



Evaluation de la performance acoustique des protections antibruit innovantes utilisant des moyens naturels : application aux transports terrestres

Faouzi Koussa

► To cite this version:

Faouzi Koussa. Evaluation de la performance acoustique des protections antibruit innovantes utilisant des moyens naturels : application aux transports terrestres. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2012. Français. NNT : 2012ECDL0025 . tel-00776758

HAL Id: tel-00776758

<https://theses.hal.science/tel-00776758>

Submitted on 16 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 2012-25

ANNÉE : 2012

UNIVERSITÉ DE LYON

THÈSE

présentée devant
L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON

pour obtenir
le grade de **DOCTEUR**
SPÉCIALITÉ ACOUSTIQUE

par

Faouzi KOUSSA

**ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ACOUSTIQUE
DES PROTECTIONS ANTIBRUIT INNOVANTES
UTILISANT DES MOYENS NATURELS :
APPLICATION AUX TRANSPORTS TERRESTRES**

Soutenue le 28 septembre 2012 devant la Commission d'Examen

JURY

Présidente : Mme M-A. GALLAND

Examineurs : M. K. ATTENBOROUGH (Rapporteur)
M. Ph. BLAN-BENON (Directeur de thèse)
M. J. DEFRANCE (Responsable de thèse)
M. D. DUHAMEL (Rapporteur)
M. Ph. JEAN (Co-directeur de thèse)
M. B. VINCENT

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509
École Centrale de Lyon

Département Acoustique et Éclairage
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Remerciements

Ce travail de thèse s'est déroulé au sein du département d'Acoustique environnementale au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Grenoble.

Mes remerciements vont tout d'abord à mon responsable de thèse Jérôme Defrance, docteur ingénieur et responsable du pôle acoustique environnementale au CSTB, à mon directeur de thèse Philippe Blanc-Benon, directeur de recherche au CNRS, à mon co-directeur de thèse Philippe Jean, chercheur-HDR au CSTB, pour le suivi et la rigueur scientifique qu'ils m'ont apportés. Leurs aides et conseils m'ont été précieux pendant ces trois années.

Je remercie Keith Attenborough, Professeur à l'Open University (Grande-Bretagne), et Denis Duhamel, Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pour m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie Marie-Annick Galland, Professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, pour avoir présidé le jury de thèse. Merci aussi à Bruno Vincent, Directeur d'Acouicité à Lyon, d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux membres du personnel du CSTB pour les échanges fructueux qui m'ont permis d'avancer dans mes travaux de thèse.

Enfin, je remercie fortement ma famille et mes proches qui m'ont toujours encouragé et soutenu pendant cette thèse.

Résumé

Le bruit dû aux infrastructures de transports terrestres fait partie des premières préoccupations environnementales de ce début de 21^e siècle. Un moyen utilisé pour réduire ce bruit est de placer des protections acoustiques le long des grands axes routiers et ferroviaires. Actuellement, les choix de ces protections antibruit se portent généralement sur des solutions traditionnelles : écran droit, merlon, écran incliné, écran avec un couronnement.

Le but de ce travail est de proposer des protections acoustiques innovantes utilisant des moyens naturels et d'en étudier la performance acoustique en utilisant des approches numérique et expérimentales. L'approche numérique peut être couplée en outre à un outil d'optimisation, développé dans cette thèse, pour chercher des formes améliorées de tels dispositifs antibruit novateurs.

Après une présentation des principaux phénomènes mis en jeu dans la propagation des ondes acoustiques en milieu extérieur complexe, un état de l'art des principaux écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres a été établi, permettant de choisir trois protections antibruit innovantes pour en étudier la performance acoustique. Une analyse des principales méthodes de simulation numérique, de mesure et d'optimisation des protections antibruit a permis de choisir les méthodes adaptées à notre problématique des écrans acoustiques utilisant des moyens naturels. Les méthodes choisies ont été utilisées dans ce travail pour évaluer la performance acoustique de ces écrans innovants. Pour le premier écran choisi, dit écran en gabions, nous avons effectué des mesures in-situ et sur modèles réduits, ainsi que des simulations numériques montrant une efficacité satisfaisante. Pour le deuxième écran, utilisant des cristaux soniques, et pour le troisième écran, de type merlon acoustique de forme complexe, nous avons réalisé une étude numérique paramétrique suivie d'une étude d'optimisation. Les résultats des calculs ont montré l'intérêt de tels dispositifs antibruit pour réduire le bruit de circulation routière et ferroviaire en milieu urbain et ils ont abouti à des formes améliorées des protections acoustiques utilisant des moyens naturels.

Abstract

Noise due to ground transportation infrastructures is among the first environmental concerns of this beginning of 21th century. Building noise protections along motorways and railways is usually the chosen solution to reduce this noise. Currently, noise abatement systems used are mainly conventional ones: straight barriers, earth berms, tilted barriers, capped barriers.

The purpose of this work is to propose innovative noise barriers using natural means and to study their acoustic performance by using numerical and experimental approaches. The numerical approach can also be coupled with an optimization tool, developed in this thesis, to obtain improved shapes of such devices using natural means.

First, the main phenomena that appear during acoustic wave propagation in a complex outdoor medium are described. Then, a state of the art of the main noise barriers dedicated to ground transportation noise is achieved. It drives the choice of three innovative noise barriers using natural means. An analysis of the main numerical, experimental and optimization methods is carried out which allows to choose the methods adapted to our problem of noise barriers using natural means. The chosen methods are used in this work to assess the acoustic performance of the three innovative noise barriers. For the first chosen noise barrier called “gabions barrier”, we perform in-situ and scale model measurements and numerical simulations. The results show a satisfactory efficiency of such noise devices. For the second and the third chosen noise barriers called respectively “sonic crystal assisted barrier” and “complex shaped earth berm”, we perform a parametric numerical and an optimization studies. The results show the capacity of such noise devices to reduce motorways and railways noises in urban areas and they lead to improved shapes of innovative noise barriers using natural means.

