

# Acoustique et Environnement: passer l'an 2000

## PARTIE I: Expérience des 30 glorieuses et quelques autres

**Claude André Lamure,**

INRETS,  
25, avenue François Mitterrand,  
Case 24,  
69675 Bron CEDEX  
Tél. : 04 72 14 23 15

**Bernard Favre,**

Renault VI,  
1, avenue Henri Germain,  
69800 Saint Priest,  
Tél. : 04 72 96 45 84,  
Fax: 04 72 96 61 89

**N**

otre regard sur l'avenir s'appuiera sur une rétrospective d'autant plus longue que durant les 50 dernières années, l'intérêt porté au bruit dans l'environnement a beaucoup augmenté en même temps que la Recherche qui lui a été consacrée. On se risquera un peu moins à la prospective car, comme on sait, celle-ci est un art difficile, surtout lorsque cet art concerne le futur! Cependant, de nombreux germes du futur peuvent être décelés dès à présent car les orientations techniques se nourrissent surtout dans les réseaux techniques et industriels internationaux; certains de ces germes se développeront certainement.

Cependant, pour ce thème de l'environnement sonore qui concerne la population dans son ensemble, le futur sera très largement déterminé par l'évolution socio-économique et la demande sociale en France ainsi que par les mouvements internationaux tels que le développement durable; ces derniers points, qui relèvent pour le chercheur du pilotage par l'aval<sup>1</sup>, ne seront pas abordés dans l'article présenté ici, ils feront l'objet probablement d'une présentation ultérieure.

Le texte porte sur l'environnement acoustique lié aux moyens de transport terrestre, car ils ont profondément modifié les paysages sonores depuis les années 1950;

<sup>1</sup> Le pilotage par l'aval (ou bottom up par opposition à top down, s'il y a un bas et un haut !) amènerait la recherche à se fixer des objectifs externes et à se préoccuper davantage d'utilité sociale. Par exemple on a peu réfléchi sur l'intérêt d'étudier le bruit des véhicules électriques et la nécessité des annonces sonores pour les signaler.

<sup>2</sup> Le bâtiment n'est évoqué que pour la protection contre les bruits extérieurs, et essentiellement les façades.

l'évolution de l'acoustique a porté beaucoup sur le bâtiment, les machines ou l'industrie. Ce dernier point ne sera pas traité ici, il le sera peut-être ultérieurement avec les mêmes perspectives que cet article dans un autre numéro de la Revue.

La présentation par décennie prend en compte autant que cela puisse se faire le début de l'activité pour chaque thème.

### Années 50. Le bâtiment<sup>2</sup>. Apparition de l'Analyse Statistique Energétique [1].

L'importance des besoins de reconstruction après la guerre, l'essor du mouvement HLM ont amené une forte demande pour la recherche d'insonorisation du bâtiment. Il faut dire que les qualités acoustiques des bâtiments avaient été négligées au début de la reconstruction mais que leur nécessité est apparue dès les années 1950. Le CSTB notamment, a travaillé alors très efficacement, sous l'impulsion de Robert Josse, sur l'isolation de parois, de façades, de planchers et d'équipements.

Les phénomènes deviennent très rapidement complexes lorsque l'on couple des solides et des masses d'air. Les modèles numériques en étaient à leurs balbutiements. Il était souvent impossible de formuler les équations décrivant le comportement vibratoire d'une structure et d'ailleurs la puissance des ordinateurs ne permettait pas le traitement de celles-ci.

Dans le cas où, pour chaque système étudié, le nombre de modes excités est grand dans la bande de fréquences d'analyse, on a été amené à effectuer une approche statistique du problème des parois simples. En 1961, R.H. Lyon définit pour l'étude des systèmes couplés une méthode appelée "Analyse Statistique Energétique", en abrégé "SEA", dont l'originalité est d'utiliser l'énergie comme variable dynamique indépendante.

## Années 60. Estimer la gêne, instrumenter. De la recherche acoustique à la question du bruit dans l'environnement

Les préoccupations pour l'environnement sonore ont amené un intérêt croissant pour des recherches appliquées que nous pouvons qualifier de recherches sur le bruit par opposition aux recherches traditionnelles sur l'acoustique initiées au XIX<sup>e</sup> siècle.

### La gêne due aux circulations terrestre et aérienne. Le choix des indices.

L'exposition des travailleurs à des niveaux de bruit intenses est un souci déjà ancien, mais c'est le secteur aéronautique qui a déclenché les premières études caractéristiques des préoccupations nouvelles en matière d'environnement sonore. Entre 1955 et 1960, les recherches sur la production et la réduction du bruit des avions ont pris leur essor aux États-Unis puis dans les pays européens ; en même temps, sont apparues les premières enquêtes sur l'impact du bruit auprès des riverains d'aéroports. Dès 1960, des recherches ont été engagées au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) sur le bruit de circulation, sa nature, la gêne qu'il provoque, les moyens d'y remédier. Un nombre étonnamment élevé de grandeurs acoustiques était en circulation pour tenter de caractériser les divers types de bruit (Pierre Liénard en avait trouvé plus de 50 dans "Décibels & indices de bruit", 1978).

### Enquêtes acoustiques

L'enquête importante menée par Mc Kennel en 1962 autour de l'aéroport de Londres a fortement influencé les méthodes des enquêtes ultérieures. La poursuite de diverses enquêtes de ce type s'est effectuée activement pour le bruit de trafic terrestre. Ainsi en France, on a eu :

- entre 1964 et 1967, une enquête le long de l'autoroute du Sud,
- entre 1968 et 1971, une enquête auprès de riverains de rues de la région parisienne,
- entre 1971 et 1974, une étude aux abords des grands axes de circulation urbaine,
- en 1977, une étude sur les quartiers soumis à la fois aux bruits de trafics automobile et aérien.

On s'est efforcé en vain d'obtenir des coefficients de corrélation élevés entre les niveaux de gêne exprimée et les niveaux de bruit. Il apparaît maintenant depuis plus de vingt ans que, pour la prédiction de la gêne, une mesure globale à partir d'une question unique donne des résultats supérieurs à ceux qui dérivent d'une batterie de questions.

On se contente d'échelle de gêne comme les réponses à la question "Etes-vous gêné?" avec réponse au choix :

Pas gêné / Un peu gêné / Modérément gêné / Très gêné

Quant à certains comportements, ils fluctuent clairement en fonction du bruit : 3 types ont retenu l'attention :

- la fermeture des fenêtres devient très fréquente à partir des niveaux LeqA, en façade (de 0h00 à 5h00) de 50/52 dB (A) (soit à partir de 45 dB (A) à l'intérieur des chambres).

