoire
d'acoustique de l'École d'architecture
Université Laval, Québec, G1K 7P4

SOMMAIRE

Cet article vise à rapporter les recherches poursuivies depuis 1977 au Laboratoire d'acoustique de l'École d'architecture de l'Université Laval. Après un tour d'horizon rapide des recherches antérieures en matière de simulation ultrasonique du bruit de la circulation, les différentes étapes de la démarche sont exposées, ainsi que les moyens mis en oeuvre, notamment au niveau du système de génération ultrasonore et de la simulation de la dynamique du bruit urbain. Les résultats ainsi obtenus sont ensuite comparés aux niveaux de bruit existant réellement sur le site simulé. La conclusion fait état des applications possibles pour le désign des autoroutes et la vérification de l'efficacité des écrans destinés à la protection des secteurs résidentiels.

ABSTRACT

This paper reports a research project undertaken since 1977 at the School of Architecture Acoustical Laboratory of Laval University. After a light review of the other research concerning ultrasonic simulation of highway noise, the progress of the different stages of the research are exposed as well as the technical means that have been used, particularly the ultrasonic generation system and the dynamic reproduction of the urban noise fluctuations. The resulting values are then compared to the real noise levels existing on the simulated urban site. The conclusion presents the possible applications for highways design and the control of efficiency for noise barriers used for the protection of residential areas.

1 - INTRODUCTION

Dans la mesure où les procédures existantes, pour le calcul du mode de propagation des ondes acoustiques générées par le trafic automobile, peuvent sembler complexes, on peut se demander si la simulation sur maquettes des principaux phénomènes acoustiques mis en oeuvre ne serait pas plus pratique, afin d'étudier simultanément l'atténuation due à la distance, les absorptions du sol et de la végétation et les phénomènes de diffraction suivant la position et la nature des écrans, le tout en relation avec la disposition des voies de circulation et la

topographie du site étudié. En théorie la chose est très possible: plutôt que de calculer l'impact prévisible d'une future autoroute, il suffit de la simuler sur maquette et de mesurer, sur cette même maquette, tous les isocontours des niveaux de bruit résultant de la nouvelle voie projetée. Sur le plan pratique, la simulation pose, cependant, de nombreux problèmes. Tout d'abord, l'échelle de réduction est limitée par la possibilité de construire une source de bruit capable de reproduire, avec une multiplication de fréquence adéquate, tout le spectre de la circulation automobile. Cette multiplication nécessaire correspond à la réduction de l'échelle de la maquette, le transfert des fréquences étant indispensable pour le respect des phénomènes de diffraction, ceux-ci dépendant de la longueur d'onde émise. A notre connaissance, il n'existe pas de source ultrasonore idéale, c'est-à-dire une source autonome et mobile, de dimensions réduites, permettant de reproduire sur maquette n'importe quel spectre, avec un mode de rayonnement semblable à celui d'une source sonore réelle, telle que le bruit d'une automobile.

L'échelle de réduction de la maquette influence aussi la dimension et les caractéristiques du microphone de mesure. Celui-ci doit être le plus petit possible, afin de ne pas perturber le champ acoustique ultrasonore de la maquette, et ses caractéristiques de linéarité doivent être adaptées à des mesures en hautes fréquences. Ce problème, bien que sérieux, est actuellement assez bien maîtrisé; c'est pourquoi nous n'insisterons pas particulièrement sur cet aspect. Il reste, enfin, un point important, toujours lié à l'échelle de réduction de la maquette: il s'agit de la reproduction des phénomènes d'absorption, tant pour l'absorption de l'air qui, aux hautes fréquences, est très sensible aux taux d'humidité relative régnant autour de la maquette, que pour l'absorption des matériaux urbains simulés dans cette maquette. En faisant un tour d'horizon des procédures déjà utilisées par les différents chercheurs, nous mentionnerons toutes ces difficultés, ainsi que les solutions proposées.

2 - APERCU DES RECHERCHES SIMILAIRES

Les premières recherches que nous mentionnerons sont celles de PINFOLD (1967, pp. 648-649), en Grande-Bretagne, qui a travaillé avec une échelle de 1/100ième, en utilisant comme sources sonores des petits haut-parleurs capables de reproduire les hautes fréquences jusqu'à 40000 Hz, ces haut-parleurs étant alimentés par quatre générateurs distincts de bruit blanc. Il semble que cette précaution ait été suffisante, afin de rendre négligeables les modifications possibles du champ sonore, causées par une mise en phase des ondes acoustiques. Cette disposition peut paraître séduisante, puisqu'elle permet le contrôle, à l'aide d'un filtre approprié, de la composition spectrale et peut s'adapter très facilement à différentes situations d'urbanisme. Cependant, la puissance acoustique obtenue à l'aide d'un haut-parleur, pour des fréquences de l'ordre de 40000 Hz, est généralement faible, ce qui permet difficilement l'emploi d'un microphone miniature à condensateur; d'autre part, la directivité d'un haut-parleur peut différer sensiblement du mode de rayonnement semi-cylindrique d'une file d'automobiles. PINFOLD s'est surtout attaché à reproduire, dans sa maquette, les fréquences comprises entre 100 et 300 Hz, qu'il assimile aux pointes de fréquence classiques du bruit de la circulation urbaine. Un tel dispositif pourrait donc difficilement restituer l'effet des pneumatiques, qui caractérise plutôt le type de bruit généré sur une autoroute, pour de grandes vitesses de circulation. Néanmoins, en s'appuyant sur les derniers développements technologiques, notamment avec l'apparition des "tweeters" électrostatiques ou à chambre de compression ce dispositif peut devenir une source acoustique très intéressante pour la simulation de toutes les sortes de trafics automobiles.

D'autres auteurs, comme SPANDOCK (1961), dont les recherches ont été poursuivies notamment par BREBECK (1967), ont également travaillé sur une maquette à l'échelle de 1/100ième, en l'installant dans un local en atmosphère complètement asséchée, de manière à se soustraire aux problèmes de l'absorption moléculaire des hautes fréquences (fortement influencée par l'humidité relative), et en employant encore des petits haut-parleurs, afin de simuler le bruit de la circulation.

Nous en arrivons, chronologiquement, aux principaux travaux dont nous ferons état, c'est-à-dire à ceux du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, en France. Les chercheurs de cet organisme ont utilisé l'échelle du 1/20ième déjà recommandée par WILLMS et BREBECK (1965), en se basant entre autres, sur la constatation qu'une plus faible réduction dimensionnelle permettait une plus grande précision des mesures. L'originalité de cette réalisation apparaît surtout dans le mode de génération mécanique des ondes sonores. Le système consistait en un ensemble de petites clochettes de bronze de 22 mm de diamètre, dont la masse était voisine de 10 grammes. Puisque la fréquence émise par une cloche varie environ suivant l'inverse de la racine cubique de son poids, les clochettes choisies étaient capables de produire une énergie acoustique importante dans les tiers d'octave de 10000 et 20000 Hz. Les files d'automobiles ont été réalisées à l'aide de clochettes suspendues tous les 10 cm, ceci avec des imprécisions volontaires, destinées à reproduire la distribution au hasard des véhicules, comme une voie réelle de circulation. Les tringles supportant les clochettes ont été choisies suffisamment fines pour ne pas produire d'ombre sonore; elles étaient soumises, à l'aide d'un système mécanique, à un mouvement alternatif destiné à l'excitation des clochettes. RAPIN (1969) rapporte d'excellents résultats, tant au point de vue de la directivité, qu'au point de vue de la puissance acoustique et de la composition spectrale.

Cet auteur a étudié en détail tous les problèmes théoriques posés par la simulation, avec une mention toute particulière pour les calculs relatifs à l'influence de l'humidité, celle-ci étant assez importante, puisque les mesures n'ont pas été faites en atmosphère contrôlée et qu'une grande partie d'entre elles ont été réalisées à l'extérieur (RAPIN, 1969, pp. 81-99). Le générateur mécanique utilisé produisant principalement des fréquences voisines de 1000 et 20000 Hz, RAPIN a dû d'abord calculer des courbes d'absorption moléculaire, d'après la théorie de KNESER et la méthode proposée par HARRIS, en y ajoutant l'absorption classique de SIVIAN (1947, pp. 914-916). En second lieu, il s'est intéressé à la reproduction de l'atténuation du niveau de bruit de la circulation, en dB (A), par dispersion géométrique et par absorption de l'air. Par exemple, la partie supérieure de la figure No. 1 montre l'effet de l'absorption d'un spectre de circulation automobile pondéré suivant la courbe (A), avec des atténuations correspondant à des distances de 100, 200, 500 et 1000 m, alors que la partie inférieure de cette même figure explique la transposition de ce phénomène, pour une maquette au 1/20ième, telle que celles utilisées par le C.S.T.B. On constate, sur ces courbes, que l'atténuation obtenue sur la maquette, pour la fréquence de 10000 Hz, est sensiblement la transposée de l'atténuation en fonction de la distance, pour la bande de fréquence de 1000 Hz, dans les conditions réelles. Elle est encore très voisine de l'atténuation apportée à la composition spectrale moyenne du bruit de la circulation, pondérée suivant la courbe (A). RAPIN a vérifié, enfin, l'effet de la diffraction sur la composition spectrale. Il a montré que l'effet de la diffraction, pour un bruit de circulation pondéré suivant la courbe (A), se situait entre la diffraction obtenue dans la bande de 500 Hz et celle obtenue dans la bande de 1000 Hz, ceci dans une fourchette qui ne dépasse jamais 3 dB et qui devient très étroite lorsque l'efficacité de l'écran se trouve être inférieure à 8 dB (RAPIN, 1969, pp. 21-22).