Tables des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	6
1.1. Phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur.....	7
1.1.1. Divergence géométrique	7
1.1.2. Absorption atmosphérique	7
1.1.3. Absorption par les matériaux	8
1.1.4. Diffraction par les obstacles.....	8
1.1.5. Effet de sol.....	9
1.1.5.1. Interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie	9
1.1.5.2. Impédance du sol	10
1.1.6. Effets météorologiques	13
1.2. Écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres.....	15
1.2.1. Introduction	15
1.2.2. Écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens naturels.....	16
1.2.2.1. Végétation.....	16
1.2.2.2. Cristaux soniques.....	18
1.2.2.3. Merlons acoustiques	20
1.2.2.4. Écrans antibruit en gabions.....	23
1.2.3. Écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens artificiels	24
1.3. Méthodes prévisionnelles appliquées aux écrans acoustiques	26
1.3.1. Méthodes fréquentielles.....	26
1.3.2. Méthodes temporelles.....	28
1.3.3. Méthodes géométriques	29
1.4. Méthodes expérimentales de l'évaluation de l'efficacité des écrans acoustiques	30
1.4.1. Mesures in-situ	30
1.4.2. Mesures sur modèle réduit	30
1.5. Algorithmes d'optimisation des écrans acoustiques	32
1.5.1. Optimisation mono-objectif	33

1.5.2. Optimisation multiobjectif.....	35
1.6. Conclusions du chapitre	37
 CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL	 38
2.1. Choix du modèle prévisionnel de propagation	39
2.2. Modèles d'impédance et de milieux poreux utilisés	44
2.3. Choix de la méthode expérimentale	44
2.4. Choix de la méthode d'optimisation.....	44
2.5. Configurations géométriques.....	48
2.6. Sources sonores et récepteurs	48
2.7. Spectres routiers et ferroviaires.....	50
2.8. Hauteurs des protections acoustiques.....	50
2.9. Choix des protections acoustiques innovantes à étudier.....	51
 CHAPITRE 3: EFFICACITÉ ACOUSTIQUE DE PROTECTIONS ANTIBRUIT EN GABIONS.....	 54
3.1. Évaluation expérimentale de la performance acoustique des protections antibruit en gabions	55
3.1.1. Mesures in-situ conformément à la norme CEN/TS 1793-5:2003.....	55
3.1.1.1. Principe de la mesure	55
3.1.1.2. Perte par réflexion de l'écran acoustique en gabions.....	57
3.1.1.3. Perte par transmission de l'écran acoustique en gabions	61
3.1.2. Mesures sur modèle réduit conformément à la norme CEN/TS 1793-5:2003	65
3.1.3. Nouvelle méthode de mesure in-situ adaptée aux écrans épais.....	67
3.1.3.1. Mesures de la perte par réflexion.....	70
3.1.3.2. Mesures de la perte par transmission	74
3.1.4. Conclusions	76
 3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur	 77

3.2.1.	Simulations numériques	78
3.2.1.1.	Modélisation des gabions	78
3.2.1.2.	Étude de sensibilité et distribution des incertitudes.....	80
3.2.1.3.	Résultats des simulations numériques	82
3.2.2.	Conclusions	89
3.3.	Conclusions du chapitre.....	90
 CHAPITRE 4: EFFICACITÉ ACOUSTIQUE DE PROTECTIONS		
ANTIBRUIT UTILISANT DES CRISTAUX SONIQUES.....		92
4.1.	Étude paramétrique de l'efficacité acoustique des cristaux soniques appliqués au	
bruit routier		93
4.1.1.	Perte acoustique par réflexion des cristaux soniques	95
4.1.2.	Perte acoustique par insertion des cristaux soniques.....	99
4.2.	Étude paramétrique de l'efficacité acoustique d'un écran innovant utilisant des	
cristaux soniques		102
4.2.1.	Conception d'un écran innovant utilisant des cristaux soniques	103
4.2.2.	Perte acoustique par diffraction du cristal sonique	105
4.2.3.	Perte acoustique par réflexion du cristal sonique	112
4.3.	Optimisation d'écrans innovants de faible hauteur utilisant des cristaux soniques.	115
4.3.1.	Position du problème	115
4.3.2.	Méthode de création de forme du cristal sonique	117
4.3.3.	Résultats d'optimisation	117
4.4.	Conclusions du chapitre.....	125
 CHAPITRE 5: EFFICACITÉ ACOUSTIQUE DE MERLONS ANTIBRUIT DE		
FORME COMPLEXE		128
5.1.	Étude paramétrique de l'efficacité des merlons acoustiques	129
5.1.1.	Merlons de faible hauteur	129
5.1.2.	Merlons de grande hauteur	133
5.1.2.1.	Effet de la forme du merlon.....	133
5.1.2.2.	Effets de la pente et de l'impédance de la surface du merlon.....	135
5.2.	Etude d'optimisation des merlons acoustiques.....	136

5.2.1.	Position du problème	136
5.2.2.	Optimisation des merlons de forme triangulaire	137
5.2.2.1.	Optimisation mono-objectif	137
5.2.2.2.	Optimisation multiobjectif	144
5.2.3.	Optimisation des merlons acoustiques ayant des irrégularités	147
5.2.4.	Optimisation des merlons acoustiques pour des remblais et des déblais	149
5.3.	Conclusions du chapitre	153
CONCLUSION		157
Références bibliographiques		163
Références personnelles		175
Annexe A : Validation de l'algorithme d'optimisation		177
Annexe B : Réponses impulsionnelles obtenues avec la nouvelle méthode de mesure in-situ		179
Annexe C : Code de calcul BEM : MICADO		183
Annexe D : Étude de convergence des simulations numériques d'écrans acoustiques en gabions		187

INTRODUCTION

La gestion du bruit environnemental est actuellement un enjeu majeur dans nos sociétés. Les nuisances sonores sont considérées par les populations comme une gêne importante en milieu urbain. En effet, environ 30 % des habitants en Europe se disent gênés par le bruit environnemental. La source de cette nuisance est en grande majorité due aux infrastructures de transports terrestres et notamment les infrastructures routières. Dans ce contexte, les nouvelles exigences réglementaires relatives au bruit des transports terrestres imposent des niveaux sonores maximaux admissibles de plus en plus faibles en milieu extérieur. Cet enjeu de société a trouvé un contexte législatif, notamment depuis la loi "bruit" n°92-1444 du 31 décembre 1992. Cette loi fournit un support légal encadrant la réduction des nuisances sonores et la définition de critères de qualité acoustique pour les bâtiments publics. Au niveau européen, la Directive 2002/49/CE (Directive-2002/49/CE, 2002) prévoit d'évaluer l'exposition aux bruits de l'environnement des riverains des grands axes routiers et ferroviaires, des industries et des grands aéroports ainsi que ceux des agglomérations de plus de 100 000 habitants, grâce à des cartographies du bruit permettant de définir ensuite des plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE) et des propositions de traitement des principales nuisances sonores.