- le sommeil est transféré - dans les rares cas où le logement est sous-peuplé - vers les pièces moins exposées lorsque le LeqA, devient élevé et correspond à un LeqA diurne supérieur à 65 dB (A) en façade.

- la consommation de somnifères augmente sensiblement pour des niveaux LeqA, en façade dépassant 60/62 dB (A) dans la journée.

Des résultats très voisins ont été trouvés également dans d'autres pays européens. Les enquêtes nombreuses menées de 1960 à 1980 sur le thème de la gêne due au bruit, ont conduit au choix du LeqA, 8 heures/20 heures pour caractériser la gêne de jour.

Pour les actions de protection des riverains, on peut se centrer sur les troubles de comportements suivants : impossibilité d'écouter la télévision avec les fenêtres ouvertes, difficulté de converser, fermeture des fenêtres en été au prix d'une chaleur excessive dans les locaux...

### Méthodes quantitatives

Dans les années 1960 et 1970, on s'attachait aux méthodes d'analyse statistique des données telles que les résultats d'enquêtes (cf. Tableau 1) ; ce type d'étude semble être tombé en désuétude alors qu'il resterait utile aujourd'hui pour juger de la valeur des résultats souvent incertains.

Indicateur	Corrélation avec le bruit	Seuil de signification	Seuil de bruit de nuit (de jour) LeqA en extérieur	
			1er seuil	2e seuil
Pourcentage de personnes s'endormant en moins de 20 mn	0,65	1 %	44 (55)	55 (65)
Difficultés à s'endormir	+ 50 ans	pas significatif		
	- 50 ans			
Pourcentage de personnes ayant souvent et très souvent des difficultés à s'endormir	0,73	>1 %	45 (56)	55 (65)
Pourcentage de personnes prenant des somnifères au coucher	0,76	>1 %	45 (55)	55 (65)
Pourcentage de personnes étant souvent et très souvent réveillées la nuit	+ de 50 ans	pas significatif		
	- de 50 ans			
	0,22	>1 %		
	0,86	>1 %	45 (56)	55 (63)

Tab.1 : Effet du bruit sur le sommeil. Étude statistique sur les résultats d'enquête [2]

### La perturbation du sommeil

La perturbation du sommeil a été étudiée et des recherches de longue durée sur les perturbations du sommeil par le bruit ont été engagées. On doit signaler à leur sujet les qualités et la persévérance des chercheurs qui les ont assurées (citons Michel Vallet et le Dr Alain Muzet en liaison avec les Professeurs de médecine Jouvét et Metz). Les recherches ont montré dans les années 1980 que l'habitation au bruit n'existe pratiquement pas pour le système cardio-vasculaire et que les enfants sont aussi perturbés que les adultes. Les effets électro-encéphalographiques analysés sur des durées de 5 ans ou plus chez les riverains d'infrastructures de transport ne régressent presque pas dans le temps, les pourcentages des bruits qui provoquent des effets EEG sont à peu près de 25 % de la totalité des bruits tant en 1976 qu'en 1981.

### Le choix de l'indice

Le choix de l'indice a été très discuté, d'autant que la Grande-Bretagne qui a été pionnière dans ce domaine a rapidement établi un système de calcul et de règlement fondé sur le L<sub>10</sub>, niveau dépassé pendant 10 % du temps.

### Quel indice ? Hong Kong. Avril 1987. Extrait [3]

The flyover, rising from Hung Horn and joining the Kai Tak Airport tunnel, was of particular concern due to its intensive traffic flow volume and its proximity to inhabitants. Six measurement spots were selected by the Local District Board Members [...] In the Environmental guidelines, a descriptor **L10 (1 hour)** is used to assess road traffic noise affecting adjacent developments. L10 (1 hour) denotes the noise level exceeded for 10 % of a one-hour measurement period in dB (A).

The set of Ln levels at various measurement spots is drawn. It can be seen that the L10 figures cover the range between 80 dB (A) to 83 dB (A). These figures are very significantly higher than the value 70 dB (A) stipulated in the environmental guidelines for new developments.

Measurement Location *	1	2	3	4	5	6
Distance (m)	10.20	16.40	11.60	13.00	19.90	18.50
L <sub>5</sub> dB (A)	81.5	82.0	82.5	83.5	80.5	81.7
L <sub>10</sub> dB (A)	81.0	81.0	81.0	82.4	79.9	81.0
L <sub>50</sub> dB (A)	78.0	78.0	78.0	79.6	77.2	78.5
L <sub>90</sub> dB (A)	75.0	75.5	75.5	76.5	75.0	75.5
L <sub>95</sub> dB (A)	74.0	75.0	74.0	75.6	74.2	74.6
Leq dB (A)	78.2	78.8	79.0	80.0	77.4	78.6

\*From microphone to the centre line of the nearest flyover dual carriageway.

Malgré les progrès de l'instrumentation, la lourdeur des méthodes de prédiction des L<sub>10</sub> et le peu de différence de corrélation (indice/gêne) selon le choix de l'indice ont amené la presque totalité des pays à adopter progressivement le LeqA comme indice significatif de la gêne due aux transports terrestres ; cependant, le choix de départ de la Grande-Bretagne a continué dans divers pays et notamment au Japon ou à Hong-Kong (cf. encadré). On remarque l'apparition des préoccupations d'environnement sonore dans certains pays émergents.

#### Instrumentation-Métrologie in situ

Il est apparu dans les années 1960 que la nécessité d'instruments et de processus métrologiques s'imposait pour deux nouvelles catégories d'emploi :

- Le contrôle et l'amélioration de l'environnement acoustique qui exigent des acquisitions de grandeurs acoustiques pendant de longues durées.
- Des instruments scientifiques de très grande fidélité nécessaires aux recherches de mécanique et au traitement de machines, par exemple, imagerie acoustique ou intensimétrie. L'intensimétrie a été vulgarisée après le colloque spécialisé du CETIM de Senlis en 1982 organisé par Jean Turret.

La mesure du bruit a exigé d'abord la définition des grandeurs retenues par les réglementations. La banalisation depuis 10 ans du LeqA, comme indice de bruit diurne lorsque ce dernier est élevé, a entraîné l'étude et la construction d'appareils de mesure très divers. Ces appareils n'ont généralement pas pu être lancés en grande série en France par défaut de support industriel. La mise au point de produits de grande diffusion destinés à la surveillance de l'environnement sonore était souhaitable pour démocratiser l'action de lutte contre le bruit mais elle n'aurait dû en principe se faire qu'en liaison avec l'ANVAR et les potentialités industrielles. À défaut, les recherches effectuées en France risquaient de servir seulement des intérêts industriels étrangers.