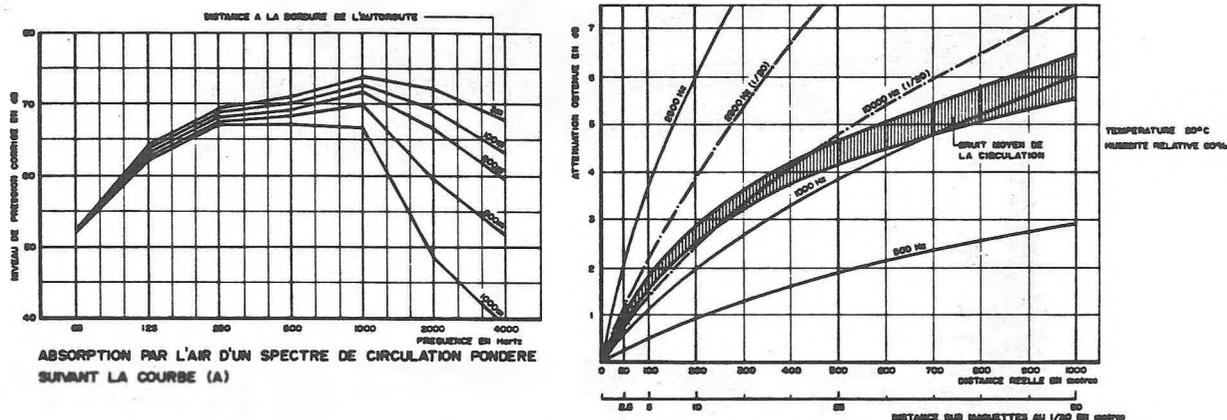


FIGURE No. 1: *Atténuation due à l'absorption par l'air du bruit de la circulation et sa représentation sur maquette (d'après RAPIN 1969).*

Le C.S.T.B. a procédé à une série impressionnante d'expériences, la plupart de ces mesures ayant été faites dans les bandes de fréquence de 500 et 1000 Hz, bien que pour les profils d'autoroute les plus courants, certaines ont été compilées en dB (A). Pour toutes ces expériences, les chercheurs français ont utilisé 8 rangées de clochettes, simulant une autoroute à double sens de 4 travées de circulation. Le niveau de bruit initial à la source, soit à la bordure de l'autoroute, étant quelque peu secondaire, quant aux lois de propagation et d'atténuation des ondes acoustiques, nous avons pu utiliser avec beaucoup de satisfaction les isophones proposées. C'est seulement pour des distances supérieures à 100 ou 120 mètres, que l'atténuation, au voisinage immédiat du sol, n'était pas toujours bien prise en compte par les résultats de la simulation; néanmoins, les écarts rencontrés dans des sites réels de topographie semblable n'ont jamais dépassé des valeurs supérieures à 2 ou 3 dB (A), dans les limites de validité de ces courbes. A l'heure actuelle, ces résultats de simulation du C.S.T.B. restent encore l'un des meilleurs procédés graphiques, pour étudier rapidement l'impact d'un futur projet de corridor de transport.

Pour leur part, les chercheurs américains du MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY ont employé, au début des années 1970, un autre type de source acoustique destinée à la simulation sur maquette. Il s'agit d'un dispositif à ultrasons, composé d'un système générateur d'étincelles électriques, associé à un analyseur de signal synchronisé, l'affichage des résultats se faisant à l'aide d'un oscilloscope à double trace (LYON, 1973, pp. 65-70). Ce système peut aussi bien servir à la simulation du trafic automobile qu'à l'étude de l'impact de la circulation aérienne. Il peut être également utilisé en acoustique architecturale et pour la prévision du bruit industriel. Les échelles de maquette pour lesquelles l'analyseur dispose d'un filtre de fréquence correspondant à la pondération (A) sont de 1/32, 1/50 et 1/64ième, cette dernière échelle s'adressant plus spécialement, d'après le constructeur, à la simulation des opérations aériennes (GROZIER TECHNICAL SYSTEMS, 1977). LYON, CANN et CARPENTER (1976, pp. 14-18) mentionnent des expériences de mesure d'absorption des matériaux aux fréquences ultrasonores, à l'aide d'une chambre réverbérante en plexiglas à l'échelle du 1/16ième. Nous avons pu vérifier, de cette manière, avec la méthode de calcul conventionnelle, les propriétés d'absorption ultrasonores de différents matériaux; ces expériences peuvent être nécessaires, dans la mesure où il est difficile d'évaluer l'absorption des matériaux utilisés pour les maquettes de simulation, par rapport à leurs propriétés acoustiques normales, à échelle réelle. Comme le montre la figure No. 2, nous nous sommes également intéressés aux applications urbaines d'un tel dispositif.

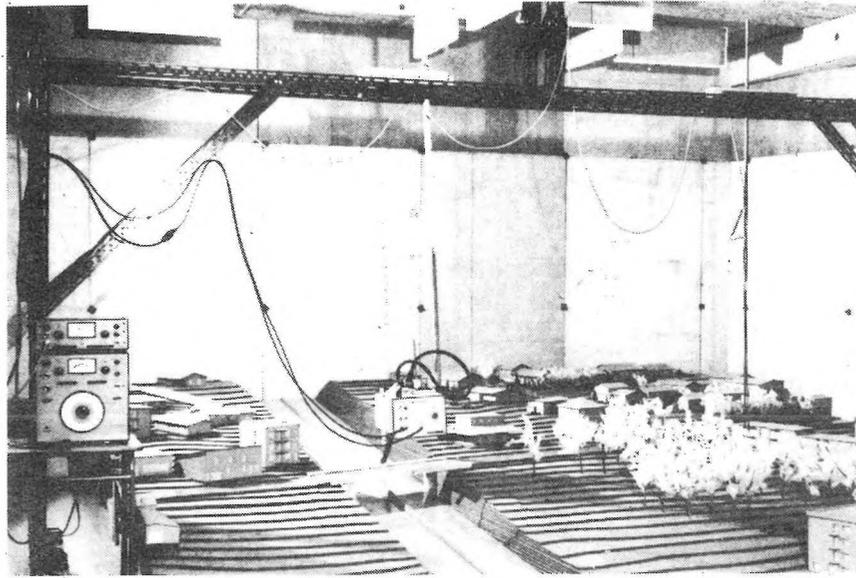


FIGURE No. 2: *Première expérience de simulation à l'aide d'un générateur d'étincelles.*

Il semble, cependant, mieux adapté aux problèmes d'acoustique architecturale ou à la simulation de l'impact des aéronefs, plutôt qu'à l'étude du bruit de la circulation automobile, puisque sa source est ponctuelle et qu'il faut procéder à l'aide de nombreuses mesures, avant d'établir l'impact acoustique simulé dans un ensemble urbain complexe. La photographie de la figure No. 2 présente, à ce sujet, nos premières expériences pour l'étude, à l'échelle du 1/50ième, de l'impact acoustique du boulevard Henri IV sur le territoire de la ville de Ste-Foy.

3 - MISE AU POINT D'UNE SOURCE ULTRASONORE CONVENANT A LA SIMULATION DU BRUIT DE LA CIRCULATION

Nos propres recherches ont commencé en 1976, surtout sous la forme d'un tour d'horizon des différentes techniques de simulation employées par les autres chercheurs. Les jets d'air comprimé étaient séduisants mais trop compliqués et trop long à installer pour notre contexte expérimental universitaire, notamment à cause du dessiccateur indispensable à ce système; quant aux générateurs mécaniques comme les clochettes, ils ne permettaient pas une petite échelle pour la maquette. Finalement, comme nous l'avons mentionné à propos de la figure No. 2, pour nos premières mesures nous avons utilisé le nouveau générateur d'étincelles électriques fabriqué par la compagnie GROZIER TECHNICAL SYSTEMS. Cependant, après un an d'essais divers et de mise au point, ce genre de générateur s'est avéré mal adapté au bruit de la circulation automobile, à cause d'un certain manque de stabilité, d'un affichage des résultats de mesure délicat et surtout d'un processus de mesure très long dû à la ponctualité de la source et à la nécessité de la déplacer tout le long de la voie de circulation simulée, afin d'étudier par sommation l'impact potentiel des automobiles pour chaque point de l'espace mesuré. Parallèlement, dès le printemps 1978, nous avons commencé à analyser les caractéristiques des différents types de haut-parleurs disponibles sur le marché de la haute-fidélité. Il fallait un système robuste, capable de reproduire avec une intensité suffisante toutes les fréquences jusqu'à 100 KHz et aussi de coût modique, car il est nécessaire d'utiliser plusieurs unités dans la maquette. De nombreux "tweeters" réputés sur le marché se sont révélés décevants au delà de 20000 Hz, sans parler de ceux que nous avons brûlés sans obtenir un niveau acoustique suffisant.