Dans ce contexte, les merlons et les écrans acoustiques (ou antibruit) sont généralement utilisés pour réduire le bruit des transports terrestres. Ces protections modifient la propagation acoustique entre la source et le récepteur afin de parvenir à un niveau sonore acceptable au voisinage de l'infrastructure. Or les modèles d'ingénierie actuels, telle la NMPB-2008 en France, ne permettent que de modéliser des écrans traditionnels ou des merlons, d'une hauteur significative. Il semble donc important de pouvoir proposer des solutions antibruit innovantes basées sur des matériaux naturels tels que de la pierre, la terre, l'herbe, le bois, etc. Comme la réglementation actuelle concernant le bruit des transports terrestres est centrée sur les bâtiments, avec une évaluation des niveaux de pression acoustique en façades de ceux-ci, il nous paraît aussi crucial de pouvoir travailler à la recherche d'une meilleure qualité acous-

tique des chemins doux, à pied ou à vélo, et proposer des solutions antibruit innovantes de faible hauteur.

L'objectif de cette thèse est donc d'étudier la performance acoustique de protections antibruit innovantes utilisant des moyens naturels, en milieu urbain, périurbain ou rural, et de la comparer à celle de certaines protections conventionnelles. Pour ce faire, nous utilisons un code avancé de calcul numérique développé au CSTB basé sur la méthode des éléments finis de frontières. Ce code permet de mener des études paramétriques en choisissant des configurations bien définies. Un outil d'optimisation, développé dans cette thèse, a été utilisé de plus en couplage avec le code de calcul numérique pour effectuer une recherche systématique des solutions optimales et améliorées d'écrans antibruit utilisant des moyens naturels. Nous avons aussi effectué des mesures in-situ et à sur modèle réduit pour caractériser les performances de l'une des solutions antibruit étudiées dans cette thèse. Cette approche expérimentale permet d'étudier des problèmes tridimensionnels difficilement simulables par les codes numériques à cause du temps de calcul prohibitif.

Avant d'aborder l'étude des protections innovantes utilisant des moyens naturels dédiées aux transports terrestres, un certain nombre de questions sont posées. En effet, après la recherche et le choix des protections antibruit innovantes à étudier dans ce travail, nous nous interrogeons sur leur performance acoustique. Nous nous posons la question si ces protections innovantes répondent aux problèmes de nuisances sonores extérieures issues des infrastructures routières ou ferroviaires, notamment de savoir si elles ont une efficacité inférieure, égale, ou supérieure à celle d'écrans conventionnels. Généralement, les valeurs maximales d'efficacité atteintes par ces derniers sont autour de 15 dB(A) pour des écrans de grande hauteur (3 à 4 m) et autour de 5 dB(A) pour des écrans de faible hauteur (1 m). Une autre question liée à l'utilisation de ces protections innovantes doit être également abordée, notamment celle de savoir si les études à mener vont aboutir à des protections de formes réalistes pour des applications pratiques.

Cette thèse s'inscrit en outre dans le contexte du projet européen n° 234306 "HOSANNA" (Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means) du 7ème PCRD dont le CSTB assure la direction de deux des huit workpackages pour une durée de 3 ans et demi (octobre 2009- avril 2013). La participation à ce projet a permis d'inscrire ce travail de thèse dans une perspective plus large de contrôle du bruit urbain par des moyens naturels, et de profiter de la critique d'un réseau d'experts internationaux en propagation acoustique en milieu extérieur.

Cette thèse est divisée en cinq chapitres. Dans le premier chapitre de synthèse bibliographique, nous exposons tout d'abord les phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur en présence des protections acoustiques. Dans un deuxième temps, nous réalisons un état de l'art sur les principaux écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres, notamment les écrans de forme complexe utilisant des moyens naturels ou artificiels. Dans un troisième temps, nous analysons les principales méthodes numériques, expérimentales et d'optimisation, permettant d'étudier l'efficacité acoustique des protections antibruit, au regard de leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la méthodologie et les hypothèses de travail appliquées dans cette thèse. Les choix de la méthode numérique, de la méthode expérimentale et de l'algorithme d'optimisation sont justifiés dans ce chapitre. Trois protections antibruit innovantes, utilisant des moyens naturels, sont choisies afin d'en étudier la performance acoustique dans les chapitres suivants.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'efficacité acoustique de la première protection antibruit innovante, utilisant des moyens naturels, choisie dans le deuxième chapitre. Il s'agit d'une protection à base des gabions constitués des cages métalliques remplies de cailloux. La construction de la protection se fait par un simple empilement de ces cages. Dans cette recherche, nous réalisons dans un premier temps des mesures in-situ et sur modèle réduit, selon la norme européenne CEN/TS 1793-5, pour évaluer les propriétés acoustiques intrinsèques des écrans en gabions. Les résultats de ces mesures conduisent au développement d'une autre méthode de mesure in-situ plus appropriée aux écrans épais et hétérogènes tels que les écrans en gabions. Dans un deuxième temps, nous effectuons des simulations numériques, à l'aide du code de calcul basé sur la méthode des éléments finis de frontières, pour évaluer la perte par insertion des protections en gabions de faible hauteur.