Alors que, au début des années 1960, on en était encore à des analyses statistiques rudimentaires des niveaux de bruit (cf. figure 1) avec comptages manuels des véhicules, les progrès de la situation internationale de l'industrie de la mesure ont bénéficié rapidement des progrès considérables de l'électronique et de l'informatique. Les progrès

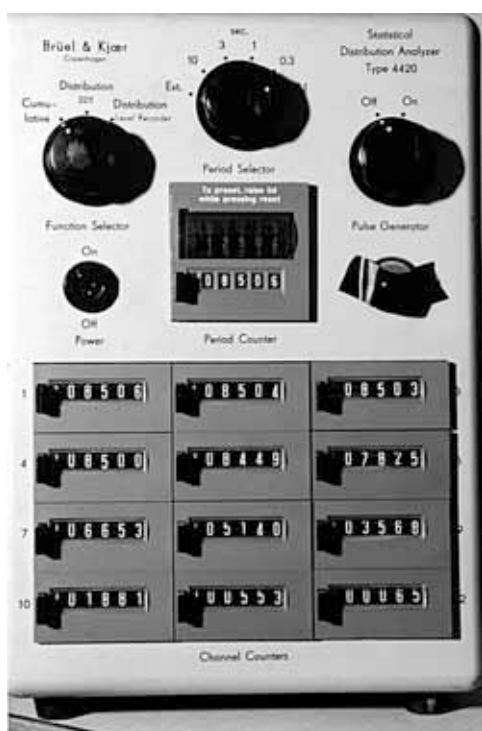


Fig.1 : Un analyseur statistique de niveaux de bruit des années 1950-1960

industriels dans le monde ont amené dès 1970, les responsables français à une grande prudence, ceci a abouti à abandonner, malgré les efforts d'origine, les financements publics au titre de la métrologie. En revanche, les besoins de connaissances sur le bruit dans l'environnement et ses effets ont exigé un travail in situ important et les techniciens se sont dévoués pour le travail à l'air libre. On notera par exemple qu'une enquête menée vers 1980 à l'IRT-CERNE pour le CETUR a comporté des mesures de bruit devant la façade de la chambre occupée pour le sommeil (ce qui n'a jamais été le cas des autres enquêtes [4]).

## Années 70. Mesurer ou prévoir les niveaux dans l'environnement ?

### Les particularités de la recherche acoustique appliquée à l'environnement

La différenciation entre Acoustique traditionnelle et Acoustique appliquée à l'environnement s'affirme depuis une décennie (cf. encadré) mais les exigences de qualité de l'acoustique demeurent notamment pour les mesures et la précision des prévisions de bruit ; l'accent est de plus en plus mis sur le caractère pluridisciplinaire des recherches à mener.

Dans les années 1970, la qualité des mesures restait un souci essentiel et la recherche à leur sujet était stimulée par le besoin d'unités nouvelles telles que le Leq. Le premier indice adopté a été le  $L_{10}$  en Grande-Bretagne, les recherches et discussions sur un indice pour les bruits extérieurs étaient très actives.

Après la parution de la loi sur la protection de la nature et de l'environnement en 1976, et du fait de la construction intense d'infrastructures pour lesquelles une étude d'impact a été imposée, on a aperçu la nécessité de prévoir le bruit plus encore que de le mesurer (une première étude prévisionnelle du bruit d'une centrale électrique avait été effectuée en 1964 dans le Rhône).

La grande préoccupation due au bruit des transports terrestres, venant après les problèmes de bruit autour des aéroports, a entraîné l'organisation de congrès spécialisés sur le bruit des transports comme à Southampton en 1974. Les bruits de véhicules et de roulement commencent à faire l'objet de communications détaillées (cf. Annexe I).

### Recherche en matière d'acoustique appliquée à l'environnement [5]

La recherche en matière d'acoustique appliquée à l'environnement présente diverses particularités et peut se distinguer des méthodes traditionnelles du physicien ou du psycho-acousticien :

- Elle traite le plus souvent de bruit de spectres à large bande et non de signaux musicaux, ou de sons purs.

- Le niveau de pression acoustique à considérer est le plus souvent constamment fluctuant dans le temps (bruits de trafic).

- L'objectif tend en général à éliminer le bruit à la source ou à réduire la transmission acoustique, alors que l'acoustique classique a cherché à préserver la qualité du son, à le transmettre dans les meilleures conditions (théâtres grecs...).

La recherche est destinée à l'orientation de l'action, qui doit inclure l'impact du bruit et ses effets de diverses natures. Le travail pluridisciplinaire s'impose très souvent et s'effectue sous des formes variées puisque peuvent intervenir des psychosociologues, des physiologistes, des physiciens, des économistes.

### Les modèles de prévision du bruit de 1970 à 2000

La prévision du bruit de circulation est rapidement apparue comme indispensable pour gérer la circulation du point de vue de l'environnement sonore. Son rôle à côté des mesures acoustiques a émergé avec les besoins de l'action et aussi avec la généralisation des études d'impact sur l'environnement rendues obligatoires par la loi de 1976.

L'urbanisation rapide s'est parfois trouvée en situation conflictuelle avec les réflexes professionnels des acousticiens qui travaillaient plus souvent sur les zones de calme relatif et sur les effets des conditions météorologiques sur la propagation du bruit (cf. figure 2). Les premières méthodes de prévision du niveau de bruit routier avaient été élaborées vers 1965 assez empiriquement d'après les mesures pour le cas des autoroutes effectuées en site ouvert.

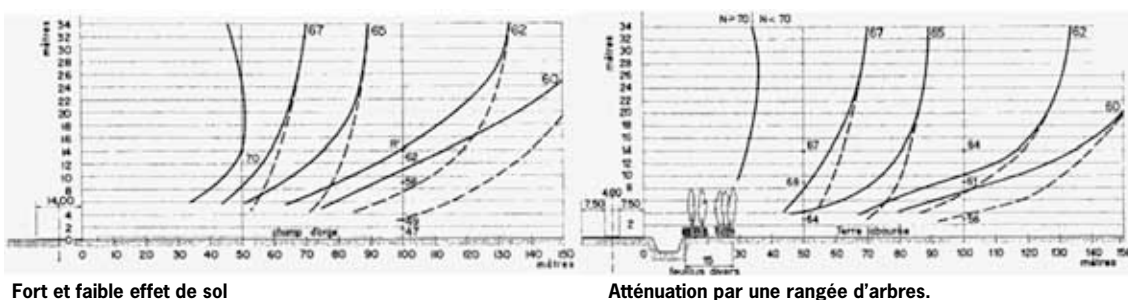


Fig. 2 : Le bruit aux champs. Mesures de LeqA à distance d'une autoroute. Courbes isophoniques jusqu'à 34 m de hauteur au-dessus du sol et 150 mètres de distance du bord de chaussée.

