

MÉMOIRE D'HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

Présenté à

LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE

L'UNIVERSITÉ DU MAINE

Par

Michel BÉRENGIER

Directeur de Recherche

Au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LA MAÎTRISE DU BRUIT ROUTIER : DE LA SOURCE AU RECEPTEUR

Soutenu le 18 mars 2002 devant le jury composé de :

Président :	M.	M. BRUNEAU	Professeur, Université du Maine
Rapporteurs :	Mme	D. HABAULT	Directeur de Recherche CNRS, LMA
	MM.	P. BLANC-BENON	Directeur de Recherche CNRS, ECL
		P. GATIGNOL	Professeur, UTC – Compiègne
Examineurs :	MM.	R. SANEJOUAND	Directeur de Recherche LCPC
		J. KERGOMARD	Directeur de Recherche CNRS, LMA
		B. CASTAGNEDE	Professeur, Université du Maine
		C. DEPOLLIER	Professeur, Université du Maine

A Jeannine

A Estelle, Benjamin, Aurore et Manon

Pour leur soutien constant.

A mes collègues de la Section « Acoustique Routière et Urbaine »

Sans qui, ce travail n'aurait pu voir le jour.

SOMMAIRE

Curriculum Vitae	7
Introduction	9
Publications principales	15
Chapitre 1 :	
Le coefficient de réflexion acoustique, les effets du sol et les conditions météorologiques sur la propagation acoustique à grande distance	41
1.1 Introduction	43
1.2 Détermination du coefficient de réflexion acoustique	43
1.3 Effet du sol sur la propagation des ondes sonores.....	46
1.3.1 <i>Cas d'un sol homogène</i>	46
1.3.2 <i>Cas d'un sol discontinu</i>	50
1.4 Effet des conditions atmosphériques sur la propagation du son	52
1.4.1 <i>Propagation pour des conditions de réfraction « négative »</i>	56
1.4.2 <i>Propagation pour des conditions de réfraction « positive »</i>	60
1.4.3 <i>Modélisation par approximation parabolique de l'équation des ondes</i>	65
1.4.4 <i>Aspect statistique de long terme</i>	65
1.5 Conclusion.....	66
Publications principales	67
Chapitre 2 :	
Propriétés acoustiques des revêtements de chaussée poreux	137
2.1 Introduction	139
2.2 Modélisation théorique des couches de roulement poreuses.....	139
2.3 Impact d'une structure poreuse sur la propagation	142
2.4 Classification des revêtements poreux dans la hiérarchie des revêtements	143
Publications principales	145
Chapitre 3 :	
Propriétés acoustiques des écrans routiers antibruit	173
3.1 Introduction	175
3.2 Calcul de la diffraction par des techniques géométriques.....	176
3.3 Calcul de la diffraction par des techniques numériques	178
3.3.1 <i>Méthode des éléments de frontière à 2 dimensions (B.E.M.)</i>	178
3.3.2 <i>Modélisation à partir de l'équation parabolique</i>	180
3.4 Cas des buttes de terre	180
3.5 Conclusion.....	181
Publications principales	183
Chapitre 4 :	
Etude du bruit de contact pneumatique-chaussée	203
4.1 Introduction	205
4.2 Les mécanismes de génération du bruit de contact pneumatique-chaussée	205
4.2.1 <i>Mécanismes de chocs et vibrations</i>	206
4.2.2 <i>Mécanisme de compression-détente d'air</i>	206
4.2.3 <i>Effet « dièdre » ou effet « pavillon »</i>	206
4.3 Détermination de la hauteur de source équivalente	207

4.4	Classification des revêtements de chaussée	207
4.4.1	<i>Classification en termes de L_{Amax}, en bordure de voie routière</i>	207
4.4.2	<i>Classification en termes de niveaux sonores équivalents $L_{Aeq}[T]$</i>	212
4.5	Conclusion.....	216
	Publications principales	217
Chapitre 5 :		
La prévision du bruit en milieu urbain		249
5.1	Introduction	251
5.2	Caractérisation physique des sources sonores en milieu urbain	251
5.2.1	<i>Les sources d'origine « routière »</i>	252
5.2.2	<i>Les sources d'origine « humaine »</i>	254
5.3	Modélisation du champ acoustique en espace urbain	255
5.3.1	<i>Le formalisme de particule sonore</i>	256
5.3.2	<i>La théorie des transports des particules sonores</i>	257
5.3.3	<i>Les conditions aux limites sur les parois</i>	257
5.3.4	<i>Résolution du problème</i>	258
5.4	Comparaison entre les interprétations sensibles d'usagers et les mesures acoustiques en milieu urbain	260
5.5	Conclusion.....	261
	Publications principales	263
Conclusion générale et perspectives		283
Références bibliographiques.....		289
Annexe 1 : Liste des publications		301
Annexe 2 : Encadrements d'étudiants		315
Annexe 3 : Activités annexes.....		321
Annexe 4 : Liste des acronymes		331

CURRICULUM VITAE

Michel BÉRENGIER

Né le 17 mai 1955 à Cotignac - Var

Marié - 4 enfants

115, rue du Moulin à l'Huile - 44 400 REZE

DIPLÔMES

- 1971 Baccalauréat Série C
- 1976 Maîtrise ès Sciences - Spécialité Mécanique - Univ. Aix-Marseille I et II
- Mathématiques,
- Physique et Métrologie,
- Mécanique des milieux déformables,
- Calcul numérique.
- 1977 Diplôme d'Etudes Approfondies en Acoustique - Univ. Aix-Marseille I,
Stage effectué au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du C.N.R.S. à
Marseille.
*« Etude de l'association de sources tripolaires antibruit et de leur
comportement en fonction de la température ».*
- 1979 Doctorat de 3ème cycle - Spécialité Acoustique - Univ. Aix-Marseille I.
Recherches effectuées au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du
C.N.R.S. à Marseille sous la direction de MM. A. Roure et B. Nayroles.
*« Un aspect de la lutte contre le bruit : Absorption acoustique active dans
un écoulement fluide guidé ».*

SITUATION ADMINISTRATIVE

- Du 21/01/80 au 01/07/86 Assistant de recherche non titulaire au Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées – Centre de Nantes, Service de
Physique, Cellule Acoustique puis Section Traitement du
Signal et Acoustique.
- Du 01/07/86 au 31/08/87 Détaché à la Section « Acoustique » du Conseil National de
Recherches du Canada à Ottawa, (Programme O.T.A.N.).
- Du 01/09/87 au 31/12/88 Réintégré à la Section Traitement du Signal et Acoustique
du Service de Physique du L.C.P.C..
- Du 01/01/89 au 31/12/95 Rattaché à la Division Gestion de l'Entretien des Routes,
responsable du Groupe « Acoustique » au sein des Sections
« Caractéristiques de Surfaces de Chaussées » puis
« Interaction Route/Véhicule et Acoustique Routière ».
- Du 01/01/96 au 31/12/98 Responsable de la Cellule « Acoustique ».

- Du 01/01/94 au 05/07/98** Chargé de Recherche 1^{ère} classe au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Centre de Nantes, Division Gestion de l'Entretien des Routes.
- Depuis 06/07/98** Directeur de Recherche 2^{ème} Classe au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Centre de Nantes, Division Gestion de l'Entretien des Routes.
- Depuis le 01/01/99** Responsable de la Section « Acoustique Routière et Urbaine »

AUTRES FONCTIONS

- 1991-1995** Chargé d'un thème de recherche sur l'approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur.
- 1995-2000** Animateur de la Commission Technique « Bruit et Vibrations » des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- Depuis 1996** Animateur du sous-groupe « Bruit » du Groupe National des Caractéristiques de Surface des chaussées.
- Depuis décembre 2001** Membre du Conseil d'Administration de la Société Française d'Acoustique.

ENSEIGNEMENTS

- 1991-1993** Cours d'Acoustique Générale à l'Institut Français d'Urbanisme (Université de Paris VIII) dans le cadre du D.E.S.S. et du D.E.A. d'Ecologie Urbaine - Option « Techniques et Milieu Urbain ».
- 1991-1995** Cours de Propagation Acoustique en Milieu Extérieur dans le cycle « Route-Bruit-Paysage » à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- 1994** Conférence sur l'Environnement Sonore de la Route dans le cadre des Rencontres Routières de Nantes à l'Ecole Centrale de Nantes.
- Depuis 1992** Participation au cycle de formation continue de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées dans le cadre de l'acoustique des transports ainsi que des caractéristiques de surface des chaussées routières.
- Depuis 1995** Cours de propagation acoustique en milieu extérieur dans le cadre du D.E.U.S.T. « Vibration - Acoustique – Signal » (2^{ème} année) de l'Université du Maine au Mans.
- Depuis 1996** Cours de propagation acoustique en milieu extérieur dans le cadre du D.E.S.S. « Acoustique des transports » de l'Université de Technologie de Compiègne.

INTRODUCTION

∞ ∞ ○ ∞ ∞

Ce document, présenté en vue d'obtenir l'habilitation à diriger les recherches, est la synthèse de mes activités de recherche dans le domaine de l'acoustique de l'environnement depuis mon affectation au centre de Nantes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en janvier 1980.

Auparavant, entre 1976 et 1979 mes recherches se sont déroulées au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du Centre National de la Recherche Scientifique à Marseille dans le cadre d'un D.E.A. d'Acoustique et d'une thèse de doctorat de spécialité.

Le travail de stage D.E.A. avait pour sujet : *L'étude de l'association de sources tripolaires antibruit et de leur comportement en fonction de la température*. Cette étude a été conduite sous la direction de M. Maurice Jessel, et se situait dans le cadre plus général des études sur *l'Absorption Acoustique Active* développées au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique.

Ce travail [R1] a consisté en l'étude théorique et expérimentale de la directivité de combinaisons de sources ponctuelles en vue de constituer des sources de contre-bruit utilisables pour réduire le bruit des ventilateurs à l'intérieur des conduits de ventilation soumis à des variations de température. Après une étude générale sur le rayonnement en champ libre, dans un milieu isotrope, de n sources élémentaires, une approche plus centrée sur les sources tripolaires à rayonnement cardioïdal a été développée. Une modélisation ainsi qu'une étude expérimentale ont été réalisées à la fois pour un triplet fonctionnant en champ libre, et le même triplet greffé sur la paroi d'un guide d'onde, agissant en absorbeur actif. Dans ce dernier cas, ont pu être mise en évidence les modifications de diagramme de rayonnement et tout particulièrement de la phase, ce qui a provoqué des variations d'atténuation à l'intérieur du conduit.

Une des conclusions majeures de ce travail fut la suivante : l'optimisation du réglage du système de contre-bruit basé sur la mise en opposition de phase des ondes issues de la source primaire et des sources secondaires étant fonction des conditions thermiques du fluide à l'intérieur du conduit, il est indispensable de conduire des travaux plus approfondis d'une part, sur l'influence des autres facteurs thermodynamiques, et d'autre part, sur des systèmes d'asservissement basés sur le principe d'une minimisation du champ acoustique résultant.

Faisant suite aux travaux effectués dans le cadre du D.E.A., la thèse intitulée « *Un aspect de la lutte contre le bruit : absorption acoustique active dans un écoulement fluide guidé* » [T1] a eu pour principal objet de définir et de tester différents systèmes capables d'asservir des sources de contre-bruit pour réduire le premier mode de propagation à l'intérieur d'un conduit de ventilation dans lequel s'écoule un fluide en mouvement. Dans la dernière partie de ce travail réalisé sous la conduite conjointe de MM. Alain Roure et Bernard Nayroles, l'absorption des modes supérieurs a été partiellement abordée.

Du point de vue théorique, l'étude de la propagation de l'onde produite par la source primaire était basée sur l'approche modale. Celle-ci nous a permis d'exprimer de façon exacte le champ acoustique produit par des sources de contre-bruit de formes réelles, greffées sur la paroi du guide. Les équations développées suivant cette approche ont permis d'écrire les conditions nécessaires pour obtenir un système de contre-bruit efficace (directivité de la source secondaire pour éviter les phénomènes de bouclage entre

le source et le microphone d'asservissement, et minimisation du champ acoustique en aval du guide d'ondes).

Différents systèmes de contre-bruit ont été étudiés, certains très sélectifs, d'autres plus large bande intégrant notamment les problèmes de stationnarité vis-à-vis des variations de vitesse d'écoulement et de température du fluide. En parallèle, les systèmes électroniques d'asservissement des sources ont été théoriquement décrits. De l'étude des différents systèmes, il est ressorti qu'un système avec des sources indépendantes était plus performant qu'un système tripolaire formé d'un monopole et d'un dipôle, et ceci notamment vis-à-vis de la variation des vitesses d'écoulement du fluide. En effet, la variation du nombre de Mach introduit un déséquilibre de la directivité du système tripolaire qui se traduit par une perte du niveau d'affaiblissement et une instabilité du procédé d'asservissement [P1].

Lors d'une dernière étape, une étude plus systématique de l'impédance acoustique des sources de contre-bruit a été réalisée pour divers modes de fonctionnement [P2]. Celle-ci nous a permis entre autre, de calculer le bilan énergétique à l'intérieur du conduit lorsque le système d'atténuation était en action. Il en a été conclu que l'énergie incidente était totalement absorbée par le réseau de sources secondaires qui agissent comme des « résonateurs actifs ». Certains de ces divers systèmes de contre-bruit ont pu être physiquement réalisés au cours de thèses successives. Les grands progrès de l'électronique et de l'asservissement numérique ont contribué au succès de certains de ces systèmes actifs qui ont trouvé de multiples applications au niveau industriel.

Faisant suite aux travaux de recherche effectués au sein du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du C.N.R.S., mon affectation au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a totalement modifié mes orientations de recherche, puisque de l'acoustique en milieu clos, j'ai été conduit à développer des recherches dans le cadre de l'acoustique des milieux extérieurs et plus précisément sur la génération et la propagation du bruit de la circulation routière prenant en compte notamment les caractéristiques acoustiques des revêtements routiers ainsi que celles du milieu environnant (air, sols, bâti).

Ces recherches que l'on pourrait regrouper sous le titre plus générique de : « ***La maîtrise du bruit routier : de la source au récepteur*** » se déclinent en réalité en divers sous-thèmes qui feront l'objet de plus larges développements au cours des chapitres suivants. On peut les intituler comme suit :

- Etudes théorique et expérimentale du coefficient de réflexion acoustique, des effets du sol et des effets météorologiques sur la propagation acoustique à grande distance,
- Propriétés acoustiques des revêtements de chaussée poreux,
- Propriétés acoustiques des écrans routiers antibruit,
- Etude du bruit de contact pneumatique/chaussée,
- Prévision du bruit en milieu urbain.

Certains de ces sous-thèmes ont été abordés pour la première fois lors d'occasions particulières telles que : contrats nationaux ou européens, thèses ou stages de fin d'étude pour lesquels j'ai assuré l'encadrement, seul ou en collaboration avec d'autres collègues universitaires, ou encore, année sabbatique au Conseil National de Recherches du Canada. Ils se sont ensuite poursuivis sous la forme de projets de recherche pluriannuels programmés au sein de la Commission Technique « Bruit et Vibrations » des Laboratoires des Ponts et Chaussées d'une part, et dans le cadre d'actions thématiques

proposées par le Pôle “ Environnement et Génie Urbain ” du L.C.P.C. d'autre part. Depuis peu, ces recherches ont été regroupées dans deux comités de programme : le premier s'intitule “ Impact des infrastructures sur l'environnement ” et le second “ Génie civil urbain ”. De nombreuses publications dont certaines seront fournies en fin de chaque chapitre, ont ponctué ces vingt-deux années de recherche. Une liste complète sera également donnée en annexe.

Au cours de ces années, j'ai également eu l'opportunité d'enseigner l'« *Acoustique générale* » et l'« *Acoustique de l'environnement routier* » dans le cadre de divers cycles universitaires ou d'école d'ingénieurs : D.E.S.S. et D.E.A. « Ecologie Urbaine – Option Techniques et Milieu urbain » de l'Institut Français d'Urbanisme (Université de Paris VIII), D.E.U.S.T. « Vibration - Acoustique – Signal » (2ème année) de l'Université du Maine au Mans et D.E.S.S. « Acoustique des transports » de l'Université de Technologie de Compiègne, cycle « Route-Bruit-Paysage » de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat ainsi qu'à l'occasion des sessions de formation continue de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Mes diverses attributions m'ont également permis de participer à plusieurs actions de normalisation tant au niveau français (A.F.N.O.R.) qu'international (C.E.N. et I.S.O.).

Enfin, compte tenu de la part importante des mes activités liées à la recherche, j'ai accepté début 1995, la proposition de titularisation qui m'a été faite afin d'être intégré dans le corps des *chargés de recherche* du Ministère de l'Equipement créée par le décret du 28 octobre 1994. Depuis juillet 1998, j'ai été reclassé, après concours, dans le corps des *directeurs de recherche*.

PUBLICATIONS PRINCIPALES

४ ४ ० ३ ३

CHAPITRE 1



LE COEFFICIENT DE RÉFLEXION ACOUSTIQUE
LES EFFETS DU SOL
ET DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES
SUR LA PROPAGATION ACOUSTIQUE À GRANDE DISTANCE

1.1 Introduction

Les phénomènes de propagation des ondes sonores émises par la circulation routière sont complexes et font intervenir un grand nombre de paramètres dont les principaux sont reliés d'une part, aux caractéristiques physiques du milieu à l'intérieur duquel se propagent les ondes acoustiques (l'air) et d'autre part, aux conditions aux frontières (chaussée routière, sols naturels environnants, obstacles, etc...). C'est ainsi, qu'une bonne connaissance du milieu de propagation impose de prendre en considération dans la modélisation divers mécanismes comme par exemple :

- La divergence géométrique,
- l'absorption moléculaire,
- la réflexion sur les surfaces limites,
- les divers phénomènes de diffraction,
- l'influence des gradients verticaux de température et de vitesse du vent,
- l'influence de la turbulence atmosphérique.

Lorsque nous sommes en présence de situations pour lesquelles un de ces phénomènes est prépondérant, il est possible d'utiliser dans ce cas des formulations simplifiées. Pour les situations dans lesquelles un ensemble de phénomènes interagissent, il faut alors faire appel à des modèles plus élaborés. Ces dernières situations correspondent majoritairement à la réalité quotidienne.

Au cours de ces quelques vingt années de travail sur ce thème, j'ai été conduit à aborder cet important problème en différentes étapes, en intégrant à chacune des étapes un paramètre supplémentaire. C'est ainsi, qu'actuellement, nous travaillons sur un modèle numérique basée sur la résolution de l'équation des ondes par approximation parabolique, capable de calculer le champ acoustique produit par une source telle que le trafic routier, jusqu'à des distances pouvant atteindre le kilomètre et prenant en compte à la fois des sols et une atmosphère inhomogènes.

Les paragraphes successifs de ce chapitre passeront en revue ces différentes étapes qui ont fait l'objet de nombreuses publications dont les plus marquantes seront fournies en annexe. En fin de chaque paragraphe, seront également fournies, dans un encadré, les formulations génériques nécessaires à la compréhension des divers phénomènes.

1.2 Détermination du coefficient de réflexion acoustique

En préliminaire aux recherches sur la propagation, il m'a été demandé lors de mon arrivée au L.C.P.C., d'effectuer quelques travaux sur la détermination théorique et expérimentale des coefficients de réflexion acoustiques. Concernant les matériaux acoustiques et les sols naturels, différentes techniques sous diverses incidences ont été développées. L'une d'entre elle a fait l'objet d'une thèse [T2] à laquelle j'ai apporté une contribution. Ces recherches étaient également soutenues par un contrat de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique du Ministère de la Recherche (D.G.R.S.T.) [R3] dans le cadre duquel le L.C.P.C. a travaillé en collaboration avec le laboratoire de recherche de la Société Saint-Gobain. Ce travail s'est soldé par un certain nombre de publications et communications tant au niveau national qu'international [P3], [P5], [P6], [C1].

Au cours de cette étude [1], dont la partie théorique faisait appel à l'application de la transformée de Hilbert pour déterminer la phase du coefficient de réflexion acoustique sous diverses incidences à partir de la seule mesure de son module, une méthode de mesure du coefficient de réflexion acoustique basée sur la technique FFT (Fast Fourier Transform) a été mise au point. Elle utilisait un signal impulsif produit par une source mécanique de type pistolet d'alarme. Cette technique était intéressante tout particulièrement pour les surfaces pour lesquelles il était délicat sinon impossible d'identifier avec suffisamment de précision les distances respectives entre le plan de réflexion, la source et le microphone de mesure.

Parallèlement à cela, un modèle d'impédance de sol à cinq paramètres a été élaboré [C3]. Ce modèle construit sur des bases identiques à celui de Delany et Bazley [2] fait appel à 5 paramètres dont les valeurs pour chaque sol sont obtenues à partir d'un calage mathématique utilisant un algorithme de Marquardt, sur des valeurs d'atténuation du son en propagation, soit en fonction de la distance entre la source et le récepteur, soit en fonction de la fréquence [P4] [C1].

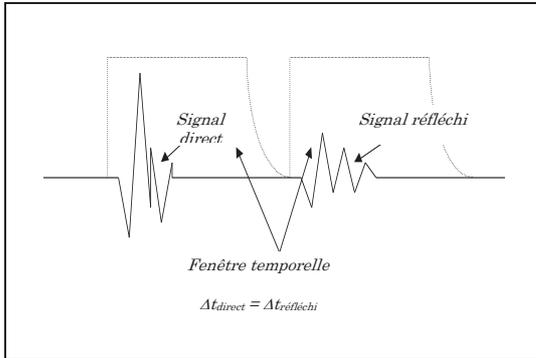
Outre son application aux matériaux acoustiques industriels et aux sols naturels, cette méthode qui pendant de longues années a servi de support à la norme française de mesure in situ des caractéristiques d'absorption des matériaux posés sur les écrans routiers antibruit [N1] [P7] [C2] a tout récemment été remise en forme pour la mesure des qualités d'absorption des revêtements routiers et plus particulièrement des structures de chaussée poreuses [C29]. Dans le cadre de la nouvelle méthode, la source impulsive mécanique est remplacée par un haut-parleur excité par un signal numérique large bande (M.L.S. [3], Burst Chirp ou autre). La méthode de traitement est basée sur les techniques d'inter-corrélation entre le signal électrique envoyé au haut-parleur et le signal acoustique recueilli au microphone de mesure. Hormis sa rapidité d'exécution et de traitement, cette technique présente l'avantage de pouvoir s'affranchir du bruit de fond toujours présent lorsqu'il s'agit de mesure en ambiance routière. Cette méthode est actuellement intégrée dans un texte de normalisation internationale ISO 13472-1 [N2] dont j'ai assuré la rédaction en collaboration avec l'expert italien du groupe de travail. Une étude comparative entre les diverses approches (impulsions mécaniques et impulsions synthétiques) a été réalisée et récemment publiée [C41].

La connaissance expérimentale de cette caractéristique importante des matériaux (coefficient de réflexion complexe ou impédance de surface), est indispensable pour la validation des divers modèles théoriques que l'on est par la suite conduit à intégrer dans les modèles propagatifs. Ces derniers permettent de calculer les différentes atténuations sonores entre une source et des récepteurs séparés par des distances parfois importantes. Ces modèles feront l'objet du prochain paragraphe.

Concernant les revêtements de chaussée poreux apparus sur nos routes dans la seconde partie des années 1980, une étude particulière, à la fois théorique et expérimentale a été réalisée à partir des années 1987-1988 en collaboration avec l'I.N.R.E.T.S. (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité). Ces recherches qui ont fait également l'objet de nombreuses publications, seront plus amplement détaillées au chapitre 2 du présent document.

Encadré n°1.1

Identification expérimentale du coefficient de réflexion sous incidence normale



$$\left| R_p(\omega) \right|^2 = \frac{1}{K_r^2} \left| \frac{H_r(\omega)}{H_i(\omega)} \right|^2 \quad \text{avec } K_r = \frac{d_s - d_m}{d_s + d_m}$$

où d_s et d_m sont respectivement les distances entre la source et le sol et le récepteur et le sol. $\omega = 2\pi f$ (f est la fréquence en Hz).

$H_i(\omega)$ et $H_r(\omega)$ sont respectivement les transformées de Fourier des signaux incident et réfléchi par la surface du sol.

A partir du module expérimental du coefficient de réflexion, on exprime la phase par la relation :

$$\Phi(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{\lg|R_p(\omega_0)|}{\omega_0^2 - \omega^2} d\omega_0$$

Cette relation fait appel aux propriétés des systèmes causaux à déphasage minimal pour lesquels la phase et le logarithme de module de leurs réponses en fréquence sont liés par une transformée de Hilbert. Sachant que la mesure du module n'est connue que sur une largeur de fréquence finie $[0, f_{\max}]$, on calcule l'intégrale en deux parties : entre 0 et f_{\max} , puis entre f_{\max} et l'infini. Sur la première bande de fréquence, on utilise le module mesuré du coefficient de réflexion et sur la bande $[f_{\max}, \infty[$, on utilise une extrapolation du module du coefficient du réflexion obtenu à partir d'un modèle analytique d'impédance dont les paramètres ont été ajustés sur la mesure par un algorithme de Marquardt. Ce modèle d'impédance a pour expression :

$$\Re\{Z(\omega)\} = 1 + a_1 \left(\frac{\omega}{2\pi a_2} \right)^{a_3} \quad ; \quad \Im\{Z(\omega)\} = a_4 \left(\frac{\omega}{2\pi a_2} \right)^{a_5}$$

Ce modèle est identique à celui de Delany et Bazley [2] lorsque les paramètres ont les valeurs suivantes :

$$a_1 = 9,08 ; a_3 = -0,75 ; a_4 = 11,9 ; a_5 = -0,73$$

a_2 est équivalent à la résistance au passage de l'air, communément notée σ ou R_s , du matériau testé, dont les valeurs s'échelonnent entre 5-10 kNsm⁻⁴ pour les matériaux absorbants industriels, 200-300 kNsm⁻⁴ pour les surfaces herbeuses, et 20000 voire 100000 kNsm⁻⁴ pour les surfaces rigides (béton de ciment ou revêtements de chaussées bitumineux compacts).

Dans le cas d'un milieu à réaction localisée, connaissant l'impédance $Z(\omega)$, le coefficient de réflexion R_p est obtenu par la relation :

$$R_p(\omega) = \frac{Z(\omega) - 1}{Z(\omega) + 1}$$

Pour certains types de matériaux comme les revêtements de chaussées poreux, il est possible d'introduire dans les formulations l'effet de l'épaisseur de la structure. Cela sera plus amplement développé au cours du chapitre suivant.

1.3 Effet du sol sur la propagation des ondes sonores

Mes travaux dans le domaine de la propagation acoustique au voisinage des sols ont commencé au début des années 80, à l'occasion d'un contrat de recherche financé par le Ministère de l'Environnement, et auquel avaient participé outre le L.C.P.C., le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du C.N.R.S., et les équipes acoustiques du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B.) et du Laboratoire National d'Essais (L.N.E.) [R2]. Ils se sont poursuivis au cours des années suivantes, jusqu'en 1986 date à laquelle nous avons démarré nos recherches sur l'influence des effets atmosphériques sur la propagation du bruit à grande distance. Ceci fera l'objet du prochain paragraphe.

Quelles que soient la nature et la composition des sols entre la source et le récepteur, homogène ou discontinue, leur influence respectives sur l'atténuation de l'onde sonore le long du champ de propagation est importante. Cette atténuation est fonction à la fois de la fréquence et de l'incidence de l'onde sonore. L'atténuation est d'autant plus importante que l'onde sonore est rasante et que la fréquence est élevée. Cette règle générale s'applique bien aux sols absorbants naturels. En revanche, il n'en est pas de même pour les structures poreuses à squelette rigide du type des bétons bitumineux drainants. Dans ce cas, des phénomènes particuliers dus en partie à l'onde de surface provoquent des amplifications du niveau sonore à certaines fréquences, sous certaines incidences. Ces phénomènes seront plus largement détaillés dans le chapitre consacré à l'acoustique des revêtements de chaussée poreux.

Dans l'ensemble de ces premières études, nous avons considéré une atmosphère homogène et isotrope à l'intérieur de laquelle le gradient vertical de vitesse du son $\partial c / \partial z$ est nul.

1.3.1 Cas d'un sol homogène

Pour résoudre ce problème, nous avons étudié plusieurs modèles basés sur la théorie des rayons dont la quasi totalité d'entre eux a été répertoriée dans [4]. Deux approches étaient cependant les plus utilisées : celle introduite par Rudnick [5] et reprise plus tard par Donato [6], Chessell [7] et Embleton et al. [8-9] et enfin celle développée par Thomasson [10-11]. Dans ces approches, le champ sonore est décomposé en trois termes :

- une onde directe entre la source et le récepteur,
- une onde réfléchie sur le sol,
- une onde de surface.

D'autres approches sont également à signaler. Elles utilisent la représentation en potentiels de couches. Elles ont été développées au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du C.N.R.S. par P. Filippi et D. Habault [12-13].

En un premier temps, nous avons plus particulièrement mis en place pour nos besoins de calcul, la méthode de Thomasson que nous détaillerons dans l'encadré suivant. Par la suite, nous avons utilisé celle de Rudnick, améliorée par les apports des travaux de l'équipe de T.W.F. Embleton du Centre National de Recherche du Canada (C.N.R.C.) dont la formulation s'est avérée plus appropriée lors de l'introduction dans le calcul de divers autres phénomènes, comme les discontinuités d'impédance et les gradients verticaux de vitesse du son variables. Ces travaux également décrits dans l'encadré

n°1.2 ont été réalisés lors d'un séjour d'une année effectué au C.N.R.C. à Ottawa dans le cadre d'une bourse O.T.A.N.. Plusieurs publications ont ponctué ces travaux [P3-P5], [R9] et [C1].

|

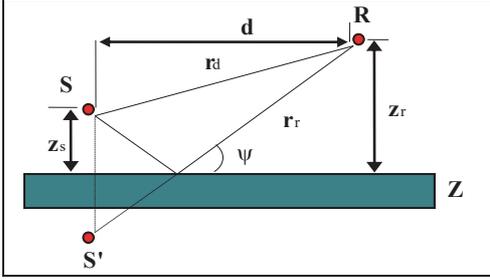
|

Encadré n°1.2

Champ sonore au voisinage d'un sol homogène, en atmosphère homogène

Le problème se résume à un système d'équations aux dérivées partielles comprenant :

- L'équation des ondes dans le milieu : $(\Delta + k^2)\Phi(R) = \delta(S - R)$ où le nombre d'ondes $k = \omega/c$,
- Une condition limite à l'interface air-sol : $Z(\partial\Phi/\partial n) = -ik\Phi$ pour $z = 0$,
- Une condition de Sommerfeld exprimant l'absence de source à l'infini.



Approche de Rudnick/Donato/Embleton

La pression acoustique en R s'exprime par :

$$\frac{p}{p_0} = \frac{A_d}{r_d} e^{ik_d r_d} + Q \frac{A_r}{r_r} e^{ik_r r_r}$$

Le coefficient de réflexion en onde sphérique Q est donné par l'expression :

$$Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$$

A_d et A_r sont respectivement les amplitudes des ondes directe et réfléchie.

R_p est le coefficient de réflexion en onde plane et $F(w)$ est calculé par la série asymptotique

$$F(w) = 1 + i\pi^{1/2} w \exp(-w^2) \operatorname{erfc}(-iw) \quad \text{où} \quad w^2 = 2ikr_r \chi^2 \frac{1}{Z(1-R_p)^2} \quad \text{et} \quad \chi = \left[1 - \left(\frac{k}{\kappa} \right)^2 \cos^2 \psi \right]^{1/2}$$

κ représente le nombre d'ondes complexe de la structure poreuse. Dans les calculs, on sous-entend une dépendance temporelle en $e^{-i\omega t}$.