Le quatrième chapitre concerne la deuxième protection choisie appelée "cristal sonore". Il s'agit d'une distribution des diffuseurs sous forme d'un réseau périodique. Dans un premier temps, nous réalisons une étude numérique paramétrique pour évaluer leur efficacité acoustique. Dans un deuxième temps, nous utilisons l'algorithme d'optimisation développé dans cette thèse en couplage avec le code de calcul numérique pour effectuer une recherche systématique des formes améliorées des cristaux sonores.

Le cinquième chapitre concerne la troisième protection choisie appelée "merlon acoustique" ou "butte de terre". Dans un premier temps, nous réalisons une étude numérique pour montrer l'influence de certains paramètres acoustiques et géométriques sur l'efficacité acous-

tique de ce type de protection. Dans un deuxième temps, nous optimisons, en utilisant la même approche d'optimisation utilisée dans le quatrième chapitre, les paramètres géométriques des merlons acoustiques.

Une conclusion générale de cette thèse dresse une synthèse globale des travaux réalisés. Les résultats d'efficacité de trois écrans acoustiques étudiés, utilisant des moyens naturels, sont récapitulés, montrant l'intérêt de l'utilisation et du développement de tels dispositifs antibruit pour l'amélioration du confort acoustique en milieu extérieur. Finalement, certaines perspectives de recherche future sont évoquées.

CHAPITRE 1: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

1.1. Phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur.....	7
1.1.1. Divergence géométrique	7
1.1.2. Absorption atmosphérique	7
1.1.3. Absorption par les matériaux	8
1.1.4. Diffraction par les obstacles.....	8
1.1.5. Effet de sol.....	9
1.1.6. Effets météorologiques	13
1.2. Écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres.....	15
1.2.1. Introduction	15
1.2.2. Écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens naturels.....	16
1.2.3. Écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens artificiels.....	24
1.3. Méthodes prévisionnelles appliquées aux écrans antibruit	26
1.3.1. Méthodes fréquentielles.....	26
1.3.2. Méthodes temporelles.....	28
1.3.3. Méthodes géométriques.....	29
1.4. Méthodes expérimentales de l'évaluation de l'efficacité des écrans acoustiques	30
1.4.1. Mesures in-situ.....	30
1.4.2. Mesures sur modèle réduit	30
1.5. Algorithmes d'optimisation des écrans acoustiques	32
1.5.1. Optimisation mono-objectif	33
1.5.2. Optimisation multiobjectif.....	35
1.6. Conclusions du chapitre	37

Dans ce chapitre, nous présenterons d’abord, dans le cadre de l’acoustique linéaire, les phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur. Ensuite, un état de l’art sur les principaux écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres est établi. La gamme de fréquences de bruit des transports terrestres étudiée est entre 50 et 4000 Hz. Enfin, une analyse des principales méthodes de propagation, de mesure et d’optimisation appliquées aux écrans acoustiques est exposée.

1.1. Phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur

La détermination du champ de pression acoustique derrière ou devant un écran acoustique dépend de plusieurs paramètres liés aux caractéristiques du milieu de propagation (atmosphère), aux conditions aux frontières (sol, diffraction), aux caractéristiques physiques de la source ainsi qu’à la configuration géométrique (position de la source et du récepteur, infrastructure de transport terrestre). Le niveau de pression L_p est donc calculé en considérant la somme des atténuations dues à la divergence géométrique Att_{div} , l’absorption de l’atmosphère et des matériaux Att_{abs} , la diffraction par les obstacles Att_{dif} , l’effet de sol Att_{sol} et l’atténuation due aux effets météorologiques Att_{meteo} [1]:

$$L_p = L_w - Att_{div} - Att_{abs} - Att_{dif} - Att_{sol} - Att_{meteo} \quad (1.1)$$

Où L_w est le niveau de puissance acoustique de la source sonore.

1.1.1. Divergence géométrique

Le premier phénomène intervenant dans la propagation en milieu extérieur est dû à la dispersion de l’énergie des ondes acoustiques en fonction de la distance de propagation ; on parle alors de la divergence géométrique. Pour une source ponctuelle, l’atténuation par divergence géométrique est de 6 dB par doublement de la distance. Lorsque la source est linéique, la diminution de niveau de pression est de 3 dB par doublement.

1.1.2. Absorption atmosphérique

L’absorption atmosphérique est un facteur influençant la propagation acoustique en milieu extérieur, surtout pour les longues distances de propagation. Elle englobe les effets de viscosité du fluide, la diffusion thermique et les échanges d’énergie entre les molécules.

Lorsque l’onde sonore traverse l’air, l’atténuation de pression acoustique est proportionnelle à la distance parcourue, au spectre de la source, à un coefficient dépendant de la fréquence, de la température de l’air et l’humidité relative [2].

L’absorption atmosphérique peut être négligée pour des distances inférieures à une centaine de mètres et pour des fréquences comprises entre une dizaine et quelques centaines

de Hz. D'autre part, lorsque les résultats sont donnés sous forme de perte par insertion, l'effet de l'absorption atmosphérique est alors d'autant plus négligeable. Le figure 1.1 présente la variation du coefficient d'absorption du son, pour l'air à 15°C et pour deux valeurs d'humidité relative, en fonction de la fréquence en tiers d'octave.

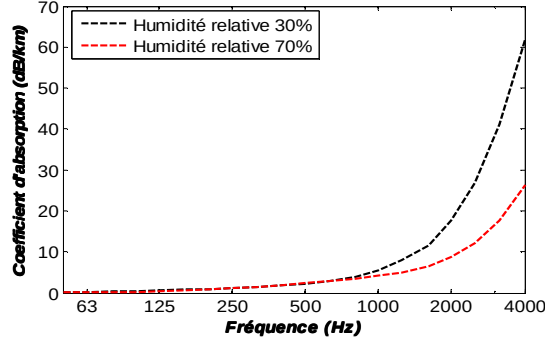


Figure 1.1. Variation de l'absorption atmosphérique en fonction de la fréquence pour deux valeurs d'humidité relative 30% et 70% à une température de 15° [2].