Caractéristiques	Formules Abaques	Calculatrice	Programme	Modèle réduit
Usages	Dégrossissage Ponctuels	Ponctuels optimisations possibles	Tous usages avec optimisations possibles	Complets ± pour optimisation
Précision (dBA)	± 3		± 2	± 2
Délai de réponse	1-2 jour	1 jour	2 semaines	2 mois
Flexibilité : Etude de variantes - Recalage avec mesures	Faible	Assez bonne	Bonne	Assez bonne
Facilité de diffusion	Bonne	Bonne	Moyen	Médiocre
Intérêt pédagogique	Bon	Médiocre	Faible	Très bon

Tabl.2 : Méthodes de prévision du bruit de circulation terrestre

Outils Phases d'une étude	Formules Abaques	Calculatrice	Programme de calcul ordinateur	Modèles réduits	Mesures in situ de longue durée
Constat initial	X				X
Détection des problèmes Esquisses de solution	X	X		X	
Bilan au stade de l'avant-projet	X	X	X	X	
Mise au point des solutions		X	X	X	
Mise au point des détails architecturaux au stade du projet				X	
Réception des ouvrages					X

Tabl.3 : Domaines d'utilisation des diverses méthodes de prévision du bruit

Des approches plus théoriques se sont imposées [6]. Les méthodes de calcul portaient surtout sur le Leq.

Après 1980, la prévision comme la mesure ont pu bénéficier des grands progrès de l'électronique et de l'informatique. On a assisté à un grand développement de logiciels de calculs parfois concurrents et des colloques spécialisés sont apparus. On a pu utiliser des moyens très variés comme le montrait le tableau 2 élaboré à la fin des années 1980.

Les comparaisons de résultats calculés (tableau 3) ou mesurés ont fait l'objet de travaux coopératifs initiés par le ministère de l'environnement [7] et montré des différences de résultats de l'ordre de 3 à 4 dB (A). Une étude des diverses méthodes européennes de calcul a montré en 1985 que les résultats de l'application de ces méthodes à des cas types différaient de 3 à 5 dB (A) (J. Lang, 1985).

### Les Guides du bruit

En 1972, un premier Guide du bruit des routes urbaines a été publié par la Direction des routes à l'usage des services techniques. Pour tenir compte des connaissances acquises dans une science en constante progression telles que adoption du Leq comme paramètre représentatif, définition de sujétions techniques pour les ouvrages de protection ou développement de méthodes de calcul, un nouveau Guide du bruit des transports terrestres a remplacé progressivement le Guide de 1972.

Il comprenait les fascicules suivants :

- Présentation générale (septembre 1976)
- Aspects de la gêne due au bruit de la circulation routière (février 1976)
- Catalogue de cas (septembre 1976)
- Recommandations techniques pour les ouvrages de protection contre le bruit (mai 1978)
- Note technique relative à l'utilisation du verre dans la construction des écrans acoustiques (septembre 1980)
- Prévision des niveaux sonores (novembre 1980).

### Modèles informatiques. MITHRA contre Microbruit après 1980

"L'informatique dompte le bruit", J.-M. Rapin, CSTB, 1990"

Une très grande activité s'est manifestée dans le domaine de la prédiction du bruit notamment par les moyens informatiques. Un congrès organisé à Lyon en a été une belle illustration (cf. Annexe II). Au début des années 1980, le ministère de l'équipement (CETUR) met en exploitation sur ses ordinateurs, le programme de calcul BRUIT développé par l'IRT. Il commence à être utilisé par le réseau de CETE. Ce logiciel fera ultérieurement l'objet d'une version pour microordinateur, appelé Microbruit. Corrélativement, le CSTB développe un logiciel MITHRA à partir de ses travaux sur la propagation du bruit en zone urbaine.

La concurrence de ces deux modèles développés par les organismes publics a été caractéristique de l'ouverture



**MITHRA : à la recherche des trajets acoustiques [8]**

Le logiciel MITHRA est fondé sur un algorithme rapide de recherche des trajets acoustiques entre sources de bruit et récepteur dans un site urbain complexe. Cet algorithme repose sur une méthode inverse de tracé de rayons. Les trajets sont représentés par des rayons directs, diffractés, réfléchis (par le sol ou les façades supposées verticales) ou une combinaison des deux derniers. N'étant pas limité en ordre de réflexion et de diffraction, l'algorithme est bien adapté à la prévision du bruit de trafic routier aussi bien dans un tissu fermé tel que le centre d'une ville à grande densité de construction, que dans un tissu ouvert dégagant de vastes espaces entre les constructions ou encore dans des sites de montagne où le relief du sol influe sur la propagation du bruit.

Le logiciel MITHRA est constitué de modules permettant :

- la saisie des données et leur contrôle : digitalisation du site, entrée des points récepteurs c'est-à-dire les endroits où sont calculés les niveaux sonores et entrée des caractéristiques du trafic ;
- la recherche des trajets existants entre un point précis et les voies de circulation, et le calcul acoustique ;
- l'édition des résultats.

d'un marché pour la prévision du bruit et de l'adaptation des techniques modernes. Le développement des modèles et leur sélection par le marché ont été longs, ce n'est que dans les années 1990 qu'il est apparu que le modèle MITHRA s'imposait définitivement par son adaptation aux besoins et capacités des usagers. Les bureaux d'étude, notamment, l'ont adopté.

**L'affaire des logiciels vue en 1994 [9]**

En 1986, alors qu'il n'existait pas de logiciel de prévision du bruit, le CETUR a souhaité développer un tel outil, et, après appel d'offres, en a confié l'élaboration à une équipe pilotée par le CETE Méditerranée. La mise au point de ce logiciel : Microbruit a été ponctuée de péripéties qui en ont altéré l'image et retardé la disponibilité.

De son côté, le CSTB, dont l'offre avait été éliminée, a développé son propre logiciel : MITHRA. Très vite, par ses facilités d'utilisation et la qualité des présentations auxquelles il se prête, ce logiciel a connu un succès certain auprès de la clientèle. Le développement de deux logiciels concurrents n'a rien de très normal. Ce qui l'est moins, outre la conduite défectueuse du projet Microbruit, c'est l'incapacité, au moins apparente, du CETUR à définir et faire respecter une politique claire vis-à-vis des logiciels de prévision du bruit et à veiller aux bonnes conditions d'expertise de ceux-ci.

C'est finalement le tour passionnel pris par certaines affaires au détriment du traitement des vrais problèmes. On en retiendra pour MITHRA, des avantages en matière d'ergonomie et de présentation des résultats.