Approche de Thomasson

Dans le cas d'une réaction localisée, et pour une dépendance temporelle en $e^{-i\omega t}$, le champ acoustique se décompose de la façon suivante :

$$\Phi = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{A_d}{r_d} e^{ik_d r_d} + \frac{A_r}{r_r} e^{ik_r r_r} \right) + \Phi_{ds} \quad \text{avec} \quad \Phi_{ds} = \Phi_d + \Phi_s$$

$$\Phi_d = \frac{k}{2\pi Z} e^{ikr_r} \int_0^\infty \frac{e^{-t}}{W^{1/2}(t)} dt \quad \text{et} \quad \Phi_s = \frac{1}{4}(1-C) \frac{k}{Z} H_0 \left[kd \left(1 - \frac{1}{Z^2} \right)^{1/2} \right] e^{i\frac{k}{Z}(z_r+z_s)}$$

$$W^{1/2}(t) = \left[(A^2 + t)(B^2 - t) \right]^{1/2} \quad \text{avec} \quad A^2 = ikr_r(\gamma_0 - 1) \quad \text{et} \quad B^2 = ikr_r(1 - \gamma_1)$$

$$\text{où} \quad \begin{cases} \gamma_0 \\ \gamma_1 \end{cases} = -\frac{1}{Z} \sin \psi \pm \left(1 - \frac{1}{Z^2} \right)^{1/2} \cos \psi$$

La détermination de la racine carrée de $W(t)$ est choisie de la façon suivante :

$$\Re \left[W^{1/2}(t) \right] > 0 \quad \text{pour} \quad t = 0 \quad \text{et} \quad \Re \left[W^{1/2}(t) \right] < 0 \quad \text{pour} \quad \frac{\pi}{4} < \operatorname{Arg}(A) < \frac{\pi}{2} \quad \text{et} \quad t > \frac{\Im m(A^2 B^2)}{\Im m(A^2 - B^2)}$$

Ces deux approches donnent des résultats quasi identiques [R9]. Le calcul de $\langle p^2 \rangle$ étant bien souvent suffisant, son expression à partir de l'approche Rudnick et al., moins gourmande en temps de calcul, est :

$$\langle p^2 \rangle = \frac{[A_d]^2}{r_d^2} + |Q|^2 \frac{[A_r]^2}{r_r^2} + \frac{2|Q|A_d A_r}{r_d r_r} \cos \left[\omega(\tau_r - \tau_d) + \operatorname{Arg}(Q) \right]$$

$$\text{où} \quad \tau_{r,d} = \frac{r_{r,d}}{c}$$

1.3.2 Cas d'un sol discontinu

La modélisation de la propagation sonore au voisinage d'un sol homogène est intéressante mais insuffisante lorsque l'on traite de bruit routier. En effet, la source sonore produite par le contact entre le pneumatique et la chaussée (cf. chapitre 2) engendre une onde qui se propage au voisinage de sols de natures différentes. Mis à part le cas des chaussées poreuses développées au chapitre 2, nous sommes en présence de deux milieux bien distincts : une chaussée routière acoustiquement réfléchissante et un sol naturel absorbant.

De même que pour les sols d'impédance homogène, plusieurs approches peuvent être envisagées. La première est celle développée par K. Rasmussen [14-15] qui utilise une formulation de Green (cf. Encadré n°1.3). Malgré l'inconvénient du temps de calcul, cette approche présente l'avantage d'être plus précise que certaines formulations semi-empiriques [16-17] qui dans quelques cas, en particulier pour des incidences très rasantes, sont mises en échec. La formulation de Kirchhoff-Huygens utilisée par Rasmussen se réduit à une intégration dans le plan vertical au dessus de la discontinuité d'impédance. En utilisant la méthode de la phase stationnaire, la formulation est réduite à une intégrale simple plus aisément calculable.

Afin de palier les inconvénients liés au temps de calcul de la méthode de Rasmussen, j'ai été conduit au cours de mon séjour canadien à me pencher sur une nouvelle formation analytique permettant d'obtenir une prévision des niveaux sonores avec une précision comparable à celle obtenue avec la méthode de Rasmussen, avec des temps de calcul plus acceptables. Cette méthode est basée en partie sur l'approche développée par Thomasson pour les sols homogènes. Dans ce cas, le champ sonore est décomposé en quatre termes :

- Φ_d Une onde directe,
- Φ_r Une onde réfléchie par une surface considérée comme parfaitement réfléchissante,
- Φ_{ds} Une onde de sol qui répercute l'absorption de la surface inhomogène,
- Φ_D Une onde diffractée sur la rupture d'impédance.

Alors que Φ_d et Φ_r sont identiques à ceux développés pour un sol homogène, le terme d'onde de sol Φ_{ds} s'obtient par combinaison des effets des deux types de sols, pondérée de coefficients α_1 et α_2 fonctions des positions respectives dans l'espace de la source et du récepteur par rapport à la discontinuité d'impédance. Les valeurs de ces coefficients ont été obtenues par calage sur un grand nombre de mesures et ont été par la suite regroupées dans un système d'abaques [R9].

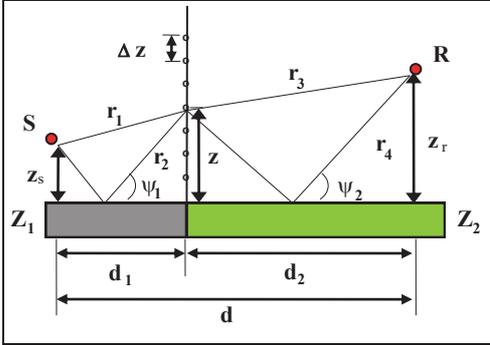
$$\Phi_{ds} = \alpha_1 \Phi_{ds}^1 + \alpha_2 \Phi_{ds}^2 \quad \text{avec la condition suivante :} \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

Le dernier terme Φ_D qui tient compte de l'effet de diffraction sur la discontinuité d'impédance peut être calculé de diverses façons. Soit par la théorie géométrique de la diffraction de Keller [18], soit encore par celle de Kirchhoff [19] adaptée par Mac Donald [20]. Chacune de ces méthodes ayant des limitations dues tout particulièrement aux angles d'incidence, il s'est avéré nécessaire d'adapter la procédure suivant le cas. Dans l'encadré n°1.3, nous fournirons la formulation à partir de la théorie de Mac Donald de calcul de la diffraction sur l'arête d'un plan semi-infini, modifiée pour prendre en compte le cas d'une rupture d'impédance entre deux milieux d'impédance finie.

Quelques exemples de comparaison des diverses méthodes sont présentées dans la publication [R9].

Encadré n°1.3

Champ sonore au voisinage d'un sol discontinu, en atmosphère homogène



Approche de Rasmussen

$$p(\omega) = (8\pi k)^{1/2} d_2 \frac{e^{-i\pi/4}}{16\pi^2} I$$

$$\text{avec } I = \int_0^\infty [p_1 + Q_2 p_2 + Q_1 p_3 + Q_1 Q_2 p_4] dz$$

où Q_1 et Q_2 sont respectivement les coefficients de réflexion en ondes sphériques des sols d'impédances Z_1 et Z_2 et

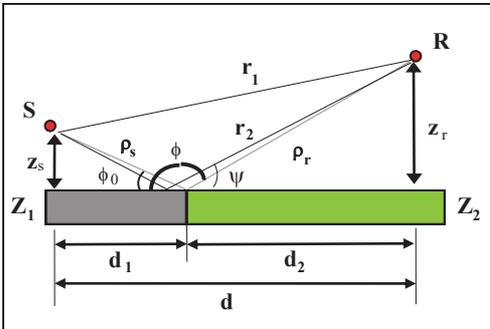
$$p_1 = \frac{e^{ik(r_1+r_3)}}{[r_3^3 r_1 (r_1+r_3)]^{1/2}} ; p_2 = \frac{e^{ik(r_1+r_4)}}{[r_4^3 r_1 (r_1+r_4)]^{1/2}} ; p_3 = \frac{e^{ik(r_2+r_3)}}{[r_3^3 r_2 (r_2+r_3)]^{1/2}} \text{ et } p_4 = \frac{e^{ik(r_2+r_4)}}{[r_4^3 r_2 (r_2+r_4)]^{1/2}}$$

D'un point de vue numérique, l'intégrale est calculée par la méthode des trapèzes à partir de

$$\text{l'approximation suivante : } I = \int_0^\infty f(Q_1, Q_2, r_1, r_2, r_3, r_4) dz = \sum_{n=1}^N f(Q_1, Q_2, r_1, r_2, r_3, r_4, z_{max}) \Delta z$$

La somme finie est calculée jusqu'à un $z_{max} = n \Delta z$.

- Quand $d < 10 \text{ m}$ et $f > 2 \text{ kHz}$, $\Delta z = 0,2 \lambda$ et $z_{max} = 20 \lambda$ ($\lambda = c/f$),
- Quand $d > 50 \text{ m}$, $\Delta z = 0,03 \lambda$ et $z_{max} = 70 \lambda$,
- Quand $f < 2 \text{ kHz}$, $0,05 \lambda < \Delta z < 0,1 \lambda$.



Approche analytique suivant Thomasson

$$\Phi = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} e^{ikr_1} + \frac{1}{r_2} e^{ikr_2} \right) + \Phi_{ds} + \Phi_D$$

$$\text{avec } \Phi_{ds} = \alpha_1 \Phi_{ds}^1 + \alpha_2 \Phi_{ds}^2$$

Φ_{ds}^1 et Φ_{ds}^2 s'exprime suivant la relation fournie dans l'encadré 2 avec pour impédances respectives Z_1 et Z_2 . α_1 et α_2 sont des coefficients de pondération fonction

de la géométrie du problème et fournis dans un système d'abaques. Le champ diffracté Φ_D sur la discontinuité d'impédance peut s'exprimer à partir de la théorie de Mac Donald :

$$\Phi_D = -\left(\frac{2}{\pi\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1}\right) e^{-i\pi/4} \left\{ \begin{array}{l} \text{sgn}(\pi + \phi_0 - \phi) \frac{e^{ikr_1}}{(\rho+r_1)^{1/2}} F\left[\left(k(\rho-r_1)\right)^{1/2}\right] \\ + \text{sgn}(\pi - \phi_0 - \phi) \frac{e^{ikr_2}}{(\rho+r_2)^{1/2}} F\left[\left(k(\rho-r_2)\right)^{1/2}\right] \end{array} \right\}$$

avec $\rho = \rho_s + \rho_r$; $\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & ; x > 0 \\ -1 & ; x < 0 \end{cases}$ et $F(x)$: fonction de Fresnel.

Dans le cas où $x \gg 1$, le développement en série asymptotique de F permet d'exprimer Φ_D par :

$$\Phi_D = -\left(\frac{2}{\pi\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1}\right) e^{i\left(k\rho + \frac{\pi}{4}\right)} \left(\frac{1}{\rho_s \rho_r}\right)^{1/2} \frac{\cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\phi_0}{2}}{\cos \phi \cos \phi_0}$$

1.4 Effet des conditions atmosphériques sur la propagation du son

Après plusieurs années de recherche sur l'influence des effets de sol (avec ou sans discontinuité d'impédance) sur la propagation des ondes sonores à grande distance, en atmosphère homogène (gradient vertical de vitesse du son nul), un effort important a été développé depuis 1986 sur l'étude de la prise en compte des effets météorologiques [P8], [P15], [P17], [R9], [C4], [C5], [C9], [C23], [C30], [C36], [C40], [S1], [L1]. Les cas étudiés ont été les suivants :

- Condition de réfraction « négative » (gradient vertical de vitesse du son négatif),
- Condition de réfraction « positive » (gradient vertical de vitesse du son positif),

1.4.1 Propagation pour des conditions de réfraction « négative »

Les premiers travaux dans ce domaine ont été conduits lors d'un séjour au C.N.R.C. au cours duquel j'ai développé en collaboration avec les collègues canadiens (MM. Gilles Daigle et Alain Berry), un modèle permettant de calculer analytiquement le champ sonore à l'intérieur d'une zone d'ombre acoustique provoquée par un gradient vertical de vitesse du son négatif. De telles conditions s'observent par exemple lors d'une journée ensoleillée ou pour des situations de vent contraire.

Un tel gradient influence la trajectoire des rayons sonores, et a pour effet de les courber vers le ciel. L'approche modélisation fait appel à la théorie des ondes rampantes suivant laquelle le champ acoustique à proximité et à l'intérieur de la zone d'ombre est obtenu après résolution du système d'équations aux dérivées partielles (équation des ondes + conditions aux limites) par transformée de Fourier bidimensionnelle [21]. L'intégrale est calculée par la suite par la méthode des résidus. Si le récepteur est situé profondément dans la zone d'ombre, le champ acoustique est fourni par le premier terme de la série qui représente le mode propagatif le moins atténué. Dans les autres cas, des approximations sont éventuellement envisageables. Il s'agit d'exprimer les fonctions de Hankel et d'Airy rentrant dans la formulation du champ sonore par leur développement asymptotique. Pour les situations les plus générales, le nombre de termes de la série peut être important ($10 < n < 50$). Il dépend principalement des positions respectives de la source et du récepteur par rapport au rayon limite. Cette approche théorique avait déjà été employée pour la modélisation de la propagation des ondes électro-magnétiques et des ondes radios sur des grandes distances entre des stations sur terre et divers navires situées en différents points de l'océan [22-23].

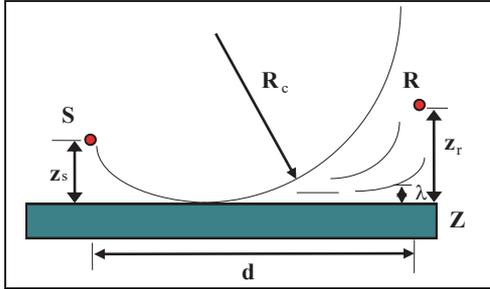
Au delà du rayon limite (zone éclairée), la méthode fournit des résultats comparables à ceux obtenus par une approche purement géométrique. Cette dernière, fait l'hypothèse qu'il existe une analogie entre la propagation au voisinage d'une surface plane en atmosphère stratifiée et une propagation au voisinage d'une surface courbe en atmosphère homogène. Les diverses prévisions ont été confrontées à des expérimentations à la fois sur maquette (sur une surface courbe) et en site réel [P8], [R9]. Les principales formulations seront présentées dans l'encadré n°1.4.

Les formulations développées dans le cas d'un sol homogène ont été par la suite étendues au cas des sols discontinus (route + environnement). A grande distance, les niveaux d'atténuation dans la zone d'ombre peuvent être très importants voire disproportionnés par rapport aux niveaux sonores réellement mesurés. Cette différence est due principalement aux effets de la turbulence qui n'a pas été introduite dans cette

formulation. Toutefois, son impact est actuellement pris en compte par une approche théorique différente qui a fait récemment l'objet d'un travail de thèse [T6] (cf. § 1.4.3).

Encadré n°1.4

Champ sonore pour des conditions de réfraction « négative »



Gradient vertical de vitesse du son

$$\frac{\partial c}{\partial z} \approx \frac{c}{2T} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\rho}{h} \frac{\partial v}{\partial z} \quad \text{où}$$

T est la température en degré Kelvin,
 c la vitesse du son, v le vecteur vent,
 h direction du vent.

Avec l'hypothèse d'un profil vertical de vitesse du son linéaire, le rayon de courbure s'exprime

$$\text{par } R_c = \frac{c(z)}{|\partial c / \partial z|}$$

Expression du champ acoustique

Dans l'ensemble du demi-plan des $z > 0$, la pression acoustique satisfait l'équation de Helmholtz :

$$\Delta p + k^2(z) \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = -4\pi \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_s),$$

à laquelle on adjoint la condition limite à l'interface air-sol et la condition de Sommerfeld.

La solution intégrale du champ est : $p(d, z) = -S^{\vec{z}} \int_{-\infty}^{+\infty} H_0^{(1)}(kd) P(z, k) k dk$

Dans la cas d'un profil linéaire de vitesse du son en fonction de l'altitude, $P(z, k)$ s'exprime par :

$$P(z, k) = -2\pi\lambda e^{-i\pi/6} Ai \left[\left(\tau - \frac{z_{>}}{\lambda} \right) e^{2i\pi/3} \right] \left\{ Ai \left(\tau - \frac{z_{<}}{\lambda} \right) - \frac{[Ai'(\tau) - q Ai(\tau)] Ai \left[\left(\tau - \frac{z_{<}}{\lambda} \right) e^{2i\pi/3} \right]}{Ai'(\tau e^{2i\pi/3}) - q Ai(\tau e^{2i\pi/3})} \right\}$$

dans laquelle : Ai représente la fonction de Airy et Ai' sa dérivée première, $q = \frac{1}{Z} (ik_0 \rho \lambda c)$,

$$\lambda = \left(\frac{R_c}{2k_0^2} \right)^{1/3}, \quad \tau = (k^2 - k_0^2) \lambda^2, \quad k = \frac{\omega}{c(z)}, \quad k_0 = \frac{\omega}{c(0)}, \quad z_{<} = \min(z, z_s) \text{ et } z_{>} = \max(z, z_s).$$

Les fonctions de Airy sont obtenues comme solution de l'équation différentielle $f''(\zeta) - \zeta f(\zeta) = 0$.

A l'intérieur de la zone réfractive, si $d > z_s + z$ où $z = z_r$ (hauteur du récepteur), après calcul de l'intégrale par la méthode des résidus, la pression acoustique a l'expression suivante :

$$p(d, z) = \frac{\pi}{\lambda} e^{i\pi/6} S^{\vec{z}} \sum_n H_0^{(1)}(k_n d) \frac{Ai \left(b_n - \frac{z_s}{\lambda} e^{2i\pi/3} \right) Ai \left(b_n - \frac{z}{\lambda} e^{2i\pi/3} \right)}{[Ai'(b_n)]^2 - b_n [Ai(b_n)]^2}$$

où $b_n = \tau e^{2i\pi/3} = (k_n^2 - k_0^2) \lambda^2 e^{2i\pi/3}$ sont les zéros de l'équation : $Ai'(b_n) + q e^{i\pi/3} Ai(b_n) = 0$

L'expression de $p(d, z)$ est valable également au dessus du rayon limite si l'on considère un nombre de termes de la série suffisant. Elle est en cela plus satisfaisante que la solution donnée par Pierce [21] qui se limite à la zone d'ombre. Cette solution peut se simplifier lorsque $Z \rightarrow \infty$.

En présence d'une discontinuité entre deux impédances Z_1 et Z_2 , la pression acoustique s'écrit :

$$p(Z_1, Z_2) = p_1(Z_1) \cdot D \cdot p_2(Z_2) \quad \text{avec } D = D_1^\alpha \cdot D_2^{1-\alpha} \quad \text{où } \alpha = \frac{d_2}{d_1}; \quad d_1 = d(S, S') \text{ et } d_2 = d(S', R).$$

S' est une source sonore fictive localisée au droit de la discontinuité, à la hauteur $z_{s'}$;

$D_1 = \frac{p(Z_1)}{p_1(Z_1) p_2(Z_1)}$ et $D_2 = \frac{p(Z_2)}{p_2(Z_1) p_1(Z_2)}$. Les $p(Z_i)$ et $p_i(Z_i)$ s'expriment en termes d'ondes rampantes par les formulations données ci-dessus et plus amplement détaillées dans [R9].

1.4.2 Propagation pour des conditions de réfraction « positive »

Après avoir abordé les cas de la réfraction « négative », nous nous sommes tout naturellement penchés sur le cas inverse, celui de la réfraction « positive » pour lequel les rayons sonores sont incurvés vers le sol et ainsi se réfléchissent une ou plusieurs fois sur ce dernier. Le nombre de réflexions dépend à la fois des hauteurs respectives de la source et du récepteur et la distance de propagation. Une telle courbure des rayons est produite par l'influence d'un gradient vertical de vitesse du son positif. De telles situations s'observent principalement en période nocturne, entre les inversions thermiques et en période diurne pour des conditions de vent portant.

La modélisation de telles conditions de propagation qui avaient déjà été abordée pour des géométries particulières par différents auteurs [24-25] a été reprise et complétée entre 1991 et 1996, dans le cadre d'un premier thème de recherche intitulé « *Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur* » dont j'ai assuré l'animation. Ce thème a suscité une étroite collaboration entre le L.C.P.C., diverses équipes des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (3), et plusieurs équipes extérieures dont le Conseil National de Recherches du Canada (M. Gilles Daigle) pour la partie acoustique et laboratoire de Bioclimatologie de l'I.N.R.A. (M. Yves Brunet) pour la partie météorologique. Outre de nombreuses publications [P14], [R10], [R11], [R12], [R13], [R14], [C14], [C15], [C19], [C21], [C23], [C25], [C26], [S4], [S8], [S13], [S24], une thèse (M. Etienne Séchet) [T3], divers logiciels [L2], [L3], les résultats de ce thème ont pu être largement utilisés lors de l'élaboration de la *Nouvelle Méthode de Prédiction du Bruit* [R15], [C28] réalisée sous l'égide de la Direction des Routes du Ministère de l'Équipement, en collaboration avec d'autres organismes du dit Ministère, comme par exemple le CSTB de Grenoble (MM. Yannick Gabillet et Jérôme Defrance) et divers Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées. Cette méthode fait actuellement l'objet de la norme XP S 31-133 [N6].

La modélisation de cet effet de réfraction « positive » pour des situations représentatives de la propagation du bruit routier a fait l'objet du premier sujet de ce thème qui avait également d'autres objectifs dont les principaux étaient :

- Faire le point sur les modèles analytiques déterministes permettant d'estimer l'atténuation sonore à moyenne et grande distance de la source pour des conditions de propagation différentes au sein d'une atmosphère homogène ou inhomogène,
- Aborder l'aspect probabiliste de la propagation du bruit pour de longues périodes d'observation au cours desquelles les conditions atmosphériques varient,
- Aborder l'aspect perceptif lié à l'influence des variations atmosphériques sur l'appréciation par les populations riveraines des infrastructures bruyantes des fluctuations de niveaux sonores.

Nous n'aborderons ici que le premier point, les deux autres le seront au cours du paragraphe 1.4.4. Le but de ce travail fut principalement la mise au point d'un code de calcul permettant de prévoir pour une géométrie source-récepteur quelconque, une atténuation sonore en fonction de divers paramètres de sol et d'atmosphère. Outre le cas précis de calcul pour des conditions de gradient positif de vitesse du son, le logiciel PROPATE [L3] développé à cet effet, permet également d'aborder le calcul pour des conditions de propagation en milieu homogène pour lesquelles la vitesse du son est invariante dans l'espace. Ces conditions correspondent à des situations de ciel couvert, avec un très faible vent. Dans ce cas, la trajectoire des rayons sonores est rectiligne.

Vis-à-vis des autres paramètres, ce logiciel permet également de prendre en compte les effets de turbulence ainsi que l'effet de divers types de sols et notamment des divers types de revêtements de chaussée qui rentrent pour une bonne part dans la composition du bruit routier, au travers du mécanisme de contact pneumatique/chaussée. Une approche théorique spéciale a été mise en place pour prendre en considération les revêtements de chaussée poreux qui ont des propriétés acoustiques particulières (cf. Chapitre 2). Les résultats obtenus avec cet outil se comparent avantageusement avec les données expérimentales recueillies au cours de plusieurs campagnes de mesures.

Du point de vue de la modélisation, la technique utilisée, plus amplement détaillée dans l'encadré n°1.5, fait également appel à la théorie de l'acoustique géométrique. Après résolution d'une équation du 4^{ème} degré permettant de déterminer les abscisses des points de réflexions de l'onde sonore sur le sol et donc par voie de conséquence le nombre N de rebonds, il suffit de calculer les différentes longueurs des rayons acoustiques courbes ainsi que les divers temps de propagation. Une formulation similaire à celle fournie en fin de l'encadré n°1.2 prenant en compte l'ensemble des trajets sonores entre la source et le récepteur permet d'accéder à l'expression de la pression acoustique totale qui correspond à la sommation des contributions de chacun des rayons issus de la source et atteignant le récepteur.

Lorsque les valeurs de gradient vertical de vitesse du son sont faibles ou lorsque les distances sont relativement courtes (inférieures à 200 m), une seule réflexion sur le sol sera prise en compte. Dans les cas contraires, on considérera les N réflexions.

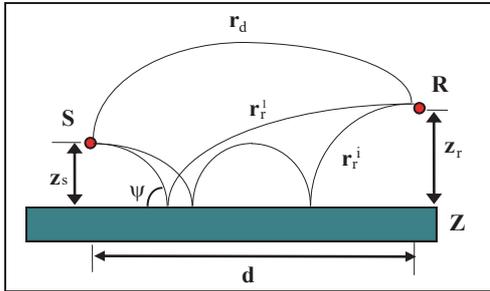
Par la suite, les effets de turbulence ont pu être introduits en rajoutant aux termes d'amplitude et de nombre d'onde ($k = \omega/c$) un terme fluctuant dont la composante aléatoire est une distribution normale [27]. Les paramètres majeurs liés à la turbulence sont :

- l'intensité $\langle \mu^2 \rangle$ qui peut prendre des valeurs comprises entre $2 \cdot 10^{-6}$ et $20 \cdot 10^{-6}$,
- l'échelle L qui pour des situations typiques de propagation de bruit routier prend des valeurs proches de 1.

Contrairement au cas de la propagation en condition de réfraction « négative » pour lequel l'effet de la turbulence peut atteindre plusieurs décibels (cf. § 1.4.3), il ne représente que quelques décibels dans le cas de la réfraction « positive ». Ceci s'explique par le fait que le niveau sonore est déjà beaucoup plus élevé du fait de la simple augmentation du nombre de rayons sonores atteignant le récepteur.

Encadré n°1.5

Champ sonore pour des conditions de réfraction « positive »



Pour l'ensemble des calculs, nous avons fait l'hypothèse d'un gradient de vitesse du son linéaire $c(z) = c_0(1 + az)$. La valeur du gradient a été choisie comme la pente de la courbe de variation à la hauteur z_r .

Abscisses des points de réflexion

Les abscisses des points de réflexion sont solutions de l'équation

$$n(n+1)x^4 - (2n+1)dx^3 + [b_r^2 + (2n^2-1)b_s^2 + d^2]x^2 - (2n-1)b_s^2 dx + n(n-1)b_s^4 = 0$$

$$b_i^2 = \frac{1}{a} [z_i(2 + az_i)], \quad z_i \text{ est la hauteur de la source ou du récepteur selon que } (i = S) \text{ ou } (i = R).$$

L'itération 1 ($n = 0$) correspond au rayon direct.

Expression du champ acoustique

Connaissant le nombre N de rayons sonores et l'impédance du sol, le champ acoustique total est :

$$p^2 = \sum_{i=1}^N \frac{A_i^2 \cdot |Q_i|^2}{r_i^2} + 2 \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{A_i |Q_i| \cdot A_j |Q_j|}{r_i r_j} \cdot \cos \left[\omega(\tau_j - \tau_i) + \text{Arg} \left(\frac{Q_j}{Q_i} \right) \right]$$

où les A_i correspondent aux atténuations dues uniquement à l'absorption atmosphérique qui peuvent être calculées à partir de la norme ISO 9613-1 [26] et r_i et τ_i respectivement les longueurs des rayons sonores et les temps de parcours. A l'itération 1, ($r_1 = r_d$), le coefficient de réflexion en onde sphérique Q_1 est pris égal à 1. Pour les trajets réfléchis ($r_{i(i>1)} = r_r^i$), Q s'exprime par la relation $Q = R_p + (1 - R_p)F(w)$ déjà détaillée dans l'encadré n°1.2. Pour le cas des réflexions multiples, chaque trajet réfléchi est pondéré par un coefficient Q_i fonction de l'angle de réflexion ψ_i et de l'ordre de la réflexion donné par l'expression : $Q_i = [Q(\psi_i)]^n$. Quand N est égal à 2 (1 rayon direct + 1 rayon réfléchi), on obtient la formulation proposée par Hidaka [24].

Les r_i et τ_i ont les expressions génériques suivantes :

$$r_i = r(z_s) + r(z_r) + 2(n-1)r(z_m) \quad \text{et} \quad \tau_i = \tau(z_s) + \tau(z_r) + 2(n-1)\tau(z_m) \quad \text{pour lesquelles,}$$

$r(z_s)$ et $\tau(z_s)$ représentent la longueur du rayon et le temps de parcours entre la source et la 1^{ère} réflexion, $r(z_r)$ et $\tau(z_r)$ la longueur et le temps entre la dernière réflexion et le récepteur et $2r(z_m)$ et $2\tau(z_m)$ la longueur et le temps entre deux réflexions intermédiaires. Les formules générales de calcul de r et τ sont données dans [25].

Expression du champ sonore en milieu turbulent

La valeur moyenne de la pression acoustique est $\langle p^2 \rangle$. En faisant l'hypothèse que :

$A_1 = 1 + a_1$; $A_{i(i>1)} = 1 + a_i$; $k_1 r_1 = k r_1 + \delta_1$ et $k_i r_i = k r_i + \delta_i$ pour $i > 1$ pour lesquels a_1, a_i, δ_1 et δ_i sont des variables gaussiennes d'écart-types respectifs $\langle a_1^2 \rangle, \langle a_i^2 \rangle, \sigma_1$ et σ_i . En faisant l'hypothèse que $\langle a_1^2 \rangle = \langle a_i^2 \rangle = \langle a^2 \rangle$, $\langle p^2 \rangle$ s'exprime par l'équation :

$$\langle p^2 \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{A_i^2 \cdot |Q_i|^2}{r_i^2} + 2 \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{A_i |Q_i| \cdot A_j |Q_j|}{r_i r_j} \cdot \cos \left[\omega(\tau_j - \tau_i) + \text{Arg} \left(\frac{Q_j}{Q_i} \right) \right] e^{-\sigma_1^2(2-\rho_{ij})}$$

avec $A_1 = 1 + \langle a^2 \rangle$ et $A_{i,j} = 1 + \langle a^2 \rangle \phi_{i,j}$ où $\rho_{i,j}$ et $\phi_{i,j}$ les covariances d'amplitude et de phase.

1.4.3 Modélisation par approximation parabolique de l'équation des ondes

Contrairement aux diverses approches précédemment développées qui mettent en place des techniques de modélisation appropriées à chaque cas (cf. encadrés 1.2 à 1.5), la modélisation par approximation parabolique permet de calculer le champ acoustique pour l'ensemble des cas rencontrés, à partir d'une même formulation de base à laquelle sont adjointes les conditions aux limites propres à chaque situation, par exemple : la propagation en milieu homogène ou stratifié, turbulent ou non, en présence d'éventuelles discontinuités de milieu ou de topographie. Ce travail a fait l'objet de la thèse de doctorat de B. Gauvreau [T6] dont j'ai assuré le co-encadrement avec C. Depollier de l'Université du Maine dans le cadre d'un thème de recherche du L.C.P.C. intitulé « *Caractérisation micrométéorologique et acoustique de sites non plans* ». Ce thème se déroule en collaboration avec l'Ecole Centrale de Nantes et le laboratoire de Bioclimatologie de l'Institut National de la Recherche Agronomique (pour la partie micrométéorologie), et l'Ecole Centrale de Lyon et le réseau des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (pour la partie acoustique) [C30], [C36], [P15], [P17], [S25].

Dans le cadre de l'approximation de l'acoustique linéaire, la pression sonore p est solution de l'équation elliptique de Helmholtz (unidirectionnelle) $\Delta p + k^2 p = 0$, où $k = \frac{2\pi f}{c(r,z)} = k_0 n(r,z)$ est le nombre d'onde, k_0 est un nombre d'onde de référence, f est la

fréquence, c est la célérité du son et n est l'indice de réfraction (c et n dépendent tous les deux des coordonnées horizontale et verticale, respectivement r et z). Dans l'hypothèse de la symétrie azimutale pour le champ acoustique, cette équation est alors écrite dans le système de coordonnées cylindriques 2D. La pression sonore est ensuite séparée ("split") en deux composantes : une onde cylindrique *propagative*, représentée par la fonction de Hankel et son approximation en champ lointain ($k_0 r \gg 1$), et une fonction enveloppe $u(r,z)$, qui varie très peu avec la distance. Si on suppose que $n(r,z)$ dépend faiblement de la distance et que l'énergie acoustique rétro-propagée est négligeable, l'évolution de $u(r,z)$ est alors gouvernée par une équation parabolique unidirectionnelle (cf. Encadré n°1.6) fonction d'un opérateur pseudo-différentiel Q . Selon l'ordre des séries de développement de la racine carrée de l'opérateur pseudo-différentiel Q , les différentes approximations conduisent à différentes limitations angulaires pour la propagation acoustique et à différents schémas numériques (différences finies).