1.1.3. Absorption par les matériaux

L'absorption des matériaux est également un paramètre important. Les matériaux situés sur les surfaces qui bornent le domaine de propagation ont pour effet d'absorber une partie de l'énergie incidente. Un matériau absorbant isotrope peut être caractérisé par son impédance acoustique normalisée donnée par [3]:

$$Z_n = \frac{Z_1}{Z_0}, \quad (1.2)$$

où l'indice 0 est associé à l'air et l'indice 1 est associé au matériau. Quelques modèles donnant le paramètre Z_n sont présentés dans la section 1.1.5.

1.1.4. Diffraction par les obstacles

Les obstacles (écrans, bâtiments, merlons...) perturbent de façon sensible la propagation de l'onde sonore. Lorsqu'une onde incidente rencontre un obstacle, sa direction de propagation est changée. La diffraction est la capacité de l'onde à "contourner" cet obstacle (figure 1.2). Ce dernier agit comme un ensemble de sources secondaires qui diffusent l'énergie sonore autour de lui avec une directivité non uniforme. Le niveau de pression décroît derrière l'obstacle dans la zone d'ombre géométrique.

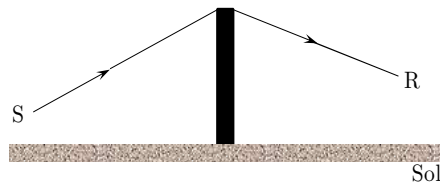


Figure 1.2. Diffraction par un écran droit entre une source S et un récepteur R. Le sommet agit comme une source secondaire et une partie de l'onde est diffractée derrière l'écran.

À l'aide de la théorie de Kirchhoff ce champ peut être déterminé par calcul d'une intégrale nécessitant la connaissance du champ sonore à la surface de l'obstacle. Il existe une autre méthode de calcul qui consiste à trouver une solution de l'équation de propagation du son satisfaisant les conditions aux limites sur l'obstacle comme dans la théorie de Sommerfeld. Cependant, ces solutions nécessitant le calcul d'intégrales difficiles à évaluer, d'autres méthodes telles que la TGD (Théorie Géométrique de la Diffraction), la méthode analytique basée sur les théories de l'optique géométrique ont été utilisées par la suite pour résoudre les problèmes de diffraction.

Le champ diffracté peut être déterminé de façon analytique pour un écran droit rigide. Pour un écran de forme géométrique complexe, il devient nécessaire d'utiliser d'autres méthodes plus appropriées comme les méthodes numériques.

1.1.5. Effet de sol

Dans cette section, nous présentons le phénomène d'interférence résultant de la réflexion sur un sol plat rigide. Ensuite, nous montrons brièvement, dans le cas de surfaces non-rigides, les principaux modèles d'impédance acoustique.

1.1.5.1. Interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie

Lorsqu'à la fois la source et le récepteur sont au-dessus du sol plan, un changement de phase se produit en raison de la différence de marche entre l'onde directe et l'onde réfléchie. À ce changement de phase s'ajoute un changement dû aux caractéristiques du sol (figure 1.3).

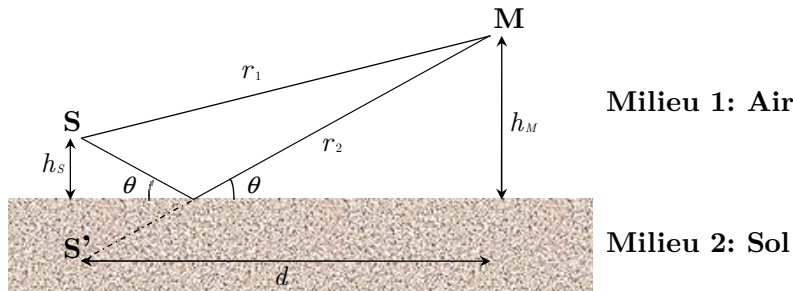


Figure 1.3. Trajets de l'onde directe (r_1) et de l'onde réfléchie (r_2) sur une surface plane de sol. h_s et h_M sont respectivement les hauteurs de la source et du récepteur et θ est l'angle d'incidence.

Dans le cas d'une surface acoustiquement rigide, l'effet de la différence de marche entre l'onde incidente et l'onde réfléchie réduit l'intensité acoustique au niveau du récepteur pour une différence de marche égale à un nombre impair de demi-longueurs d'onde. Un exemple tiré de l'article d'Embleton [4] illustrant le phénomène d'interférence est présenté en figure 1.4. Il montre le changement de niveau de pression relative (atténuation excédentaire) en fonction de la fréquence dans le cas d'un sol rigide (bitume) pour différentes hauteurs de la source. À une certaine fréquence, la différence de marche entre le rayon direct et le rayon

réfléchi atteint une demi-longueur d'onde avec une différence de phase de 180° . Dans ce cas l'interférence est destructive et les minima d'interférences sont observés à 3.2, 1.6 et 0.8 kHz pour des sources situées à 0.3, 0.6, et 1.2 m au-dessus de la surface du sol, respectivement. Les autres minimums d'interférences pour le dernier cas sont dus à des différences de marche de $3/2$ et $5/2$ longueurs d'onde.

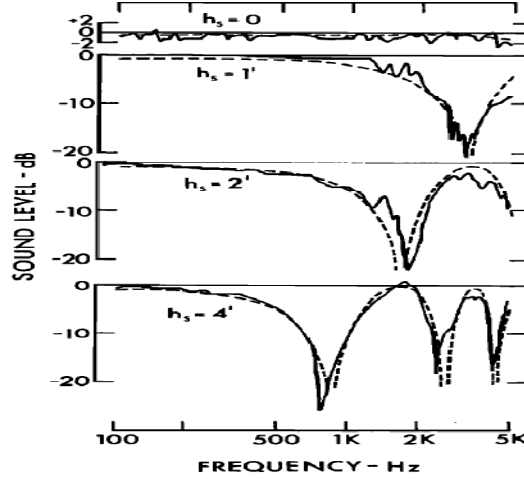


Figure 1.4. Niveau de pression relative mesuré (traits continus) et calculé (traits pointillés) à 15,2 m de la source et à 1,2 m au dessus d'un sol réfléchissant (bitume). Résultats pour quatre hauteurs différentes h_s de la source : 0; 0,3; 0,6 et 1,2 m [4].