La compétition entre deux logiciels conçus par des organismes publics a provoqué une certaine polémique bien que beaucoup s'accordent à dire que la compétition est une voie normale de progrès. Au-delà de la polémique mentionnée en encadré pour son rôle d'étape historique, il faut voir dans cette affaire, l'évolution générale de la conception depuis des logiciels avec une informatique centralisée vers une informatique décentralisée plus conviviale pour des utilisateurs divers et intéressant de ce fait un nombre d'acteurs plus grand (J. Delcambre).

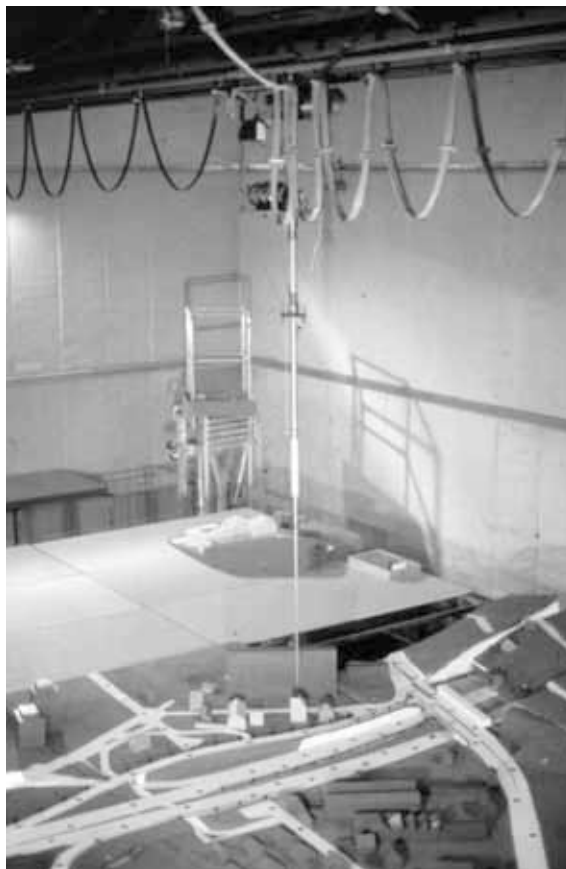
**Centre des maquettes de simulation du CSTB**

Fig.3 : Laboratoire des modèles réduits

Outre les méthodes de calcul, l'utilisation de maquettes a comporté la création du Centre des maquettes de modèles réduits du CSTB à Grenoble. Les maquettes y sont à l'échelle 1/100<sup>e</sup> dans un local d'atmosphère, d'humidité et de température bien contrôlées afin de limiter l'absorption des ultrasons par l'air : les 100 sources, initialement des clochettes, sont maintenant constituées par deux jets d'air se rencontrant dans une cavité cylindrique, les maquettes sont constituées de polystyrène de haute densité peint ou vernis pour limiter l'absorption des façades à 0,1.

Les sols sont constitués suivant le cas, de moquettes diverses destinées à représenter des sols naturels plus ou moins absorbants. Cette installation permet des études acoustiques complètes de sites urbains :

- Etudes opérationnelles de propagation du bruit dans des sites simples ou complexes, non encore résolues sur le plan théorique et donc non modélisées (tranchées de profil variable, sites complexes du point de vue des réflexions ou des diffractions acoustiques).
- Etudes de sites de grande étendue comportant de nombreuses variantes de tracés, et de protections acoustiques (échangeurs autoroutiers...).
- Etudes de plans masses de bâtiments situés dans des zones exposées à des bruits extérieurs importants.

Cette installation est très utile pour les cas de géométrie ou de topographie complexes difficiles à traiter par le calcul numérique.

### Débuts de connaissance des émissions de bruit des moteurs [10]

Les années 1970 voient s'engager corrélativement la sévérisation des valeurs réglementaires d'émission sonore des véhicules routiers et la recherche des sources sonores émergentes sur le véhicule et des moyens de les traiter. Plusieurs pays (Allemagne Fédérale, France, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, USA), engagent des programmes concertés de développement de véhicules silencieux pour préparer les futures générations de véhicules (Réf. a et b de [10]). En général, ces programmes ont pour but :

- de déterminer la faisabilité technique de la réduction du bruit grâce à des techniques d'insonorisation appropriées aux différents types de véhicules,
- d'évaluer l'influence de la réduction du bruit sur d'autres caractéristiques des véhicules : le coût de production et d'entretien, la consommation, la fiabilité, etc.

En France par exemple, entre 1973 et 1980, les Actions Thématiques Programmées, programme de l'État piloté par l'Institut de Recherche des Transports (IRT), permettent de financer une trentaine de projets avec des industriels (Berliet/RVI, Renault, Peugeot), des sociétés d'études spécialisées (le Moteur Moderne, Bertin, Metravib, Boët), des laboratoires universitaires (INSA Lyon, ECP, ICPI) pour un montant total de l'ordre de 20 MF.

Les travaux portent essentiellement sur la réduction du bruit des moteurs et des systèmes d'échappement et de ventilation, avec des techniques de correction acoustique (par exemple, l'encapsulation du groupe motopropulseur pour les véhicules à moteur Diesel). Ils portent aussi sur les matériaux acoustiques, et sur les méthodes d'identification des sources de bruit. On peut évoquer par exemple les recherches d'antennes de la société Metravib et de l'Institut de Chimie et Physique Industrielles de Lyon, et leur application à l'analyse des signatures sonores des véhicules, qui sont restées exemplaires et inégalées à ce jour.

On assiste également à la genèse de travaux approfondis sur l'identification des mécanismes de génération et de propagation du bruit dans les structures mécaniques, en particulier les moteurs thermiques (équipe du Pr Priede de l'ISVR de Southampton (Réf c. de [10])).

Le mouvement de fond engagé sur l'analyse du bruit des véhicules permet ainsi un bilan déjà précis de l'importance des différents types de sources de bruit, des possibilités techniques potentielles, et de la répartition entre sources d'origine mécanique et sources de bruit de roulement.

Mais, à l'orée des années 1980, et suite aux effets successifs des chocs pétroliers, l'équilibre se déplace vers la réduction de la consommation de carburant, et de nombreuses études demeureront inexploitées. L'encapsulation des moteurs bruyants est évoqué en liaison avec les préoccupations liées à l'énergie comme l'aérodynamique.

### Années 80. Les grandes infrastructures

La poursuite de la construction intensive de routes, autoroutes et TGV a maintenu l'intérêt pour la protection des riverains, le LeqA a pu être adopté vers 1975 pour le bruit de trafic permettant ainsi l'action, notamment en matière de réglementation ; on manquait encore d'indices pour évaluer l'environnement sonore pendant la nuit. Il apparaissait de plus en plus nécessaire de poursuivre, pour l'étude des indices, une étroite collaboration entre acousticiens et psychologues comme en avait rassemblé l'IRT en France.