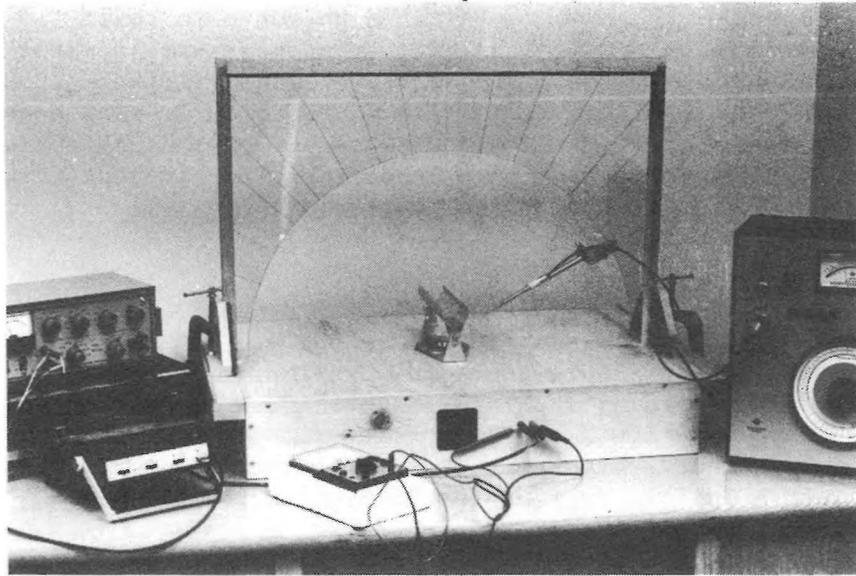


FIGURE No. 3: *Banc de mesure expérimental pour la mise au point des déflecteurs ultrasonores.*

Finalement, c'est en 1979 que nous avons pu trouver un haut-parleur à bas prix susceptible de convenir pour nos travaux. Il s'agit d'un "super-tweeter" électrodynamique à chambre de compression et pavillon exponentiel de fabrication japonaise. La réponse obtenue est excellente jusque vers 100 KHz et même au-dessus, avec un niveau supérieur à 80 dB. Par contre, comme il fallait s'y attendre, la directivité est très prononcée dans l'axe du haut-parleur. Cette directivité ne convenant pas pour reproduire la dispersion normale du bruit d'un véhicule, il a fallu étudier un déflecteur susceptible d'améliorer la similitude du modèle. Environ une trentaine de déflecteurs différents ont été analysés sur le banc de mesure de la figure No. 3; après le choix d'une forme simple bien appropriée, il restait à optimiser la hauteur du déflecteur finalement retenu, suivant la bande de fréquence requise de 6.3 à 80 KHz. Le graphique de la figure No. 4 montre en définitive la répartition spatiale obtenue; ce résultat s'apparente assez bien avec la répartition sonore du bruit d'une automobile tel qu'analysé par PACHIAUDI, CHAPON et BRUYERE (1971), ces auteurs mentionnent en effet une directivité acoustique notable pour un angle de 25° au-dessus de la chaussée,

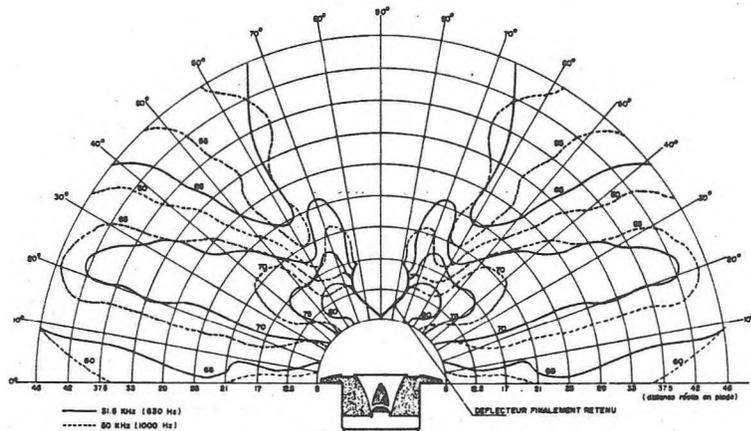


FIGURE No. 4: *Dispersion du haut-parleur à compression utilisé sur la maquette (niveau en dB).*

pris perpendiculairement à l'axe de roulement d'un véhicule roulant à la vitesse de 80km/h. Le niveau sonore obtenu à 30 KHz, fréquence correspondant environ au milieu du spectre simulé des automobiles, est excellent, il faut cependant surveiller constamment la tension aux bornes des haut-parleurs, afin d'éviter de surchauffer et de déformer les bobines mobiles. Pour de longues séries de mesures, un dispositif simple de protection a été installé, évitant ainsi toute surcharge.

4 - MISE AU POINT D'UN GENERATEUR APPROPRIE

Avec l'utilisation de petits haut-parleurs pour nos travaux sur maquettes, il était évident que notre meilleure source de bruit devait être un générateur de "bruit blanc", c'est-à-dire un appareil susceptible de fournir un spectre homogène et linéaire jusqu'à 100 KHz. Le modèle 1405 de la compagnie BRUEL & KJAER convenait parfaitement. Cependant, la composition spectrale reproduite dans la maquette doit à la fois représenter le bruit de la circulation automobile transféré en fréquence et l'effet de la courbe de pondération (A), cette courbe est utilisée pour toutes les mesures de bruit communautaire, afin de tenir compte des caractéristiques physiologiques de l'oreille humaine. Si les haut-parleurs reproduisent dans la maquette le spectre approprié, il est alors facile de procéder aux mesures sans aucune correction de fréquence autre qu'un filtrage destiné à éliminer tous les bruits extérieurs au champ ultrasonore. Plutôt que de construire un filtre spécial et limité à une seule échelle de maquette, nous sommes attachés à réaliser un véritable égaliseur au tiers d'octave à 12 canaux, actuellement réglé pour opérer dans les bandes de fréquence comprises entre 6.3 et 80 KHz. Ainsi, à l'échelle du 1/50ième, nous reproduisons, avec l'effet de la pondération (A) (c'est-à-dire en diminuant l'influence des basses fréquences), un spectre de circulation automobile compris dans la réalité entre 125 et 1600 Hz. RAPIN, ROLAND et DE TRICAUD, signalent à ce sujet qu'il est possible de négliger la reproduction des fréquences supérieures à 2000 Hz et qu'il est important de se concentrer sur une bonne restitution de l'octave de 1000 Hz (1972, pp. 39-41).

La reproduction de la dynamique, c'est-à-dire des variations du niveau de bruit au bord d'une voie de circulation, était plus complexe et plus difficile à concevoir. Nous avons envisagé deux solutions, soit créer un modèle de variation avec la possibilité de changer le débit de circulation, soit piloter le niveau de reproduction à l'aide d'un enregistrement du bruit réel, tel que mesuré en bordure de la voie étudiée ou bien d'une voie similaire. Si les modèles de circulation sont bien connus, avec RATHE (1965) ou JOHNSON et SAUNDERS (1968, pp. 287-309), il n'en demeure pas moins que leur reproduction dans le domaine ultrasonore présente une grande complexité sur le plan électronique, aussi nous sommes d'abord orientés vers le pilotage du niveau émis dans la maquette. A l'aide d'un dispositif d'asservissement lié à un enregistreur graphique BRUEL & KJAER modèle 2305, il nous a été facile de reproduire les mêmes variations sonores que dans la réalité, ceci avec un niveau simulé exactement similaire à celui enregistré sur le terrain. Ce résultat remarquable apparaît dans la figure No. 5, de même sur la photographie de la figure No. 6 on peut voir à gauche l'enregistreur graphique utilisé pour le pilotage et à droite l'enregistreur reproduisant le niveau ultrasonore mesuré dans la maquette en bordure de la voie de circulation. Dans le cas d'une étude sur maquette portant sur le tracé d'une future autoroute, il sera toujours possible d'utiliser une boucle magnétique de pilotage enregistrée à partir d'une voie existante de débit similaire.