La méthode de résolution de l'équation parabolique mise en place est la méthode Split-Step Padé [28] dont les équations principales sont détaillées dans l'encadré n°1.6.

Après réécriture de l'équation parabolique sous une forme appropriée faisant appel à un nouvel opérateur pseudo-différentiel Q' tel que $Q'^2 = 1 + \xi + \eta$ où $\xi = \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ et $\eta = n^2 - 1$,

et après résolution de cette équation par une méthode identique à celle de split-step Fourier [29], l'idée originale consiste à approximer non plus Q' , mais l'opérateur exponentiel $\exp[\sigma(Q'-1)]$ dans sa globalité grâce un développement Padé du second ordre [30,31] dont les coefficients se déduisent facilement depuis un développement de Taylor de l'opérateur exponentiel $\exp[\sigma(Q'-1)]$. Un algorithme de marche est finalement

exprimé en fonction des divers coefficients du développement et de l'opérateur

$$\xi = \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Le schéma numérique déduit de l'algorithme conduit à un système linéaire (matrices pentadiagonales), résolu à chaque pas à l'aide d'une méthode standard de décomposition LU [32]. Sa stabilité est garantie en imposant aux éléments du numérateur et du dénominateur de l'approximation rationnelle du développement de Padé d'être complexes conjugués, si bien que la fraction rationnelle est toujours de module unité. Ce schéma numérique Padé du second ordre supporte des angles d'ouverture de propagation de l'ordre de 54°, ce qui constitue une plus large ouverture que les méthodes de différences finies classiques.

Dans ce cas précis, les sols (chaussée réfléchissante et sol naturel environnant) sont modélisés par une surface plane à réaction localisée, avec une impédance complexe dont la valeur peut varier sur le trajet de l'onde sonore (discontinuité d'impédance). Les valeurs d'impédance sont classiquement calculées à partir du modèle Delany et Bazley [2]. Le cas de la chaussée poreuse, à réaction étendue, en cours d'étude, n'est pas présentée dans ce document.

A la limite supérieure du domaine, une nouvelle condition est imposée par l'addition d'une couche absorbante d'une épaisseur de quelques dizaines de longueur d'onde. Ainsi, aucune énergie sonore ne peut être artificiellement introduite par réflexion dans le guide d'onde.

Le champ de pression initial requis pour l'initialisation de l'algorithme de marche possède un profil gaussien de largeur ajustable, et prend en compte la source image pondérée par un coefficient de réflexion complexe. Enfin, les profils moyens de célérité sont ceux introduits par Gilbert & White [33]. Dans notre approche, en complément de leur forme logarithmique, ils dépendent de la distance.

Sachant que l'atmosphère est le siège de fluctuations aléatoires de température et de vitesse du vent qui perturbent le comportement de l'onde acoustique, on prend en compte la turbulence atmosphérique en introduisant un indice de réfraction n du milieu comme étant la somme d'une partie moyenne ou *déterministe* $\langle n \rangle$ et d'une partie fluctuante ou *aléatoire* μ (cf. encadré n°1.7).

L'hypothèse de la turbulence gelée de Taylor permet de modéliser le milieu comme un ensemble de réalisations indépendantes du champ d'indice $\mu(\vec{x})$. Ainsi, pour chacune d'elles et pour une turbulence homogène, μ s'écrit comme la transformée de Fourier de $\tilde{\mu}(\vec{K})$ qui représente les fluctuations d'indice dans l'espace des nombres d'ondes.

L'originalité de cette technique de génération de la turbulence réside dans la transformation de cette intégrale en une somme de N_m *modes de Fourier aléatoires*, somme qui est ajustable avec l'étendue du spectre de μ . Le champ $\mu(\vec{x})$ est alors représenté comme la superposition de N_m "ondes planes" [30]. Il est fonction de deux variables aléatoires indépendantes θ_i représentant l'orientation du vecteur d'onde \vec{K}_i et ϕ_i ainsi que de l'amplitude $|\tilde{\mu}(K_i)|$, grandeur déterministe obtenue à partir du spectre de fluctuation d'indice. L'homogénéité de la turbulence, qui traduit l'invariance par

translation des propriétés du milieu, est assurée en imposant à ϕ_i d'être équiréparti sur $[0, 2\pi]$. Le vecteur d'onde $\overset{p}{K}_i$ ne possède pas de direction privilégiée dans l'espace de Fourier, réalisant ainsi l'isotropie de la turbulence. La valeur de l'angle θ_i est donc également équirépartie sur $[0, 2\pi]$.

La variance $\langle \mu^2 \rangle$ de l'indice de réfraction est fonction du spectre d'énergie $G(K)$ qui s'exprime en 2D en fonction du *spectre bidimensionnel* $\Phi_n(K)$ des fluctuations d'indice qui est, par définition, la transformée de Fourier 2D de la *fonction de corrélation* des fluctuations d'indice Ψ_n (cf. encadré n° 1.7).

Ainsi, la description de la turbulence atmosphérique est déterminée par le choix de la fonction de corrélation Ψ_n , dont la nature conditionne la modélisation du spectre de la turbulence $\Phi_n(K)$, donc le spectre d'énergie $G(K)$ et finalement le champ d'indice $\mu(\overset{p}{x})$.

Divers spectres de turbulence ont été utilisés, tout d'abord un spectre gaussien [34], puis un spectre de von Karman [35].

Des comparaisons ont été établies entre cette approche et d'autres tant numériques qu'analytiques. Les résultats enregistrés sont entièrement satisfaisants et demandent à être validés définitivement par les expérimentations qui sont actuellement en cours de réalisation dans le cadre du thème de recherche tant sur sites plans que sur sites non plans pour lesquels le modèle a été étendu [C40].

D'ores et déjà, ces travaux ont fait l'objet de quelques communications orales [C30] et [S25] ainsi que d'une publication dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées [P15]. Cette approche qui fait également l'objet d'une application pour le calcul de l'efficacité des écrans antibruit (cf. chapitre 3) a permis de soumettre une publication spécifique dans le Journal de la Société Américaine d'Acoustique (J.A.S.A.) [P17].

Encadré n°1.6

Modélisation par approximation parabolique de l'équation des ondes

L'équation parabolique

Dans l'hypothèse de la symétrie azimutale du champ acoustique, l'équation s'écrit dans le système de coordonnées cylindriques 2D : $\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right)p = 0$

Après séparation ("split") de la pression en une onde cylindrique *propagative*, et une fonction *enveloppe* $u(r,z)$, on obtient : $p(r,z) = u(r,z)H_0^{(1)}(k_0 r) \approx \frac{1}{\sqrt{r}}u(r,z)\exp(ik_0 r)$ où le nombre d'ondes *porteuse* est choisi proche du nombre d'ondes horizontal dominant dans la décomposition spectrale de $u(r,z)$. Une bonne approximation est $k_0 = \omega/\bar{c}$, où \bar{c} est la vitesse moyenne du son. Supposant que $n(r,z)$ est faiblement fonction de la distance et qu'il n'y a pas d'énergie acoustique rétro-propagée, la variation de $u(r,z)$ s'écrit alors : $\frac{\partial u(r,z)}{\partial r} = i(\sqrt{Q} - 1)u(r,z)$.

L'opérateur pseudo-différentiel Q est défini par la relation : $Q = \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n^2$.

La méthode split-step Padé

Soit un nouvel opérateur pseudo-différentiel Q' tel que $Q'^2 = 1 + \xi + \eta$ où $\xi = \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ et $\eta = n^2 - 1$.

L'équation parabolique peut être alors réécrite sous la forme : $\frac{\partial u}{\partial r} = ik_0(Q'-1)u$

En considérant le champ existant à la distance arbitraire r_0 , et en supposant que Q' varie très peu sur $[r_0, r_0 + \Delta r]$, la solution de l'équation précédente au pas $r_0 + \Delta r$ est donnée par :

$$u(r_0 + \Delta r, z) = \exp\left[ik_0(Q'-1)\Delta r\right]u(r_0, z) = \exp\left[\sigma(Q'-1)\right]u(r_0, z)$$

Soit $\mathfrak{S} = Q'^2 - 1$. L'approximation de l'opérateur exponentiel $\exp\left[\sigma(Q'-1)\right]$ par un développement

$$\text{Padé du second ordre conduit à l'expression : } \exp\left[\sigma(Q'-1)\right] = \exp\left[\sigma(\sqrt{1+\mathfrak{S}}-1)\right] \approx \frac{1+p_1\mathfrak{S}+p_2\mathfrak{S}^2}{1+q_1\mathfrak{S}+q_2\mathfrak{S}^2}$$

Les coefficients p_1, p_2, q_1, q_2 , se déduisent d'un développement de Taylor de l'opérateur exponentiel $\exp\left[\sigma(Q'-1)\right]$. Par identification, on trouve :

$$p_1 = \frac{3+\sigma}{4}; p_2 = \frac{\sigma^2+6\sigma+3}{48}; q_1 = \frac{3-\sigma}{4}; q_2 = \frac{\sigma^2-6\sigma+3}{48}$$

Enfin, l'algorithme s'exprime en fonction de p_1, p_2, q_1, q_2, η et de l'opérateur ξ , soit :

$$\left[1+q_1(\eta+\xi)+q_2(\eta+\xi)^2\right]u(r_0+\Delta r, z) = \left[1+p_1(\eta+\xi)+p_2(\eta+\xi)^2\right]u(r_0, z)$$

Les profils moyens de célérité du son (de forme logarithmique), dépendant de la distance sont :

$$c(r, z) = \begin{cases} c_0 + a(r)\ln(z/z_0) & \text{pour } z \geq z_0 \\ c_0 & \text{pour } z < z_0 \end{cases} \text{ où } c_0 = 340 \text{ m/s, } z_0 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m (paramètre de rugosité).}$$

La valeur du paramètre de réfraction $a(r)$ peut varier de -2 m/s (gradient fortement négatif) à 2 m/s (gradient fortement positif), avec une évolution *linéaire* en fonction de la distance.

Encadré n°1.7

Modélisation par approximation parabolique de l'équation des ondes (suite)

La turbulence atmosphérique - Modes de Fourier aléatoires

L'indice de réfraction n a pour expression : $n = \langle n \rangle + \mu$ où $\langle n \rangle \approx 1$ et $\mu \ll 1$

Pour un problème bidimensionnel, le champ d'indice $\mu(\vec{x})$ s'écrit : $\mu(\vec{x}) = \int_{R^2} \tilde{\mu}(\vec{K}) \exp(i\vec{K}\vec{x}) d\vec{K}$ où $\tilde{\mu}(\vec{K})$ représente les fluctuations d'indice dans l'espace des nombres d'ondes.

Lorsque l'on transforme l'intégrale en une somme de N_m modes de Fourier aléatoires, $\mu(\vec{x})$ devient : $\mu(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{N_m} |\tilde{\mu}(K_i)| \cos(\vec{K}_i \cdot \vec{x} + \phi_i)$.

Par ailleurs, la variance $\langle \mu^2 \rangle$ de l'indice de réfraction s'exprime par la relation : $\langle \mu^2 \rangle = \int_0^{+\infty} G(K) dK$; où le spectre d'énergie $G(K)$ s'écrit en 2 dimensions $G(K) = 2\pi K \Phi_n(K)$. $\Phi_n(K)$ représente le spectre bidimensionnel des fluctuations d'indice, transformée de Fourier 2D de la fonction de corrélation des fluctuations d'indice Ψ_n qui s'écrit :

$$\Phi_n(K) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \Psi_n(r) J_0(Kr) r dr \quad \text{où } J_0 \text{ est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 0.}$$

Pour une turbulence décrite par une fonction de corrélation gaussienne, la fonction de corrélation s'écrit :

$$\Psi_n(r) = \langle \mu(\vec{x} + \vec{r}) \mu(\vec{x}) \rangle = \langle \mu^2 \rangle \exp\left(-\frac{r^2}{L^2}\right)$$

où $\langle \mu^2 \rangle$ est l'intensité de la turbulence et L une distance représentative de la corrélation des fluctuations d'indice. L est communément appelée « distance de corrélation » ou « échelle de turbulence ».

L'expression analytique de la densité spectrale de fluctuations d'indice s'écrit :

$$\Phi_n(K) = \frac{\langle \mu^2 \rangle}{4\pi} L^2 \exp\left(-\frac{K^2 L^2}{4}\right)$$

Pour une turbulence décrite par un spectre en puissance de von Karman, le spectre des fluctuations d'indice est défini par la loi :

$$\Phi_n(K) = \frac{5}{6\pi} L_0^{-5/3} \langle \mu^2 \rangle \left(K^2 + \frac{1}{L_0^2}\right)^{-11/6} \exp\left(-\frac{K^2}{K_m^2}\right)$$

pour laquelle : $K_m = \frac{5,92}{l_0}$ et $l_0 = 0,05 \text{ m}$ et $L = L_0 = 1,1 \text{ m}$

1.4.4 *Aspect statistique de long terme*

L'ensemble des études portant sur la modélisation du champ acoustique à courte, moyenne et grande distance de la source sonore conduites au cours des années 1980-1990, prenant en compte ou pas l'effet des conditions atmosphériques, n'a traité que de cas déterministes. Le champ de pression acoustique n'est calculé qu'à un instant t pour des conditions fixées de géométrie et de gradient vertical de vitesse du son représentatif de la situation météorologique du site au même instant t .

Afin de traiter des cas plus réalistes d'évaluation des niveaux sonores à moyen et long terme comme l'impose la réglementation depuis la parution de la loi « Bruit » du 31 décembre 1992, il s'est avéré indispensable d'apporter une dimension statistique à la relation étroite entre la propagation des ondes sonores et les conditions météorologiques. Cette démarche a été conduite en mettant en relation, sur des périodes allant de quelques heures à quelques jours voire plus, une caractéristique météorologique et une information sur l'atténuation acoustique au voisinage d'un site considéré dans une première approche comme plan, d'impédance acoustique homogène et dégagé de tout obstacle réfléchissant. Les diverses approches mises en place vérifient les contraintes suivantes :

- Vis-à-vis des hétérogénéités de l'atmosphère, toute variable acoustique mesurée à grande distance d'une source est considérée comme une variable aléatoire. L'information acoustique est donc représentée par sa distribution statistique.
- La correspondance météo-acoustique est essentiellement basée sur la connaissance que l'on peut extraire d'une banque de données expérimentale qui a été acquise par le réseau technique des Ponts et Chaussées sur divers sites dont les caractéristiques correspondent à celles mentionnées ci-dessus.

Les travaux réalisés dans le cadre de ces recherches ont consisté :

- En un premier temps, en une étude bibliographique approfondie relative à l'ensemble des phénomènes mis en jeu,
- En un second temps, en une étude expérimentale de la relation bruit/météo utilisant les approches statistiques « classiques ». A partir de ces travaux une grille qualitative à double entrée a été mise au point. Elle permet d'établir les diverses classes bruit/météo.
- En un troisième et dernier temps, en une étude de la relation bruit/météo par une approche utilisant la logique floue. Ce dernier travail qui s'est attachée à proposer une première approche « quantitative non déterministe » du problème, adaptée à la nature imprécise du pouvoir d'évaluation de l'opérateur humain ainsi que du caractère chaotique des états atmosphériques, a fait l'objet de la thèse d'Etienne Séchet [T3] qui a été soutenue en juillet 1996 à l'Université de Paris-Dauphine. Cette nouvelle approche apporte d'une part à l'acousticien de terrain un outil pratique lui permettant de mieux appréhender les mesures effectuées à grande distance d'une source, en lui fournissant une information conforme à la réalité expérimentale, et d'autre part, elle vise à lui faire remettre en question la véracité qu'il accorde habituellement aux résultats de nature déterministe.

Concernant l'aspect perception par les riverains des fluctuations de bruit liées aux variations atmosphériques, une première étude exploratoire a été conduite sur la base de deux campagnes d'expérimentation au cours desquelles les mesures acoustiques étaient simultanées aux enquêtes de « perception » auprès des riverains. Au cours de la

première série, la source sonore était une usine d'incinération d'ordures ménagères, alors que l'autoroute A821, dans la banlieue nantaise, était la source sonore lors de la seconde série. Les premières conclusions de cette recherche basée sur un nombre restreint d'échantillons sont les suivantes :

- De façon générale, les riverains sont aptes à distinguer des variations de niveau sonore en fonction des fluctuations atmosphériques,
- Même à des niveaux faibles, les bruits d'origine routière peuvent provoquer des nuisances relativement élevées,
- A faible niveau, la coloration spectrale semble plus influencer les réponses des riverains que les niveaux sonores proprement dit,
- Lorsqu'il y a présence d'une source secondaire, l'identification de cette dernière est d'autant plus marquée en fonction des variations de conditions météorologiques que la source primaire est permanente et que la nature de la source secondaire est bien identifiée.

L'ensemble des résultats de cette étude est regroupé dans le rapport de synthèse du thème de recherche [R14].

1.5 Conclusion

Au début des années 1980, la volonté de vouloir prévoir, avec la meilleure précision possible, l'impact acoustique des routes nationales à trafic élevé, nous a tout naturellement conduit à lancer des recherches dans le domaine de la propagation acoustique en milieu extérieur et plus particulièrement, sur l'influence des conditions de sol et des phénomènes météorologiques sur l'évaluation des niveaux sonores pour des récepteurs (riverains) situés à courte, moyenne et grande distance de la route. Depuis ces vingt dernières années, ces travaux ont été successivement conduits dans le cadre de projets multiples (contrats, thèses, thèmes de recherche, etc...) et ont fait l'objet d'un grand nombre de publications.

Au cours de leur déroulement, nous avons été progressivement conduits à complexifier les modèles pour essayer de se rapprocher toujours au plus près des situations réelles. Ceci nous a notamment conduit à prendre en compte successivement les phénomènes de discontinuité de milieu de propagation et plus récemment l'évolution des conditions micrométéorologiques au travers de diverses approches allant de l'acoustique géométrique analytique à l'emploi de méthodes numériques. Ces travaux n'ont pu être menés à bien que grâce au fruit d'étroites collaborations tissées entre l'équipe du L.C.P.C. et des équipes françaises et étrangères d'acousticiens de l'environnement et de micrométéorologues.

Alors qu'au début de ces recherches, l'objectif principal était la « simple » caractérisation du champ de pression acoustique en tout point de l'espace, au fur et à mesure de leur progression, les divers résultats enregistrés ont pu être d'une part utilisés pour la normalisation et la réglementation et d'autre part, transférés dans des domaines plus appliqués. Nous citerons à titre d'exemple, l'impact sonore de divers types de revêtements de chaussées routières sur la génération et la propagation du bruit de la circulation routière. Les résultats de ces travaux sont présentés au chapitre suivant.

PUBLICATIONS PRINCIPALES

∞ ∞ ○ ∞ ∞

CHAPITRE 2



PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES DES REVÊTEMENTS DE CHAUSSÉE POREUX

2.1 Introduction

Jusqu'à la fin des années 80, dans l'ensemble des modèles de calcul prévisionnel lié au bruit de la circulation, le revêtement de surface de la chaussée était considéré comme un dioptré réfléchissant d'impédance de surface infinie.

Au cours de ces mêmes années, des structures de chaussées présentant un pourcentage de vide non négligeable (de l'ordre de 10 à 15 %) sont apparues sur le marché des matériaux routiers. Ces structures routières appelées communément « enrobé drainant » ou « béton bitumineux drainant (BBD_r) » qui avaient été mises au point pour régler des aspects sécuritaires liés tant aux projections d'eau qu'aux problèmes d'hydroplanage par temps de pluie se sont avérées rapidement être des couches de roulement pouvant présenter des caractéristiques acoustiques intéressantes du fait de leur porosité interne.

Des études ont donc été lancées dans le but d'une part, de décrire les phénomènes acoustiques à l'intérieur de structures granulaires poreuses et d'autre part, d'identifier l'impact de ces nouveaux matériaux sur la propagation des ondes sonores produites notamment par le phénomène de contact entre le pneumatique et la surface de chaussée.

Concernant la partie modélisation de l'impédance acoustique de la couche de surface, ces études ont fourni l'opportunité d'une collaboration étroite entre les acousticiens du L.C.P.C. et ceux du département « Modélisation Mécanique et Acoustique » de l'I.N.R.E.T.S.¹. De même, la partie de ces recherches relative à l'impact environnemental de la structure de chaussée sur la propagation des ondes sonores issues du trafic nous ont permis de poursuivre notre collaboration avec l'équipe acoustique du Conseil National de Recherches du Canada.

Les résultats enregistrés sur cette thématique ont fait l'objet de multiples publications et communications [P9] [P10] [P12] [C15] [C16] [C26]. Deux d'entre elles seront reprises dans leur intégralité en fin de chapitre tandis que les autres ne seront mentionnées que dans la liste complète des productions.

Parallèlement à ces travaux plus fondamentaux, les divers résultats ont été utilisés pour établir une classification acoustique des revêtements de chaussée tant à proximité de la voie routière qu'en façade des habitations riveraines situées à quelques centaines de mètres de la route [P10] [P11] [C35]. Ce dernier point sera repris plus en détail au chapitre 4 du présent document.

2.2 Modélisation théorique des couches de roulement poreuses

La structure de chaussée est modélisée comme une structure poreuse d'épaisseur finie, à squelette rigide, à l'intérieur de laquelle l'onde acoustique se propage dans un fluide visqueux au repos. Son impédance de surface Z est fonction à la fois de l'impédance caractéristique Z_c de la structure, de l'impédance de la couche de fond Z_T , de la constante de propagation dans le milieu κ et de l'épaisseur λ de la couche (cf. encadré n°2.1). Dans le cas où le fond de couche est imperméable, on peut considérer qu'il est parfaitement réfléchissant, c'est-à-dire que $Z_T \rightarrow \infty$. L'expression de l'impédance Z se simplifie alors pour n'être fonction seulement que de Z_c et de κ . Chacun de ces paramètres s'expriment

¹ Actuellement « Laboratoire Transport Environnement »

en fonction de la porosité communicante de la couche Ω et de K_g et ρ_g représentant respectivement les fonctions permettant de prendre en compte les effets thermiques et visqueux à l'intérieur de la structure poreuse. Ces dernières fonctions s'expriment à partir des paramètres thermodynamiques (le rapport des chaleurs spécifiques γ , la masse volumique de l'air ρ_0 , la pression atmosphérique ambiante P_0 et le nombre de Prandtl N_{pr}) et des paramètres physiques de la structure poreuse (la résistance spécifique au passage de l'air R_s , la porosité communicante Ω et le facteur de tortuosité q^2). A partir de la formulation générale, il est possible de calculer par récurrence, l'impédance de surface d'une structure multicouche en remplaçant à chaque étape n du calcul, Z_T par la valeur de l'impédance de surface Z de la couche $(n-1)$.

Quelle que soit l'approche utilisée (microstructurelle [36] ou phénoménologique [C16]), les caractéristiques de la couche Z_c et de κ s'expriment par les mêmes relations génériques. En revanche, K_g et ρ_g ont des expressions légèrement différentes (cf. encadré n° 2.1). Les écarts observés entre ces deux formulations pour des matériaux de laboratoire ne se retrouvent quasiment plus pour des matériaux granulaires composant les couches de roulement pour lesquels certains paramètres comme les facteurs de forme visqueux et thermiques sont très délicats à estimer. La simple prise en compte d'un facteur de forme global relié directement à la tortuosité du milieu paraît bien suffisant. Les multiples comparaisons entre la mesure et le calcul du coefficient d'absorption suivant les deux approches confirment ces hypothèses et sont largement discutées dans [P10].

L'approche dite « phénoménologique » décrit les échanges thermiques et visqueux à l'intérieur de la structure granulaire poreuse en considérant celle-ci dans sa globalité, tandis que l'approche dite « microstructurelle » décrit l'ensemble de ces phénomènes d'échange à l'intérieur de la couche d'un point de vue structurel.

Tout au long de nos études, nous avons utilisé l'approche « phénoménologique » qui nous est apparue comme bien suffisante pour décrire les phénomènes à l'intérieur d'une couche de chaussée qui peut être considérée comme partiellement inhomogène en termes de répartition des vides.

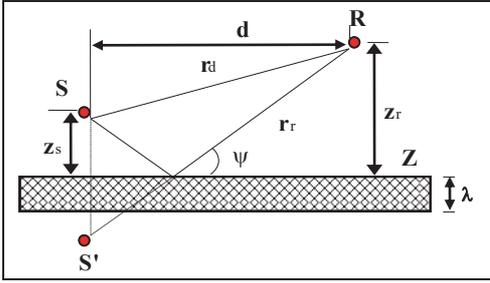
Bien qu'ayant été testés en diverses épaisseurs (jusqu'à 50 cm [S26]), les bétons bitumineux drainants répandus le plus couramment sur nos routes (granularités 0/6, 0/10 ou 0/14 mm) le sont en épaisseur de 4 cm. Ils possèdent les caractéristiques physiques suivantes :

- Résistance spécifique au passage de l'air : $1 \text{ kNsm}^{-4} < R_s < 20 \text{ kNsm}^{-4}$,
- Porosité : $0,10 < \Omega < 0,30$,
- Tortuosité : $2 < q^2 < 10$.

Le facteur R_s est mesuré par une technique décrite dans la norme internationale ISO 9053 [37] et détaillée dans [P13]. La porosité Ω est obtenue à partir d'une mesure au banc Gamma [38], matériel développé par le réseau des laboratoires des ponts et chaussées. Enfin, le paramètre de tortuosité est estimé à partir de la position du premier maximum d'absorption obtenue après une mesure du coefficient d'absorption acoustique, en incidence normale, d'un ou plusieurs échantillons représentatifs de la couche poreuse, soit à l'intérieur d'un tube à ondes stationnaires, soit par une méthode transitoire non destructive [P9] [C29].

Encadré n°2.1

Détermination de l'impédance acoustique d'une couche poreuse d'épaisseur finie



Cas d'une structure monocouche

L'impédance de surface s'exprime par :

$$Z = \frac{Z_c}{\chi} \cdot \frac{Z_T \coth(-i\kappa\lambda\chi) + Z_c}{Z_T + Z_c \coth(-i\kappa\lambda\chi)}$$

$$\text{avec } \chi = \left[1 - \left(\frac{k}{\kappa} \right)^2 \cos^2 \psi \right]^{1/2}$$

où Z_c et κ sont respectivement l'impédance caractéristique et la constante de propagation dans le milieu d'épaisseur λ , Z_T l'impédance de la couche de fond, k le nombre d'ondes dans l'air (ω/c) et ψ l'angle de réflexion. $\omega = 2\pi f$, f est la fréquence et c est la célérité du son dans l'air.

Si la couche de fond est imperméable ($Z_T \rightarrow \infty$), l'expression de l'impédance de surface devient :

$$Z = (Z_c/\chi) \coth(-i\kappa\lambda\chi).$$

Z_c et κ s'expriment respectivement par les relations génériques suivantes :

$$\kappa = \omega \left[\frac{\rho_g(\omega)}{K_g(\omega)} \right]^{1/2} \text{ et } Z_c = \frac{1}{\Omega} \left[\rho_g(\omega) K_g(\omega) \right]^{1/2} \text{ où } \Omega \text{ représente la porosité communicante.}$$

Suivant l'approche « phénoménologique »

$$K_g(\omega) = \gamma P_0 \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{1 - i f/f_\theta} \right)^{-1} \text{ et } \rho_g(\omega) = \rho_0 q^2 \left(1 + i \frac{f_\mu}{f} \right) \text{ avec } f_\mu = \frac{\Omega R_s}{2\pi \rho_0 q^2} \text{ et } f_\theta = \frac{R_s}{2\pi \rho_0 N_{pr}}$$

où : γ est le rapport des chaleurs spécifiques, ρ_0 la masse volumique de l'air, P_0 la pression atmosphérique ambiante et N_{pr} le nombre de Prandtl (0,71 dans l'air). f_μ et f_θ décrivent les dépendances visqueuse et thermique.

R_s la résistance spécifique au passage de l'air et q^2 le facteur de tortuosité.

Suivant l'approche « microstructurelle »

$$K_g(\omega) = \gamma P_0 \left(1 + \frac{2(\gamma-1) T(\Lambda_k)}{\Lambda_k} \right)^{-1} \text{ et } \rho_g(\omega) = \rho_0 q^2 + i \frac{R_s \Omega F(\lambda_\rho)}{\omega}$$

$$\text{avec } F(\lambda_\rho) = -\frac{1}{4} \frac{\lambda_\rho \sqrt{i} T(\lambda_\rho \sqrt{i})}{2T(\lambda_\rho \sqrt{i})} \text{ où } T(\xi) = \frac{J_1(\xi)}{J_0(\xi)} \text{ et } \Lambda_k = N_{pr}^{1/2} \lambda_k \sqrt{i}.$$

$$\lambda_\rho = s_\rho \left(\frac{8q^2 \rho_0 \omega}{R_s \Omega} \right)^{1/2} \text{ et } \lambda_k = s_k \left(\frac{8q^2 \rho_0 \omega}{R_s \Omega} \right)^{1/2} \text{ représentent les dépendances visqueuse et thermique.}$$

s_ρ et s_k appelés respectivement facteurs de forme visqueux et thermique sont obtenus par ajustement.

Cas d'une structure multicouche (n couches)

$$\text{L'impédance de surface s'exprime par : } Z_n = \frac{Z_{c,n}}{\chi_n} \cdot \frac{Z_{n-1} \coth(-i\kappa_n \lambda_n \chi_n) + Z_{c,n}}{Z_{n-1} + Z_{c,n} \coth(-i\kappa_n \lambda_n \chi_n)} \text{ avec } Z_0 = Z_T$$

Si les n couches poreuses reposent sur un fond réfléchissant, alors $Z_1 = (Z_{c,1}/\chi_1) \coth(-i\kappa_1 \lambda_1 \chi_1)$

L'influence des variations des divers paramètres physiques de la couche poreuse sur le facteur d'absorption est détaillé dans [P9]. Toutes les étapes de cette démarche théorique ont été validées tant par des mesures en laboratoire que sur chantiers réels [R5] [P12].

2.3 Impact d'une structure de chaussée poreuse sur la propagation

La couche de surface poreuse est traitée comme un matériau d'épaisseur finie. En fonction des différentes conditions atmosphériques et des diverses conditions aux limites (sols homogènes ou discontinus), les expressions du champ acoustique au voisinage d'une telle structure sont similaires à celles décrites au paragraphe 1.3 (encadrés 1.2 à 1.5) du chapitre 1 du présent document. Seul, le terme de réflexion en onde plane R_p est modifié pour tenir compte de l'ensemble des phénomènes à l'intérieur de la structure granulaire poreuse. Dans l'expression du coefficient de réflexion, la valeur de l'impédance de surface Z est obtenue à partir des relations fournies dans l'encadré 2.1.

Lorsque l'on exprime par la suite le coefficient de réflexion en onde sphérique Q à partir du coefficient de réflexion en onde plane R_p et de la fonction $F(w)$, il faut être très attentif lors de la détermination de la racine carrée de la variable complexe w^2 . M. R. Stinson [39] montre que pour obtenir une solution stable, l'argument complexe de w doit se situer à l'intérieur de l'intervalle $[-\pi/4, 3\pi/4]$. Dans ces conditions, il est possible de prévoir avec une précision intéressante les atténuations excédentaires dues à la présence d'une couche poreuse pour des situations quelconques. De nombreux tests ont été réalisés en site réel pour déterminer l'impact de tels types de chaussée sur le niveau sonore perçu par des riverains de voies routières ou autoroutières recouvertes de béton bitumineux drainant. Les résultats sont reportés dans diverses publications dont les principales sont [P10] [P12] [C7] [C8] [C14] [C26] [S16] [S28].