### Écrans. L'œil ou l'oreille ?

La technique des écrans antibruit était bien connue depuis 20 ans ; le premier écran, étudié par le CSTB, a été construit en bordure de l'autoroute du Sud vers 1961. Pendant les 30 glorieuses, une grande activité de construction d'écrans a entraîné, après la mise au point de méthodes de calcul notamment dans le Guide du bruit, un intérêt centré surtout sur les qualités visuelles de ces dispositifs qui ont été d'une variété considérable. On a effectué l'apprentissage des écrans transparents en concluant que les crédits d'entretien de ces écrans devaient être prévus (pour les salissures, la casse...). Il ne s'agit plus guère d'acoustique et en 1998, on écrit à la Direction des routes : "Chacun peut aujourd'hui constater le long de nos autoroutes, un manque d'unité et de qualité architecturale de ces écrans. Bien souvent, ces réalisations ont ignoré leur intégration dans la ville et le paysage routier" (cf. Annexe III).



Fig.4 : Écrans acoustiques et Esthétique

### Un mur antibruit photovoltaïque

Fin juillet 1995, a été mis en service en Allemagne, le premier mur antibruit photovoltaïque intégré qui alimente en courant d'origine solaire "propre" le réseau électrique de Sarrebruck. Dans une structure de 332 m, incorporant la totalité des éléments, a été intégrée une unité modulaire de 293 m de long, d'une puissance de 40 kW permettant l'alimentation d'environ une quinzaine de foyers.

Des centaines de kilomètres d'autoroutes et d'autres voies de circulation offrent des surfaces considérables pour l'implantation de centrales électriques antibruit, évitant ainsi l'inutile pollution des paysages.

Dans le futur, des écrans intégrés aux voies avec fonctions multiples peuvent être imaginés, les fonctions relevant de la signalisation, du captage d'énergie, etc. L'exemple de l'écran support de capteurs solaires est connu depuis le début des années 1990 en Allemagne [11] ou au Japon [12], l'intérêt pour ce type de mur multifonctionnel apparait maintenant en France.

L'acousticien optimiste pensera plutôt qu'il faut dès à présent penser à construire des écrans faciles à démonter et à détruire le jour où les véhicules seront très silencieux!<sup>3</sup>

*3 Claude Lamure a pu écrire dans un rapport officiel de 1999: "Il me semble peu souhaitable de couvrir le pays d'écrans, il faudra même, dans un contexte de long terme et de développement durable, penser à la facilité de leur élimination dans deux ou trois décennies."*

### Isolement des logements. Les traitements de façade

La technique de l'isolation de façade présente les avantages d'une grande efficacité acoustique si les fenêtres sont fermées. L'expérience a fait prendre conscience de divers inconvénients :

- l'isolement de façade ne protège pas les espaces extérieurs, ce qui a souvent amené les riverains à demander en simultané l'édification de barrières acoustiques,
- la protection contre le bruit peut devenir une gêne thermique en saison chaude lorsqu'il faut choisir entre fenêtres ouvertes ou fenêtres fermées ; le bénéfice d'un climat tempéré comme en France est ainsi perdu,
- les bruits intérieurs à l'immeuble émergent si l'isolement de façade est excessif et une gêne nouvelle due au voisinage se substitue à la gêne due au trafic.

Cependant l'effort d'isolement de façade a été assez constant aussi bien sur l'initiative des organismes de logements collectifs publics (HLM) que pour les logements privés. Cet isolement s'est trouvé malheureusement souvent confondu avec l'isolement thermique encouragé aussi pour l'économie d'énergie.

### Couverture partielle et enceinte totale

Dans les zones à forte population avec des bâtiments élevés, l'implantation des infrastructures en tunnels ou une couverture totale ou partielle peut diminuer le bruit de 10 à 30 dB (A), mais ces moyens sont très coûteux. Dans les zones urbaines en particulier, les routes et les métros souterrains sont souvent la seule solution acceptable pour l'environnement. Un encapsulage total de la voie par un écran solide, solution ultime adoptée il y a dix ans dans certains pays étrangers (cf. figure 6) n'a été réalisé qu'exceptionnellement en France sous la forme non d'encapsulage mais de couverture pour laquelle il y



Fig.5 : Une première, le traitement des HLM de Bron Parilly



a moins d'intrusion visuelle mais des coûts plus élevés (ex : le boulevard périphérique dans la traversée du bois de Boulogne, l'autoroute A1 au nord de Paris). Il peut dans le futur être réédité car les riverains ont des exigences croissantes et il est évoqué de plus en plus pour diverses sections du périphérique de Paris.

La couverture totale est coûteuse pour la ventilation et l'éclairage, la couverture partielle ou ajourée ne l'est pas. La recherche s'est concentrée sur la conception de couvertures avec des ouvertures en général sous forme de grillage en lames ou de séries de lucarnes ; la réduction du bruit peut atteindre 15 dB (A) ; l'intérêt d'un revêtement d'absorption du bruit sur les ajours ou les grillages en lames a été évalué [13] mais il n'a guère été construit qu'une seule couverture ajourée en France. En revanche, diverses couvertures partielles ont été construites lorsque les voies longeaient des immeubles de grande hauteur.



Fig.6 : Couverture en surélévation et écran avec casquette à Hong Kong [14]

### Errements normatifs et incidences à long terme

Les méthodes de mesure des émissions sonores des véhicules (et non pas les limites qui, elles, sont en baisse continue) n'ont pas été modifiées en Europe pendant plus de quarante ans. Cette situation peut étonner notamment dans les pays qui abordent le sujet (cf. encadré) alors même que l'efficacité de ces mesures de réglementation est mise en doute (cf. encadrés et figure 7).

#### Assessments on future trends in pass-by noise regulations with a prediction model. Ahmet Güney. Istanbul

There has been no major change in the pass-by test technique which has been employed for more than 30 years in order to control the external noise of vehicles having a disturbing effect on the environment. Although the reliability of the method is subject to arguments, no essential change is expected in the near future. For this reason, the ISO 362 based noise prediction model will maintain its position on the agenda in the analysis of vehicle external noise in the coming years.

Cependant la méthode de mesure dite ISO ne semble guère devoir évoluer prochainement.

#### Une évaluation internationale de l'efficacité de la réglementation des émissions de bruit de véhicules routiers [15]

The standardized method for measuring the noise emissions of individual vehicles that is most widely accepted is described in International Standard ISO 362, "Acoustics-Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles-Vehicle noise regulations were first introduced in some countries more than 20 years ago, the emission limits have been substantially lowered".

Simply stated, there have been very few investigations dealing with the effectiveness in reducing road traffic noise over the period of time during which the current noise emission limits have been in place and none of them has been global. The results of these restricted studies imply that the regulations have had a much smaller effect than had been anticipated. In some cases, the regulations are viewed as having been completely ineffective.