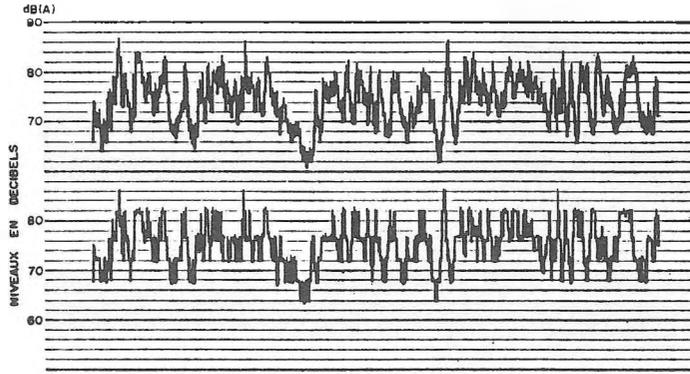
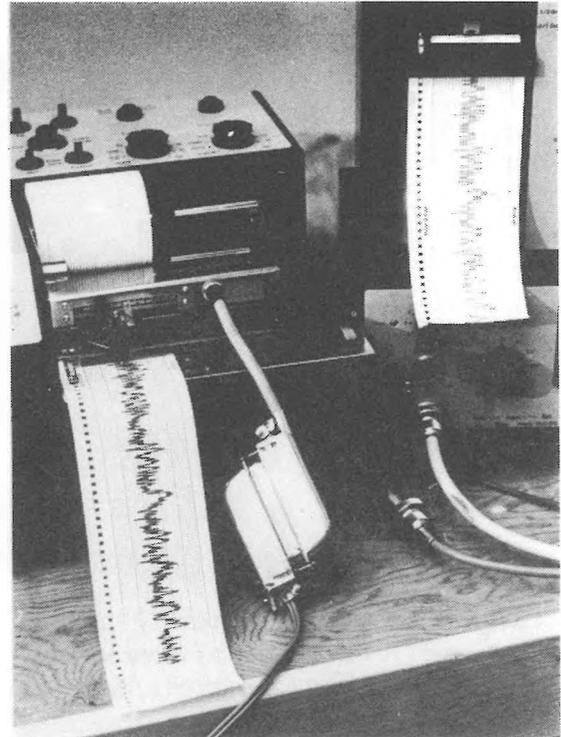


FIGURE No. 5: *Enregistrement du niveau de bruit réel en dB(A) et du niveau simulé en ultrason.*

FIGURE No. 6: *Dispositif de pilotage du niveau ultrasonore.*



Enfin, pour éviter toute forme d'onde stationnaire ou de mise en phase possible des haut-parleurs, ces derniers sont alternativement répartis sur quatre canaux différents d'amplification de 60W chacun, avec un dispositif de retard digital séquentiel utilisant une base de temps d'environ 300 KHZ (retard de quelques millisecondes). Pour plus de compréhension, le dispositif complet de génération est schématisé sur la figure No. 7, ainsi que la chaîne de mesure dans la maquette avec ses deux microphones. De même, la photographie de la figure No. 8 présente les principaux appareils utilisés pour la simulation.

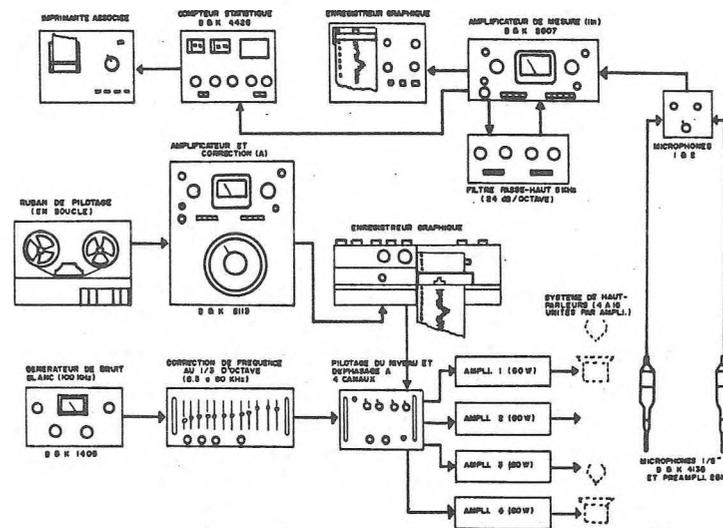


FIGURE No. 7: *Disposition des appareils de génération des ultrasons et de mesure.*



FIGURE No. 8: *Vue d'ensemble des principaux appareils utilisés lors de la simulation (on notera la forme du spectre ultrasonore sur la partie gauche de l'égaliseur).*

5 - INSTALLATION DE LA MAQUETTE ET OPERATIONS DE MESURE

La chambre de mesure utilisée est en fait la grande chambre réverbérante du Laboratoire d'acoustique de l'Ecole d'Architecture, transformée pour la circonstance en une chambre semi-anéchoïque, avec sur les murs des panneaux de laine minérale à haute densité de 2 pouces d'épaisseur et un plafond suspendu comportant des baffles acoustiques de 12 pouces. La photographie de la figure No. 2 montre d'ailleurs en partie la configuration de la chambre de mesure et de son plafond. Avec un volume de 8650 pieds cube et une longueur de 32 pieds, la salle d'expérience peut accueillir des maquettes d'environ 16 par 28 (voire 30) pieds. Ce sont ces dimensions que nous avons retenues pour le cas du boulevard Henri IV, sur le territoire de la ville de Ste-Foy. Notre maquette expérimentale représente donc, à l'échelle du 1/50ième une longueur d'autoroute de 1600 pieds (soit environ 500 mètres).

Comme nous l'avons déjà mentionné, il faut tenir compte à la fois de l'absorption moléculaire de l'air et de l'absorption acoustique des matériaux employés pour la construction de la maquette. La photographie de la figure No. 9 montre, à ce sujet, la petite chambre réverbérante en plexiglas que nous avons employée pour mesurer les coefficients d'absorption du terrain et de la végétation aux fréquences ultrasonores. Nous disposons, pour établir la similitude, de mesures d'absorptions précises faites en 1976 en chambre réverbérante conventionnelle, sur des éléments végétaux et sur divers produits de maçonnerie couramment rencontrés dans la construction urbaine (MIGNERON, 1976). En ce qui concerne l'absorption moléculaire de l'air elle dépend directement de la quantité d'eau contenue dans l'air de la salle de mesure. Il faut que dans la maquette l'affaiblissement linéique obtenu corresponde à peu près à celui mesuré dans la réalité, soit pour une humidité relative de 50 à 80% et une température d'environ 15°C à 18°C. Pour une échelle de réduction de 1/100ième, RAPIN, ROLAND et DE TRICAUD recommandent une humidité acceptable d'au plus 10% dans la maquette (1973, pp. 31-32); mais l'écart de mesure croît également avec la fréquence, donc avec l'échelle de réduction de la maquette. Nous nous sommes d'abord con-

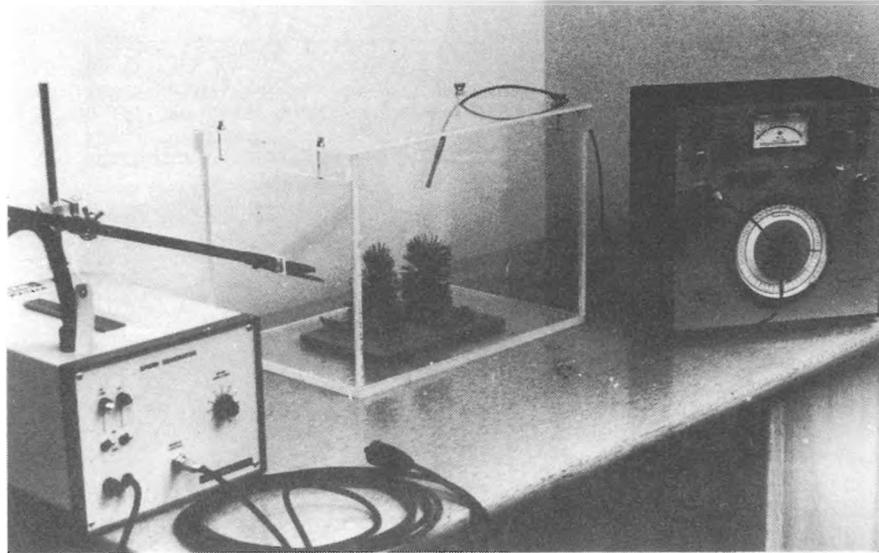


FIGURE No. 9: *Dispositif de mesure utilisé pour déterminer les coefficients d'absorption ultrasonores des matériaux servant à la construction de la maquette.*

tentés d'utiliser le système d'air conditionné de l'édifice dans lequel se trouve le Laboratoire, et ce surtout en hiver, ce qui donne une période d'environ 5 à 6 mois avec une humidité relative constante de 20%. Pour pouvoir poursuivre les mesures en période estivale, il a fallu ajouter par la suite un déshumidificateur, de façon à contrôler l'air de la salle de mesure (la ventilation principale pouvant être condamnée à la demande).

Le site choisi pour notre recherche méthodologique est situé dans la région métropolitaine de Québec, entre le boulevard du Versant-Nord et le chemin des Quatre-Bourgeois, en fait il est centré sur la partie du boulevard Henri IV située de part et d'autre du chemin Ste-Foy. Ce site présente de nombreux points d'intérêt, en plus que d'être suffisamment proche de l'Université Laval pour être mesuré facilement. Il comporte une partie plane, pour laquelle les voies de l'autoroute sont au même niveau que le terrain naturel et une partie en tranchée d'une profondeur d'environ 30 à 40 pieds; d'autre part les trois voies vers le sud sont montantes et le chemin Ste-Foy représente une artère secondaire assez importante, dont l'impact peut venir s'ajouter de façon significative à celui de l'autoroute. Durant les trois dernières années, nous avons régulièrement mesuré ce secteur selon les méthodes les plus reconnues pour le bruit communautaire, notamment en procédant à des analyses statistiques d'une durée supérieure à 15 minutes, pour les niveaux de bruit présents en différents points également localisés sur la maquette. La carte de la figure No. 10 reproduit les isocontours de bruits obtenus en 1979 et 1980, selon trois indices statistiques différents: soit L99% (bruit de fond), L50% (bruit moyen en fonction du temps) et Leq (niveau continu équivalent). Elle donne également la localisation des points de mesure utilisés.