Il est toutefois important de noter que dans la réalité des situations rencontrées, les incidences sont particulièrement rasantes. En effet, la source de roulement qui représente le part la plus importante du bruit du véhicule pour des vitesses supérieures à 50 km/h, se situe très proche de la surface de chaussée [C27] et les hauteurs des microphones de réception localisés à diverses distances comprises entre 7,5 m (référence) et 200 m (distance maximum au delà de laquelle le rapport signal/bruit n'est plus suffisant) n'excèdent jamais 1,20 m à la référence et 10 m au récepteur le plus éloigné. De ce fait, les angles d'incidences sont toujours inférieurs à 10°. Dans ces conditions, les phénomènes d'atténuation au voisinage de ces enrobés sont donc particulièrement intéressants à étudier.

En particulier, sous certaines incidences critiques, on observe une prépondérance marquée de l'onde de surface. On voit alors apparaître à certaines fréquences une amplification assez importante du signal [P10]. Ce phénomène a également mis en évidence par M. R. Stinson et al. [40] sur des surfaces de type « treillis », présentant un fort taux de vides superficiels. Ce phénomène particulier et très sélectif présente un intérêt majeur lorsque l'on souhaite vérifier par exemple, à l'aide d'une méthode de mesure non destructive, l'état de surface et notamment le taux de fermeture des pores de la structure drainante après colmatage partiel ou total. Un exemple pour une chaussée urbaine (Boulevard de Doulon à Nantes) est présenté et discuté dans [P10].

2.4 Classification des revêtements poreux dans la hiérarchie des revêtements

Depuis de longues années, le réseau des laboratoires de ponts et chaussées s'est investi pour établir une classification acoustique des couches de roulement de chaussée de tout type. Cette classification a été réalisée à partir d'une méthode actuellement normalisée qui a été développée par le réseau technique et validée, sous la tutelle du L.C.P.C.. La méthode dite du « véhicule au passage » qui sera plus amplement détaillée au chapitre 4 du présent document, classe les différentes familles de revêtements de chaussée à partir de la mesure des niveaux maxima au passage de plusieurs véhicules passant au droit d'un microphone de mesure situé à 7,50 m de l'axe de roulement et à 1,20 m de hauteur [N3]. Cette méthode peut être appliquée aussi bien à des véhicules légers et des véhicules lourds pris isolément dans le flot réel de circulation (méthode du « Véhicule Isolé »), qu'à des véhicules d'essais maîtrisés présentant des caractéristiques bien précises en termes de cylindrée, de kilométrage et de montes de pneumatiques (méthode du « Véhicule Maîtrisé »).

Au sein de cette classification, les revêtements poreux à faible granularité (0/6 ou 0/10 mm) font partie de la classe des revêtements peu bruyants [P14] [C32]. Cette mesure étant effectuée en proximité directe de la voie de circulation, il s'est avéré indispensable de vérifier l'état de la classification à des distances plus importantes au voisinage direct des habitations.

Afin d'établir cette nouvelle classification, il a fallu tenir compte des multiples paramètres influençant la propagation, et tout particulièrement l'impédance acoustique de la chaussée au même titre que celle du milieu environnant constitué soit de sols absorbants de type herbeux, soit de sol parfaitement réfléchissant, comme de grandes aires de stationnement en béton de ciment. Les diverses conditions de propagation et plus particulièrement les effets atmosphériques à grande distance sont également à considérer. Les premiers résultats d'un travail qui se poursuit encore actuellement sont discutés dans [P12] [C35].

PUBLICATIONS PRINCIPALES

⌘ ⌘ ○ ⌘ ⌘

CHAPITRE 3



PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES DES ÉCRANS ROUTIERS ANTIBRUIT

3.1 Introduction

La protection phonique des riverains voisins d'infrastructures routières devient de plus en plus souvent un important problème à résoudre pour les aménageurs. Dans la majorité des cas, les solutions les plus courantes consistent à mettre en place des obstacles antibruit en bordure de voie. Ces obstacles sont très souvent des écrans de formes simples ou complexes réfléchissants ou absorbants, ou bien des buttes en terre « paysagées », absorbantes. Cette dernière solution permet d'obtenir des gains acoustiques appréciables. Elle ne peut être retenue cependant qu'à condition d'avoir à disposition une distance suffisante entre l'obstacle et les premières habitations. A titre d'exemple, l'implantation d'une butte de terre de 4 m de hauteur nécessite une largeur minimum au sol d'une vingtaine de mètres.

Avant l'apparition sur nos routes des revêtements peu bruyants, la solution « écran » était la seule possibilité de réduire de quelques décibels (8 à 10 dB(A) dans le meilleur des cas) les niveaux sonores en façade des habitations les plus proches des voies routières. Depuis la commercialisation de ces nouveaux types de revêtements que l'on ne peut pas considérer encore comme des moyens de protection à part entière, du fait des problèmes de pérennité des performances acoustiques sur plusieurs années, liés notamment aux phénomènes de colmatage, on se doit de prendre en compte dans les calculs de dimensionnement des écrans l'effet combiné de l'obstacle et de la couche de roulement absorbante. Une thèse a été effectuée sur cette thématique [T4] et quelques publications sont venues ponctuer ces recherches [P14] [C12] [C22] [S5].

Depuis plus de vingt ans, des études sont conduites au L.C.P.C. sur l'efficacité en réflexion, en transmission et en diffraction des ouvrages de protection phoniques. Les premières ont été expérimentales [P6-P7]. Elles concernaient les écrans plans et homogènes et étaient basées sur l'application d'une méthode transitoire (cf. encadré 1.1). Ces travaux ont, entre autres, servi de support à la rédaction de la norme française NFS 31-089 [N1]. Cette méthode a été par la suite améliorée afin de permettre la mesure des caractéristiques acoustiques intrinsèques des ouvrages de protection de formes quelconques. Ce travail a été réalisé dans le cadre du contrat européen « ADRIENNE » [41].

En parallèle, nous nous sommes également intéressés à la modélisation du calcul du champ acoustique au voisinage de l'écran. Au cours de ces années, diverses approches ont été développées. Elles étaient basées soit sur des méthodes analytiques de rayons de type Hadden et Pierce [42] ou Rasmussen [14-15], soit sur des méthodes numériques de type « Eléments de frontières » [T4] ou plus récemment, de type « Equation parabolique » [T6] [P17]. Chacune de ces méthodes possède un domaine d'application particulier que l'on décrira au cours des paragraphes suivants. Il est à noter cependant, que la méthode « parabolique » permet depuis peu de calculer la variation de l'efficacité acoustique d'un écran en présence d'un profil vertical de célérité du son variable lui même influencé par la présence de l'obstacle [P17].

A titre d'information, ces méthodes ont toutes fait l'objet de logiciels d'étude, en partie utilisés par le réseau technique des laboratoires des ponts et chaussées [L4] [L5] [L6] [L7].

Concernant les buttes de terre, nous avons approché théoriquement le calcul de la diffraction à partir de la théorie des « ondes rampantes », développée au cours de mon séjour au Conseil National de Recherches du Canada [R9]. Cette méthode fait également l'objet d'un logiciel d'étude [L1].

3.2 Calcul de la diffraction par des techniques géométriques

Les techniques géométriques faisant appel à des formulations analytiques sont celles les plus répandues. En fonction du type de problème à résoudre, différentes approches sont envisageables. Citons par exemple :

- La méthode de Rasmussen [14] : elle permet de calculer le champ diffracté produit par un écran plan, totalement réfléchissant, reposant sur sol discontinu,
- La méthode de Hadden et Pierce [42] modifiée par L'Espérance et al. [43] : elle permet de calculer le champ diffracté produit par un écran plan, possédant des propriétés particulières d'absorption sur chacune de ses faces et reposant sur un sol pouvant présenter également une discontinuité d'impédance.

Les formulations principales seront développées dans l'encadré 3.1. On peut noter toutefois, que le modèle de Rasmussen peut être adapté pour tenir compte d'éventuelles courbures des rayons sonores [44] représentatives des effets d'un gradient vertical de vitesse du son positif. Cette version de la méthode [L7] peut être utilisée pour des distances écran-récepteur assez importantes (jusqu'à 200 m). Dans ce cas, il suffit dans un premier temps, de calculer les longueurs des rayons sonores ainsi que les temps de trajets, de chaque côté de l'obstacle, à partir des relations détaillées dans l'encadré 1.5. Dans un second temps, nous calculons le champ acoustique à partir des relations fournies dans l'encadré 3.1, en substituant les longueurs des rayons rectilignes par celles des rayons courbes et en adaptant le calcul des déphasages pour tenir compte des nouveaux temps de trajets variables en fonction de la hauteur au dessus de l'obstacle. Ces formulations font l'hypothèse que le profil vertical de célérité du son est linéaire. Afin de rester dans des hypothèses physiquement réalistes, il est indispensable de limiter la hauteur à partir de laquelle le profil de célérité demeure constant. Ceci est détaillé dans [RS1].

Bien qu'existant dans la littérature, ces méthodes ont dû être adaptées à nos contraintes « routières », c'est-à-dire :

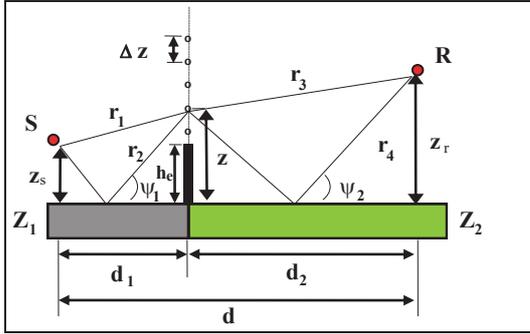
- Source sonore très proche de la chaussée,
- Récepteur pouvant être situé aussi bien en zone de diffraction (rez-de-chaussée ou premiers étages d'habitation), à proximité du rayon limite, qu'en zone éclairée (derniers étages),
- Obligation de prendre en compte les effets de la discontinuité d'impédance de surface de part et d'autre de l'écran,
- Calcul de la perte par insertion sur l'intégralité du spectre fréquentiel représentatif du bruit routier, c'est-à-dire entre 100 Hz et 5 kHz.

Bien que limitées dans certaines de leurs capacités (impossibilité de prendre en compte des formes complexes d'écrans, approximations sur la topographie du terrain, etc ...), ces méthodes présentent toutefois l'avantage de nécessiter des temps de calcul relativement brefs par rapport aux méthodes numériques plus précises, mais plus gourmandes en temps CPU. C'est une des raisons majeures pour lesquelles ces méthodes sont toujours aussi utilisées pour des calculs de dimensionnement et de prévision des niveaux sonores en présence d'obstacles.

Bien que moins adaptables aux sites réels que les méthodes numériques, ces dernières sont en revanche, plus précises que les méthodes d'abaques comme par exemple celle de Maekawa [45] qui appliquent des approximations encore plus sévères.

Encadré n°3.1

Champ sonore diffracté par un écran par des techniques géométriques



Approche de Rasmussen

$$p(\omega) = (8\pi k)^{1/2} d_2 \frac{e^{-i\pi/4}}{16\pi^2} I$$

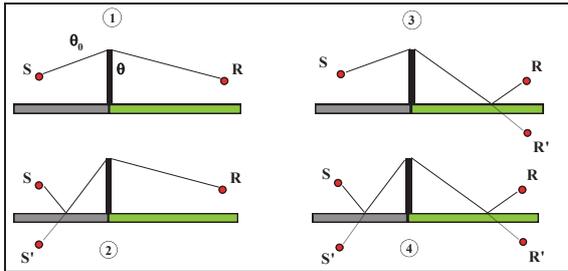
$$\text{avec } I = \int_{h_e}^{\infty} [p_1 + Q_2 p_2 + Q_1 p_3 + Q_1 Q_2 p_4] dz$$

où Q_1 et Q_2 sont respectivement les coefficients de réflexion en ondes sphériques des sols d'impédances Z_1 et Z_2 . Les expressions des p_i sont les mêmes que celles décrites dans l'encadré 3.1.

D'un point de vue numérique, l'intégrale est également calculée par la méthode des trapèzes.

$$\text{Soit : } I = \int_{h_e}^{\infty} f(Q_1, Q_2, r_1, r_2, r_3, r_4) dz = \sum_{n=1}^N f[Q_1, Q_2, r_1, r_2, r_3, r_4, (h_e + z_{max})] \Delta z$$

La somme finie est calculée jusqu'à un $z_{max} = n \Delta z$. Les conditions sur z_{max} sont identiques à celles décrites dans l'encadré 1.3.



Approche de Hadden et Pierce

$$\Phi_T = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$$

Dans laquelle les Φ_i ($i = 1, 4$) représentent les quatre termes des champs diffractés correspondant aux trajets 1, 2, 3 et 4.

En prenant en compte les effets d'absorption des faces de l'écran et du sol de part et d'autre de l'écran, la relation devient :

$$\Phi_T = \Phi_1 + Q_e^1 Q_s^1 \Phi_2 + Q_e^2 Q_s^2 \Phi_3 + Q_e^1 Q_s^1 Q_e^2 Q_s^2 \Phi_4$$

Q_e^1 et Q_e^2 sont respectivement les coefficients de réflexion en onde sphérique relatifs aux impédances Z_1 et Z_2 des deux faces de l'écran. Q_s^1 et Q_s^2 sont respectivement les coefficients de réflexion en onde sphérique relatifs aux impédances Z_1' et Z_2' du sol de part et d'autre de l'écran.

Les termes Φ_i s'expriment par la relation intégrale :

$$\Phi_i = \Phi(\xi_i) = \left(-\frac{1}{\pi}\right) \int_0^{\infty} G(\pi + i\omega) \cdot D(\omega, \xi_i) d\omega$$

$$\text{avec } \xi_1 = |\theta - \theta_0| ; \xi_2 = 2\pi - |\theta - \theta_0| ; \xi_3 = \theta + \theta_0 \text{ et } \xi_4 = 2\pi - (\theta + \theta_0)$$

$G(\pi + i\omega)$ est la fonction de Green associée à la source et $D(\omega, \xi_i)$ représente un terme de directivité associé à l'onde incidente. ω est la pulsation ($2\pi f$).

Pour un écran mince, Il s'exprime par la relation :

$$D(\omega, \xi) = \frac{(1/4) \sin[1/2(\pi - \xi)]}{\text{ch}(\omega/2) - \cos[1/2(\pi - \xi)]}$$

3.3 Calcul de la diffraction par des techniques numériques

Lorsque les écrans présentent les faces inhomogènes en termes de planéité de surface et d'impédance ou bien lorsque les conditions de propagation au voisinage proche de l'obstacle sont fluctuantes (variation horizontale du profil vertical de célérité du son due à la présence de l'obstacle lui-même et effets turbulents), les méthodes analytiques ne permettent pas de faire des prévisions précises. En revanche, les méthodes numériques sont mieux adaptées. Pour les situations décrites ci-dessus, les techniques suivantes peuvent être utilisées :

- Les configurations géométriques particulières (écrans avec divers types de casquettes, écrans à faces architecturées, écrans présentant une variété de matériaux possédant diverses propriétés d'absorption, etc...), ont été abordées par une technique d'éléments de frontière (B.E.M.).
- La variation horizontale du profil vertical de vitesse du son ainsi que des effets de la turbulence ont été abordés par une méthode basée sur l'approximation parabolique de l'équation d'Helmholtz telle que décrite au § 1.4.3 (encadrés 1.6 et 1.7) du chapitre 1.

3.3.1 Méthode des éléments de frontière à 2 dimensions (B.E.M.)

Cette méthode 2D consiste à écrire la formulation intégrale du problème (cf. encadré n° 3.2) sur la frontière du domaine, et par la suite de calculer le champ acoustique en un point quelconque du domaine. Le problème est résolu sur la frontière en utilisant une technique de type « éléments finis » conduisant à un système linéaire de valeurs de la pression acoustique et du gradient de pression à chaque noeud du maillage. Afin de résoudre le système, il est indispensable d'y adjoindre les bonnes conditions aux limites.

L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne se limite pas aux écrans de forme simple. Toutes formes ou configurations particulières pouvant être modélisées en 2D peuvent être prises en compte. En contre partie, cette méthode est coûteuse en temps de calcul et tout particulièrement en haute fréquence et à grande distance. L'introduction de fonctions de Green appropriées peut permettre cependant de réduire les temps de calcul. Pour une bonne résolution, il est recommandé de discrétiser la frontière avec un minimum de 5 points par longueur d'onde. La géométrie du problème est définie par un contour de forme quelconque. Ce contour est discrétisé en petits éléments auxquels sont associées les conditions aux limites. La source de trafic est modélisée par une ou plusieurs lignes sources cohérentes. Le problème est résolu pour chaque fréquence du spectre de bruit routier.

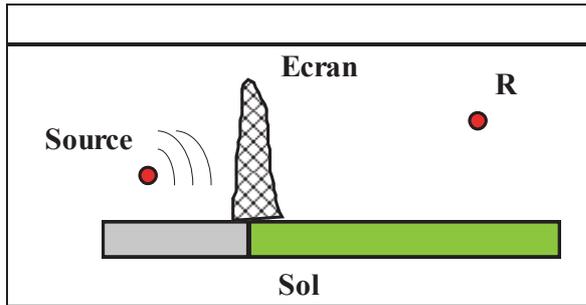
L'originalité du travail effectué dans le cadre de la thèse de F. Anfosso [T4] a concerné la prise en compte dans le modèle des revêtements de chaussée poreux considérés comme milieux à réaction non localisée. En effet, l'introduction de l'influence de l'angle d'incidence sur la valeur de l'impédance n'était pas adaptée à une résolution globale du système par la technique classique. Afin de palier cet inconvénient majeur, une technique particulière a été étudiée. Celle-ci a consisté à coupler deux équations intégrales, l'une dans l'air et l'autre dans le milieu poreux en imposant la continuité de pression et de vitesse normale à l'interface air/milieu poreux. Cette méthode a été validée par rapport aux modèles analytiques, à d'autres modèles numériques et enfin à l'expérimentation in situ [P14] [S19].

Le modèle de calcul ainsi incorporé dans le code numérique CESAR-LCPC [46] a permis d'étudier d'une part, différentes formes d'écran et d'autre part, la complémentarité entre

les barrières acoustiques et les revêtements de chaussée peu bruyants de type bétons bitumineux drainants (BBDr) [C22].

Encadré n°3.2

Calcul de la diffraction d'un écran par la technique des éléments de frontière (B.E.M.)



Approche théorique

la formulation intégrale du problème s'écrit :

$$p(R) + \int_S \left[\frac{\partial G(R, R_s)}{\partial n_s} p(R_s) - G(R, R_s) \frac{\partial p(R_s)}{\partial n_s} \right] dS(R_s) = p_{inc}(R)$$

où $p(R)$ est la pression acoustique au point

récepteur R , G la fonction de Green, S la frontière du problème discrétisée en n éléments Γ_i , n_s la normale extérieure à la surface et $p_{inc}(R)$ le terme de source.

Le système est résolu sur la frontière en utilisant une technique d'éléments finis conduisant au système linéaire suivant :

$$[\mathbf{H}] \{p\} - [\mathbf{G}] \{q\} = \{p_{inc}\}$$

avec $\{q\} = \left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \right\}$

Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$\{q\} = \{0\} \text{ pour les surfaces parfaitement réfléchissantes,}$$

$$\{q\} = ik \frac{\rho_0 c}{Z} \{p\} \text{ pour les surfaces absorbantes ayant une impédance de surface } Z .$$

Introduction des milieux poreux de type béton bitumineux drainant.

La formulation du problème couplé est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{H}] \{p\} - [\mathbf{G}] \{q\} = \{p_{inc}\} \\ \\ [\mathbf{H}_p] \{p\} - [\mathbf{G}_p] \{q\} = \{0\} \end{array} \right.$$

La première équation correspond à la résolution du problème dans l'air et la seconde à l'intérieur du milieu poreux en imposant la continuité de pression et de vitesse normale à l'interface air/milieu poreux.

La propagation à l'intérieur du milieu poreux est caractérisée à partir du modèle phénoménologique détaillé au paragraphe 2.2, encadré n° 2.1 du chapitre 2.

3.3.2 Modélisation à partir de l'équation parabolique

La méthode employée pour calculer le champ acoustique derrière un écran acoustique est en tout point identique à celle développée pour la propagation en milieu ouvert hétérogène, au paragraphe 1.4.3 (encadrés n° 1.6 et 1.7) du chapitre 1. La prise en compte de l'écran est réalisée par une mise à zéro du champ de pression acoustique à la surface de l'obstacle. Le phénomène de diffraction est pris en compte uniquement au travers du couplage des équations au voisinage de la discontinuité représentée par l'arête de diffraction.

En l'état actuel des connaissances, cette méthode basée sur un algorithme « à l'avancement » (*marching algorithm*) ne permet pas de connaître le champ acoustique devant l'obstacle. En effet, la technique de calcul n'est pas adaptée pour prendre en compte l'énergie rétropropagée due à la réflexion sur la surface de l'écran. Elle présente néanmoins de nombreux avantages.

Outre le fait qu'elle permette de visualiser l'impact des phénomènes turbulents dans la zone d'ombre de l'obstacle, une telle méthode est très intéressante car elle permet en plus d'intégrer le fait que l'obstacle lui-même puisse apporter une perturbation au profil vertical de célérité du son qui peut dans certaines conditions s'inverser au voisinage proche de l'écran.

Ce travail effectué dans le cadre de la thèse de B. Gauvreau [T6] est actuellement en cours de développement. La démarche de calcul a été en un premier temps, introduite dans le corps d'une première publication dans le Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées [P15]. Elle a fait l'objet, en un second temps d'un article publié dans le Journal de la Société Américaine d'Acoustique (J.A.S.A.) [P17] et d'une communication invitée au congrès Internoise 2000 à Nice [C36].

3.4 Cas des buttes de terre

Le cas des obstacles de grande épaisseur tels que les buttes de terre peuvent être modélisés également suivant deux approches :

- * Une approche analytique basée sur la théorie des « ondes rampantes »,
- * Une approche numérique basée sur les techniques des éléments de frontières.

Nous ne reviendrons pas ici sur la méthode numérique qui vient d'être largement développée au paragraphe précédent. En revanche, quelques éléments peuvent être signalés sur la méthode analytique.

Dans [P8], il est montré qu'à une transformation géométrique près, on peut établir une analogie entre une propagation le long d'une surface plane en atmosphère stratifiée et une propagation le long d'une surface courbée en atmosphère neutre. De nombreux auteurs ont utilisé cette analogie [44] [47]. Dans le cas d'une butte, la zone d'ombre atmosphérique produite par un gradient vertical de vitesse du son négatif est transformée en zone d'ombre topographique. Si nous assimilons notre obstacle à une surface courbe de rayon de courbure R_c , le champ de pression acoustique à l'intérieur de la zone d'ombre est déterminé à partir de la théorie des ondes rampantes utilisant les diverses formules de résidus décrites dans l'encadré n° 1.4 du chapitre 1, et dans

lesquelles sont introduites les valeurs d'impédance représentatives du ou des matériaux naturels composant l'obstacle.

Différentes expérimentations tant en milieu clos (sur maquette) qu'en extérieur ont été réalisées. Les premières lors de mon séjour au Conseil National de recherches du Canada et les autres à l'occasion de l'étude de réhabilitation acoustique d'un site autoroutier (A8) à l'entrée de l'agglomération niçoise. Ces diverses mesures comparées aux prévisions théoriques sont regroupées dans [R9] pour les premières et dans [S3] pour les autres.

Les résultats montrent d'une part, d'excellentes comparaisons entre le calcul et la mesure, et d'autre part l'apport supplémentaire d'efficacité que peuvent produire de tels obstacles par rapport aux écrans minces traditionnels.

3.5 Conclusion

Dans tout problème de modélisation du champ acoustique en milieu extérieur, il est bien rare que l'on ne soit pas confronté à la présence d'un ou plusieurs obstacles sur le chemin de propagation. La prise en compte de l'effet de ces derniers a suscité depuis de nombreuses années un grand nombre de recherches tant en France qu'à l'étranger.

En France, les travaux les plus significatifs, suivant des approches analytiques, ont démarré au cours des années 70 au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille [48-49]. Ils se sont poursuivis ensuite, en faisant appel à des approches numériques, tant au L.C.P.C. [50] qu'à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées [51].

A l'étranger, les recherches les plus significatives se sont soldées pour partie d'entre-elles par des systèmes d'abaques. Les plus connues portent encore de nos jours le nom de leur auteur (Kirchhoff, Maekawa, Kurze, etc.). Malheureusement, ces systèmes « simplifiés » deviennent très vite limités lorsque l'obstacle n'a plus une forme idéale, ou encore lorsqu'il repose sur un sol discontinu au sein d'un milieu hétérogène voire même turbulent.

C'est un peu pour apporter modestement une partie de réponse à ces problèmes concrets mais surtout complexes que nous avons développé conjointement des méthodes de calculs, analytiques et numériques, en parallèle de méthodes expérimentales. Les développements théoriques ont fait l'objet principalement de thèses et quelques logiciels ainsi que de plusieurs publications dans des revues spécialisées et communications lors de congrès nationaux et internationaux. Les méthodologies de mesure ont été quant à elles valorisées plutôt sous forme de normes.

PUBLICATIONS PRINCIPALES

⌘ ⌘ ○ ⌘ ⌘

CHAPITRE 4



ÉTUDE DU BRUIT DE CONTACT PNEUMATIQUE-CHAUSSÉE

4.1 Introduction

Au cours des dix dernières années, les constructeurs de véhicules de transports terrestres sont parvenus à diminuer considérablement les bruits d'origines mécaniques émis par le moteur, l'échappement et la transmission. Ces améliorations découlent notamment des réglementations draconiennes adoptées par les gouvernements d'Europe occidentale en matière de lutte contre le bruit de la circulation routière. En France, par exemple, les niveaux réglementaires d'émission sonore des véhicules mesurés suivant la procédure décrite dans la norme ISO 362 [52] est passé respectivement de 81 dB(A) en 1982 à 74 dB(A) actuellement pour des véhicules légers, et de 91 dB(A) à 81 dB(A) dans la même période pour les poids lourds. En raison de ces importantes améliorations, le bruit émis par le contact entre le pneumatique et la chaussée est devenu de ce fait prédominant, tout particulièrement pour des vitesses de circulation supérieures à 50 km/h pour les véhicules légers (au delà du 3^{ème} rapport de boîte de vitesse) et 80 km/h pour les poids lourds. Ce bruit de contact pneumatique - chaussée appelé aussi bruit de roulement dépend principalement de la vitesse du véhicule, des caractéristiques du pneumatique (composition de la gomme, état de la structure, répartition des pavés), et celles de la chaussée (texture superficielle, porosité). Il peut être mesuré selon une procédure normalisée [N3], [N4].

Ces phénomènes de contact, générateurs de bruit, se produisent à l'intérieur d'une aire dont la dimension relativement restreinte (quelques dizaines de centimètres carrés) varie avec la vitesse du véhicule. Etant donné leur importance, ils influent de façon essentielle sur la hauteur de la source équivalente d'un véhicule routier qui se situe théoriquement au barycentre de l'ensemble des sources sonores engendrées par un véhicule en roulement. Diverses études récentes dont une sera plus particulièrement décrite dans ce chapitre ont conduit à choisir la source équivalente très proche de la surface de chaussée. A titre d'information, quelques années en arrière, cette hauteur de source était estimée à plusieurs dizaines de centimètres. Ceci confirme une nouvelle fois l'évolution importante des véhicules en matière d'émission acoustique.

Du fait de ces évolutions, on comprend bien que des conséquences importantes sur les phénomènes propagatifs ainsi que sur le dimensionnement des ouvrages de protection en découleront. L'ensemble de ces points sera plus amplement développé au cours de ce chapitre.

4.2 Les mécanismes de génération du bruit de contact pneumatique-chaussée

Le bruit de contact pneumatique-chaussée dépend principalement de la vitesse du véhicule, des caractéristiques du pneumatique (composition de la gomme, structure de la carcasse, géométrie et répartition des pavés de gomme) et de la chaussée (spectre de la texture de surface, porosité interne et rigidité de la structure). Ce bruit est engendré par différents mécanismes [53] dont les principaux sont reliés aux phénomènes de chocs et de vibrations, aux phénomènes de compression-détente de l'air emprisonné à l'intérieur des sculptures du pneumatique (phénomène également appelé dans la littérature « air pumping ») et aux effets d'amplification à l'intérieur d'une zone comprise entre la surface du pneumatique et la surface de chaussée, classiquement nommé « effet dièdre » ou « effet pavillon ». Certains auteurs mentionnent également le phénomène produit par un glissement issu d'une rupture d'adhérence (slip-stick). Ce phénomène de crissement particulièrement riche dans le domaine des hautes fréquences, présent lorsque le pneumatique roule sur une surface lisse, est négligeable

dans le cas d'une chaussée classique. Nous l'ignorons donc dans la suite du document. L'ensemble de ces effets majeurs peuvent être résumés sur un schéma générique (cf. Figure 4.1).

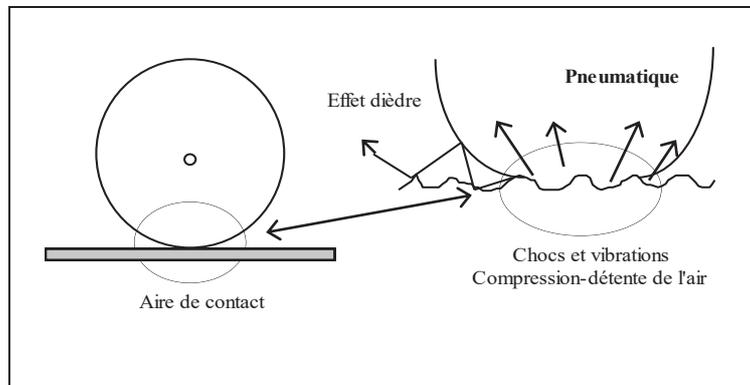


Figure 4.1 : Mécanismes de génération de bruit de contact pneumatique-chaussée

4.2.1 Mécanismes de chocs et vibrations

Les mécanismes vibratoires sont à l'origine des émissions sonores dans le domaine des fréquences basses, inférieures à 1 kHz. Une partie du champ vibratoire est engendré par la déformation de la bande de roulement du pneumatique lorsque celle-ci entre en contact avec la surface de la chaussée. Une autre partie de l'énergie vibratoire provient de l'impact entre les pavés de gomme du pneumatique et la surface de chaussée. La pénétration des granulats de surface à l'intérieur de la structure de gomme du pneumatique est responsable de ce dernier phénomène. C'est ainsi que l'accroissement de l'énergie sonore produit par ces phénomènes est proportionnel à la taille des granulats de surface. Des couches de roulement très rugueuses telles que des bétons bitumineux 0/14¹ ou des enduits superficiels en double gravillonnage sont des surfaces de chaussée très bruyantes.

4.2.2 Mécanisme de compression-détente d'air

Ce mécanisme est à l'origine d'une émission sonore située dans le domaine des fréquences hautes, supérieures à 1 kHz. Ce phénomène est maximum pour des surfaces lisses. Dans le cas d'une couche de roulement présentant une macrotexture significative, le phénomène est minimum. Ceci se produit également dans le cas d'une couche de surface poreuse. Dans ces deux cas, l'air est évacué soit entre les granulats, soit à l'intérieur des pores de la structure poreuse.

4.2.3 Effet « dièdre » ou effet « pavillon »

Ce phénomène correspond à une amplification de l'énergie sonore émise dans le zone de contact entre le pneumatique et la chaussée, due aux multiples réflexions entre la surface du pneumatique et celle de la chaussée (cf. Figure 4.1). Lorsque ces deux

¹ Pour une formulation donnée, ceci correspond à la plage de répartition des granulats de diamètres moyens minimum et maximum compris entre 0 et 14 mm.

surfaces sont acoustiquement réfléchissantes, l'amplification est maximum. Dans le cas d'une chaussée poreuse présentant des caractéristiques d'absorption significatives (cf. Chapitre 2), l'amplification est réduite.