The study has included assessments of the development of vehicle noise emission limits over the past 25 years, the most important noise reduction measures on vehicles, changes in vehicle noise emissions over the past 25 years for various categories of road vehicles and for various driving conditions, expected effectiveness of the planned lowering of vehicle noise emission limits, and the reasons why the effectiveness of the regulations has been less than intended.

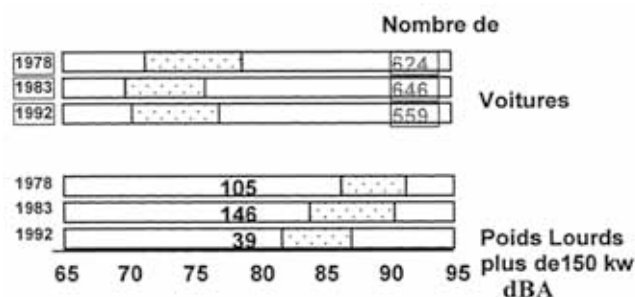


Fig.7 : Niveaux d'émission de bruit par les véhicules à moteur en trafic urbain en Allemagne (7,5 m du centre de la voie, vitesse urbaine constante) [15]. (Le nombre de véhicules suivis par des mesures est indiqué à droite du graphique).

### Années 1990. Les normes de certification acoustique des chaussées

L'importance de la définition de méthodes de qualification acoustique des revêtements de chaussée est grande car sans elles on ne peut guère envisager d'action efficace et légitime ; or il faut une dizaine d'années pour développer une nouvelle méthode à partir de rien.

## Mesures acoustiques au passage et en continu

Les méthodes de mesure permettant d'évaluer les performances acoustiques des revêtements de chaussées se répartissent en deux grandes familles :

Mesures acoustiques au passage	Mesures acoustiques en continu (A & T, n° 15 p. 21)
NFS 31 119 "Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées". ISO 118 19-1 "Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1 : Statistical Pass-By Method (SPB)"	ISO/CD 11819:2 "Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2 : The Close Proximity Method (CPX)"
Et non normalisées	Et non normalisées
Méthode Franco-Allemande Méthodes VM, VI	Méthode du LREP Méthode du LRPC de Lyon

Les premières études sur les méthodes au passage ont été engagées en 1986 (méthode appelée alors "franco-allemandes"). Ces méthodes ne sont qualifiées que depuis peu.

Les recherches du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées se sont concentrées sur les méthodes "au passage", au détriment des méthodes en champ proche, parce que les moyens disponibles ne permettaient pas de mener les deux approches de front.

A l'instigation de la Ville de Paris, le Laboratoire Régional de l'Est Parisien (LREP) a, quant à lui, travaillé à partir de 1985-1986, sur la mesure en champ proche, sur la base d'un véhicule instrumenté.

La méthode a évolué au cours du temps. Depuis 3-4 ans elle est stabilisée. Il reste à la formaliser. La méthode pourrait, de l'avis du LREP, recueillir l'assentiment des Ingénieurs des villes de France (IVF) et se généraliser dans les collectivités locales mais elle n'est pas complètement validée en particulier pour prévoir les niveaux de bruit en façade d'immeuble, elle est encore moins adoptée au plan international.

Les méthodes au passage disponibles (VM et VI) ne sont pas représentatives de la variabilité potentielle de l'émission du bruit liée à l'hétérogénéité du revêtement et elles peuvent être difficiles à mettre en œuvre sur les sections innovantes.

En 2000, il y a accord sur l'intérêt de disposer d'une méthode de mesure en continu, utilisable en zone urbaine, en complément des méthodes au passage.

## Conclusions sur les orientations de recherche pour la normalisation

L'orientation au départ des méthodes peut avoir des conséquences à très long terme sur les résultats à espérer de l'action contre le bruit. Il est difficile d'effectuer un diagnostic pour réduire ces retards inhérents à la démarche de recherche, peut-être faudrait-il un pilotage très en amont dans le secteur économique concerné ? Ce dernier pourrait peut-être signaler les besoins futurs même si au moment de la demande, il n'a ni besoins ni connaissances.

La possibilité de passer des résultats de mesure au passage (VI) à une évaluation du niveau de bruit en façade est quelque chose de tout à fait récent en France, cependant dans le cas présent, il existe une expérience internationale à valoriser.

Outre le travail encore nécessaire sur les mesures en continu, elles doivent pouvoir être raccordées aux méthodes au passage existantes. Un programme pluriannuel est à construire, prenant en compte, notamment, le raccordement de la méthode en champ proche aux méthodes au passage.

## Les progrès du TGV

Le domaine ferroviaire a été marqué dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle par l'apparition du TGV, celui-ci a largement focalisé l'attention en particulier de la recherche en acoustique.

Des progrès très sensibles du TGV sont apparus depuis la mise en service des premières lignes en 1981, ils proviennent de :

- l'introduction de systèmes de freinage à disque à la place des freins sabots,
- l'extension aux motrices de ce remplacement,
- l'amélioration des disques,
- la substitution des disques ajourés par des disques à ventilation aérodynamique.

De manière générale, les exigences très élevées de qualité pour les voies et les roues amènent inévitablement des progrès acoustiques liés au passage obligatoire à la vitesse de 300 km/h lors de l'ouverture complète de la ligne du TGV Sud Est.

Types et années disparition en service	Emissions	Réductions
TGV des débuts (Paris-Lyon, orange, 270 km/h, 1981)	99,5	0
TGV de deuxième génération (Atlantique, bleue, 300 km/h, 1989)	94,5	-5 à -6
Rame améliorée, TGV réseau (bleu)	93	-8
TGV duplex à deux étages (bleu)	≤92	-8 à -12

Tab.4 : Emissions des divers TGV. Émissions à 25 m. Valeurs SNCF

## Maîtrise du bruit routier urbain

Après s'être porté sur les grandes infrastructures (en France du moins), l'intérêt s'est orienté vers le bruit urbain. En 1992, on a assisté à un EUROSYPHOSEUM à Nantes du 12 au 15 mai, sur la "Maîtrise du bruit routier en milieu urbain" <sup>4</sup>. On a commencé dans cette décennie à mettre l'accent sur les modèles de prévision du bruit urbain et la réduction du bruit urbain (par exemple, la réduction des arrêts de circulation).

<sup>4</sup> L'intitulé qui évoque le bruit routier et non la circulation automobile illustre bien le passage des préoccupations liées à la route interurbaine aux préoccupations de bruit de circulation automobile en zone urbaine.

Mais du côté de l'action, si la lutte contre les irrégularités de la circulation a trouvé ses raisons surtout dans le besoin de confort de l'automobiliste, on n'a eu de résultats sur la limitation de vitesses qu'assez lentement et on n'a presque rien obtenu sur la réduction du bruit.