En ce qui concerne la localisation des haut-parleurs reproduisant chacun un véhicule, elle est bien visible sur la photographie de la figure No. 11; 26 haut-parleurs sont installés sur les 6 voies de l'autoroute, ce qui correspond à un débit de circulation de 6000 véhicules/heure; de plus 5 haut-parleurs sont disposés sur les 2 voies du chemin Ste-Foy ce qui correspond à un débit d'environ 1000 véhicules/heure. Comme le montre le plan de localisation de la figure No. 12, la densité des véhicules est légèrement supérieure sur les voies

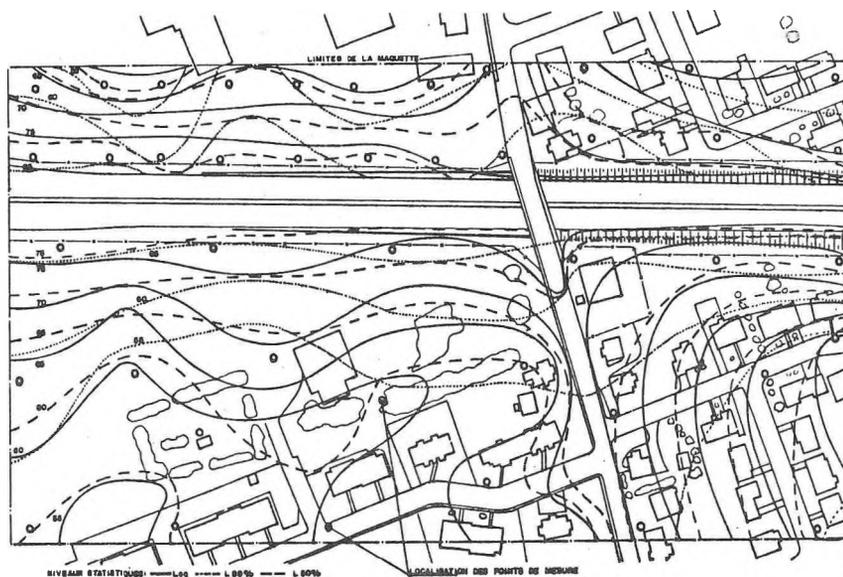


FIGURE No. 10: *Cartographie du niveau de bruit réel (boul. Henri IV & chemin Ste-Foy 1979-80).*

montantes, afin de tenir compte de la réduction de vitesse; par contre, sur toute la longueur de la maquette, les haut-parleurs sont également espacés pour donner un champ acoustique demi-cylindrique et homogène.

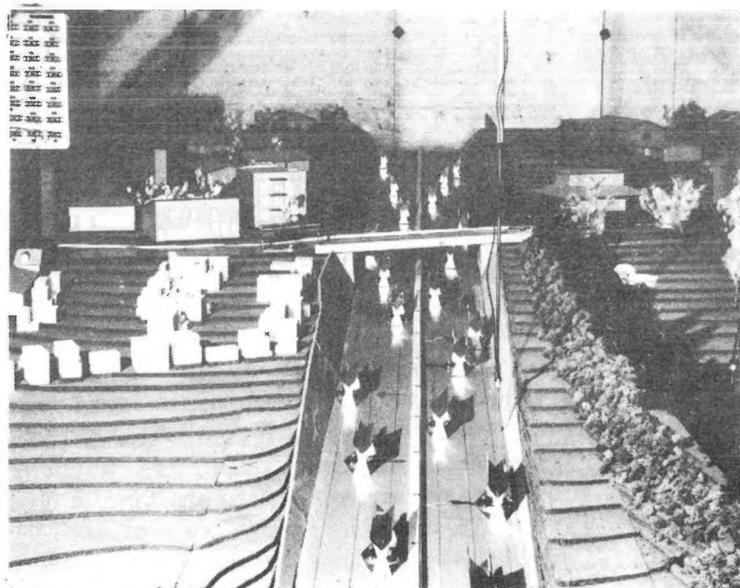
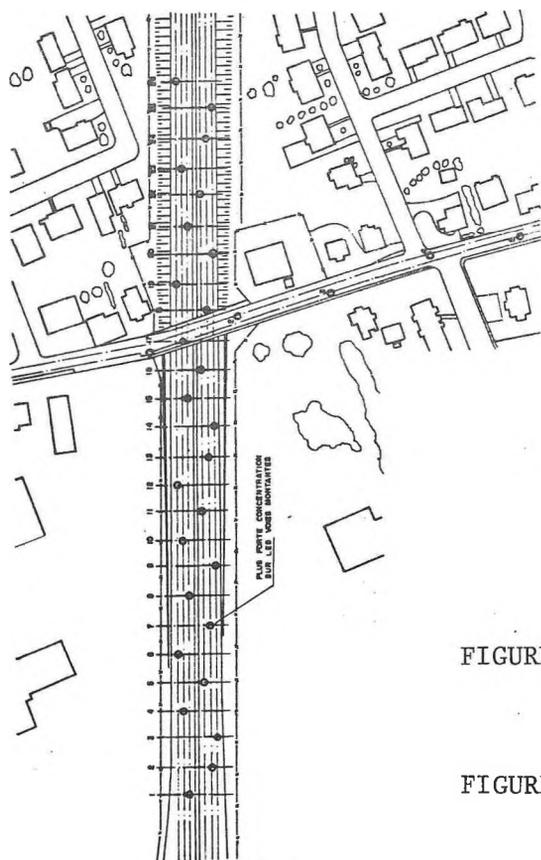


FIGURE No. 11: *Vue d'ensemble des haut-parleurs tels que localisés sur la maquette (on notera à gauche le tableau de connexion des haut-parleurs).*

FIGURE No. 12: *Localisation des haut-parleurs sur la maquette (disposition équivalente à un débit de 6000 véh./h.).*

Quant aux microphones de mesure, nous disposons de deux lignes indépendantes, avec des cartouches de microphones à condensateur de 1/4 ou de 1/8 de pouce, modèles 4135 ou 4138 de BRUEL & KJAER. La bande passante de ces microphones s'étend jusqu'à plus de 100 KHz et leur sensibilité descend jusque vers 30 dB avec un préamplificateur spécial, modèle 2618. Nous avons construit un portique simple qui permet aisément de déplacer les microphones dans la maquette et un garde de sécurité limite leur course vers le sol, pour les maintenir à une hauteur correspondant à environ 4 pieds de la réalité. L'amplificateur de mesure n'utilise aucun filtre, à l'exception d'un passe-haut de 24 dB/octave réglé sur 5 KHz, il peut finalement être complété par un enregistreur graphique et un compteur statistique (sans correction de fréquence).

6 - UTILISATION POSSIBLE DE LA SIMULATION ET CONCLUSION

La méthode que nous avons mise au point s'adresse en tout premier lieu à l'étude du profil et à la localisation des futures autoroutes, notamment en relation avec l'utilisation résidentielle des terrains avoisinants. Comme le montre les résultats de la figure No. 13, elle est suffisamment précise pour reproduire, non seulement la répartition spatiale des niveaux sonores, mais également l'évolution de la dynamique en fonction de la distance à l'autoroute (jusqu'à 500 pieds), ainsi que l'effet cumulé de deux voies de circulation de débits différents. Le pincement des isocontours Leq aux deux extrémités de la maquette est simplement attribuable à l'absence des haut-parleurs qui devraient reproduire les véhicules circulant sur l'autoroute en dehors des limites de la maquette.