4.3 Détermination de la hauteur de source équivalente

Dans le but final de modéliser l'émission des véhicules routiers, il s'est avéré primordial de connaître avec la meilleure précision la hauteur de source équivalente. La technique d'identification mise en place pour des véhicules circulant à des vitesses stabilisées, là où le bruit de roulement émerge, pourra être étendue par la suite au cas des véhicules circulant dans des conditions de trafic urbain. Ces nouveaux résultats seront détaillés au cours du chapitre suivant, plus spécialement dédié au bruit routier en milieu urbain.

L'hypothèse principale fait appel au concept de source ponctuelle omnidirectionnelle. Nous verrons que bien que réductrice, celle-ci est tout à fait satisfaisante. Afin de déterminer la hauteur de source équivalente, deux techniques ont été testées : une technique d'antenne développée par les chercheurs de l'I.N.R.E.T.S. [54] et une technique propagative basée sur une procédure de calage inverse utilisant un modèle de propagation au voisinage d'une surface d'impédance, développée au L.C.P.C. [T7]. Les deux techniques ont pu être avantageusement comparées et ont identifié une source sonore proche du sol (quelques centimètres). Pour l'ensemble des calculs futurs nous avons choisi une hauteur de source de l'ordre de 3 à 5 cm.

Dans le cadre de la méthode propagative, la technique consiste à mesurer l'atténuation excédentaire entre deux points du champ de propagation, situés respectivement à 7,5 m et à 13 ou 15 m de l'axe de roulement du véhicule, à 1,20 m de hauteur, puis de la comparer, par calages successifs au sens des moindres carrés (algorithme de Marquardt), à l'atténuation excédentaire calculée à partir des équations fournies au chapitre 1 (encadré 1.2) tenant compte des effets de sol. Afin de s'affranchir d'effets particuliers d'absorption ou/et de diffraction, les essais ont été réalisés sur une piste d'essai ayant une impédance de sol homogène et parfaitement réfléchissante (planche revêtue de béton bitumineux semi-grenu 0/10 sur la piste de référence du L.C.P.C. à Nantes). Comme le montrent les résultats détaillés dans [P16], [C27] et [C34], les effets de la hauteur de source se font ressentir plus spécialement sur la partie haute du spectre de roulement (au delà de 1000 Hz).

De multiples validations ultérieures ont montrées qu'une procédure identique pouvait être appliquée pour les véhicules lourds, et que dans ces conditions également, le barycentre acoustique de l'ensemble des sources sonores était également situé proche de la surface de roulement. De nombreuses comparaisons entre expérimentations et calculs pour des distances de propagation importantes (quelques centaines de mètres) ont montré le bien fondé de ces résultats.

4.4 Classification des revêtements de chaussée

4.4.1 *Classification en termes de LAmax, en bordure de voie routière*

Cette classification a été réalisée selon la procédure normalisée AFNOR S 31 119 [N3] qui est très proche, dans son principe, de la norme ISO 11819-1 [N4]. Cette procédure de mesure a vu le jour au cours des années 1980-1985, suite aux travaux réalisés en

collaboration entre le réseau technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées et nos collègues allemands de la B.A.St (Bundesanstalt für Straßenwesen), équivalent outre-Rhin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

La méthode normalisée I.S.O., en voie de normalisation européenne, ne concerne que la méthode statistique au passage (S.P.B. pour Statistical Pass-by Method en Anglais, V.I. pour Véhicules Isolés en Français). Cette méthode relève le bruit au passage d'un grand nombre de véhicules circulant dans un flot de trafic réel. Pour garantir une faible erreur aléatoire, le nombre minimum de véhicules à mesurer dans chaque catégorie (Véhicules légers et Poids lourds) doit être compris entre 80 et 100 véhicules.

La normalisation française décrit quant à elle deux méthodes. La première est équivalente à la méthode I.S.O./S.P.B.. La seconde, aussi appelée méthode V.M. (Véhicules Maîtrisés) (ou C.P.B. pour Controlled Pass-By method en anglais), ne nécessite que quatre configurations véhicules/pneumatiques différentes, représentatives de celles rencontrées couramment sur le réseau routier français à l'époque de la mesure. Chaque mesure consiste en huit passages par configuration, à des vitesses réparties dans la gamme 70 - 110 km/h. Sachant que la norme ISO 11819-1 a été acceptée pour devenir une norme européenne, et donc directement transformable en norme française, la version révisée de la norme française ne reprend plus que la méthode « Véhicules Maîtrisés ».

Chacune des deux méthodes permet d'obtenir le niveau de pression maximum pondéré A (L_{Amax}) au point de mesure à proximité de la route, à 7,5 m de l'axe de la voie et 1,20 m au dessus de la surface de chaussée. Ce L_{Amax} est obtenu à une vitesse de référence (V_{réf}) à partir d'une régression linéaire (cf. encadré 4.1).

Cette procédure développée pour le L_{Amax} peut s'étendre à une analyse spectrale en tiers d'octaves (nécessitant alors le calcul d'une régression pour chaque bande de 1/3 d'octave). Le spectre calculé de L_{Amax} est alors très légèrement différent du spectre correspondant au niveau de pression maximum, mais présente l'avantage de refléter en partie l'effet de directivité du véhicule. Tous les résultats sont donnés pour une température de l'air de référence de 20°C. Pour les autres conditions de température entre 5-30°C, une correction forfaitaire de -0,1 dB(A)/°C est appliquée selon les préconisations de la norme NFS 31 119-2 [N3].

Pour les véhicules légers, à la vitesse de référence de 90 km/h, dans les conditions de référence fixées dans la norme, deux classifications différentes peuvent être proposées, respectivement selon la méthode V.M. et selon la méthode V.I.. Les résultats de la base de données établie à partir des mesures effectuées par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg sont détaillés dans [C33].

En France, tous les revêtements qui produisent un niveau de bruit L_{Amax} (20°C) à la vitesse de référence de 90 km/h inférieur à 76,0 dB(A) selon la méthode V.M. sont considérés comme des revêtements peu bruyants. Au regard de la variance dans chaque catégorie et de la précision de la méthode de mesure, deux catégories de revêtements sont véritablement séparées si la différence entre leur L_{Amax} (20°C) respectif à la vitesse de référence de 90 km/h est supérieure ou égale à 2 dB(A).

Des grandes tendances ressortent de ces classifications. De façon générale, le bruit de roulement diminue lorsque la taille des granulats diminue et que la porosité augmente. Actuellement en France, les spécialistes considèrent que les formulations optimales vis-

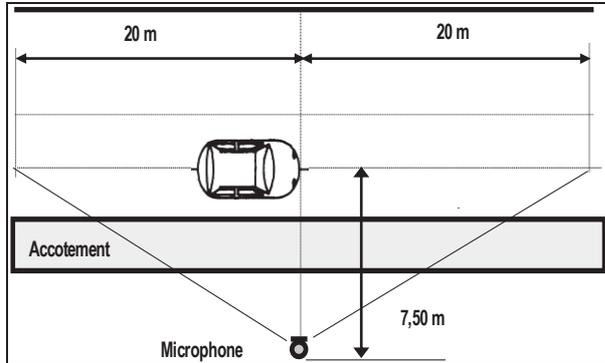
à-vis du bruit de roulement, sont des mélanges ouverts de formulation 0/6 mm discontinue (Béton bitumineux drainants 0/6 sur voies rapides et bétons bitumineux très minces ou ultra minces 0/6 ailleurs et plus spécialement en milieu urbain).

A l'étranger, aux Pays-Bas et en Italie, des structures drainantes en double couche voient actuellement le jour. Elles sont composées d'une couche de fond épaisse (8 à 10 cm), très poreuse (25 à 30% de vide), composée de granulats de grosse dimension (0/14, voire 0/20 ou plus) et d'une couche de surface de plus faible épaisseur (entre 2,5 et 4 cm), également poreuse (15 à 20% de vide) et composée de granulats de faible dimension (0/6 ou 0/8). Ces structures semblent donner d'excellents résultats tant au jeune âge qu'après quelques années de service et tout particulièrement sous circulation urbaine.

Les Quelques premiers résultats d'études réalisées conjointement avec le département de Génie Civil de l'Université de Pise sont détaillés dans [S32] et [C37].

Encadré n°4.1

Détermination du niveau sonore maximum au passage d'un véhicule



Analyse des niveaux de bruit mesurés

L'analyse des niveaux de bruit mesurés est effectuée en fonction du logarithme décimal de la vitesse de passage au droit du microphone, par la relation :

$$LA_{max} = LA_{V_{réf}} + a \times \lg_{10} (V/V_{réf})$$

où : $V_{réf}$ est la vitesse de référence, en km/h ; LA_{max} est la valeur du niveau de pression sonore mesuré maximal, en décibels, en niveau global ou en niveau par bande de tiers d'octave à la vitesse de passage V , en km/h, contenue dans l'intervalle des vitesses observées ; $LA_{V_{réf}}$

est le niveau sonore, en décibels, résultant de la régression linéaire au sens des moindres carrés, pour la vitesse $V_{réf}$; a est la pente de la régression linéaire, en décibels par décade de vitesse.

Calcul des coefficients de régression

En notant $\lg_{10} (V/V_{réf}) = v$, on obtient successivement a et $LA_{réf}$ par les relations suivantes :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (v_i - \bar{v})(LA_i - \bar{LA})}{\sum_{i=1}^{i=n} (v_i - \bar{v})^2} \quad \text{et} \quad LA_{réf} = \bar{LA} - a\bar{v}$$

où : n est le nombre d'observations (nombre de véhicules de la classe, ou nombre de mesures par configuration), v_i est le $\lg_{10} (V_i/V_{réf})$ avec V_i vitesse de passage mesurée du véhicule i , LA_i est le niveau de bruit mesuré pour le véhicule i , en décibels, \bar{v} est la moyenne des n valeurs v_i , \bar{LA} est la moyenne des n valeurs LA_i , en décibels.

Calcul de l'intervalle de confiance, I

Les niveaux $LA_{réf}$ sont estimés avec un intervalle de confiance I au niveau $(1 - \alpha)$: $LA_{réf} \pm I$.

L'intervalle de confiance se calcule de la manière suivante : $I = t_i \times s \times \left[\frac{1}{n} + \frac{(v_{réf} - \bar{v})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \right]^{1/2}$;

avec $s^2 = \frac{1-r^2}{n-2} \sum_{i=1}^n (LA_i - \bar{LA})^2$, $v_{réf} = 0$, $r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(LA_i - \bar{LA}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \sum_{i=1}^n (LA_i - \bar{LA})^2}$ et $t_i = t_{(1-\alpha/2)}(n-2)$:

valeur de la variable de student à $(n-2)$ degrés de liberté telle que : $Pr ob(|t| < t_{(1-\alpha/2)}) = 1 - \alpha$.

Si \bar{v} est proche de 0 (c'est-à-dire que la vitesse moyenne des véhicules de l'échantillon est proche de $V_{réf}$), alors la valeur de l'intervalle de confiance I sera minimale : $I_{opt} = \frac{t_i \times s}{n}$

Pour que l'intervalle de confiance prenne des valeurs les plus faibles possibles, il est indispensable que la moyenne des vitesses des véhicules de la classe ou des configurations définies, pour la voie considérée, diffère peu de la vitesse de référence. La validité de l'intervalle de confiance est liée au respect de trois hypothèses : normalité des résidus, résidus de variance égale, résidus indépendants.

4.4.2 Classification en termes de niveaux sonores équivalents $L_{Aeq}[T]$

L'ensemble des classifications obtenues à partir des diverses procédures normalisées, pour divers types de véhicules (légers ou lourds) et différentes procédures de mesure (« Véhicules maîtrisés » ou « Véhicules isolés ») sont effectives pour un récepteur positionné au voisinage proche de la chaussée. Dans le but d'obtenir des données de référence directement utilisables pour des études environnementales, il s'est avéré nécessaire d'établir une nouvelle classification, que l'on souhaite proche des précédentes, mais qui tienne compte à la fois d'un trafic représentatif et de conditions de propagation réalistes incluant à la fois les effets « jour-nuit » ainsi que les effets saisonniers.

La prévision des niveaux sonores équivalents L_{Aeq} en façade des habitations, à partir de la connaissance de l'énergie produite par le bruit de roulement sur divers types de surfaces, nécessite la connaissance d'un minimum d'informations :

- le nombre exact de véhicules passant au droit du récepteur au cours des périodes de jour [6:00-22:00] et de nuit [22:00-6:00] pour chaque classe de véhicules,
- la vitesse de référence pour chaque classe de véhicules,
- le niveau de pression acoustique maximum L_{Amax} (en valeurs globales ou par bandes de 1/3 d'octave) au microphone de référence situé en bordure de voie (7,50 m de distance par rapport à l'axe de la voie lente et 1,20 m de hauteur) pour chaque classe de véhicules, obtenu suivant les méthodes normalisées [N3-N4],
- le nombre de voies de circulation et leur largeur respective,
- la position des récepteurs (distance et hauteur),
- les valeurs d'impédance acoustique du revêtement et des sols environnants,
- la position de la discontinuité d'impédance par rapport à l'axe de chacune des voies,
- les conditions atmosphériques moyennes au cours des périodes de référence.

Après introduction dans le modèle de la valeur de chacun de ces paramètres, le $L_{Aeq}[T]$ est alors calculé pour chacune des familles de revêtements à partir de la démarche décrite dans l'encadré n°4.2. Ainsi, un nouveau type de classification est obtenu [C35].

Afin de valider cette approche, des comparaisons entre le calcul et la mesure, sur la période de référence de 1 heure, ont été réalisées pour une douzaine de familles de revêtements balayant l'ensemble de la gamme, des moins bruyants aux plus bruyants. Dans l'ensemble des cas, la dispersion entre la mesure et le calcul n'a jamais excédée ± 2 dB(A). L'obtention d'une telle précision nécessite toutefois d'avoir une bonne connaissance des paramètres d'entrée du modèle. Dans le cas où ceux-ci ne peuvent être qu'estimés et non pas mesurés, l'écart mesure-calcul peut atteindre $\pm 3-4$ dB(A). Ces comparaisons ont été effectuées à la fois sur les niveaux globaux en dB(A) et sur les spectres en bandes de 1/3 d'octave pour des distances comprises entre 7,50 m et 200 m [C35].

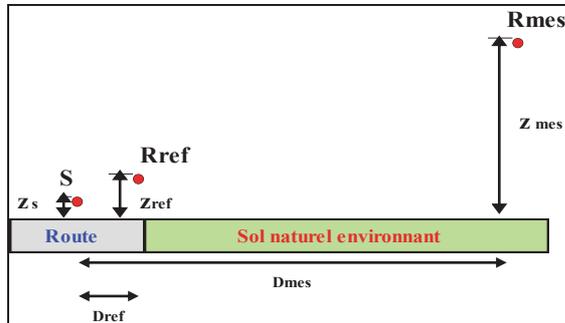
Une fois validée, l'approche a été appliquée à 10 familles de revêtement, à la fois bruyants et peu bruyants, pour une configuration (site-traffic) type et pour des conditions météorologiques moyennes correspondant à des situations estivale et hivernale. De ces calculs il ressort les conclusions suivantes :

- concernant les revêtements peu bruyants, la classification obtenue en bordure de voie routière est approximativement conservée à la distance de 200 m en dépit des effets propagatifs,

- concernant les revêtements intermédiaires et bruyants, le classement peut très légèrement évoluer entre le « champ proche » et le « champ lointain ». Ceci peut s'expliquer par la différence de composition spectrale du bruit émis et des conditions de propagation,
- concernant l'impact des conditions atmosphériques (nuit-jour) ou (été-hiver), on observe qu'il est quasi identique pour l'ensemble des revêtements (5 à 6 dB(A) entre le jour et la nuit et 1 à 1,5 dB(A) entre l'été et l'hiver). Ces différences peuvent être aisément expliquées par l'influence du gradient positif de vitesse du son.

Encadré n°4.2

Détermination du niveau sonore équivalent LAeq[T] à partir du niveau maximum au passage LAmax



A partir du niveau LAmax global ou par bande de 1/3 d'octave, le LAeq[T] sur la période de référence T s'obtient à partir de la relation générale :

$$LAeq [T](V) = LA \max (V) + 10 \cdot \lg_{10} \left(\frac{\pi D}{V \cdot T} \right)$$

où D est la distance entre l'axe de la voie lente et le microphone de référence, T la période de référence égale à 1 heure et « V » la vitesse moyenne de chaque classe de véhicules à l'intérieur du flot de circulation.

Un premier calcul est effectué au microphone de référence sur l'ensemble de la gamme de fréquence représentative du bruit routier [100 Hz - 5 kHz]. Par la suite, sont calculées les atténuations excédentaires entre le récepteur de référence et les divers récepteurs situés à distance. En fonction des différentes conditions de sol et d'atmosphère, divers modèles de calcul appropriés sont utilisés. Quatre situations peuvent être étudiées :

- Sol et atmosphère homogènes,
- Sol homogène et atmosphère stratifiée,
- Sol discontinu et atmosphère homogène,
- Sol discontinu et atmosphère stratifiée.

Afin de calculer ces diverses atténuations excédentaires plusieurs modèles sont à notre disposition, pour les trois premières situations, ils ont déjà été détaillés au cours des chapitres précédents (cf. Encadrés n°1.2, 1.3, 1.4 et 1.5). Dans le cas du sol discontinu et d'une atmosphère stratifiée, les approches sont variables suivant les conditions de gradient vertical de vitesse du son. Lorsqu'il est négatif, les formulations sont présentées en fin de l'Encadré n°1.4. Lorsqu'il est positif, le niveau de pression acoustique peut être modélisé à partir d'une adaptation du modèle de Rasmussen (cf. Encadré n°1.3) prenant en compte la courbure des rayons sonores. Soit :

$$p = \frac{D_d}{16 \pi^2} \exp(-i \pi / 4) \sqrt{8 \pi k} \cdot \int_0^{z_{max}} \varphi(z) dz$$

où :

$$\varphi(z) = \frac{e^{2i\pi(\tau_1 + \tau_3)}}{r_3 \sqrt{r_1 r_3 (r_1 + r_3)}} + \frac{Q'_1 e^{2i\pi(\tau_2 + \tau_3)}}{r_3 \sqrt{r_2 r_3 (r_2 + r_3)}} + \frac{Q'_2 e^{2i\pi(\tau_1 + \tau_4)}}{r_4 \sqrt{r_1 r_4 (r_1 + r_4)}} + \frac{Q'_1 Q'_2 e^{2i\pi(\tau_2 + \tau_4)}}{r_4 \sqrt{r_2 r_4 (r_2 + r_4)}}$$

Da représente la distance entre la discontinuité et le récepteur, r_i and τ_i sont respectivement la longueur des rayons courbes et les temps de trajet entre les rayons direct et réfléchi de part et d'autre de la discontinuité d'impédance calculés conformément aux relations fournies dans l'Encadré n°1.5. Q'₁ et Q'₂ sont les deux coefficients de réflexion sphériques fonction de l'angle d'incidence à chaque pas de calcul, pour la route et le sol avoisinant. Dans cette approche, le gradient vertical de vitesse du son est considéré comme linéaire jusqu'à une hauteur de 10 m et constant au delà.

Connaissant le LAeq[1heure] par type de véhicule (LAeq,VL et LAeq,PL), le LAeq[T] est obtenu par la relation :

$$LAeq [T] = 10 \cdot \lg_{10} \left[\frac{1}{T} \left(n_{VL} \cdot 10^{0.1 LAeq, VL} + n_{PL} \cdot 10^{0.1 LAeq, PL} \right) \right]$$

dans laquelle n_{VL} et n_{PL} sont respectivement, le nombre de véhicules légers et de poids lourds au cours de la période T.

4.5 Conclusion

Le bruit de la circulation routière est un phénomène complexe dont le bruit de roulement est une des composantes majeures. Bien que produit globalement par le véhicule, ce dernier est en grande partie fonction du type de revêtement de chaussée sur lequel se déplace le véhicule. L'étude des phénomènes générateur du bruit de contact pneumatique-chaussée ainsi que leur incidence sur la propagation à grande distance du bruit routier a constitué et constitue toujours un de nos axes majeurs de recherche.

Au cours d'une première étape, rapportée dans le présent chapitre, il s'est agi principalement d'études basées sur le constat des phénomènes ainsi que sur leur impact environnemental. C'est ainsi qu'ont été mises au point diverses classifications des couches de roulement de chaussée, soit en bordure de voie routière, en termes de LA_{max}, soit à distance, proche des façades d'habitation, en termes de LA_{eq}. Celles-ci nous permettent d'ores et déjà d'apporter une première réponse aux maîtres d'œuvres et aux maîtres d'ouvrages qui souhaitent prendre en compte l'aspect acoustique dans leurs nouveaux projets.

Dans une étape suivante, l'effort sera porté sur la modélisation directe des phénomènes générateurs du bruit de roulement, et donc par voie de conséquence sur la relation entre le spectre de texture d'une surface de chaussée et le spectre du bruit émis au cours du roulement. Ces recherches actuellement en cours dans le cadre de projets nationaux et européens, et de différentes thèses mobilisent un grand nombre d'équipes européennes. En France notamment, ces recherches ont suscité l'institution de collaborations entre les divers instituts de recherche du Ministère de l'Équipement. Ces recherches amont nécessitent d'autre part de mettre au point de nouveaux outils de mesure, indispensables à la validation des modèles. Ceci est également un créneau sur lequel nous nous positionnons et sur lequel nous concentrons une partie de nos moyens. Une méthode de mesure en continu du bruit de roulement par une technique de microphones embarqués, positionnés en proximité immédiate du pneumatique, est d'ailleurs en cours de développement en collaboration étroite avec les quatre L.R.P.C. associés au projet.

Sur cette problématique complexe, nous considérerons avoir franchi une étape décisive lorsqu'il nous sera possible de modéliser le niveau sonore en façade d'habitations par la seule connaissance de l'état de surface de la chaussée, des composantes structurelles de la couche de roulement et des sols environnants ainsi que des conditions atmosphériques du site.

Notre objectif à long terme est de pouvoir répondre de façon satisfaisante à une demande qui se fait de plus en plus pressante. Pour cela, d'importants moyens matériels et humains sont mis en œuvre. Ceci devrait nous permettre d'atteindre cet objectif ambitieux au cours de la prochaine décennie.

PUBLICATIONS PRINCIPALES

∞ ∞ ○ ∞ ∞

CHAPITRE 5



LA PRÉVISION DU BRUIT EN MILIEU URBAIN

5.1 Introduction

Après avoir travaillé de nombreuses années sur des problèmes d'acoustique routière en espace ouvert, une nouvelle orientation a été prise en 1994. Cette dernière a vu le jour lors de la constitution du pôle de recherche « Physique et Images de la Ville » du C.N.R.S. sur la région des Pays de la Loire (Fédération de Recherche 73) auquel participe activement le L.C.P.C.. Elle a pu se développer par la suite, dans le cadre du programme Pir-Villes, puis plus récemment, au sein de deux projets du P.R.E.D.I.T. dont l'objectif était de qualifier et quantifier les ambiances sonores en milieu urbain. Notre contribution se situe au niveau de la prévision des niveaux sonores en espace semi-clos représentatif d'un espace urbain. De façon identique aux approches développées pour le milieu extérieur, nos efforts se sont concentrés tout d'abord sur la caractérisation physique des sources sonores présentes dans nos villes : sources d'origine routière ou autres et par la suite, sur la propagation des ondes sonores issues de ces sources dans un espace encombré diffusant, représentatif des centres-villes historiques.

Dans une seconde approche, nous tentons également de comprendre la relation qu'il peut exister entre l'aspect quantitatif et l'aspect qualitatif de l'évaluation du bruit en milieu urbain. Ces recherches sont conduites en collaboration avec le laboratoire C.E.R.M.A.¹ de l'École d'Architecture de Nantes.

Dans le but d'apporter rapidement des réponses aux nombreuses interrogations que suscite ce milieu complexe, cinq travaux de thèse ont été lancés sur ces diverses problématiques [55], [T5], [T7], [T8], [T9]. En adoptant la démarche qui nous conduit de la source au récepteur, les divers paragraphes de ce chapitre reprendront les points majeurs développés lors de ces derniers travaux.

5.2 Caractérisation physique des sources sonores en milieu urbain

Afin de résoudre le problème qui nous était posé : quantifier les ambiances sonores urbaines, il s'est avéré nécessaire de développer des modèles pour prévoir, entre autres, les niveaux sonores à l'intérieur du tissu urbain. La donnée d'entrée indispensable pour faire « tourner » ces modèles est le paramètre source. Nous avons donc porté notre attention dans un premier temps sur la caractérisation physique de ce paramètre.

L'espace urbain est un milieu complexe au sein duquel divers types de sources sonores cohabitent. Classiquement, nous les avons classées en deux familles principales :

- Les sources d'origine « mécanique » ou « routière » telles que les voitures particulières, les autobus, les tramways, les poids lourds, les motocyclettes, etc .
- Les sources d'origine « humaine » telles que les enfants dans une cour de récréation, les passants sur une place de marché ou dans une rue piétonne, les clients de bar ou de restaurant en terrasse, etc.

Dans la littérature, très peu d'éléments ont été publiés sur cette thématique. Quelques travaux cependant ont pu être analysés. Tous, concernent les véhicules automobiles. Les plus développés sont ceux réalisés dans les années 80 à l'I.R.T.² [56] et qui ont servi, pour partie, à établir les abaques d'émission sonore des véhicules que l'on retrouve dans le Guide du bruit des transports terrestres [57]. D'autres travaux ont été également

¹ C.E.R.M.A. : Centre de Recherche Méthodologique en Architecture

² I.R.T. : Institut de Recherche des Transports (actuellement I.N.R.E.T.S.)

développés aux U.S.A. [58], [59], au Japon [60] et en Pologne [61]. Les uns concernent plus spécialement la détermination de la hauteur de source équivalente [58], [59], tandis que les autres traitent plutôt de l'émission acoustique des véhicules [60], [61]. De façon générale, l'ensemble de ces travaux ne présente des résultats qu'en termes de niveaux sonores globaux pondérés A, ce qui est quelque peu restrictif dans l'optique de leur exploitation future au sein d'un code de calcul de propagation avec lequel il est prévu de fournir des résultats par bandes de fréquences.

Concernant les sources d'origine « humaine », le champ d'activité était quasiment vierge. Les seuls travaux identifiés traitaient soit de l'aspect psychoacoustique, soit de reconnaissance vocale. Bien que très intéressants, ces recherches ne permettaient pas de répondre à notre problème immédiat relatif à la caractérisation physique des phénomènes.

L'objectif de notre travail a donc été de traiter tout d'abord, les sources d'origine « routière » suivant deux directions : identification de la hauteur de source équivalente et identification du spectre de puissance acoustique des divers véhicules dans leur mode de fonctionnement urbain, puis suivant une approche similaire les sources d'origine « humaine » ; c'est à dire, identification de la source élémentaire, de sa position et de son spectre de puissance acoustique. Ces recherches ont été intégralement développées dans le cadre d'un travail de thèse [T7] et de deux stages de D.E.S.S. [RS2] [RS3]. Outre la thèse et les deux rapports de D.E.S.S., la partie source relative au sources d'origine « routière » est plus spécialement publiée dans [P16], [R4], [C27], [C31], [C32], [C34], [S23], [S29] et [S35], tandis que la partie source d'origine « humaine » l'a été dans [S23], [S29] et [S35].

5.2.1 *Les sources d'origine « routière »*

Un premier travail fut de valider leur classification. Une première classification avait été établie lors de la rédaction du Guide du bruit des transports terrestres [57]. Il fallait donc vérifier qu'elle restait identique malgré la très large amélioration des caractéristiques acoustiques des véhicules au cours des 20 dernières années. Ces travaux préliminaires, confirmés par une étude I.N.R.E.T.S. [62], ont montré que cela était le cas et que les divers types de véhicules présents en milieu urbain pouvaient être regroupés en 3 classes :

- Les véhicules légers (V.L.) de poids total en charge inférieur à 3,5 tonnes,
- Les véhicules lourds : poids lourds (P.L.) de poids total en charge compris entre 3,5 et 12 tonnes et trains routiers (T.R.), véhicules articulés de poids total en charge supérieur à 12 tonnes,
- Les deux roues motorisés.

Cette classification est intermédiaire entre celle établie en Allemagne qui ne contient que deux classes (V.L. et P.L.) et celle utilisée aux U.S.A. qui en comprend cinq (V.L., P.L., T.R., Autobus et motocyclettes).

Après avoir vérifié la classification, il s'est agi de modéliser ces véhicules dans un premier temps, en termes de hauteur de source équivalente et par la suite, sous la forme d'un spectre de puissance acoustique par bandes 1/3 d'octave. Les résultats de ces recherches doivent constituer les données d'entrée du modèle de propagation en milieu urbain dont nous discuterons au paragraphe 5.3.

Une démarche préliminaire a tout d'abord consisté à valider le concept de source ponctuelle dans la modélisation des sources routières. L'ensemble des références analysées [57-61] ont utilisé ce concept. Seul B. Favre au cours des années 80 [56] s'est penché sur une modélisation à partir de dipôles orientés soit dans l'axe du déplacement du véhicule, soit perpendiculairement à l'axe du déplacement. Après comparaison aux données expérimentales, B. Favre conclut que la représentation de la réalité est majoritairement fournie par une source monopolaire.

La validité du concept de source ponctuelle étant acquise, l'étape suivante a consisté à déterminer la position de cette source équivalente. Autant un consensus existe entre les divers auteurs sur la directivité de la source, autant la détermination de la hauteur de source « équivalente » ne fait pas l'unanimité. En fonction des procédures de localisation mises en place (techniques interspectrales [59] ou autres [57], [58], [63]), des résultats très variables ont été trouvés. Les hauteurs varient suivant les études de 0 à 2,40 m (0,80 m pour le Guide du Bruit des Transports Terrestres) en fonction du type de véhicule. Au sein de cette très large plage de variation, il était impossible de fixer notre choix. Sachant de plus, que le paramètre hauteur était très sensible lors de la prévision des niveaux sonores, en fonction de la distance, dans la partie « haute » du spectre, nous avons donc pris le parti de tester notre propre méthode, basée sur une technique propagative (cf. § 4.3). Comme nous avons eu l'occasion de le mentionner au paragraphe 4.3, traitant plus spécialement du bruit de roulement, nos résultats ont été par la suite comparés à une technique d'antenne développée par l'I.N.R.E.T.S. et ont fait l'objet de deux communications lors de congrès internationaux [C27] [C34].

Nos recherches, corroborées par celles de l'I.N.R.E.T.S., ont conclu à une hauteur de source « équivalente » faible (inférieure à 0,10 m). Des calculs complémentaires en termes de signatures acoustiques des véhicules « au passage » ainsi que des estimations de valeurs de $LA_{eq}(1 \text{ heure})$ sur sites réels ont montré le bien fondé de ces conclusions [T7], [P16]. Ces résultats, bien que surprenants, peuvent s'expliquer de la façon suivante :

- A vitesse élevée et stabilisée (voirie péri-urbaine), il y a prédominance du bruit de contact pneumatique-chaussée,
- A vitesse plus lente (voirie urbaine), outre la faible partie d'énergie sonore due au phénomène de contact, l'énergie provient principalement de la réflexion du bruit moteur sur la chaussée qui « ressort » par la partie inférieure de la caisse du véhicule. Cette hypothèse est confirmée par les résultats des expérimentations réalisées à partir des techniques d'antennerie [R4].

Des expérimentations à diverses vitesses, divers régimes moteurs et en présence de différents types de revêtement de chaussée ont confirmé les hypothèses de source sonore « équivalente » omnidirectionnelle localisée à quelques centimètres du sol. De façon identique au milieu « ouvert », en milieu urbain, nous avons choisi une hauteur moyenne de 3 cm quel que soit le type de fonctionnement du véhicule.