1.1.5.2. Impédance du sol

Pour une onde plane, le coefficient de réflexion R_p dépend de l'angle de l'onde d'incidente θ et du rapport entre l'impédance de l'air $Z_1 = \rho c$ (ρ est la masse volumique de l'air et c est la célérité du son dans l'air) et l'impédance du sol Z_2 :

$$R_p = \frac{\sin(\theta) - Z_1 / Z_2}{\sin(\theta) + Z_1 / Z_2} \quad (1.3)$$

Dans le cas d'une surface à réaction localisée, une hypothèse qui a été validée pour la plupart des surfaces rencontrées dans les applications de propagation acoustique en milieu extérieur [5,6], les caractéristiques acoustiques du sol peuvent être représentées par son impédance acoustique Z . Une surface à réaction localisée désigne le fait que l'impédance et le coefficient de réflexion du sol sont indépendants de l'angle d'incidence de l'onde sonore, mais dépendent de la fréquence.

Différents modèles prévisionnels de l'impédance du sol ont été développés au cours des dernières décennies. Un premier modèle d'impédance a été développé par Delany et Bazley [7] en 1970 pour des matériaux fibreux et a montré son efficacité pour modéliser un sol naturel absorbant. Il utilise un seul paramètre caractéristique qui est la résistivité au passage de l'air σ . La résistivité au passage de l'air et la porosité sont les deux paramètres les plus significatifs pour caractériser le sol, ainsi ces deux paramètres peuvent être combinés dans un seul

paramètre appelé résistance effective au passage de l'air σ (en kPa.s.m⁻²). L'expression de l'impédance acoustique normalisée complexe Z d'une telle surface pour une fréquence f est donnée par l'égalité suivante :

$$Z = 1 + 0,05 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} + i0,077 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73} \quad (1.4)$$

Le modèle de Delany et Bazley est approprié pour modéliser les sols herbeux ou les surfaces routières réfléchissantes. Cependant, il devient très limité pour modéliser des surfaces plus poreuses telles que celles de sols forestiers, du bitume poreux et du gravier [6].

Pour un modèle à deux paramètres, la surface du sol est considérée comme une surface absorbante d'épaisseur d reposant sur un fond réfléchissant pour laquelle l'impédance normale de surface $Z(d)$ est donnée par [8]:

$$Z(d) = Z \coth \left(-ik_b \left(\omega / c_0 \right) d \right) \quad (1.5)$$

où d est le deuxième paramètre de ce modèle, c_0 est la célérité du son dans l'air, $\omega = 2\pi f$ et k_b est le nombre d'onde normalisé donné par :

$$k_b = 1 + 0,0978 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,693} + i0,077 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} \quad (1.6)$$

Le modèle de Zwikker et Kosten [9] à trois paramètres provient des équations acoustiques linéarisées pour une onde plane se propageant dans un matériau absorbant d'épaisseur d reposant sur un fond réfléchissant. L'impédance caractéristique Z_c dans ce cas est définie par :

$$Z_c = \frac{\rho c_0}{\Omega_0} \sqrt{T + i \frac{\Omega_0 \sigma}{\rho \omega}} \quad (1.7)$$

où T est la tortuosité et Ω_0 est la porosité.

Le modèle de Zwikker et Kosten est approprié pour modéliser les sols naturels (sol herbeux, sol de forêt), les surfaces de chaussée poreuses et les ballasts de voies ferrées [6]. Ce modèle a été transformé par Taraldsen en un modèle à un seul paramètre [10]. Dans ce dernier, l'admittance ($Y = 1 / Z_c$) est donnée par :

$$Y = \sqrt{\gamma} \frac{\Omega_0}{T} \left(1 + \frac{f'}{f} \right)^{-1/2} \quad (1.8)$$

avec

$$f' = \frac{1}{2\pi\rho} \frac{\Omega_0}{T} \sigma \quad (1.9)$$

$$\frac{\Omega_0}{T} = 100 \left(10^{\frac{x}{10}} \right) \quad (1.10)$$

$$x = \frac{1}{19,76} \left[-U + 404,55 + \sqrt{546,166 + (9,35 - U)^2} \right] \quad (1.11)$$

$$U = 10 \log(\sigma) \quad (1.12)$$

Il existe d'autres modèles à trois paramètres tels que le modèle des pores tortueux identiques [5] (Résistivité au passage de l'air, porosité et tortuosité) et le modèle de Hamet [11] (Résistivité au passage de l'air, porosité et facteur de structure). Ce dernier modèle est une forme modifiée du modèle de Zwikker et Kosten (qui assume des conditions adiabatiques dans les pores). Il est approprié pour modéliser les surfaces de chaussée poreuses [6]. L'impédance acoustique dans ce modèle est donnée par :

$$Z_c = \frac{1}{\Omega_0} \left(\frac{T}{\gamma} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \left(\frac{1}{F_0} \right)^{1/2} \right) F_\mu^{1/2} \quad (1.13)$$

avec $F_\mu = 1 + (i\omega_\mu / \omega)$, $F_0 = 1 + (i\omega_0 / \omega)$, $\omega_\mu = (\sigma / \rho)(\Omega_0 / T)$, $\omega_0 = \omega_\mu(\Omega_0 / p_r)$ et p_r est le nombre de Prandtl pour l'air.

Dans un autre modèle plus sophistiqué, quatre paramètres sont nécessaires pour décrire l'impédance du sol : facteur de structure k , porosité Ω_0 , résistance au passage de l'air σ et un paramètre t associé au fait que la compression au sein des pores n'a lieu ni adiabaticquement ni isothermiquement. L'impédance normale normalisée de la surface est exprimée par [5]:

$$Z = (t\Omega_0)^{1/2} \left(k - \frac{i\sigma}{\rho\omega} \right)^{1/2} \quad (1.14)$$

où ρ est la densité de l'air et $1 < t(w) < 1.4$.