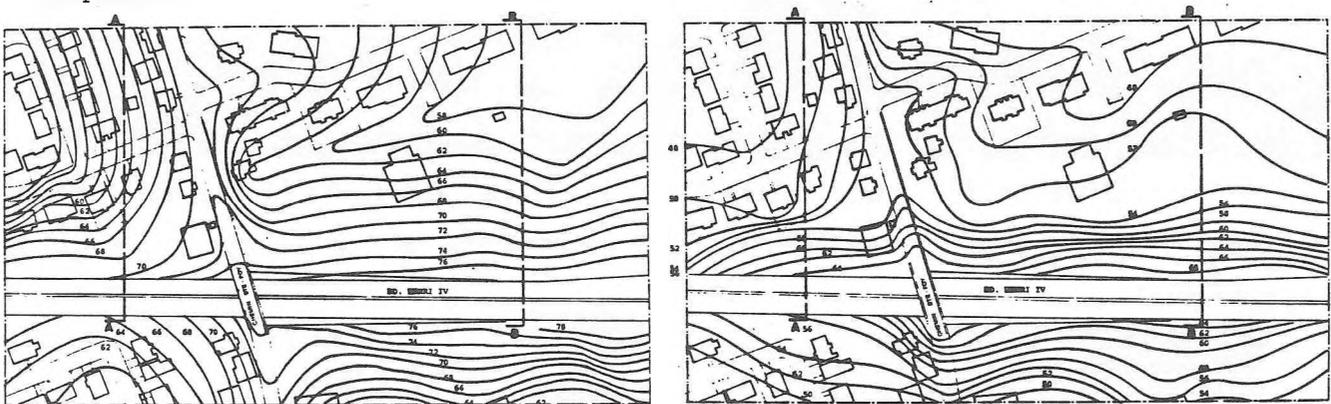
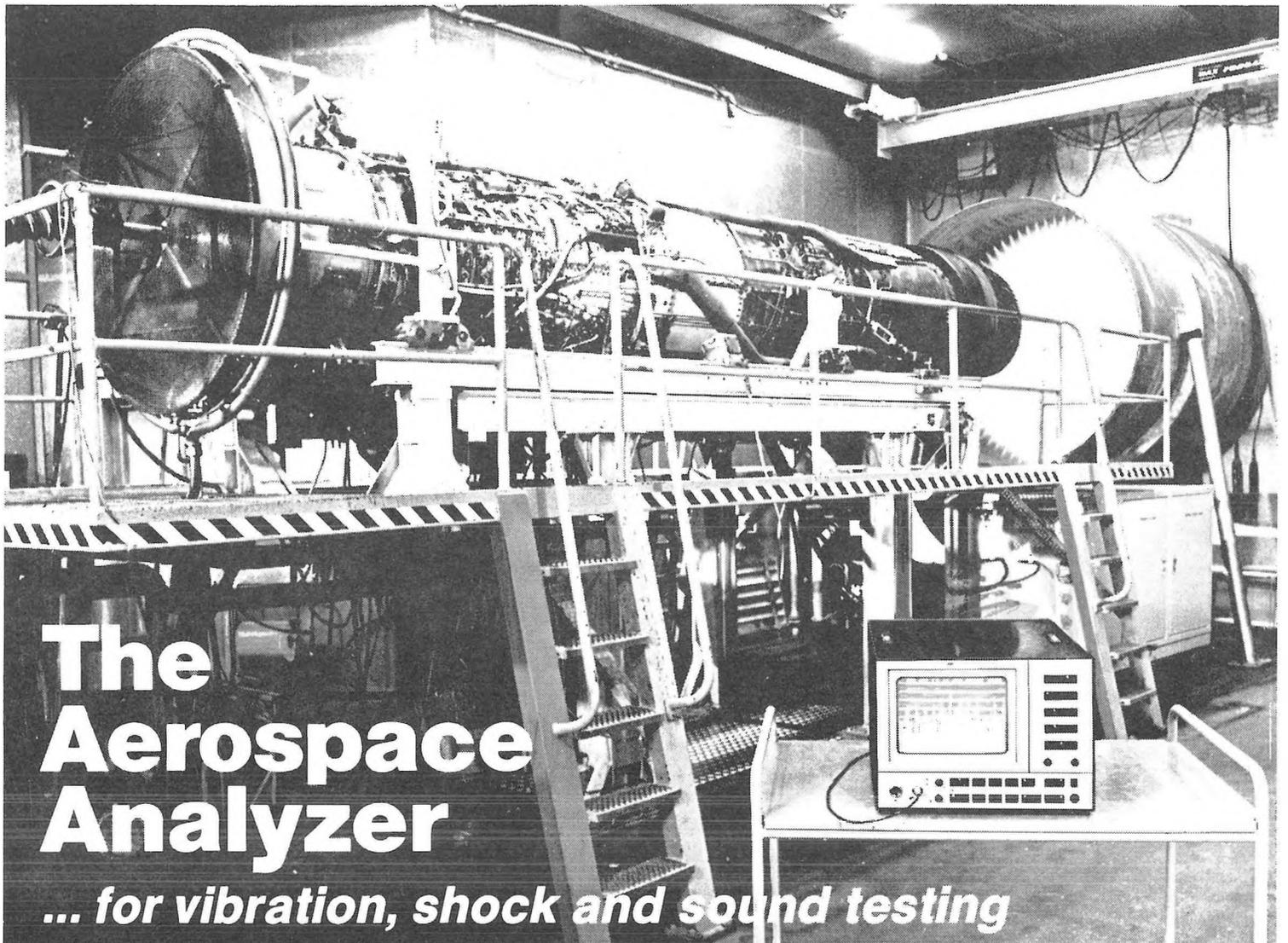


FIGURE No. 13: Niveau équivalent (Leq) réel obtenu en bordure de l'autoroute (40 points de mesure) et niveau correspondant obtenu par simulation (70 points).

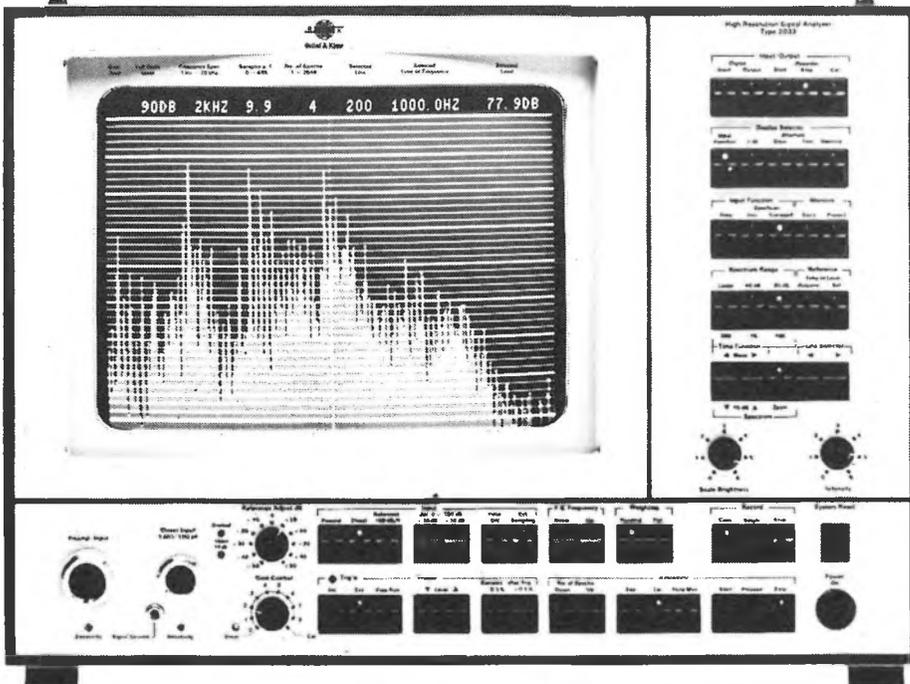
Le procédé est applicable également au cas des autoroutes existantes, surtout dans le but d'étudier les dispositifs de protection acoustique les plus adéquats. Ces dispositifs peuvent être constitués par des bâtiments commerciaux en rangée, par des murs écrans, ou bien encore par des buttes en terre paysagées. Les photographies de la figure No. 14 montrent, à ce sujet, la méthode de mesure employée pour vérifier l'efficacité d'un écran, constitué ici d'une butte en terre plantée de buissons et de résineux. Le graphique de la figure No. 15 reproduit également les niveaux de bruit ainsi mesurés dans la maquette, en présence et en l'absence de l'écran, la différence correspondant dans ce cas à une réduction moyenne du niveau de bruit de 12 dB(A). Finalement, les graphiques des figures Nos. 16 et 17 présentent les résultats concernant l'ensemble du traitement acoustique correctif possible pour la partie



The Aerospace Analyzer

... for vibration, shock and sound testing

Imagine what you can do... with an instrument that includes:



- Digital Oscilloscope with 10240 sample memory
- 400 and 4000 line FFT analyzer
- Slow motion FFT analysis of transients
- High-speed computer interface (IEEE-488)

With 10 times the memory of conventional FFT analyzers, the B & K 2033 sets new performance standards, and provides new, innovative functions for analysis of transients and continuous signals



BRUEL & KJAER CANADA LTD.