### Limiter les vitesses

On soupçonnait depuis longtemps que l'abaissement ou au moins le respect des limitations de vitesse présentait le plus d'effets favorables pour les riverains de voies de circulation.

Aux vitesses de croisière inférieures à 60 km/h, les variations de  $L_{max}$  et de  $LeqA$  avec la vitesse sont beaucoup plus faibles et, surtout pour les véhicules lourds, les modifications de vitesses n'ont guère d'effet sur les niveaux de bruit.

En zone urbaine, ce sont le plus souvent les irrégularités de vitesse et les accélérations des véhicules ou leurs démarrages qui dominent la production de bruit, le travail classique de l'ingénieur de la circulation est alors surtout de réguler les allures et de réduire le nombre des arrêts. Il a fallu des expérimentations spécialisées en Allemagne et en Suisse pour évaluer une remarque d'expert selon laquelle, soumis à des limites de vitesse faible, les conducteurs utiliseraient des rapports de vitesse plus bas et émettraient par conséquent plus de bruit!

#### *Il faut se méfier des experts!*

En effet, dans les années 1970, on a trouvé, après que la limitation de vitesse eut été réduite de 50 à 30 km/h sur des voies urbaines, que les niveaux de bruit étaient partiellement réduits, comme prévu, par cette limitation mais aussi grâce aux changements de style de conduite [16]: les conducteurs accéléreraient et décéléreraient moins agressivement que lorsqu'ils conduisent sur une voie où la vitesse n'est pas limitée. La réduction du bruit en  $LeqA$  attribuable aux changements du comportement du conducteur se situait entre 2 et 4 dB (A) dépendant de la vitesse effectivement atteinte.

Aux abords d'une voie à sens unique, le "surimpact" se manifeste en aval des feux de signalisation et dépend de la vitesse de croisière recherchée par les véhicules; les accroissements de crête de bruit atteignent souvent 10 dB (A) pour les automobiles.

Et pourtant, nous n'avons pas manifesté de précipitation vers des mesures du type des zones 30 que certains de nos voisins ont adoptées [17] dès 1977; il faut dire que l'objectif de réduction des accidents et de leur gravité a été le plus souvent majeur, et qu'actuellement bien des communes françaises ont leurs zones 30 surtout pour des raisons de sécurité (voir article p.30 de Valérie Rozec).

### Urbanisme

Nous serons courts pour ce qui concerne des méthodes générales où la recherche acoustique n'a pas de rôle comme pour la partition des centres de villes et leur fermeture au trafic de transit. Des méthodes détaillées connues et appliquées depuis les années 1970 en Suède ou aux Pays-Bas n'ont été répandues dans nos villes que vers les années 1990. L'OCDE a contribué à la vulgarisation des connaissances sur le sujet.

En 1970, le centre de Göteborg a été divisé en 5 zones telles que leurs frontières ne pouvaient être traversées que par les piétons, les transports publics ou les véhicules de services d'urgences. Cette technique a été appliquée en 1977 à Groningue aux Pays-Bas et s'est répandue en Europe ensuite assez vite.

### Références bibliographiques

- [1] "REEF. Acoustique", Rédigé sous la Direction de Robert Josse, CSTB, 1984
- [2] J. Lambert et al., Étude des comportements dans l'habitat soumis au bruit de circulation. Paragraphe II.2 et 111.2. Rapport au CETUR, I.R.T.CERNE, décembre 1979. Tableau publié en 1982 dans la Revue d'acoustique n° 62.
- [3] R.C. Keen, W.H. Wong, A Survey of Flyover Traffic Noise in Tokawan and Observations on Possible Remedies Hong Kong, avril 1987.
- [4] C. Lamure, M. Vallet, M. Maurin, J. Lambert, B. Favre, Le problème de l'indice de bruit nocturne pour les riverains de voies de circulation, Revue d'acoustique, n° 62, 1982.
- [5] C. Lamure, État de la recherche en France et à l'étranger, Colloque Acoustique et Environnement, 1984.
- [6] B. Favre, Le bruit de trafic routier. Méthodes de prévision, Synthèse INRETS, n° 8, octobre 1987
- [7] C. Lamure, Comparaison de méthodes d'estimation du bruit de trafic dans les zones bâties, Revue d'Acoustique, n° 51, 1979, pp 255-257
- [8] J.M. Rapin, Bruits de trafic. L'informatique dompte le bruit. Lettre mensuelle d'information sur la Recherche. n° 6, novembre 1992 et Yannick Gabillet, Une méthode inverse de recherche de rayons : le logiciel MITHRA. Domaines d'utilisation, Cahiers du CSTB 2444, octobre 1990.
- [9] C. Renie, Rapport du Conseil général des ponts et chaussées : Les besoins de la Direction des Routes dans le domaine du bruit, 12 août 1994
- [10] Références principales pour bruit de véhicules de 1970 à 1987 :  
a - T. Priede, Design parameters and noise of a diesel engine. Engineering for noise control symposium, Xth ICA, 1980 et Origins of automotive vehicle noise, JSV, 15 (1), 1971  
b - B. Favre, J. Lambert, Prospects for reducing road vehicle noise by 1985 and 2000 taking into account the technical possibilities, energy consumption and cost, EEC Report EUR 8573 EN, Bruxelles, Luxembourg, 1983.  
c - B. Favre, J. Tyler, Quiet vehicle development. Transportation noise. Reference book, chapter 8, Butterworths, 1987, P. Nelson Editor.
- [11] Strasse und Autobahn (organe de la FGSVW et de l'Union fédérale des ingénieurs routiers), nov. 95
- [12] Five year Program for Road Technology in Japan. Challenging possibilities in the 21 st century. Road Bureau, Ministry of Construction, Tokyo, juin 1993
- [13] S. Ullrich, Minderung von Verkehrlärm durch Teilabgedeckte Troglagen. Beispiele Königswinter und Stuttgart, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 40, 1993, PP 43-47.
- [14] Environment Hong Kong, 1991. EPA, Hong Kong. 1992.
- [15] U. Sandberg, Report by the International Institute of Noise Control Engineering. Working Party on The Effect of Regulations on Road Vehicle Noise, Swedish Road and Transport Research Institute, Noise News International, 1995
- [16] G. Kemper, H. Steven, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 31, 1984, PP 36-44.
- [17] Wohndorf : Eine andere Art von Einrichtungen der Wohnunggebung und die dort geltenden Verkehrs, Anordnungen, Royal Touring Club of Netherlands, 1977. Geschwindigkeits Reduzierung auf Ortsdurchfahrten. Minister für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein Westfalen. Dec. 1985.