Il existe d'autres modèles plus complexes à quatre paramètres tels que le modèle d'Attenborough [12] utilisant les paramètres suivants: résistivité au passage de l'air, porosité, tortuosité et facteur de forme de pore.

Le modèle de relaxation de Wilson [13] est aussi un modèle à quatre paramètres dans lequel la diffusion thermique et visqueuse dans un matériau poreux est décrite par un processus de relaxation. Ce modèle introduit les paramètres suivants : temps de relaxation thermique, temps de relaxation visqueuse pour les basses et les hautes fréquences. Pour un matériau poreux dans lequel la section des pores est constante, l'impédance acoustique Z est donnée par :

$$Z = \frac{\sqrt{T}}{\Omega_0} \left[\left(1 + \frac{\gamma-1}{(1-iw\tau_e)^{1/2}} \right) \left(1 - \frac{1}{(1-iw\tau_v)^{1/2}} \right) \right]^{-1/2} \quad (1.15)$$

où τ_e et τ_v sont les temps caractéristiques thermodynamique et aérodynamique respectivement. Lorsque la section des pores varie, $(1-iw\tau_e)^{1/2}$ et $(1-iw\tau_v)^{1/2}$ sont remplacés par : $1 + (\tau_h / \tau_l) \left((1-iw\tau_l / \tau_h)^{1/2} - 1 \right)^{1/2}$ où τ_h et τ_l représentent τ_e et τ_v aux hautes et basses fréquences.

Enfin, il existe d'autres modèles plus complexes à cinq paramètres ou plus. Par exemple, le modèle de Johnson-Allard [14] est un modèle à cinq paramètres : résistivité au passage de

l'air, porosité, tortuosité, longueur caractéristique visqueuse et longueur caractéristique thermique. Ce modèle est approprié pour des formes arbitraires des pores et pour des sections des pores qui varient avec les longueurs des pores.

Il est à noter que certaines approximations sont utilisées afin de réduire le nombre de paramètres des modèles d'impédance développés. Pour les modèles de Hamet, Zwiker et Kosten et Wilson, le nombre de paramètres peut être réduit à deux paramètres effectifs. Par exemple, pour le modèle de Zwiker et Kosten, ces deux paramètres sont $\Omega_e = \Omega_0 / \sqrt{T}$ et $\sigma_e = \sigma / \sqrt{T}$. La nouvelle expression de l'impédance caractéristique Z_c est donnée par :

$$Z_c = \frac{\rho c_0}{\Omega_e} \sqrt{1 + i \frac{\Omega_e \sigma_e}{\rho \omega}} \quad (1.16)$$

1.1.6. Effets météorologiques

Les effets météorologiques, principalement les gradients de température et de vitesse du vent, perturbent la propagation acoustique à longue distance en présence des protections acoustiques. Ces effets sont d'autant plus importants que la source sonore et le récepteur sont proches du sol. Le changement de la direction de propagation des ondes acoustiques est le résultat du phénomène de réfraction. Ce dernier provient d'un effet thermique et/ou d'un effet aérodynamique. Pour le premier effet, la température varie en fonction de l'altitude à cause de l'échange de chaleur entre le sol et les basses couches de l'atmosphère provoquant un changement de la vitesse du son qui est proportionnelle à la racine carrée de la température absolue. Pour le deuxième effet, la vitesse du vent augmente avec l'altitude à cause de la rugosité du sol. On distingue trois cas de propagation : la propagation du son en présence d'un gradient vertical de vitesse du son négatif, positif ou nul [15].

- Cas d'un gradient vertical de vitesse du son négatif : pour un gradient de température négatif, la température décroît avec la hauteur au-dessus du sol. Ce phénomène se produit pendant la journée lorsque le soleil chauffe les couches de l'atmosphère proches du sol. Dans ce cas, la température de l'air au voisinage du sol est plus élevée qu'en hauteur. Pour un gradient de vitesse du vent négatif, le vent souffle en direction opposée à la direction de propagation du son, la vitesse du vent est soustraite à celle de la vitesse du son en atmosphère homogène. La vitesse du son dans les deux cas diminue avec la hauteur au-dessus du sol et les rayons acoustiques sont, par conséquence, réfractés vers le haut. L'efficacité de l'écran acoustique en présence d'un gradient négatif augmente pour des grandes distances de propagation et l'effet de sol est fortement augmenté puisque les ondes acoustiques deviennent rasantes. Une zone d'ombre peut être créée où aucun rayon acoustique ne peut se propager (figure 1.5).

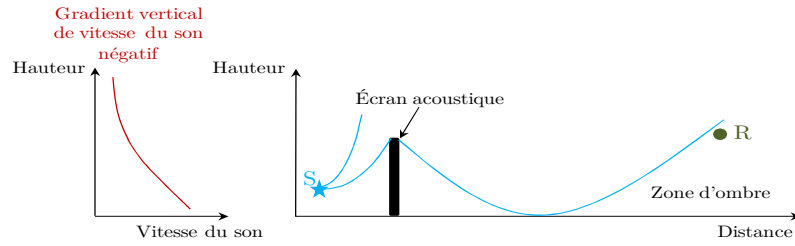


Figure 1.5. Propagation acoustique en présence d'un écran antibruit (à droite) dans le cas d'un gradient vertical de vitesse du son négatif (à gauche).

- Cas d'un gradient vertical de vitesse du son positif : pour un gradient de température positif, la température croît avec la hauteur. Ce phénomène se produit pendant la nuit lorsque le ciel est dégagé. Les basses couches de l'atmosphère proches du sol deviennent plus froides que les couches supérieures. Pour un gradient de vent positif, le vent souffle dans la même direction de propagation du son, la vitesse du son du vent est ajoutée à celle de la vitesse du son en atmosphère homogène. La vitesse du son dans les deux cas augmente avec la hauteur et les rayons acoustiques sont réfractés vers le bas en se réfléchissant une ou plusieurs fois sur le sol. Le nombre de réflexions dépend des hauteurs de la source et du récepteur par rapport au sol ainsi que de la distance de propagation. Par conséquent, l'écran acoustique en présence d'un gradient positif est moins efficace pour des grandes distances de propagation lorsque l'effet de sol est diminué et l'énergie acoustique est renforcée à cause de la multiréflexion sur le sol (figure 1.6).