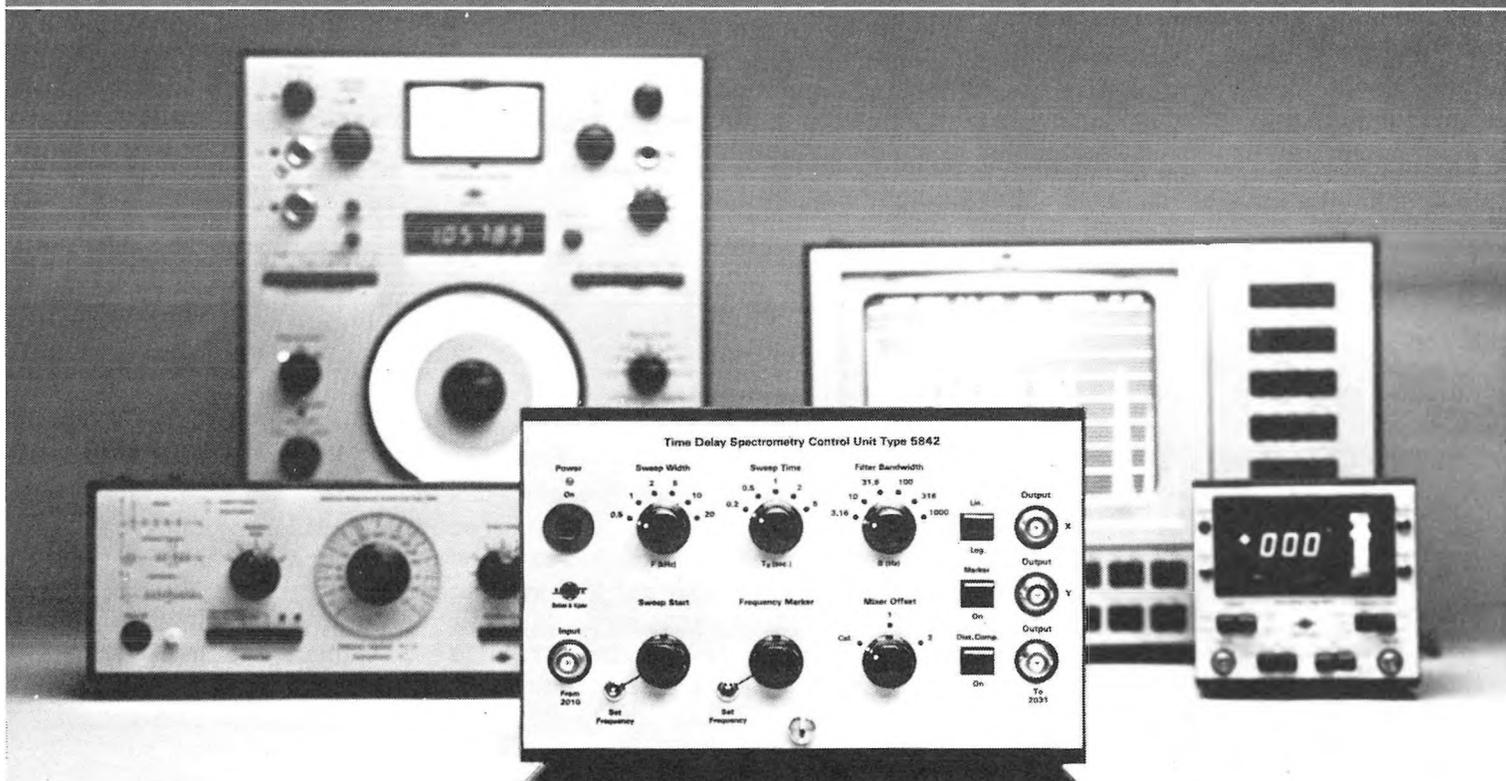
Specialists in acoustic and vibration measurement

Get the full potential from your B & K Analyzers ...
Add a
FREQUENCY-TIME WINDOW
to your 1902/2010 Electroacoustics
Measurement System

The TIME DELAY SPECTROMETRY CONTROL UNIT, Type 5842
facilitates in "real-time" the measurement of:

- FREQUENCY & PHASE RESPONSES WITHIN A SELECTABLE TIME WINDOW
- ENERGY vs. TIME RESPONSE

by centralizing all the essential controls, reference signals and
vital detection circuits in one instrument



Time Delay Spectrometry, TDS and Energy Time Curves, ETC,
have a wide range of applications within the Electroacoustics
and Architectural Acoustics fields:

The TDS technique allows you to make time-selective frequen-
cy and phase response measurements on systems exhibiting
time delay and time dispersion such as: Microphones, speak-
ers, delay-echo and reverb systems and twin-head tape re-
corders. It allows you to make "free field" measurements in

ordinary rooms as well as lets you look selectively at internal
and external reflections of speaker systems and microphones.

By adding the Brüel & Kjær High Resolution FFT Analyzer
Type 2033, the Energy Time Curve can be displayed instantly.

The TDS/ETC technique is an invaluable tool when studying
studio-, auditorium and concert hall acoustics and, in the con-
trol room, lets you study the "direct sound", early and late
reflections.

MONTREAL
90 Leacock Road
Pointe Claire, Que. H9H 1H1
Tel. (514) 695-8225

OTTAWA
7-Slack Road, Suite 201
Ottawa, Ont. K2G 0B7
Tel. (613) 225-7648

TORONTO
71 Bramalea Road, Suite 71D
Bramalea, Ont. L6T 2W9
Tel.: (416) 791-1642

LONDON
23 Chalet Crescent
London, Ont. N6K 3C5
Tel.: (519) 473-3561

VANCOUVER
5520 Minoru Boulevard, Room 202
Richmond, B.C. V6X 2A9
Tel.: (604) 278-4257

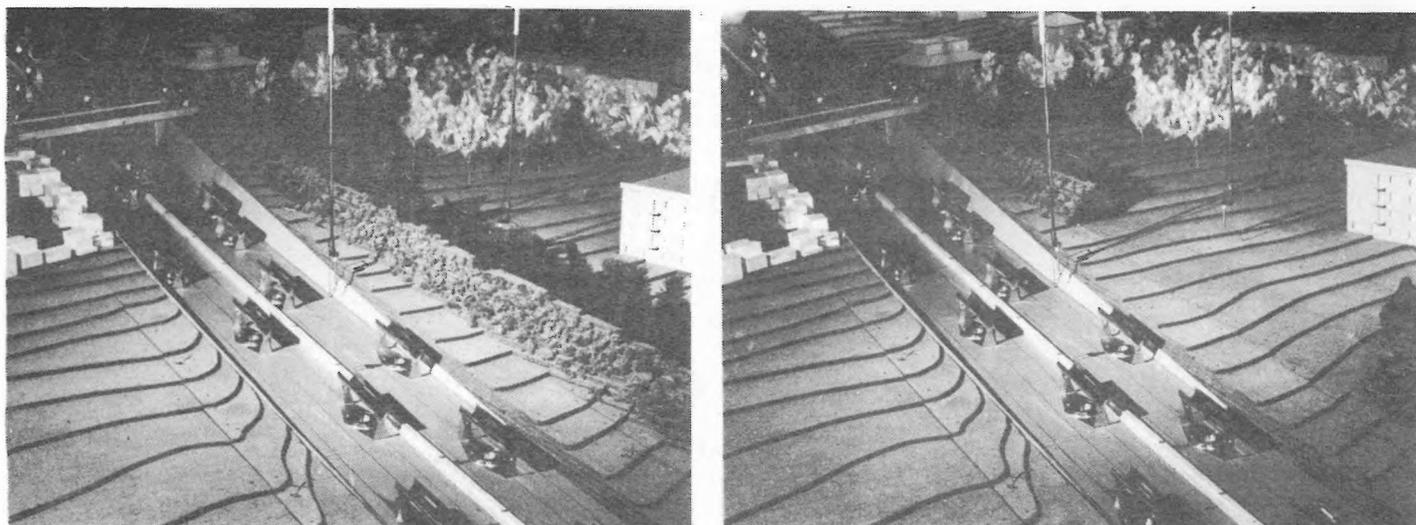


FIGURE No. 14: *Mesure de l'effet d'écran d'une butte en terre paysagée, à l'aide des deux microphones.*

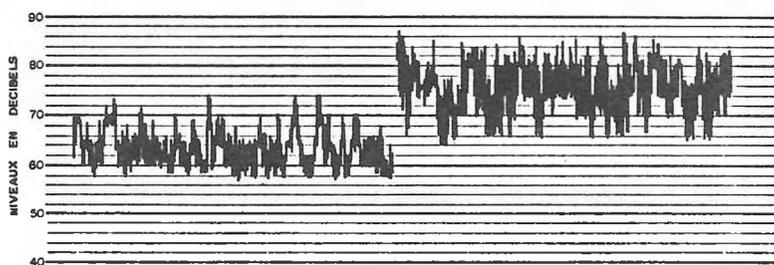


FIGURE No. 15: *Enregistrement d'un effet d'écran tel qu'obtenu sur la maquette*

ouest du boulevard. Les isocontours de propagation, qu'ils reproduisent dans deux plans perpendiculaires à l'autoroute, ont été obtenus de façon simple, en bloquant le dispositif de pilotage du niveau sonore (source de niveau constant, sans rue secondaire et sans variation dynamique) et en déplaçant les microphones de mesure de façon à couvrir une grille verticale.

En conclusion, cette nouvelle méthode de simulation de l'impact acoustique des autoroutes ne prétend pas remplacer les procédures de calcul existantes, mais dans certains cas elle peut les affiner et donner des résultats supérieurs. Elle est justifiée notamment dans le cas des échangeurs, des voies en pente ou des dénivellations prononcées du terrain, toutes situations pour lesquelles le calcul d'impact peut être imprécis. Elle permet, en plus, de combiner les effets d'écrans et de tenir compte des diffractions multiples. Cet outil de travail supérieur est donc à la disposition des autorités municipales ou provinciales concernées, pour amorcer une véritable politique d'aménagement des voisinages des autoroutes et éviter aux résidents une forme de pollution des plus insidieuses.