En matière de puissance acoustique, il n'en est pas de même. En effet, en fonction du régime moteur, très fluctuant en milieu urbain, les résultats peuvent être très différents. Une étude systématique du comportement acoustique des véhicules circulant en espace urbain a été entamée dans le cadre de la thèse de D. Gaulin [T7], et s'est poursuivie au cours des deux stages successifs déjà mentionnés ci-dessus [RS2] [RS3]. Les premiers résultats ne traitent que des véhicules légers au voisinage d'aménagements urbains suscitant une modification importante du comportement du conducteur en termes d'accélération ou de décélération, voire même de freinage

(carrefours giratoires, passages piétons, feux tricolores, stop). De ces études, il ressort que la puissance acoustique peut s'exprimer à partir d'une loi générale décrite par la relation :

$$L_w = 10 \log \left[10^{(a_0 + a_1 S + a_2 A)/10} + 10^{(a_3 \log V)/10} \right]$$

où S est le régime moteur (tr/mn), A l'accélération (m/s^2), V la vitesse (km/h) et a_0, a_1, a_2, a_3 des coefficients de régression. Pour chaque bande 1/3 d'octave, on obtient un jeu de coefficient a_i .

Les coefficients de régression a_0, a_1, a_2, a_3 sont obtenus à partir d'une procédure de calage inverse sur l'ensemble des résultats de mesure, pour toutes les bandes 1/3 d'octave ainsi que les niveaux globaux (linéaires et pondérés A), par l'intermédiaire d'un algorithme de Levenberg-Marquardt développé sous Matlab. L'ensemble de la procédure est détaillée dans [R4].

Connaissant la loi de variation de la puissance acoustique et l'ensemble des paramètres propre à chaque véhicule ou à un véhicule « moyen » représentatif, il est ainsi possible de prévoir indépendamment l'impact sonore du véhicule considéré ou d'un aménagement urbain. Cette loi a été comparée à d'autres lois publiées par divers auteurs [56] [60]. Elle fournit des résultats de meilleure qualité sur l'ensemble des conditions de circulation [T7].

Une tentative d'adaptation de cette méthode à d'autres types de véhicules (deux roues par exemple) a été faite sans réel succès. Les raisons de cet insuccès sont à notre avis dues aux raisons suivantes : d'une part, le parc national des deux roues est très hétérogène par rapport au parc des voitures particulières et d'autre part, un nombre non négligeable de ces véhicules circulent après avoir subi des modifications de la part de leur propriétaire ce qui a pour effet de fausser les paramètres intrinsèques du véhicule par rapport aux données fournies par les constructeurs que nous utilisons dans la loi de variation de la puissance acoustique.

5.2.2 Les sources d'origine « humaine »

La tendance actuelle de libérer les centres historiques de nos villes d'une grande partie de la circulation routière a tendance à faire émerger d'autres types de sources et principalement les sources d'origine « humaine ». L'approche concernant ce type de source particulier a été abordée dans un premier temps, par le biais de l'expérimentation ; l'objectif majeur étant de dégager des paramètres moyens aisément utilisables dans un modèle de propagation, puis dans un second temps, par la modélisation. Deux types de source ont été étudiés : la cour de récréation d'école primaire et la place de marché.

Dans les deux cas, nous avons recherché tout d'abord, comment identifier, en position et en énergie, la source élémentaire (groupe d'enfants dans la cour ou de clients aux étalages du marché) en partant de l'hypothèse simplificatrice que la source complexe n'était qu'une composition adaptée de sources élémentaires. Dans une seconde étape, nous avons tenté de quantifier un spectre sonore « de référence » pour chaque type de source élémentaire associé à chaque activité par une procédure de calcul précisément détaillée dans [T7]. A chaque étape de ces travaux, une validation expérimentale est intervenue.

De ces premiers travaux, il ressort :

- Qu'il est possible d'associer chaque groupe d'individus à une source ponctuelle unique reposant sur le sol au barycentre géométrique du groupe. Cette hypothèse simplificatrice permet d'une part, de s'affranchir d'un certain nombre de problèmes interférentiels et fournit d'autre part, des résultats très proches de ceux trouvés avec un calcul dans lequel chaque individu est identifié séparément, et pour lequel il est nécessaire d'échantillonner le groupe élémentaire par un minimum de 10 sources ponctuelles non corrélées entre elles et situées à hauteur moyenne de la bouche, soit : 0,80 m pour un enfant et 1,60 m pour un adulte.
- Que les phénomènes sonores sont bien reproductibles (d'un temps de récréation à un autre ou d'un jour de marché à un autre).
- Que le spectre sonore résultant est bien représentatif du groupe d'individus. Le spectre représentatif d'une cour de récréation est centré sur les 1/3 d'octave 1 kHz à 2 kHz proche d'un spectre sonore de voix d'enfant alors que celui représentatif d'une place de marché est plutôt centré sur les 1/3 d'octave 400 Hz à 1 kHz proche d'un spectre sonore de voix d'adulte [64].
- Que les comparaisons entre les modélisations et les mesures aux divers microphones répartis autour de l'enceinte de la zone d'activité sont de bonne qualité tant en niveau global pondéré A que sur l'ensemble des bandes de fréquence. L'écart moyen mesure-calcul se situe autour de ± 2 dB(A).

Les résultats enregistrés sur un premier site ont par la suite été confirmés sur d'autres sites à la fois dans la région nantaise et dans la région Centre (Blois, Tours). Une extension à d'autres types d'activité (marchés couverts, rues piétonnes, terrasses de café, etc.) est prévue dans les années à venir. Ceci permettra d'établir plus précisément une cartographie des ambiances sonores dans les centres urbains. Le détail de ces recherches figurent dans [T7], [S23], [S29] et [S35].

5.3 Modélisation du champ acoustique en espace urbain

Au cours des années passées, la modélisation sonore en espace urbain a été abordée par analogie à la propagation acoustique en espace clos. Cette approche fait appel principalement aux théories des sources images, des tracés de rayons et de la réverbération. Depuis les travaux de Wiener [65] dans les années 60, plusieurs auteurs ont assimilé les rues à de longs couloirs présentant des murs plus ou moins absorbants (façades) et un sol réfléchissant (revêtement routier). Les résultats obtenus par ces modélisations ont montré dans la majorité des cas des écarts assez substantiels avec les mesures sur site. Lyon [66] fit alors l'hypothèse que les effets de multiples réflexions, de diffraction et de diffusion par les façades et leurs divers constituants pouvaient s'avérer être plus importants que précédemment envisagé.

A la fin des années 70, quelques auteurs [67], [68] ont proposé des modèles analytiques prenant en compte les effets de multi-réflexions et de diffraction par les façades par la théorie des sources images sans toutefois montrer de façon expérimentale dans quel domaine de fréquences ces phénomènes de réflexion diffuse apparaissaient. Etant donné les dimensions des irrégularités de façade, il est probable qu'ils apparaissent autour des fréquences 500-3500 Hz.

Plus récemment, dans le cadre du projet de la Fédération de Recherche 73 du C.N.R.S. précédemment cité, un modèle de prévision de la propagation des ondes sonores dans

une rue a été développé au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine par J. Picaut [55]. Ce modèle basé sur l'équation de la diffusion permet de décrire l'ensemble des multiples réflexions diffuses à l'intérieur d'une rue au travers d'un coefficient qui traduit la diffusivité des façades. Diverses approches ont été abordées pour déterminer ce coefficient dont une basée sur la théorie fractale [T5].

Partant de cette hypothèse, une thèse [T9] lancée en 2000 aborde le problème de la modélisation du champ diffus en acoustique des salles et en acoustique urbaine par le biais d'une équation de transport.

L'objectif est de définir un formalisme mathématique général, base d'un modèle énergétique utilisable pour décrire analytiquement la distribution de l'énergie du champ diffus produite par les multiples réflexions et diffractions. A cet effet, nous considérons une approche globale dont l'originalité consiste à assimiler les effets des réflexions et des diffractions sur les parois à des lois de réflexion aux frontières du domaine. Cette approche fait appel au concept de particules sonores. Les principales équations qui régissent ce principe ainsi que les diverses expressions des conditions aux limites sont détaillées dans l'encadré n° 5.1 [C43]

5.3.1 *Le formalisme de particule sonore*

Dans notre approche, le champ diffus est le résultat d'une combinaison énergétique de l'ensemble des réflexions simples et multiples, des diffractions et de la diffusion à l'intérieur d'un volume entièrement ou partiellement clos. Dans le domaine fréquentiel communément rencontré en acoustique architecturale, les divers effets produits par les multiples déphasages sont moyennés, ce qui nous autorise à faire l'hypothèse que les différentes sources sont décorrélées. Ainsi, en négligeant la nature ondulatoire du champ sonore, des modèles uniquement énergétiques sont suffisants pour évaluer des échogrammes, des temps de réverbération et des atténuations sonores dans le milieu. A partir de ces hypothèses et en considérant l'aspect géométrique de la propagation acoustique, l'énergie sonore peut être assimilée à un « faisceau sonore » dont le contenu est formé d'une infinité de « paquets d'énergie » que l'on pourra appeler « particules sonores » ou « phonons ».

La particule sonore est définie comme une particule ponctuelle d'énergie élémentaire e localisée en \mathbf{r} , possédant une vitesse \mathbf{v} dont la norme $\|\mathbf{v}\|$ est égale à la vitesse du son c . Dans ce qui suit, nous ferons l'hypothèse que les interactions et les collisions entre les particules sont négligées. Les phonons obéissent aux lois de la mécanique classique basées sur le principe de Hamilton [69]. De ce fait, ils suivent une trajectoire rectiligne jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle ou une paroi. Au cours d'une collision, la direction du vecteur vitesse est instantanément modifiée. Cette approche permet de considérer le champ diffus comme un « gaz de particules », et de lier la distribution de l'énergie sonore à l'évolution de la densité de particules.

Ainsi, le formalisme classique de la théorie des gaz peut être appliqué aux problèmes d'acoustique. L'approche énergétique peut alors être interprétée comme une application de la théorie des transports communément utilisée en mécanique statistique.

L'état d'un système à N particules est décrit par $3N$ coordonnées d'espace $(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \dots, \mathbf{r}_N)$ et $3N$ coordonnées vitesse $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \dots, \mathbf{v}_N)$. Cet état est donc représenté dans un espace des phases Γ à $6N$ dimensions [70]. Si à un instant t , il était

possible de connaître exactement la position et la vitesse de chaque particule ; alors, il serait possible de prévoir sa position et sa vitesse à l'instant $t+dt$. Cependant, le nombre de particules étant très important, la mise en forme pratique du processus s'avère très délicat. Le problème est donc abordé suivant une approche statistique.

En faisant l'hypothèse d'ergodicité, la description du système à N particules peut être réduit à la connaissance d'un système fictif de particules élémentaires [71]. L'espace des phases Γ peut être alors réduit à un espace μ à 6 dimensions regroupant les trois coordonnées usuelles d'espace et de vitesse.

Le comportement statistique de la particule sonore est obtenu ici à partir de la mécanique statistique. La densité de probabilité appelée également fonction de distribution de la particule élémentaire $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ est alors introduite. On retrouve également cette notion dans divers domaines de la physique comme dans la théorie des transports de neutrons, en physique des plasmas, en chimie, etc.. Cette fonction de distribution est définie de telle sorte que $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{r} d\mathbf{v}$ représente le nombre total de particules à un instant t , avec une vitesse $\mathbf{v} \pm d\mathbf{v}$, à l'intérieur d'un volume élémentaire $d\mathbf{r}$ localisé en \mathbf{r} . L'ensemble des équations de base explicitant ces diverses notions sont fournies dans l'encadré n°5.1.

5.3.2 *La théorie des transports des particules sonores*

Tant que les collisions des phonons se produisent sur les frontières du domaine, l'évolution de la densité des particules sonores est semblable à l'évolution de la densité moléculaire à l'intérieur d'un gaz raréfié ou gaz de Knudsen [72]. L'équation principale du modèle peut se déduire directement de la théorie des transports (cf. Encadré n° 5.1).

Il s'agit de l'équation de transport du flux moléculaire libre, appelée également équation de Louville. Elle décrit l'évolution temporelle et spatiale de la densité de particules sonores et par voie de conséquence de l'énergie du champ acoustique diffus. Cette équation traduit la variation de la densité de particules pendant le temps dt par un phénomène de transport.

Les objets diffusants et diffractants à l'intérieur de la rue (voitures, mobilier urbain, etc...) peuvent être pris compte en introduisant un terme de collision dans le second membre de l'équation (cf. Encadré n° 5.1). Cette équation alors appelée équation de Boltzmann [73] a d'ailleurs déjà été utilisée par Kuttruff en acoustique des salles [74] pour optimiser les densités de diffuseurs dans la conception de salles réverbérantes.

Enfin, pour obtenir une description globale du problème, il est nécessaire d'y adjoindre les conditions aux limites en fonction de la géométrie des parois.

5.3.3 *Conditions aux limites sur les parois*

En milieu urbain, les surfaces des parois (façades) sont généralement considérées comme irrégulières (présence de fenêtres, portes, balcons, boiseries, etc...). En fonction des dimensions λ de ces irrégularités par rapport aux longueurs d'ondes étudiées λ , les réflexions sur les parois peuvent être considérées comme spéculaires (si $\lambda \ll \lambda$) ou non (si $\lambda \geq \lambda$). Etant donné le domaine de fréquence relativement étendu (100 Hz-5 kHz), les deux phénomènes sont bien souvent à considérer.

La condition de réflexion spéculaire est intégrée par utilisation des lois de Snell-Descartes faisant l'hypothèse d'égalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion.

La condition de réflexion non spéculaire est abordée différemment de ce que l'on peut trouver dans la littérature. En effet, pour des raisons inhérentes au calcul, la loi de Lambert [75] est bien souvent utilisée. Bien que fournissant des résultats corrects en acoustique des salles, elle n'a cependant aucun sens physique. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'aborder le problème différemment en introduisant des lois de réflexion plus réalistes sur les parois. Ceci devrait permettre d'être en meilleur accord avec la réalité expérimentale, et notamment en milieu urbain.

Une façon simple de traiter analytiquement ce problème est d'introduire une fonction $\mathcal{W}(\mathbf{r}_s, \mathbf{v}, \mathbf{v}')$, définie sur l'espace des phases μ^\pm (cf. Encadré n° 5.1), positive, continue et intégrable. Cette loi de réflexion représente la probabilité qu'une particule entrant en collision en un point \mathbf{r}_s de la façade, avec une vitesse \mathbf{v}' , reparte après la collision avec une vitesse \mathbf{v} . Cette fonction doit satisfaire la relation de réciprocité qui exprime la conservation du flux de particules à la surface du domaine, en dehors de tout phénomène d'absorption des particules au niveau des parois du domaine.

Cette approche permet en outre de considérer différents types de réflexions sur les diverses parois du domaine, alors que les autres approches font l'hypothèse que la diffusion due aux parois est identique dans tout le domaine.

Dans le cas de parois ou surfaces absorbantes, le coefficient d'absorption est exprimé en terme probabiliste en considérant la probabilité $\alpha(\mathbf{r}_s)$ qu'une particule qui rencontre une paroi au point \mathbf{r}_s soit absorbée. Dans une première approche, le coefficient d'absorption est considéré comme indépendant de l'angle d'incidence. Sa valeur varie entre 0 (réflexion parfaite) et 1 (absorption totale correspondant notamment au cas des ouvertures).

5.3.4 *Résolution du problème*

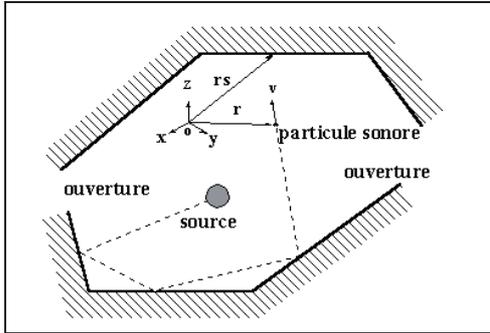
Dans une majorité de cas, le problème de la propagation du son dans un espace de type « Rue en U » ou « couloir étroit » est entièrement posé avec l'équation de transport assortie des conditions aux limites appropriées. Cependant aucune solution analytique du problème n'existe actuellement.

Sa résolution ne peut donc être réalisée que par une approche asymptotique (actuellement en cours de développement) qui nécessitera d'être validée par une simulation numérique basée sur les techniques de Monte-Carlo [76] basée sur la théorie des tirages aléatoires.

Une comparaison des deux approches est en cours. Cette démarche sera également confirmée par comparaison avec les résultats des expérimentations réalisées dans une rue étroite du centre historique nantais. Ces comparaisons seront établies à la fois sur les temps de réverbération et sur les atténuations en divers points de la rue.

Encadré n°5.1

Le formalisme de particule sonore



La fonction de distribution d'une particule élémentaire

La densité de probabilité ou fonction de distribution d'une particule élémentaire $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ est définie par telle que $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{r} d\mathbf{v}$ représente le nombre de particules à l'instant t avec une vitesse $\mathbf{v} \pm d\mathbf{v}$ dans un volume élémentaire $d\mathbf{r}$ en \mathbf{r} . Elle doit satisfaire la condition de normalisation :

$$\iint_{\mu} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{r} d\mathbf{v} = 1$$

La densité de particule sonore est définie par $n(\mathbf{r}, t) = \int_{\mathbf{v}} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v}$

La densité d'énergie sonore est définie par $w(\mathbf{r}, t) = e \cdot n(\mathbf{r}, t)$, où e est l'énergie élémentaire des phonons.

Le flux de particules est défini comme une quantité scalaire par le relation : $\phi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = c \cdot f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$, et le flux local de particules par le vecteur $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \int_{\mathbf{v}} \mathbf{v} \cdot f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v}$ qui représente le nombre de particules pénétrant une unité de surface par unité de temps. c représente la vitesse du son.

La théorie des transports des particules sonores

L'équation fondamentale du modèle est : $\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f = 0$. Elle est également appelée équation de

Louville. $\nabla_{\mathbf{r}}$ représente l'opérateur de dérivation spatiale.

Dans cette équation il est possible de prendre en compte des effets de diffraction et de réflexion sur les objets urbains en introduisant un terme de collision dans le membre de droite de l'équation

qui devient : $\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f = \left(\int \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll}$. Cette équation est aussi appelée équation de Boltzmann.

Les conditions aux limites

Si nous considérons \mathbf{n} comme le vecteur unitaire normal à la surface au point $\mathbf{r} = \mathbf{r}_s$, nous définissons par μ^{\pm} les points (\mathbf{r}, \mathbf{v}) de l'espace des phases μ qui satisfont la relation :

$$\mu^{\pm} : \{ (\mathbf{r}, \mathbf{v}) / \mathbf{r} = \mathbf{r}_s, 0 < \pm \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} \}$$

Par suite de cette notation, la restriction de la fonction f à l'ensemble μ^+ (respectivement μ^-) sera notée f^+ (respectivement f^-).

Réflexion spéculaire

Dans ce cas, la vitesse \mathbf{v}^* de la particules sonore après réflexion est définie par la relation :

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{v} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{n}$$

Réflexion non spéculaire

Soit une fonction continue, positive et intégrable $W(\mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{v}')$ définie sur l'espace μ^{\pm} . L'expression de la conservation du flux de particules sur la paroi en absence de toute absorption est :

$$\int_{0 > \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} W(\mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{v}') d\mathbf{v} = 1$$

Conservation du flux de particules sonores sur les parois

Considérant la répartition de « spéculaire » et de « non spéculaire », la loi de conservation s'écrit :

$$|\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}| f^-(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = [1 - \alpha(\mathbf{r}_s)] \{ d |\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}| f^+(\mathbf{r}, \mathbf{v}^*, t) + (1 - d) \int_{0 < \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}'} W(\mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{v}') |\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}'| f^+(\mathbf{r}, \mathbf{v}', t) d\mathbf{v}' \}$$

où $\alpha(\mathbf{r}_s)$ est le coefficient d'absorption des parois et d le coefficient d'accommodation qui prend la valeur 0 si la réflexion est entièrement « non spéculaire » et 1 dans le cas inverse.

5.4 Comparaison entre les interprétations sensibles d'usagers et les mesures acoustiques en milieu urbain

Contrairement à l'acoustique des salles qui vise un confort d'écoute en réponse à des exigences précises, il n'existe pas de demande spécifiée concernant le confort acoustique en espace extérieur. Si le discours actuel envisage de « repenser la ville » d'un point de vue qualitatif, les pratiques des citoyens ainsi que leurs attentes en termes de confort ou d'ambiances sonores sont encore mal identifiées.

Actuellement les urbanistes ainsi que les services techniques des villes en charge des problèmes d'environnement doivent répondre à une double contrainte : une obligation de respecter les seuils réglementaires quelquefois fort contraignants et une insatisfaction croissante de la population dont la vision des problèmes d'acoustique en espace urbain est relativement restreinte compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu.

Comme le mentionnait Schäfer en 1979 [77] le problème de la pollution sonore n'est pas le seul fait de niveaux acoustiques plus ou moins élevés, mais plutôt d'un ensemble de bruits de diverses natures, issus de multiples sources composant un environnement sonore. Actuellement, la réglementation attribue aux « bruits » une connotation négative, et oublie que les « sons » participent entièrement à la perception de l'espace urbain.

Dans ce contexte, l'intégration des aspects qualitatifs au sein d'outils d'aide à la conception sonore des espaces urbains, apparaît comme un réel atout.

La prise en compte de critères qualitatifs dans les outils de simulation présente divers avantages. Tout d'abord, celui d'être plus proche d'une réalité vécue par les citoyens et ensuite, celui d'apporter une innovation intéressante en matière de logiciels. En effet, les produits présents sur le marché ne traitent que de la simulation des phénomènes acoustiques physiques en termes de niveaux sonores afin de répondre aux exigences des réglementations nationale et européenne, à savoir : la cartographie acoustique des centres urbains. En revanche, la connaissance des critères les plus pertinents du point de vue perceptif permet d'enrichir la description sensible des modèles et d'exprimer qualitativement les résultats donnés par l'outil de simulation pour une ambiance sonore particulière.

Cette nouvelle approche a fait l'objet d'une thèse en collaboration avec le laboratoire C.E.R.M.A. de l'École d'Architecture de Nantes [T8] au sein d'un projet national P.R.E.D.I.T. relatif à la définition d'un simulateur des ambiances sonores en milieu urbain [78].

Dans le cadre de ce travail qui a fait entre autre l'objet d'une communication lors du Congrès International d'Acoustique de Rome en 2001 [C44], diverses situations urbaines « types » ont été sélectionnées : deux boulevards, deux places piétonnes, deux marchés et une cour d'école. Les travaux expérimentaux ont été effectués dans deux agglomérations françaises de grande et moyenne dimensions, respectivement Lyon et Nantes. Chacune de situations sélectionnées a fait l'objet de procédures d'enquêtes et de mesures acoustiques *in situ*.

Les résultats présentent tout d'abord une synthèse des traitements des données linguistiques et statistiques des enquêtes auprès de passants et d'habitants. Au regard

de ces premières tendances, différents paramètres acoustiques ont pu être comparés. Le croisement entre les données d'enquête et les mesures acoustiques permet de conclure sur les propriétés requises pour de nouveaux indicateurs adaptés à la description des ambiances sonores urbaines à l'aide de méthodes simplifiées.

De cette confrontation, il ressort en premier lieu que le niveau acoustique est malgré tout un paramètre majeur. En effet, il caractérise principalement la présence des boulevards qui représentent une composante dominante de l'environnement sonore urbain. Par ailleurs, pour des situations « acoustiquement proches » en termes de niveaux sonores (place piétonne, marché et voisinage d'école), deux autres indicateurs ressortent de l'analyse statistique : l'amplitude sonore et le bruit résiduel que l'on pourrait également qualifier de bruit de fond ou encore de « rumeur urbaine ». L'interprétation de ces indicateurs nous permet de caractériser la dynamique ainsi que la temporalité des situations sonores urbaines. Parmi les autres paramètres de niveau sonore, le critère d'émergence semble être intéressant, même si actuellement, il ne s'agit que d'une émergence en niveau d'intensité globale et non d'une émergence spectrale.

Toutefois, les résultats des enquêtes perceptives posent les limites de possibles corrélations. Nous avons en effet observé que les sujets perçoivent les ambiances sonores suivant deux types d'écoute pour une même situation sonore : une écoute descriptive ou une autre plus discrète. Dans le premier cas, les sujets discrétisent l'intégralité des événements de la scène urbaine alors que dans l'autre cas, ils se focalisent sur leurs activités qui viennent occulter tout l'environnement. En d'autres termes, pour un contexte identique, et donc pour les mêmes mesures acoustiques d'une situation sonore, il peut y avoir deux représentations cognitives différentes. Ceci met alors en relief la difficulté à corréler les deux approches physique et sensible.

5.5 Conclusion

Au cours de ces sept dernières années, la problématique du bruit en milieu urbain a été abordée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées suivant trois directions majeures : l'identification physique des sources sonores quelle que soit leur origine (mécanique ou humaine) [T7], [RS2], [RS3], la modélisation des phénomènes propagatifs à partir de la théorie de la diffusion [T9] et enfin la comparaison entre interprétations sensibles et mesures acoustiques [T8].

L'ensemble de ces travaux développé au sein d'un programme de recherche commun auquel ont collaboré entre autres, divers organismes de recherche dans le cadre de la Fédération de Recherche 73 du C.N.R.S. ainsi qu'un bureau d'étude nantais, a permis d'amorcer l'élaboration d'un simulateur des ambiances sonores en milieu urbain. Ce travail qui se poursuivra également dans le cadre d'un Groupement de Recherche « Bruit des transports terrestres » du C.N.R.S. permettra de finaliser un produit logiciel qui devrait voir le jour au cours des prochaines années. Ce dernier représentera un outil majeur d'aide à la conception de nouveaux espaces urbains qui intégrera à la fois l'aspect quantitatif directement relié à la caractérisation des niveaux de bruit nécessaires à la cartographie sonore de nos agglomérations, et l'aspect qualitatif relié à l'appréciation sensible des citoyens.

Dans l'attente, les recherches tant théoriques qu'expérimentales vont se poursuivre sur cette nouvelle thématique afin de tendre, au plus vite, vers une intégration la plus réaliste possible de l'ensemble des phénomènes acoustiques physiques et sensibles,

présents en ville, en relation avec les diverses typologies de morphologies architecturales tant au niveau général du tissu urbain qu'au niveau particulier de l'entité urbaine telle que la rue, la place, le carrefour, etc.

Associés aux expérimentations *in situ* qui, malgré leur lourdeur et leur difficulté de mise en œuvre, resteront toujours le « juge de paix » final, le nouvel outil de mesure performant³ dont se verra prochainement doter le L.C.P.C. constituera un atout majeur pour la validation sur maquettes urbaines des modèles analytiques et numériques développés dans le cadre de ces recherches.

Les contributions variées et complémentaires de ces multiples approches tant au niveau de la modélisation que de la mesure constitueront ainsi une palette complète de moyens d'action que l'on pourra alors mettre à la disposition des différents acteurs de la ville tels que par exemple, les aménageurs, les urbanistes, les architectes, les services techniques.

Ces recherches ne sont qu'à leur début. L'avenir dans ce domaine est ouvert et des solutions pratiques sont attendues. Les trouver et les mettre en pratique, tel est notre objectif pour les années futures.

³ Salle de mesure semi-anéchoïque permettant de valider les modèles théoriques sur des maquettes urbaines à différentes échelles.

PUBLICATIONS PRINCIPALES



CONCLUSION GENERALE

ET

PERSPECTIVES

∞ ∞ ○ ∞ ∞

Au cours de ces vingt-deux années d'activité au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, j'ai été conduit à développer mes recherches sur l'ensemble de la problématique liée à l'émission, à la propagation et à la réception du bruit du trafic routier. Même s'il elles n'ont pas toujours suivi, en fonction des opportunités, une démarche continue conduisant naturellement de la connaissance de la source à l'effet final au récepteur, elles ont toujours été conduites en conservant en mémoire la globalité du problème à traiter. C'est ainsi, qu'au cours de la période entre la fin de la thèse de spécialité et ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, l'ensemble de la problématique a été abordé avec l'intention d'apporter à chaque étape une contribution significative qui a notamment été rendue possible grâce aux apports successifs des collègues acousticiens du L.C.P.C. et des L.R.P.C., des divers doctorants et stagiaires.

Mes premiers travaux ont concerné l'aspect propagatif et plus spécifiquement, la modélisation des effets du sol sur la propagation des ondes sonores à grande distance. Ils se sont poursuivis ensuite, par la modélisation analytique et numérique des divers effets météorologiques sur la propagation ainsi que des divers effets d'obstacle de type écrans anti-bruit complexes et buttes de terre végétalisées. Ces travaux, réalisés en collaboration avec plusieurs laboratoires français et étrangers, constituent la partie la plus importante de mon activité. Ils ont permis notamment de mettre en évidence l'influence de chaque paramètre caractéristique du milieu de propagation et d'en quantifier l'impact acoustique.

Les résultats collectés au cours de cette période ont en particulier contribué à l'évolution de la réglementation en vigueur, en matière de seuils à ne pas dépasser d'une part, ainsi que des méthodes de calcul simplifiées permettant de réaliser les études prévisionnelles d'autre part. C'est ainsi que nous avons pu passer des méthodes décrites dans le Guide du Bruit des Transports Terrestres [57] à la Nouvelle Méthode de Préviation du Bruit (N.M.P.B.) [R15] qui permet de tenir compte de l'influence des effets atmosphériques à grande distance de la source routière. Expérimentale depuis 1996, cette dernière méthode, développée pour satisfaire aux décrets d'application de la loi « Bruit » du 31 décembre 1992, est actuellement en cours de révision. Sous sa forme future, elle pourrait être intégrée à la méthode harmonisée européenne en cours d'élaboration.

Parallèlement aux divers développements théoriques, les méthodes de mesure ont également évoluées, tant au niveau de la recherche que de la normalisation. A ce niveau, nous avons largement bénéficié des compétences et de l'aide précieuse des acousticiens du réseau des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées. Grâce à cette collaboration, à celle des micrométéorologues de l'I.N.R.A., à celle des dynamiciens de l'atmosphère de l'Ecole Centrale de Nantes et à celle des acousticiens spécialistes de la turbulence de l'Ecole Centrale de Lyon, nous avons pu concevoir et développer un outil expérimental unique. Sur un même site (non plan), voisin à la fois d'une voie autoroutière et d'une ligne ferroviaire, un ensemble de capteurs météorologiques et acoustiques ont été disposés. Ils permettent de collecter simultanément, toutes les 10 mn, un ensemble de données acoustiques et micrométéorologiques (Spectre sonore, température, vitesse et direction du vent, hygrométrie, ensoleillement, etc.) ainsi que la composition du trafic routier et ferroviaire. Ces données seront utilisées à l'avenir d'une part, pour valider les nouveaux modèles théoriques (analytiques ou numériques), et d'autre part, pour étudier l'évolution statistique des niveaux sonores sur de très longues périodes. L'objectif final étant d'approcher le niveau sonore de long terme requis par les

textes réglementaires. Cette station dite « de Long Terme » est prévue pour fonctionner sur une période minimale d'une décennie.

Au cours des années quatre-vingt-dix, une autre thématique importante est venue se greffer à notre programme de recherche, il s'agit des études relatives au bruit de contact pneumatique-chaussée. A ces recherches, se sont rattachées celles sur la caractérisation acoustique des nouvelles structures poreuses de revêtement de chaussée. Ces travaux conduits en collaboration avec l'I.N.R.E.T.S. nous ont permis une nouvelle fois de travailler en parallèle sur les aspects « Modélisation » et « Méthode de mesure ». Cette thématique de recherche développée également dans divers autres pays d'Europe (Suède, Allemagne, Belgique, Grande-Bretagne, Pays-Bas, pour ne citer que les plus importants) et plus récemment aux Etats-Unis, revêt actuellement un grand intérêt vis-à-vis de la lutte contre le bruit de la circulation routière. Cet intérêt est bien ressenti par les sociétés routières qui contribuent de façon significative aux recherches, en mettant à notre disposition à la fois des sites expérimentaux et des échantillons de revêtements.

Tant sur l'aspect « Modélisation » que sur l'aspect « Mesure », des résultats significatifs ont été obtenus sur le thème de l'absorption acoustique des couches de roulement poreuses dites également peu bruyantes. Les dernières avancées théoriques obtenues en collaboration avec l'I.N.R.E.T.S. ont été rapidement intégrées dans les divers codes de calcul [L1 - L3] [L5 - L7] qui considèrent à la fois les effets de réflexion sur la chaussée et les effets des conditions atmosphériques représentatives du site considéré. Le bon accord entre la prévision et la mesure nous a encouragé à poursuivre nos développements. Ainsi, nous avons établi une classification acoustique des diverses couches de roulement en façade des habitations pouvant être situées à plusieurs centaines de mètres des voies routières. De plus, ces recherches nous ont permis de répondre à une question majeure que se posaient les entreprises routières : le gain acoustique en bordure de chaussée, obtenu à partir des mesures effectuées suivant les méthodes normalisées, se retrouve-t-il à grande distance ? Sans grand risque d'erreur, la réponse est globalement positive.

L'application directe des méthodes expérimentales sur site constitue toujours un objectif majeur pour un laboratoire de recherche appliquée tel que le L.C.P.C.. C'est ainsi que sous son impulsion, une méthode de mesure non destructive, basée sur les techniques d'intercorrélation, a été développée en collaboration avec le Département Acoustique de l'Université de Bologne en Italie. Cette méthode de mesure, ponctuelle, reprend les principes de base de celle développée dans les années quatre-vingt par le réseau des L.P.C., qui fait l'objet de la norme NFS 31 089 [N1]. Dans la version actuelle de la méthode, le signal impulsionnel est remplacé par des séquences de signaux pseudo-aléatoires de type M.L.S. ou des séquences de sinus balayés en fréquence. Cette mesure, insensible au niveau de bruit de fond, a été développée en un premier temps, en statique. Elle fait actuellement l'objet d'une norme internationale [N2].

Afin d'assurer le suivi en absorption d'un long linéaire routier, une adaptation de la procédure en dynamique serait intéressante. Quelques premières tentatives ont été lancées. Malheureusement, les résultats sont peu convaincants. Néanmoins, conscient de l'intérêt croissant que présente pour les entreprises routières toute méthode d'auscultation des chaussées en continu, de nouveaux développements devraient certainement voir le jour au cours des prochaines années. Notre connaissance approfondie des techniques de mesure ainsi que du traitement du signal associé devrait nous permettre d'apporter une contribution importante à cette recherche méthodologique.

Dans un autre domaine, au cours des quatre dernières années, un effort important a été concentré sur la connaissance des phénomènes de génération du bruit de roulement et plus particulièrement, sur les divers mécanismes de contact. Ces recherches conduites en collaboration avec l'I.N.R.E.T.S. et le laboratoire L.A.M.I. de l'E.N.P.C. ont été développées dans le cadre d'un projet national P.R.E.D.I.T.. Les premiers résultats traitent principalement de l'effet « dièdre ». Afin d'aborder la modélisation des autres mécanismes, ce travail devra se poursuivre au cours des prochaines années. Outre la modélisation du phénomène d'air pumping, une attention toute particulière sera portée à la modélisation de la relation texture-bruit, en intégrant dans la statistique le comportement des revêtements poreux qui possèdent une texture atypique par rapport aux revêtements denses plus classiques. Les premiers résultats récemment enregistrés [79] nous permettent d'envisager les années futures avec confiance, même si les phénomènes sont complexes. De nombreuses recherches sont d'ailleurs actuellement en cours dans divers pays d'Europe et tout particulièrement en Suède, dans l'équipe du Professeur Kropp, à l'Université Chalmers de Göteborg [S38] qui occupe une position privilégiée sur ce thème.

L'ensemble de ces travaux sur la modélisation des phénomènes liés au roulement des pneumatiques sur une chaussée nécessite toutefois d'être validé par des expérimentations. Celles-ci pourront être réalisées prochainement à l'aide d'un système de mesure, embarqué sur un véhicule d'essai, actuellement en cours de développement. La mesure de bruit résultante, obtenue en proximité directe du pneumatique, viendra en complément les résultats déjà obtenus par les méthodes de mesure dites « au passage », développées en collaboration avec les L.R.P.C. au cours des années quatre-vingt-dix et qui font actuellement l'objet de normes françaises et internationales (I.S.O. et C.E.N.).

Associés aux techniques de modélisation, les diverses méthodes de mesure (caractérisation des phénomènes d'absorption, qualification expérimentale des mécanismes de génération du bruit de roulement tant en champ proche du pneumatique qu'en bordure de voie routière) devraient nous permettre, dans un terme pas trop éloigné, d'avoir une bonne appréciation de l'impact de la circulation automobile sur l'environnement sonore d'un site routier ou autoroutier.

Plus récemment, le L.C.P.C. a décidé d'étendre son champ de compétence au Génie Urbain, et plus particulièrement, pour ce qui nous concerne, à l'acoustique urbaine. Etant donné la complexité du problème et la multiplicité des disciplines impliquées, nous avons recherché les compétences complémentaires au sein de la Fédération de Recherche 73 du C.N.R.S. et plus spécifiquement du pôle « Physique et images de la ville » dont le L.C.P.C. est un membre actif. Dans ce cadre, avec le laboratoire C.E.R.M.A. de l'Ecole d'Architecture de Nantes et le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, nous avons lancé un programme sur la caractérisation et la modélisation des ambiances sonores en milieu urbain. Ce programme a reçu l'appui du Ministère de l'Environnement par l'intermédiaire des projets P.R.E.D.I.T..

Poursuivant une démarche identique à celle développée pour les autres thématiques, il a été décidé de travailler en parallèle sur les sujets suivants : la modélisation de la propagation sonore en espace urbain, la modélisation des sources sonores de tout type dans leur mode de fonctionnement urbain, l'impact de l'architecture sur la diffusion du

son en milieu urbain et enfin, la comparaison entre les interprétations sensibles des usagers et les mesures acoustiques dans diverses typologies urbaines.

Afin d'apporter une contribution significative dans l'ensemble de ces domaines, cinq travaux de thèses se sont déroulés entre 1994 et 2002 au sein des trois organismes partenaires. Les résultats les plus significatifs seront intégrés dans un logiciel prédictif des ambiances sonores en milieu urbain en cours de réalisation. Ce code est développé en collaboration avec un bureau d'étude nantais spécialiste en acoustique [78]. Dans ce logiciel, actuellement à l'état de maquette, le calcul de la propagation s'effectue à partir d'un modèle de diffusion initialisé au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine et dont les développements se poursuivent actuellement au L.C.P.C.. Dans le calcul, les caractéristiques physiques des sources sonores urbaines, relatives tant au trafic des véhicules de transports qu'à l'animation de nos cités, seront introduites sous la forme d'une puissance acoustique de combinaisons de sources élémentaires non corrélées entre elles, telles que définies dans [T7]. La prise en compte de l'aspect architectural et de l'aspect qualitatif relié à l'appréciation des passants et des riverains, s'effectuera dans une étape ultérieure.

Les premières recherches engagées depuis 1994, n'ont abordé que des situations urbaines « simples » de type rue en « U ». Au cours des années à venir, des développements complémentaires sont envisagés pour étendre les modèles à des typologies urbaines plus complexes (croisements, places, etc.) représentatives de tissus urbains plus réalistes.

L'approche en cours de développement, basée sur le transport des particules sonores devrait permettre d'atteindre notre objectif. Les résultats numériques actuellement comparés à des résultats analytiques pour des configurations simplifiées, devront cependant être validés par l'expérimentation. Celle-ci se basera tant sur des résultats recueillis in situ, en vraie grandeur, que sur des résultats obtenus sur maquettes en salle semi-anéchoïque.

La construction d'un tel équipement est en cours au Centre de Nantes du L.C.P.C.. Il permettra, dans un proche avenir, d'alimenter notre base de données expérimentale et de palier ainsi aux difficultés de mise en œuvre et de réalisation de campagnes de mesure en centre urbain qui constitueront malgré tout le « juge de paix » ultime.

L'ensemble des thématiques majeures jusqu'ici abordées ont été récemment intégrées dans le programme d'un Groupement de Recherche intitulé « Bruit des transports terrestres », placé sous l'égide du C.N.R.S.. Ce dernier nous permettra d'étendre nos collaborations à d'autres organismes de recherche français. De ces collaborations jailliront certainement des idées nouvelles qui nous permettront de résoudre plus finement des situations complexes représentatives de la réalité de l'environnement sonore lié à la circulation routière tant en milieu périurbain qu'au sein de nos agglomérations urbaines.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

∞ ∞ ○ ∞ ∞

- [1] **V. LEGEAY, R. SEZNEC**
 Sur la détermination des caractéristiques acoustiques des matériaux absorbants.
Acustica, 1983, vol 53, n° 4, pp 171-192.
- [2] **M.E. DELANY, E.N. BAZLEY**
 Acoustical properties of fibrous absorbent materials.
Applied Acoustics, 1970, vol 3, pp 105-116.
- [3] **M. GARAI**
 Measurement of the sound absorption coefficient *in situ*: the reflection method using periodic pseudorandom sequences of maximum length.
Applied Acoustics, 1993, vol 39, pp 119-139.
- [4] **K. ATTENBOROUGH, S.I. HAYEK, J.M. LAWThER**
 Propagation of sound above a porous half space.
Journal of the Acoustical Society of America, novembre 1980, vol 68, n° 5, pp 1493-1501.
- [5] **I. RUDNICK**
 The propagation of an acoustic wave along a boundary.
Journal of the Acoustical Society of America, 1947, vol 19, pp 348-356.
- [6] **R.J. DONATO**
 Propagation of a spherical wave near a plane boundary with complex impedance.
Journal of the Acoustical Society of America, 1976, vol 60, pp 34-39.
- [7] **C.I. CHESSELL**
 Propagation of noise along a finite impedance boundary.
Journal of the Acoustical Society of America, 1977, vol 62, pp 825-834.
- [8] **T.F.W. EMBLETON, J.E. PIERCY, N. OLSON**
 Outdoor sound propagation over a ground of finite impedance.
Journal of the Acoustical Society of America, février 1976, vol 59, n° 2, pp 267-277.
- [9] **T.F.W. EMBLETON, J.E. PIERCY, G.A. DAIGLE**
 Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements.
Journal of the Acoustical Society of America, octobre 1983, vol 74, n° 4, pp 1239-1244.
- [10] **S.I. THOMASSON**
 Reflection of waves from a point source by an impedance boundary.
Journal of the Acoustical Society of America, 1976, vol 59, pp 780-785.
- [11] **S.I. THOMASSON**
 A powerful asymptotic solution for sound propagation above an impedance boundary.
Acustica, 1980, vol 45, pp 122-125.
- [12] **D. HABAULT, P.J.T. FILIPPI**
 Ground effect analysis : Surface wave and layer potential representations.
Journal of Sound and Vibration, 1981, vol 79, pp. 529-550.
- [13] **D. HABAULT**
 Etude de l'influence des sols sur la propagation sonore.

- Thèse de doctorat es sciences physiques, Université Aix-Marseille I, Marseille, juin 1984.*
- [14] **K.B. RASMUSSEN**
Propagation of road traffic noise over level terrain.
Journal of Sound and Vibration, 1982, vol 82, n°1, pp. 51-61.
- [15] **K.B. RASMUSSEN**
A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens.
Journal of Sound and Vibration, 1982, vol 84, n°4, pp. 598-602.
- [16] **B.A. DE JONG, A. MOERKERKEN, J.D. VAN DER TOORN**
Propagation of sound over grassland and over earth barrier.
Journal of Sound and Vibration, 1983, vol 86, n°1, pp. 23-46.
- [17] **P. KOERS**
Diffraction by an absorbing barrier or by an impedance transition.
Congrès Internoise'83, 1983, pp. 311-314.
- [18] **J.B. KELLER**
Geometrical theory of diffraction.
Journal of the Optical Society of America, 1962, vol 52, n° 2, pp 116-130.
- [19] **A.E. HEINS, H. FESHBACH**
On the coupling of the two half planes.
Proceedings of Symposia in Applied Mathematics, vol 5, Mc Graw-Hill, New York, 1954, pp. 75-84.
- [20] **H.M. Mc DONALD**
A class of diffraction problems.
Proc. London, Math. Soc., vol 14, 1915, pp. 410-427.
- [21] **A.D. PIERCE**
Acoustics : an introduction to its physical principles and application.
Mc Graw-Hill, New York, 1981, chapitre 9.
- [22] **D.A. HILL, J.R. WAIT**
HF ground wave propagation over mixed land, sea and sea-ice paths.
IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens, 1981, vol GE 19, pp. 210-216.
- [23] **R.M. JONES**
How edge diffraction couples ground wave modes at a shoreline.
Radio science, 1984, vol 19, pp. 959-965.
- [24] **T. HIDAKA, K. KAGEYAMA, S. MASUDA**
Sound propagation in the rest atmosphere with linear sound velocity profile.
Journal of the Acoustical Society of Japan (E), 1985, vol 6, n° 2, pp 117-125.
- [25] **A. L'ESPÉRANCE, P. HERZOG, G.A. DAIGLE, J.R. NICOLAS**
Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile.
Applied Acoustics, 1992, vol 37, pp.111-119.
- [26] **Norme ISO 9613-1**
Acoustique - Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre – Partie 1 : Calcul de l'absorption atmosphérique.
Organisation Internationale de Normalisation, Genève, 1993, 26p.
- [27] **G.A. DAIGLE**
Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary.
Journal of the Acoustical Society of America, 1979, vol 65, n°1, pp 45-49.

- [28] **M.D. COLLINS**
A split-step Padé solution for the parabolic equation method.
Journal of the Acoustical Society of America, 1993, vol 93, n°4, pp 1736-1742.
- [29] **F.D. TAPPERT, R.H. HARDIN**
Computer simulation of long-range ocean acoustic propagation using the parabolic equation method.
8^{ème} Congrès International d'Acoustique, 1974, p. 452.
- [30] **P. CHEVRET**
Simulation numérique des effets de la turbulence atmosphérique sur la propagation du son dans l'atmosphère.
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1994.
- [31] **P. CHEVRET, P. BLANC-BENON, D. JUVÉ**
A numerical method for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground.
Journal of the Acoustical Society of America, 1996, vol 100, n°6, pp 3587-3599.
- [32] **W.H. PRESS, B.P. FLANNERY, S.A. TEUKOLSKY, W.T. WETTERLING**
Numerical Recipes, Cambridge University Press, 1992.
- [33] **K.E. GILBERT, M.J. WHITE**
Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere.
Journal of the Acoustical Society of America, 1989, vol 85, n°2, pp 630-637.
- [34] **G.A. DAIGLE, T.F.W. EMBLETON, J.E. PIERCY**
Propagation of sound in the presence of gradients and turbulence near the ground.
Journal of the Acoustical Society of America, 1986, vol 79, n°3, pp 613-627.
- [35] **V.E. OSTASHEV**
Acoustics in moving inhomogeneous media.
Spon Press, Londres, Chapitre 6, 1997.
- [36] **Y. CHAMPOUX, M.R. STINSON**
On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors.
Journal of the Acoustical Society of America, 1992, vol 62, n°2, Pt 1., pp 1120-1131.
- [37] **Norme ISO 9053**
Acoustique - Matériaux pour applications acoustiques - Détermination de la résistance à l'écoulement de l'air.
Organisation Internationale de Normalisation, Genève, 1991, 9 p.
- [38] **Le matériel L.P.C.**
Banc Gamma vertical A 322C.
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, p 58.
- [39] **M.R. STINSON**
A note on the use of an appropriate formula to predict sound fields above an impedance plane due to a point source.
Journal of the Acoustical Society of America, 1995, vol 98, n°3, pp 1810-1812.
- [40] **M.R. STINSON, G.A. DAIGLE, D.I. HAVELOCK**
The measurement of air-coupled surface waves over a porous surface.
Congrès Internoise'93, 1993, Leuven, Belgique, pp. 1683-1686.

- [41] **F. ANFOSSO-LÉDÉE, M. GARAI, J.P. CLAIRBOIS**
ADRIENNE : Une méthode européenne pour la qualification sur site des écrans antibruit.
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2000, vol 225, pp. 89-104.
- [42] **W.J. HADDEN, A.D. PIERCE**
Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations.
Journal of the Acoustical Society of America, 1981, vol 69, n°5, pp 1266-1276 et Erratum : Journal of the Acoustical Society of America, 1982, vol 71, n°5, pp 1290.
- [43] **A. L'ESPÉRANCE, J. NICOLAS, G.A. DAIGLE**
Insertion loss of absorbent barrier on ground.
Journal of the Acoustical Society of America, 1989, vol 86, n°3, pp 1060-1064.
- [44] **J. DEFRANCE**
Méthode analytique pour le calcul de propagation du bruit extérieur.
Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, 1996, 190 p.
- [45] **Z. MAEKAWA**
Noise reduction by screens.
Applied Acoustics, 1968, vol 1, pp 157-173.
- [46] **F. ANFOSSO-LÉDÉE, P. DANGLA**
Modélisation numérique du fonctionnement des écrans antibruit routiers dans leur environnement.
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1996, vol 203, pp. 45-54.
- [47] **Y. GABILLET, H. SCHROEDER, G.A. DAIGLE, A. L'ESPÉRANCE**
Application of the gaussian beam approach to sound propagation in the atmosphere : Theory and experiments.
Journal of the Acoustical Society of America, 1993, vol 93, n°6, pp 3105-3116.
- [48] **P. FILIPPI, G. DUMERY**
Etude théorique et numérique de la diffraction par un écran mince.
Acustica, 1969, vol 21, pp 343-350.
- [49] **A. DAUMAS**
Etude de la diffraction par un écran mince disposé sur le sol.
Acustica, 1978, vol 40, pp 213-222.
- [50] **R. SEZNEC**
Diffraction of sound around barriers : Use of the boundary elements technique.
Journal of Sound and Vibration, 1980, vol 73, n°2, pp. 195-209.
- [51] **D. DUHAMEL**
Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier.
Journal of Sound and Vibration, 1996, vol 197, n°5, pp. 547-571.
- [52] **Norme ISO 362**
Acoustique - Mesurage du bruit émis par les véhicules routiers en accélération - Méthode d'expertise.
Organisation Internationale de Normalisation, Genève, 1998, 18 p.
- [53] **P. BAR, Y. DELANNE**
Réduire le bruit pneumatiques-chaussées : Les couches de roulement à faible émission sonore.
Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1993, 266 p.

- [54] **J.F. HAMET, M.A. PALLAS, D. GAULIN, M. BÉRENGIER**
Acoustic modeling of road vehicles for traffic noise prediction : Determination of the sources heights.
Journal of the Acoustical Society of America, 1998, vol 103, n°5, Pt. 2, pp 2919-2920.
- [55] **J. PICAUT**
Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion : Application à l'acoustique des salles et à l'acoustique urbaine.
Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, 1998, 125 p.
- [56] **B. M. FAVRE**
Noise emission of road vehicles : Evaluation of some simple models.
Journal of Sound and Vibration, 1983, vol 91, n°4, pp. 571-582.
- [57] **C.E.T.U.R.**
Guide du bruit des transports terrestres : Prévision des niveaux sonores.
Editions du C.E.T.U.R., 1980, 317 p.
- [58] **R. COULSON**
Method for measuring vehicle noise source height and subsources spectra.
Transportation Research Record, 1996, vol 1559, pp. 8-13.
- [59] **S.A.L. GLEGG, J.R. YOON**
Determination of noise source heights - Part I : The measurement of equivalent acoustic source height above a reflecting surface.
Journal of Sound and Vibration, 1990, vol 143, n°1, pp. 19-37.
Part II : The measurement of equivalent acoustic source height of highway vehicles.
Journal of Sound and Vibration, 1990, vol 143, n°1, pp. 39-50.
- [60] **Y. OSHINO, H. TACHIBANA**
Prediction of road traffic noise taking account of transient running conditions of vehicles.
Congrès Internoise'93, 1993, Leuven, Belgique, pp. 629-632.
- [61] **P. KOKOWSKI, R. MAKAREWICZ**
Interrupted traffic noise
Journal of the Acoustical Society of America, 1997, vol 101, n°1, pp 360-371.
- [62] **J. LELONG**
Influence des véhicules lourds sur un bruit de trafic interurbain : Tests de sensibilité PL/TR.
I.N.R.E.T.S., Rapport M.M.A. 9701, 1997, 16 p.
- [63] **J.F. HAMET**
Bruit du trafic routier - Abaques d'émission du modèle de prévision américain : FHWA Traffic noise model.
I.N.R.E.T.S., Rapport M.M.A. 9603, 1996, 33 p.
- [64] **D. BYRNE, K. TRAN, S. ARLINGER, K. WILBRAHAM, R. COX, B. HAGERMAN, R. HETU, J. KEI, C. LUI, J. KIESSLING, M. NASSER KOTBY, H. NASSER, A. NASSER, A. WAFAA, H. EL KHOLY, Y. NAKANISHI, H. OYER, R. POWELL, D. STEPHENS, M. MEREDITH, T. SIRIMANNA, G. TAVARTKILADZE, I.G. FROLENKOV, S. WESTERMAN, C. LUDVIGSEN.**
An international comparison of long-term average speech spectra.
Journal of the Acoustical Society of America, 1994, vol 96, n°4, pp 2108-2120.
- [65] **F.M. WIENER, C.I. MALME, C.M. GOGOS**
Sound propagation in urban areas.
Journal of the Acoustical Society of America, 1965, vol 37, pp 738-747.

- [66] **R.H. LYON**
Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation.
Journal of the Acoustical Society of America, 1974, vol 55, n°3, pp 493-503.
- [67] **P.R. DONAVAN**
Sound propagation in urban space.
Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 1976.
- [68] **H.G. DAVIES**
Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets.
Journal of the Acoustical Society of America, 1978, vol 64, n°2, pp 517-521.
- [69] **L. de BROGLIE**
La thermodynamique de la particule isolée.
Editions Gauthiers-Villars, Paris, 1964.
- [70] **R. HAKIM**
Mécanique.
Editions Armand Colin, Paris, 1995.
- [71] **M.M.R. WILLIAMS**
Mathematical methods in particle transport theory.
Butterworth & Co Publishers Ltd, Londres, 1971.
- [72] **H.L. FRISCH**
Model of nonequilibrium ensemble : Knudsen gas.
Physical Review, 1957, vol 107, n°4, pp. 917-923.
- [73] **C. CERCIGNANI**
Theory and application of the Boltzmann equation.
Academic Press Inc., Londres, 1975.
- [74] **H. KUTTRUFF**
Sound decay in reverberation chambers with diffusing elements.
Journal of the Acoustical Society of America, 1981, vol 69, n°6, pp 1716-1723.
- [75] **H. KUTTRUFF**
Room acoustics.
Spon Press, 4^{ème} édition, Londres, 1999.
- [76] **S. ARMENIO**
Modélisation de la propagation du son dans une rue par une méthode de Monte Carlo.
Rapport de stage, Ecole d'ingénieurs en modélisation mathématique et mécanique, Université de Bordeaux I, 2001, 25 p.
- [77] **R.M. SCHÄFER**
Le Paysage sonore.
Editions J.C. Lattès, 1979.
- [78] **L.C.P.C., C.E.R.M.A., L.A.U.M., SerdB, C.R.E.S.S.O.N.**
Etude du traitement des ambiances sonores à l'aide de méthodes simplifiées à des configurations urbaines.
Convention Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement n° 23/2000, Rapport final, 2001, 162 p.
- [79] **A.L. DELEUZE**
Analyse spectrale de textures de chaussées dans leur relation avec le bruit de contact pneumatique-chaussée.
Rapport de stage, Maîtrise de physique et application, Université de Méditerranée, 2001, 38 p.

Thèses (participation[†] et/ou encadrement[‡])

- [T1] **M. BÉRENGIER**
Un aspect de la lutte contre le bruit : Absorption acoustique active dans un écoulement fluide guidé.
Université d'Aix-Marseille I, Marseille, janvier 1979.
- [T2] **V. LEGEAY[†]**
Application de la transformée de Hilbert discrète à l'évaluation des coefficients de réflexion acoustique.
Université du Maine, Le Mans, juillet 1981.
- [T3] **E. SÉCHET[‡]**
Modélisation d'une connaissance imprécise sur les influences des conditions météorologiques dans la propagation du son à partir de données expérimentales.
Université de Paris 9 - Dauphine, Paris, juillet 1996.
- [T4] **F. ANFOSSO-LÉDÉE[‡]**
Application de la méthode des équations intégrales à la modélisation du bruit aux abords des routes : Interaction chaussée/écran antibruit.
Université de Strasbourg, Strasbourg, novembre 1996.
- [T5] **P. WOLOSZYN[‡]**
Caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des formes architecturales et urbaines.
Université de Nantes, Nantes, juillet 1998.
- [T6] **B. GAUVREAU[‡]**
Influence des conditions micrométéorologiques sur l'efficacité des écrans acoustiques.
Université du Maine, Le Mans, novembre 1999.
- [T7] **D. GAULIN[‡]**
Caractérisation physique des sources sonores en milieu urbain.
Université du Maine, Le Mans, mars 2000.
- [T8] **M. RAIMBAULT[‡]**
Simulation des ambiances sonores urbaines : Intégration des aspects qualitatifs.
Université de Nantes, Nantes, à soutenir en mars 2002.
- [T9] **T. LE POLLES[‡]**
Généralisation du modèle de diffusion à l'acoustique urbaine.
Université du Maine, Le Mans, à soutenir fin 2002.

Rapports de stage (*Etudiants encadrés*)

[RS1] **T. GOUIN**

Contribution à l'étude de la classification des revêtements de chaussées en champ lointain, pour la période nocturne : Mise au point du modèle de calcul et vérification expérimentale.

Rapport de stage de D.E.U.S.T.- Vibration Acoustique Signal 2, Université du Maine, Le Mans, juin 1999.

[RS2] **F. GUILLOU**

Détermination de la puissance acoustique des véhicules dans leur mode de fonctionnement urbain.

Rapport de stage de D.E.S.S. « Acoustique des transports », Université de Technologie de Compiègne, septembre 2000.

[RS3] **L. MADEC**

Classification acoustique des aménagements urbains.

Rapport de stage de D.E.S.S. « Acoustique des transports », Université de Technologie de Compiègne, septembre 2001.

Normes (*Participation à la rédaction*)

- [N1] **Norme AFNOR NFS 31 089**
Acoustique – Code d’essai pour la détermination des caractéristiques acoustiques d’écrans installés in situ.
A.F.N.O.R., Paris, 1990 (Version révisée en octobre 2000).
- [N2] **Norme ISO 13472-1**
Acoustique – Mesurage in situ des propriétés d’absorption acoustique des revêtements de chaussées : Partie 1 – Méthode de la surface étendue.
Organisation Internationale de Normalisation, Genève, à paraître en 2002, 26 p.
- [N3] **Norme AFNOR NFS 31 119**
Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage.
A.F.N.O.R., Paris, 1993 (Version révisée sous la référence 31 119-2 : Acoustique - Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées - Mesurages acoustiques au passage – Partie 2 : procédure véhicule maîtrisé, en décembre 2000).
- [N4] **Norme ISO 11819-1**
Acoustique - Méthode de mesurage de l'influence des revêtements de chaussées sur le bruit émis par la circulation – Partie 1 : Méthode statistique au passage.
Organisation Internationale de Normalisation, Genève, 1997, 33 p.
- [N5] **Projet Norme ISO 11819-2**
Acoustique - Méthode de mesurage de l'influence des revêtements de chaussées sur le bruit émis par la circulation – Partie 2 : Méthode de proximité.
Organisation Internationale de Normalisation, Genève, en cours.
- [N6] **Norme AFNOR XPS 31 133**
Acoustique - Bruit des infrastructures de transports terrestres - Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques.
A.F.N.O.R., Paris, 2001.

Logiciels de recherche

- [L1] **MB_COURB**
Calcul de l'atténuation excédentaire au voisinage d'une surface courbe ou au voisinage d'une surface plane en présence d'un gradient vertical de vitesse du son négatif. (*Méthode analytique*).
- [L2] **MB_TURB**
Calcul de l'atténuation excédentaire au voisinage d'une surface plane en présence d'un effet de turbulence. (*Méthode analytique*).
- [L3] **PROPATE**
Calcul de l'atténuation excédentaire au voisinage d'une surface plane en présence d'un gradient vertical de vitesse du son positif ou nul avec un effet de turbulence. (*Méthode analytique*).
- [L4] **SSP**
Calcul de l'atténuation excédentaire par approximation de l'équation parabolique, au voisinage plane en présence d'un gradient vertical de vitesse du son positif, négatif ou nul avec un effet de turbulence. (*Méthode numérique*).
- [L5] **Module ECRAN de CESAR-LCPC**
Calcul du champ sonore au voisinage d'un écran de forme quelconque installé sur une chaussée d'impédance finie (effet de complémentarité entre un écran et un revêtement de chaussée poreux) par une méthode d'éléments de frontière. (*Méthode numérique*).
- [L6] **MB_ECRAN**
Calcul de l'atténuation excédentaire derrière un écran droit et mince installé sur un sol d'impédance finie quelconque. (*Méthode analytique*).
- [L7] **TG_DISGRD**
Calcul de l'atténuation excédentaire en présence d'une discontinuité d'impédance et d'un gradient vertical de vitesse du son positif ou nul. (*Méthode analytique*).

ANNEXE 1



LISTE DES PUBLICATIONS

Publications parues dans des revues avec comité de lecture

- [P1] **M. BÉRENGIER, A. ROURE** ^(a)
Broad-band active sound absorption in a duct carrying uniformly flowing fluid.
Journal of Sound and Vibration, 1980, vol 68, n° 3, pp 437-449.
- [P2] **M. BÉRENGIER, A. ROURE** ^(a)
Radiation impedance of one or several real sources mounted in a hard-walled rectangular waveguide.
Journal of Sound and Vibration, 1980, vol 71, n° 3, pp 389-398.
- [P3] **R. SEZNEC** ^(b), **M. BÉRENGIER, V. LEGEAY** ^(b)
Propagation of spherical waves above ground.
Applied Acoustics, 1983, vol 16, pp 163-168.
- [P4] **M. BÉRENGIER, D. HABAUT** ^(a)
Propagation acoustique au dessus d'un sol.
La Revue d'Acoustique, 1983, vol 65, pp 86-89.
- [P5] **R. SEZNEC** ^(b), **M. BÉRENGIER**
Effet du sol sur la propagation d'une onde sphérique.
Acustica, 1983, vol 53, n° 6, pp 269-280.
- [P6] **Y. DELANNE** ^(b), **M. BÉRENGIER, V. LEGEAY** ^(b), **R. SEZNEC** ^(b)
Application d'une méthode transitoire pour la caractérisation en absorption et en transmission des structures en place.
La Revue d'Acoustique, 1983, vol 65, pp 90-95.
- [P7] **M. BÉRENGIER, Y. DELANNE** ^(b)
Caractéristiques acoustiques intrinsèques d'une structure par une méthode impulsionnelle.
Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, sept-oct 1985, vol 139, pp 113-118.
- [P8] **M. BÉRENGIER, G. DAIGLE** ^(c)
Diffraction of sound above a curved surface having an impedance discontinuity.
Journal of the Acoustical Society of America, septembre 1988, vol 84, n° 3, pp 1055-1060.
- [P9] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET** ^(d)
Propriétés acoustiques des revêtements drainants : Le phénomène d'absorption.
Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, juillet-août 1990, vol 168, pp 109-125.
- [P10] **M. BÉRENGIER, M. STINSON** ^(c), **G. DAIGLE** ^(c), **J.F. HAMET** ^(d)
Porous road pavements : Acoustical characterization and propagation effects.
Journal of the Acoustical Society of America, janvier 1997, vol 101, n°1, pp 155-162.
- [P11] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET** ^(d)
Acoustical Classification of Road Pavements : Ranking differences due to distance from the road.
Heavy Vehicle Systems - International Journal of Vehicle Design, 1999, vol 6, n° 1-4, pp 13-27.