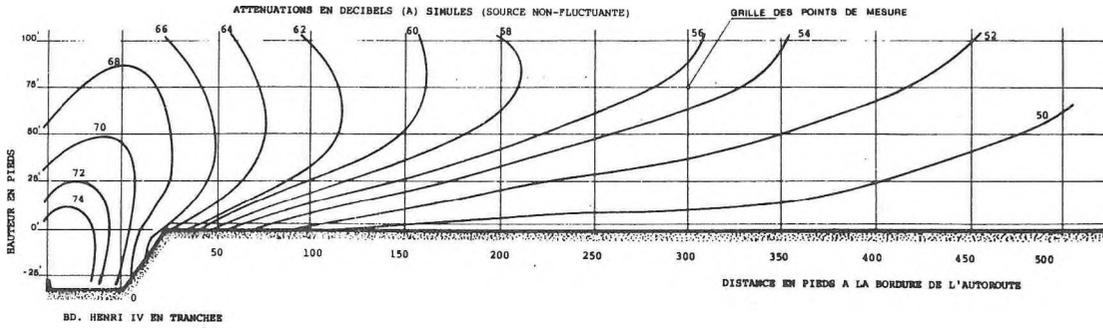
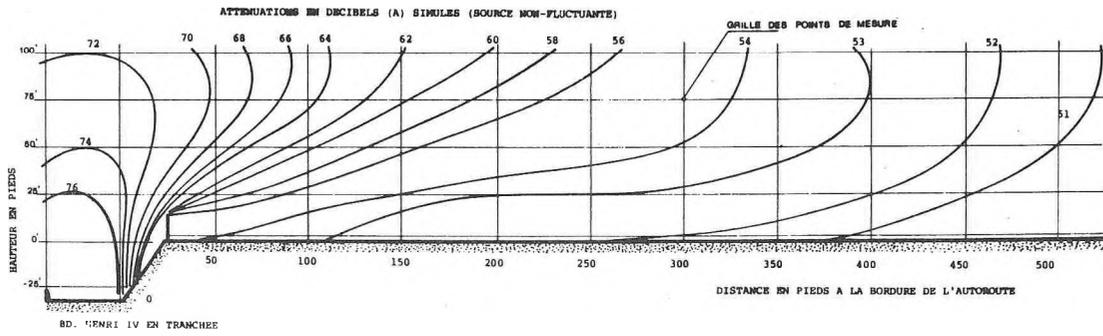


FIGURE No. 16: Simulation de l'impact d'une autoroute en tranchée avec et sans écran de 14 pieds.

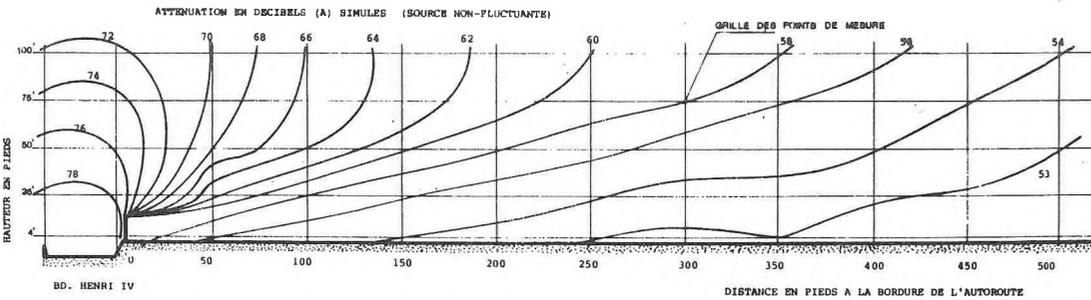
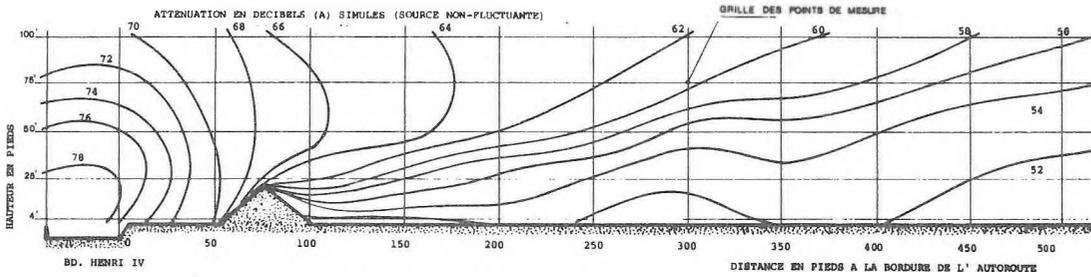


FIGURE No. 17: Simulation de l'atténuation d'une butte en terre paysagée et d'un mur écran de 14 pieds.

BIBLIOGRAPHIE

- BREBECK, Von D., BUKLEIN, R., KRAUTH, E. et SPANDOCK, F.: "Akustisch Ähnliche Modelle als Hilfsmittel für Raumakustik", in *Acustica*, vol. 18 (1967).
- DELANY: "Scale model investigation of traffic noise", NPL report AC 58.
- EVANS et BAZLEY: "The absorption of sound in air at audio-frequencies", in *Acoustica*, vol. 6, p. 238 (1956).
- GROZIER TECHNICAL SYSTEMS: Technical information regarding specifications for modeling system, Grozier Technical Systems Inc., Somerville, Mass. (1977).
- HARRIS, C.M.: "Absorption of sound in air versus humidity and temperature", in *Journal of Acoustical Soc. of Am.*, vol. 40, pp. 148-159 (1966).
- KNESER, H.O.: "A nomogram for determination of the sound absorption coefficient in air", in *Akustik, Zeitschrift*, vol. 5, pp. 256-257 (1940).
- KNESER, H.O.: "The interpretation of the anomalous sound-absorption in air and oxygen in terms of molecular collisions", in *Journal of Acoustical Soc. of Am.*, vol. 5, pp. 122-126 (1933).
- LYON, R.H.: "Lectures in transportation noise", Grozier Publishing, Cambridge, Mass., 259 p. (1973).
- LYON, R.H., CANN, R.G. et CARPENTER, G.D.: "Application of acoustical modeling to plant noise problems", in *Sound and Vibration*, vol. 10, no. 5, pp. 14-18 (1976).
- LYON, R.H., PANDE, L. et KINNEY, W.A.: "Modeling of V/STOL noise in city streets", Summary Report DOT-TSC-93, Mass., Inst. of Techn. (1971).
- MIGNERON, J.G.: "Etude de l'absorption acoustique de la végétation et des matériaux de construction en vue d'une meilleure atténuation du bruit de la circulation automobile auprès des corridors de transport", Rapp. No. ARC-006, Subv. par Clay Brick Association of Canada, Lab. d'acoust., Ecole d'Arch., Université Laval, Québec (1976).
- MIGNERON, J.G.: "Acoustique urbaine", Ed. Masson, Paris (1980).
- MIGNERON, J.G.: "Le bruit de la circulation automobile et son contrôle", in *l'Ingénieur*, vol. 34, pp. 3-17 (1979).
- PACHIAUDI, G., CHAPON, A. et BRUYERE, J.C.: "Bruit émis par un véhicule isolé en croisière et à l'arrêt", Etude réalisée à l'O.N.S.E.R., I.R.T. (1971).
- PINFOLD, H.C.: "Traffic noise in miniature", in *New Scientist*, pp. 648-649 (1967).
- RAPIN, J.M.: "Etude des modes de protection phoniques aux abords des voies rapides urbaines (mesure de l'influence du profil en travers et de la présence d'écrans et d'absorbants sur la pression acoustique aux abords des voies rapides urbaines)", vol. I et II, Centre Scient. et Techn. du Bâtiment, Grenoble (1973).
- RAPIN, J.M.: "Le centre des maquettes" (l'Activité du C.S.T.B. en 1975), in *Cahiers du C.S.T.B.*, vol. 170, Centre Scient. et Techn. du Bâtiment, Paris (1975).
- RAPIN, J.M., ROLAND, J. et DE TRICAUD, P.: "Réalisation de maquettes destinées à simuler l'environnement sonore du milieu urbain", contrat 72-01-282, rapp. final, Centre Scient. et Techn. du Bâtiment, Grenoble (1973).
- RAPIN, J.M., ROLAND, J. et BRUDER, P.: "Centre des maquettes - Etude à Grenoble d'une installation destinée à une simulation sur modèle réduit de la propagation du son dans les espaces urbanisés", contrats 73-60-173-73-608, 73-41-037 et 73-01-160, seconde phase, Centre Scient. et Techn. du Bâtiment, Grenoble (1974).
- RATHE, E.J.: "Über Methoden und Ergebnisse von Geräuschmessungen an Motorfahrzeugen", Ecole Polytechn. de Zurich, Zurich (1965).
- RATHE, E.J.: "Note on two common problems of sound propagation", in *Journal of Sound and Vibration*, vol. 10, pp. 472-479 (1969).
- SIVIAN, L.J.: "High Frequency absorption in air and other gases", in *Journal of Acoustical Soc. of Am.*, vol. 19, pp. 914-916 (1947).
- SPANDOCK, F.: "Das Raumakustische Modellverfahren mit maßstabgerechter Frequenztrauspövierung und die Möglichkeiten Verwirklichung", in 3e Congrès Intern. d'Acoustique, Stuttgart, 1959, Ed. Cremer (1961).
- WILLMS, W. et BREBECK, Von D.: "Untersuchung der Schutzwirkung von Schallschirmen gegen Lärm mit Hilfe von Modellmessungen", Comm. 5e Congrès Intern. d'Acoustique, Liège (1965).