- [P12] **M. BÉRENGIER, J.-F. HAMET** ^(d)
 Etude acoustique des milieux poreux - Application aux revêtements drainants.
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nov-déc 1997, vol 212, pp. 65-74.
- [P13] **M. JACQUES** ^(f), **M. BÉRENGIER**
 Le Réamètre : Appareil de mesure de la résistance spécifique au passage de l'air des revêtements poreux.
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, juillet-août 1998, vol 216, pp. 61-66.
- [P14] **M.C. BÉRENGIER, F. ANFOSSO-LÉDÉE** ^(b)
 State of the art on the prediction and control of the road traffic noise in France.
Transportation Research Board Record, september 1998, n° 1626, pp. 71-77.
- [P15] **B. GAUVREAU** ^(b), **M. BÉRENGIER**
 Influence des conditions météorologiques sur la propagation acoustique : Modélisation numérique.
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, mai-juin 1999, vol 221, pp 55-68.
- [P16] **D. GAULIN** ^(b), **M. BÉRENGIER**
 Caractérisation des sources sonores d'origine routière pour le milieu urbain.
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, juillet-août 1999, vol 222, pp. 71-84.
- [P17] **B. GAUVREAU** ^(b), **M. BÉRENGIER, P. BLANC-BENON** ^(ab),
C. DEPOLLIÉ ^(r)
 Traffic noise prediction with the PE method : Validation of a Split-Step Padé approach in complex environments.
Acceptée au Journal of the Acoustical Society of America.
- [P18] **W. GARDZIEJCZYK** ^(ae), **M. BÉRENGIER**
 Tyre/road noise in aspect of road surface construction technology.
Archives of Civil Engineering, 2000, vol XLVI, n°1, pp. 25-38.
- [P19] **M. BÉRENGIER**
 Outdoor noise pollution: measurement of the main factors.
Radiation Protection Dosimetry, 2001, vol 97, n°4, pp.429-432.

Rapports et autres publications

- [R1] **M. BÉRENGIER**
 Etude de l'association de sources tripolaires anti-bruit et de leur comportement en fonction de la température.
Rapport de D.E.A., Université d'Aix-Marseille I, Marseille, juin 1977.
- [R2] **M. BÉRENGIER**
 Propagation acoustique au voisinage du sol.
Rapport final du contrat avec le Ministère de l'Environnement, Comité bruit et vibration, n° BV 79-932 bis, février 1983.
- [R3] **M. BÉRENGIER, Y. DELANNE** ^(b), **V. LEGEAY** ^(b)
 Utilisation d'un signal de détonation à la détermination de l'efficacité d'un écran en place.

Rapport final du contrat D.G.R.S.T., 1983.

- [R4] **J. LELONG** ^(d), **M. BÉRENGIER**
Projet prédit : « Emission acoustique des transports terrestres – Constitution d'une base de données nationale ».
Rapport final du contrat P.R.E.D.I.T., Rapport I.N.R.E.T.S. – L.T.E. 0106, avril 2001.
- [R5] **M. BÉRENGIER, J.P. MARCHAND** ^(e)
Validation expérimentale de l'absorption acoustique d'un enrobé drainant.
Revue Générale des Routes et Aéroports, numéro spécial "Enrobés Drainants", printemps 1990, pp 55-58.
- [R6] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET** ^(d), **P. BAR** ^(f)
Propriétés acoustiques des revêtements poreux - Aspects théorique et expérimental.
Revue Générale des Routes et Aéroports, numéro spécial "Enrobés Drainants", printemps 1990, pp 95-104.
- [R7] **M. BÉRENGIER**
Maîtrise du bruit routier - Emploi combiné d'enrobés drainants et d'écrans antibruit.
Chaussées d'autoroutes infos, juillet 1991, n° 29.
- [R8] **M. BÉRENGIER**
La mesure de l'intensité acoustique.
Partie 1 : Théorie,
Partie 2 : Applications.
Rapport interne L.C.P.C., 1984.
- [R9] **M. BÉRENGIER, G. DAIGLE** ^(e), **A. BERRY** ^(g)
Etude du champ acoustique en présence d'une discontinuité d'impédance et d'un effet de gradient de vitesse du son.
Rapport de Recherche L.P.C., novembre 1989, n° 155.
- [R10] **M. BÉRENGIER**
Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur - Thème de recherche E.G.U. 03 : Synthèse des travaux de l'année 1991.
Rapport L.C.P.C., janvier 1992, Pôle Environnement et Génie urbain.
- [R11] **M. BÉRENGIER**
Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur - Thème de recherche E.G.U. 03 : Synthèse des travaux de l'année 1992.
Rapport L.C.P.C., janvier 1993, Pôle Environnement et Génie urbain.
- [R12] **M. BÉRENGIER**
Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur - Thème de recherche E.G.U. 03 : Synthèse des travaux de l'année 1994.
Rapport L.C.P.C., avril 1995, Pôle Environnement et Génie urbain.
- [R13] **M. BÉRENGIER, V. ZOBOFF** ^(k), **E. SÉCHET** ^(k)
Propagation acoustique en milieu extérieur. Comment estimer un niveau acoustique à grande distance ?
Acoustique et Techniques, octobre 1995, n°3, pp 13-17.
- [R14] **M. BÉRENGIER**
Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur - Thème de recherche E.G.U. 03 : Synthèse finale.
Rapport L.C.P.C., mai 1996, Pôle Environnement et Génie urbain.

- [R15] **BRUIT DES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES** : Méthode de calcul incluant les effets météorologiques. Version expérimentale : NMPB – Routes – 96. (Contribution à la rédaction)
Edition C.E.R.T.U., S.E.T.R.A., L.C.P.C., C.S.T.B., janvier 1997.
- [R16] **J.-P. GASTAUD** ^(s), **P. DUPONT** ^(t), **Y. DELANNE** ^(b), **J.-P. MICHAUD** ^(u), **J.-P. LAVAUD** ^(v), **B. FAURE** ^(w), **M. BÉRENGIER**, **J.-P. ANTOINE** ^(x)
Le groupe national « Caractéristiques de Surface de Chaussée » : Un exemple de concertation entre l'administration et la profession routière.
Revue Générale des Routes, février 1998, vol 759, pp. 51-53.
- [R17] **P. WOLOSZYN** ^(q), **J.P. PENEAU** ^(q), **M. RAIMBAULT** ^(q), **L. SIMON** ^(t),
C. AYRAULT ^(t), **J. PICAUT** ^(b), **M. BÉRENGIER**, **T. LE POLLES** ^(b),
S. ARMENIO ^(b), **T. LEGOUIS** ^(l)
Plate-Forme expérimentale pour un simulateur des ambiances sonores urbaines.
Acoustique et Techniques, septembre 2001, n° 26, pp. 16-22.

Communications lors de congrès avec comité de lecture

- [C1] **R. SEZNEC** ^(b), **V. LEGEAY** ^(b), **M. BÉRENGIER**
Etude de la propagation d'une onde sphérique au voisinage d'un sol absorbant.
11ème Congrès International d'Acoustique, Paris, 1983.
- [C2] **Y. DELANNE** ^(b), **M. BÉRENGIER**
Utilisation d'un signal transitoire de détonation à la détermination de l'efficacité d'un écran en place.
11ème Congrès International d'Acoustique, Paris, 1983.
- [C3] **V. LEGEAY** ^(b), **M. BÉRENGIER**
Modèle d'impédance d'un sol à réaction localisée.
12ème Congrès International d'Acoustique, Toronto, 1986.
- [C4] **M. BÉRENGIER**, **G.P. OSWALD** ^(h), **B. MÉRIEL** ⁽ⁱ⁾
Influence du sol et des variations atmosphériques sur la propagation sonore à grande distance : Expérimentations réparties sur quatre saisons.
12ème Congrès International d'Acoustique, Toronto, 1986.
- [C5] **M. BÉRENGIER**, **G. DAIGLE** ^(c)
Noise propagation in the presence of an impedance discontinuity and sound speed gradients.
Congrès Noise Con' 87, Penn State University, USA, juin 1987.
- [C6] **J.F. HAMET** ^(d), **M. BÉRENGIER**, **M. JACQUES** ⁽ⁱ⁾, **P. L'HERMITE** ^(b)
Optimisation acoustique des revêtements routiers poreux.
8ème Symposium F.A.S.E., Saragosse, avril 1989.
- [C7] **M. BÉRENGIER**, **J.F. HAMET** ^(d), **P. L'HERMITE** ^(b), **P. DABURON** ^(b)
L'acoustique des revêtements routiers poreux.
13ème Congrès International d'Acoustique, Belgrade, 1989.

- [C8] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET ^(d), P. BAR ^(f)**
Acoustical properties of the porous asphalts - Theoretical and Environmental aspects.
69ème Congrès du Transportation Research Board, Washington D.C, USA, janvier 1990, papier n° 890226.
Transportation Research Record n° 1265, 1990.
- [C9] **M. BÉRENGIER, V. ZOUBOFF ^(k), J. BERTRAND ^(k), F. CURRAN ^(k)**
Propagation acoustique à grande distance : Influence des conditions atmosphériques.
1er Congrès Français d'Acoustique, Lyon, avril 1990.
- [C10] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET ^(d)**
Effect of an absorbent pavement on the tire noise propagation.
International Tire Road Noise Conference 90, Göteborg, Suède, août 1990.
- [C11] **J.F. HAMET ^(d), M. BÉRENGIER, M. JACQUES ⁽ⁱ⁾**
Acoustic performances of pervious surfaces.
International Tire Road Noise Conference 90, Göteborg, Suède, août 1990.
- [C12] **M. BÉRENGIER**
Traffic noise propagation : Absorbing pavement and screening effect.
Congrès Internoise 1992, Toronto, Canada, juillet 1992.
- [C13] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET ^(d), G. DAIGLE ^(c), M. STINSON ^(c)**
Acoustic impedance of porous pavements : Comparison between a microstructural and a phenomenological model.
125ème Congrès de la Société Américaine d'Acoustique, Ottawa, Canada, mai 1993.
- [C14*] **M. BÉRENGIER**
Long distance traffic noise propagation.
International conference on Noise and Vibration control, Saint-Petersbourg, Russie, juin 1993.
- [C15*] **M. BÉRENGIER**
Outdoor sound propagation over road pavements.
Congrès internoise 1993, Louvain, Belgique, août 1993.
- [C16*] **J.F. HAMET ^(d), M. BÉRENGIER**
Acoustical characteristics of porous pavements : A new phenomenological model.
Congrès internoise 1993, Louvain, Belgique, août 1993.
- [C17*] **Y. DELANNE ^(b), M. BÉRENGIER**
Efficiency of acoustically optimised drainage asphalts.
Symposium Vehicle/road and vehicle/bridge interaction, Delft, Pays-Bas, juin 1994.
- [C18] **T. LEGOUIS ^(l), M. BÉRENGIER**
"ECRAN" a predicting software to evaluate the efficiency of traffic noise barriers.
Congrès euro-noise '95, Lyon, mars 1995.
- [C19*] **M. BÉRENGIER**
Different solutions to control the acoustic environment of roads.
15ème Congrès International d'Acoustique, Trondheim, Norvège, juin 1995.

- [C20*] **M. BÉRENGIER**
An in-situ method to evaluate the absorption coefficient of road pavements.
15ème Congrès International d'Acoustique, Trondheim, Norvège, juin 1995.
- [C21*] **M. BÉRENGIER**
Influence of propagating effects on the acoustical classification of road pavements.
Congrès internoise 1996, Liverpool, Angleterre, août 1996.
- [C22] **F. ANFOSSO-LÉDÉE ^(b), M. BÉRENGIER**
The prediction of combined effect of road barrier and porous road surface by BEM.
Congrès internoise 1996, Liverpool, Angleterre, août 1996.
- [C23] **V. ZOUBOFF ^(k), M. BÉRENGIER, J.C. LAPORTE ⁽ⁿ⁾, B. DULAU ^(p)**
Representativity of long range sound level calculation.
Congrès internoise 1996, Liverpool, Angleterre, août 1996.
- [C24] **P. WOLOSZYN ^(q), M. BÉRENGIER**
Mesures dimensionnelles et implantation numérique d'un modèle de diffusion acoustique en milieu urbain.
4ème Congrès Français d'Acoustique, Marseille, avril 1997.
- [C25] **M.C. BÉRENGIER, F. ANFOSSO-LÉDÉE ^(b)**
State of the art on the prediction and control of the road traffic noise in France.
77ème Congrès du Transportation Research Board, papier n° 980691, Washington, USA, janvier 1998.
- [C26] **M.C. BÉRENGIER, J.F. HAMET ^(d), Y. PICHAUD ^(b)**
Effects of the acoustical characteristics of road pavements on long range sound propagation.
16ème Congrès International d'Acoustique, Seattle, USA, juin 1998.
- [C27] **J.F. HAMET ^(d), M.A. PALLAS ^(d), D. GAULIN ^(b), M.C. BÉRENGIER**
Acoustic modelling of road vehicles for traffic noise prediction : Determination of the sources heights.
16ème Congrès International d'Acoustique, Seattle, USA, juin 1998.
- [C28*] **M. BÉRENGIER**
Il rumore delle infrastrutture stradali - Il nuovo metodo di previsione del rumore da traffico che include gli effetti meteorologici sulla propagazione.
26ème Congrès de l'Association Italienne d'Acoustique, Turin, Italie, mai 1998.
- [C29] **M. GARAI ^(aa), M. BÉRENGIER, P. GUIDORZI ^(aa), P. L'HERMITE ^(b)**
Procedure for measuring the sound absorption of road surfaces in-situ.
Congrès euro-noise'98, Munich, Allemagne, octobre 1998.
- [C30] **B. GAUVREAU ^(b), M. BÉRENGIER, P. BLANC-BENON ^(ab),
C. DEPOLLIÉ ^(t)**
A numerical method to predict sound propagation for realistic road environment.
137ème Congrès de la Société Américaine d'Acoustique et à la 2ème Convention des Sociétés Européennes d'Acoustique, Berlin, RFA, mars 1999.

- [C31] **D. GAULIN** ^(b), **M. BÉRENGIER**, **C. DEPOLLIÉ** ^(c)
 Models for acoustic sources in urban area.
137ème Congrès de la Société Américaine d'Acoustique et à la 2ème Convention des Sociétés Européennes d'Acoustique, Berlin, RFA, mars 1999.
- [C32] **M. BÉRENGIER**, **J. LELONG** ^(d), **M.A. PALLAS** ^(d), **D. GAULIN** ^(b)
 A French national database on the acoustic emission of transportation vehicles.
2ème Congrès Européen de la Route, Bruxelles, Belgique, juin 1999.
- [C33*] **M. BÉRENGIER**, **F. ANFOSSO-LÉDÉE** ^(b)
 The efficiency of road pavements for traffic noise reduction - A state of the art in France.
21ème Congrès International de la Route – A.I.P.C.R., Kuala Lumpur, Malaisie, Octobre 1999.
- [C34] **M. A. PALLAS** ^(d), **D. GAULIN** ^(b), **M. BÉRENGIER**
 Vertical description of noise sources of a moving passenger car.
7ème congrès I.C.S.V., Garmisch-Partenkirchen, Allemagne, juillet 2000.
- [C35*] **M. BÉRENGIER**, **Y. PICHAUD** ^(b), **J.F. LE FUR** ^(b)
 Effect of low-noise pavements on traffic noise propagation over large distances : Influence of grounds and atmospheric conditions.
Congrès internoise 2000, Nice, août 2000.
- [C36*] **M.C. BÉRENGIER**, **B. GAUVREAU** ^(b)
 Calculation of the meteorological effects on outdoor sound propagation using parabolic equation.
Congrès internoise 2000, Nice, août 2000.
- [C37*] **M. LOSA** ^(ac), **G. LICITRA** ^(ad), **M. BÉRENGIER**, **M. CERCHIAI** ^(ad)
 Physical characteristics of road pavements and noise emission.
Congrès internoise 2001, La Haye, Pays-Bas, août 2001.
- [C38*] **J. DEFRANCE** ^(af), **M. BÉRENGIER**, **J.F. RONDEAU** ^(af)
 Validation and evolution of the road traffic noise prediction model N.M.P.B.-96. Part 2 : Improvements based on theoretical methods.
Congrès internoise 2001, La Haye, Pays-Bas, août 2001.
- [C39] **J. PICAUT** ^(b), **M. BÉRENGIER**
 Qualitative evaluation of sound reflection by a building façade.
Congrès internoise 2001, La Haye, Pays-Bas, août 2001.
- [C40*] **N. BLAIRON** ^(ab), **P. BLANC-BENON** ^(ab), **M. BÉRENGIER**, **D. JUVÉ** ^(ab)
 Calculation of sound propagation over non flat terrain using parabolic equation.
17ème Congrès International d'Acoustique, Rome, Italie, septembre 2001.
- [C41*] **M. BÉRENGIER**, **M. GARAI** ^(aa)
 A State-of-the-art of in situ measurement of the sound absorption coefficient of road pavements.
17ème Congrès International d'Acoustique, Rome, Italie, septembre 2001.

- [C42] **J. LELONG** ^(d), **M. BÉRENGIER**
 Noise radiated by vehicles moving in urban areas.
17ème Congrès International d'Acoustique, Rome, Italie, septembre 2001.
- [C43] **T. LE POLLES** ^(b), **J. PICAUT** ^(b), **M. BÉRENGIER**
 Modelling of diffuse sound field in architectural acoustic using transport theory.
17ème Congrès International d'Acoustique, Rome, Italie, septembre 2001.
- [C44] **M. RAIMBAULT** ^(q), **M. BÉRENGIER**, **D. DUBOIS** ^(ah)
 Common factors in the identification of urban soundscapes : Pilot studies in two French cities : Lyon and Nantes.
17ème Congrès International d'Acoustique, Rome, Italie, septembre 2001.
- [C45*] **M. BÉRENGIER**
 The French new traffic noise prediction method : towards an european harmonized method. (*Il nuovo metodo francese di previsione del rumore stradale : verso un metodo europeo armonizzato.*)
17ème Congrès International d'Acoustique, Session speciale AIA « Noise Mapping », Rome, Italie, septembre 2001.
- [C46*] **M. BÉRENGIER**
 La propagation acoustique à grande distance : Evolution des méthodes et des techniques.
6ème Congrès Français d'Acoustique, Lille, avril 2002.

Communications lors d'autres congrès, symposium ou colloques

- [S1*] **M. BÉRENGIER**
 Effect of an impedance discontinuity and sound speed gradients on the acoustic propagation - Application to the road traffic noise.
International seminar on road traffic noise - Evaluation by model studies, Grenoble, 1988.
- [S2*] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET** ^(d)
 Caractéristiques acoustiques des chaussées poreuses.
4ème Entretiens Jacques Cartier, Colloque "Effets et traitement du bruit des transports", Bron, décembre 1990.
- [S3*] **M. BÉRENGIER**
 Propagation acoustique en milieu extérieur, étude de la complémentarité chaussée absorbante/écran routier.
Publication du L.M.A. (C.N.R.S.), septembre 1991, n° 126, pp 29-47.
- [S4*] **M. BÉRENGIER, J. BERTRAND** ^(k), **V. ZOUBOFF** ^(k)
 Effect of the meteorological factors on long range sound propagation.
5th International Symposium on Long Range Sound Propagation, Milton Keynes, U.K., mai 1992.
- [S5] **M. BÉRENGIER, P. L'HERMITE** ^(b), **P. DABURON** ^(b)
 Action de lutte contre le bruit : Emploi combiné d'enrobé drainant et d'écrans anti-bruit.
Eurosymposium "Maîtrise du Bruit Routier en Milieu Urbain", Nantes, mai 1992.

- [S6*] **M. BÉRENGIER**
Moyens de protection contre le bruit routier.
24ème Congrès National des A.T.T.F., Angers, Septembre 1992.
- [S7*] **M. BÉRENGIER**
Influence des enrobés drainants sur la propagation du bruit du trafic routier à moyenne et grande distance.
Journée I.N.R.E.T.S. "Mesure des bruits routiers et ferroviaires", Bron, novembre 1993.
- [S8*] **V. ZOUBOFF** ^(k), **Y. BRUNET** ^(m), **M. BÉRENGIER**, **E. SÉCHET** ^(k)
A qualitative approach of atmospheric effects on long range sound propagation.
6th International Symposium on Long Range Sound Propagation, Ottawa, Canada, juin 1994.
- [S9*] **M. BÉRENGIER**
L'Acoustique au L.C.P.C.
Les 20 ans des Sciences pour l'Ingénieur au C.N.R.S., Nantes, septembre 1995.
- [S10*] **M. BÉRENGIER**
Les couches de roulement à faible bruit dans les pays de l'O.C.D.E.
Conférence sur la réduction du bruit aux abords des voies routières, O.C.D.E., Madrid, Espagne, novembre 1995.
- [S11*] **M. BÉRENGIER**
Le bruit routier : Caractérisation acoustique des revêtements.
Les Journées Techniques Chaussées des L.P.C., Nantes, janvier 1996.
- [S12*] **M. BÉRENGIER**
Le bruit routier : Caractérisation du bruit à distance - méthodes et exemples.
Les Journées Techniques Chaussées des L.P.C., Nantes, janvier 1996.
- [S13*] **M. BÉRENGIER**
Propagation acoustique et effets météorologiques.
Journées Techniques « Le bruit des infrastructures routières », Grenoble, février 1996.
- [S14*] **M. BÉRENGIER**
La place des mesures dans la conception et la réalisation des protections acoustiques.
Les Journées Techniques Chaussées des L.P.C., Nantes, janvier 1996.
- [S15*] **M. BÉRENGIER**
Infrastructures de transport - Les nouvelles mesures de prévention des nuisances : Les revêtements routiers.
Colloque National « Acoustique, Architecture et Aménagement Urbain », C.I.D.B., Bordeaux, mai 1996.
- [S16*] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET** ^(d)
Acoustical classification of road pavements : Evolution for far field conditions.
Congrès Vehicle-Infrastructure Interaction IV, San Diego, Californie, USA, juin 1996.

- [S17*] **M. BÉRENGIER, J. KERGMARD** ^(r)
L'Acustica urbana in Francia.
Séminaire Franco-Italien sur la Physique et l'Image de la Ville, Rome, Italie, septembre 1996.
- [S18*] **M. BÉRENGIER**
Interventi di mitigazione del rumore da traffico urbano.
Convegno « Il controllo dell'inquinamento acustico e la gestione del territorio », Vicenza, Italie, octobre 1996.
- [S19] **M. BÉRENGIER, F. ANFOSSO-LÉDÉE** ^(b)
Prevision and control of road traffic noise.
6th Conference of Science and Technology Building Physics in Theory and Practice, Lodz, Pologne, juin 1997.
- [S20*] **M. BÉRENGIER**
La circulation routière : sources de bruit : « Les sources sonores en milieu urbain : impact des nouveaux aménagements ».
Journée d'étude « Les aménagements de voirie ... et le bruit », Bruxelles, Belgique, juin 1997.
- [S21*] **M. BÉRENGIER**
L'acustica ambientale in Francia : dalla regolamentazione alla modellizzazione.
Conferenza Internazionale Italo-Francese sul Rumore Ambientale, Roma, Italie, juin 1997.
- [S22] **M. BÉRENGIER, J.F. HAMET** ^(d)
Acoustique des revêtements poreux.
Journée de rencontres « 1+1 > 2 ? », partenariat ou sous-traitance..., Nantes, décembre 1997.
- [S23*] **J.P. PENEAU** ^(q), **M. BÉRENGIER, J. PICAUT** ^(r), **P. WOLOSZYN** ^(q), **D. GAULIN** ^(b), **N. TIXIER** ^(v), **J. HARDY** ^(r), **L. SIMON** ^(r), **J.D. POLACK** ^(z), **J.F. AUGOYARD** ^(v), **J.J. DELÉTRÉ** ^(v)
Vers un logiciel des ambiances sonores urbaines.
Journée « Ville et Acoustique », Paris, janvier 1998.
- [S24*] **M. BÉRENGIER**
Impatto degli effetti meteorologici sul livello di rumore misurato a distanza.
Journée d'étude « Attuazione della legge quadro 447/95 sull'inquinamento acustico », Catania, Italie, janvier 1998.
- [S25] **B. GAUVREAU** ^(b), **M. BÉRENGIER, P. BLANC-BENON** ^(ab),
C. DEPOLLIÉ ^(r)
Range dependent refraction profile and impedance discontinuity : A numerical study.
8th International Symposium on Long Range Sound Propagation, State College, USA, septembre 1998.
- [S26*] **M. BÉRENGIER**
La chaussée réservoir de la rue de la Classerie à Rezé : L'aspect acoustique.
Journée technique « Bilan de la chaussée à structure réservoir de la rue de la Classerie à Rezé 10 ans après sa construction », Nantes, octobre 1998.

- [S27*] **M. BÉRENGIER**
 La réduction du bruit du trafic routier : des revêtements peu bruyants aux barrières acoustiques.
Colloque « Bruit dans la ville : y-a-t-il un remède ? », Pollutec, Lyon, novembre 1998.
- [S28*] **M. BÉRENGIER**
 Impact des revêtements de chaussée sur l'environnement acoustique des voies routières.
2èmes assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Table ronde : « Nouveaux produits et technologies de la lutte contre le bruit : adapter l'offre à la demande dans le domaine des transports », Paris, décembre 1998.
- [S29] **J.P. PENEAU** ^(q), **P. WOLOSZYN** ^(q), **M. BÉRENGIER**, **D. GAULIN** ^(b)
 Identification et caractérisation expérimentale des sources sonores en milieu urbain.
2èmes assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Paris, décembre 1998.
- [S30*] **M. BÉRENGIER**
 Le strategie di contenimento del rumore stradale in ambiente urbano.
Convegno « I piani di risanamento acustico delle aree urbane », Modena, Italie, février 1999.
- [S31*] **M. BÉRENGIER**, **M. GARAI** ^(aa)
 Modelli di previsione del rumore da traffico veicolare.
Convegno « Traffico e Ambiente », Trento, Italie, février 2000.
- [S32*] **F. LANCIERI** ^(ac), **G. LICITRA** ^(ad), **M. LOSA** ^(ac), **M. CERCHIAI** ^(ad),
M. BÉRENGIER
 Field and laboratory testing on different porous asphalt pavements.
4ème Symposium international A.I.P.C.R.-SURF 2000 « Caractéristiques de surface de chaussées », Nantes, 22-24 mai 2000.
- [S33*] **M. BÉRENGIER**
 Inquinamento acustico : Misura dei fattori principali.
Convegno nazionale « Problemi e tecniche di misura degli ambienti fisici in campo ambientale », Ivrea, Italie, 3-5 avril 2001.
- [S34*] **M. BÉRENGIER**, **R. DURANG** ^(ag)
 Les revêtements routiers : la mesure des caractéristiques acoustiques des revêtements routiers.
Journée A.T.E.C. « Acoustique des transports et dispositifs de réduction du bruit » Paris, 24 avril 2001.
- [S35*] **J. PICAUT** ^(b), **D. GAULIN** ^(b), **M. BÉRENGIER**
 Identification des sources sonores urbaines.
Colloque « La place des ambiances sonores dans l'aménagement urbain et périurbain », Bordeaux, 7 juin 2001.
- [S36*] **M. BÉRENGIER**
 Rappel des notions d'acoustique et méthodes de mesure des caractéristiques acoustiques des revêtements.
Journées interrégionales « Uni et adhérence des chaussées », Clermont-Ferrand, juin 2001, Angers, octobre 2001 et Mallemort, novembre 2001.

[S37] **M. GARAI** ^(aa), **M. BÉRENGIER**
Propagazione del rumore in ambiente esterno.
*Seminario « Determinazione e gestione del rumore ambientale », Bologna, Italie,
21-22 juin 2001.*

[S38*] **M. BÉRENGIER**
Phénomènes liés au bruit du trafic routier : Etat actuel des connaissances
Journées d'étude « Bruit du trafic routier », Nantes, 22-23 novembre 2001.

Légendes

* Communication invitée

- (a) C.N.R.S. - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (L.M.A.)
- (b) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.)
- (c) Centre National de Recherches du Canada (C.N.R.C.)
- (d) Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (I.N.R.E.T.S.)
- (e) Société Cochery-Bourdin-Chaussé (C.B.C.)
- (f) Centre d'Etude des Transports Urbains (C.E.T.U.R.)
- (g) Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke - Québec, Canada (G.A.U.S.)
- (h) Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (D.E.R. - E.D.F.)
- (i) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (L.R.P.C. Blois)
- (j) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux (L.R.P.C. Bordeaux)
- (k) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (L.R.P.C. Angers)
- (l) Société d'Etudes et de Réalisations pour la Diminution du Bruit (SerdB)
- (m) Institut National de la Recherche Agronomique (I.N.R.A.)
- (n) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand (L.R.P.C. Clermont-Fd)
- (p) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (L.R.P.C. Strasbourg)
- (q) Centre de Recherche Méthodologique en Architecture (C.E.R.M.A.)
- (r) Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (L.A.U.M.)
- (s) Conseil Général des Ponts et Chaussées (C.G.P.C.)
- (t) Service Technique des Routes et Autoroutes (S.E.T.R.A.)
- (u) Société COLAS
- (v) CETE du Sud-Ouest
- (w) Société SACER
- (x) Société APPIA
- (y) Centre de Recherche sur l'Espace Sonore et l'Environnement Urbain (C.R.E.S.S.O.N.)
- (z) Laboratoire d'Acoustique Musicale (L.A.M.)
- (aa) Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del controllo Ambientale (D.I.E.N.C.A.)
- (ab) Ecole Centrale de Lyon (E.C.L.)
- (ac) Università di Pisa – Dipartimento d'Ingegneria Civile
- (ad) Agenzia Regionale per le Protezione dell'Ambiente Toscana (A.R.P.A.T.)
- (ae) Bialystok Technical University – Institute of Civil Engineering
- (af) Centre Scientifique et Technique du Batiment (C.S.T.B.)
- (ag) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de L'Est Parisien (L.R.E.P.)
- (ah) Laboratoire Langages Cognitions Pratiques Ergonomie (L.C.P.E.)

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

Michel BERENGIER

« La Maîtrise du bruit routier : de la source au récepteur »

Résumé

Le bruit en général et le bruit routier en particulier sont reconnus par une large part de la population comme des sources importantes de pollution environnementale. Afin de les combattre efficacement, il est indispensable de maîtriser à la fois leurs phénomènes de génération et de propagation. L'objectif de ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches est de faire le point sur les travaux effectués depuis une vingtaine d'années au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, sur la thématique du bruit routier.

Les phénomènes d'émission et de propagation des ondes sonores produites par la circulation routière sont complexes et font intervenir un grand nombre de paramètres dont les principaux sont reliés à la fois aux caractéristiques physiques des véhicules de transports terrestres, aux caractéristiques physiques du milieu à l'intérieur duquel se propagera l'onde sonore et aux conditions aux frontières. L'étude systématique de ces divers paramètres nous a conduit à développer des recherches dans des domaines aussi variés que l'étude : de la réflexion acoustique, des effets du sol et des conditions atmosphériques sur la propagation acoustique à courte, moyenne et longue distance, des propriétés acoustiques des structures de chaussée appliquées en couches de roulement, des écrans antibruit, des mécanismes de génération du bruit de contact pneumatique-chaussée et de la diffusion du bruit en milieu urbain. L'ensemble de ces thématiques sont reprises dans le mémoire à la fois du point de vue de la modélisation théorique que du point de vue expérimental. Les différentes publications jointes en annexe viennent illustrer les résultats les plus significatifs obtenus au cours de la période 1980-2001.