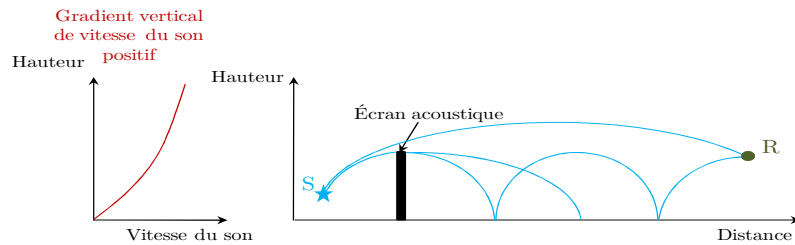


Figure 1.6. Propagation acoustique en présence d'un écran antibruit (à droite) dans le cas d'un gradient vertical de vitesse du son positif (à gauche).

- Cas d'un gradient vertical de vitesse du son nul (vitesse du son constante) : ceci est rencontré dans deux situations : soit lorsque la vitesse de vent est nulle et la température est constante en fonction de l'altitude, ce qui se produit au lever et au coucher du soleil ou lorsque les effets thermiques et aérodynamiques se compensent, c'est le cas pour un ciel dégagé avec présence d'un vent opposé à la direction de propagation du son ou encore pour une journée ensoleillée avec présence d'un vent portant (figure 1.7). Toutefois, cette compensation ne peut se faire que dans des cas rares et pour certaines altitudes.

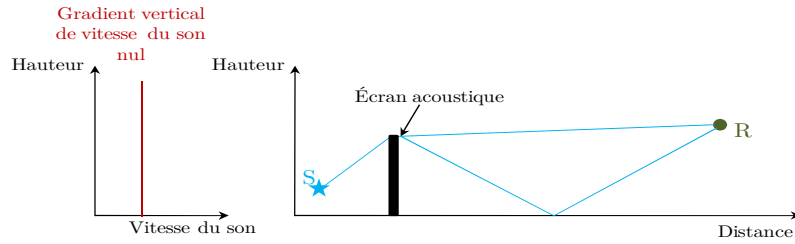


Figure 1.7. Propagation acoustique en présence d'un écran antibruit (à droite) dans le cas d'un gradient vertical de vitesse du son nul (à gauche).

La vitesse du son peut être modifiée aussi d'une façon aléatoire et pendant des courtes périodes à cause de la turbulence. Cette dernière est prise en compte sous deux formes : la turbulence cinématique et la turbulence thermique. La turbulence cinématique est due à la rugosité du terrain et les obstacles. Elle cause des perturbations donnant naissance à des tourbillons dont la durée caractéristique est de l'ordre de la seconde et l'échelle spatiale de l'ordre du mètre. La turbulence thermique est créée par les changements de température entre les différentes altitudes de l'atmosphère. Elle a une durée caractéristique de l'ordre de 30 secondes à 15 minutes et une échelle spatiale de 200 à 15000 mètres [16].

Les effets météorologiques sont négligés dans ce travail. Cette hypothèse est acceptable puisque les distances considérées dans la suite de ce travail sont inférieures à une centaine de mètres.

1.2. Écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres

1.2.1. Introduction

Actuellement, de nombreux écrans acoustiques existent pour protéger les riverains et les habitants le long des axes routiers et des voies ferrées. Ils ont pour objectif de modifier le chemin de propagation de l'onde sonore afin de réduire le niveau de pression acoustique au niveau du récepteur. Plusieurs travaux de recherche sur l'efficacité acoustique des écrans antibruit ont été réalisés pendant les dernières décennies. Les premiers écrans proposés sont des écrans droits réfléchissants ou absorbants dotés d'un seul bord diffractant [17-21]. Le matériau absorbant (laine de verre, mousse de plastique ou de caoutchouc, béton poreux...) a pour effet de réduire le champ réfléchi sur l'écran, et notamment dans le cas de multiréflexions entre celui-ci et la caisse des véhicules (tramway, train). Si ce matériau est placé en tête de l'écran (couronnement), il a pour effet de réduire, au moment de la diffraction vers le récepteur, le niveau de pression de l'onde acoustique.

La position et la hauteur de l'écran droit, sont des paramètres importants pour estimer sa performance. L'épaisseur de l'écran présente aussi un autre paramètre qui peut influencer son efficacité lorsque le matériau de construction est non rigide. Par exemple, Jean [22] a montré que des écrans en bois ou des écrans transparents en verre ou en plastique, de faible épaisseur

(1 cm), ont une efficacité plus faible qu'un écran rigide de même épaisseur. Cela est dû au comportement vibratoire de telles protections provoquant un transfert de l'énergie acoustique et par suite une augmentation de niveau de pression derrière l'écran pour certaines basses fréquences.

Pour des raisons pratiques et esthétiques, la construction des écrans avec une hauteur très importante dans un milieu urbain n'est pas appropriée. Ainsi, pour améliorer l'efficacité des écrans, il est nécessaire de chercher des nouvelles méthodes et de concevoir des nouvelles formes pour essayer d'améliorer la performance d'un écran acoustique sans engendrer une augmentation de sa hauteur. Par exemple, cela peut se produire par inclinaison de l'écran acoustique jusqu'à une quinzaine de degrés sans changer sa forme [23, 24, 25]. L'inclinaison dans ce cas permet de rediriger une partie de l'énergie acoustique soit vers le sol lorsque l'écran est incliné vers la source ou vers le ciel lorsqu'il est incliné vers le récepteur. L'inclinaison vers la source permet d'augmenter faiblement son efficacité en diffraction puisque le bord diffractant est rapproché de la source. L'inclinaison de l'écran vers le récepteur permet aussi d'augmenter sa perte par réflexion. Les écrans inclinés présentent aussi l'avantage de réduire l'effet de la multiréflexion qui se produit entre deux écrans droits installés en parallèle des deux côtés de la route.

D'autres solutions de réduction de bruit du transport terrestre ont été envisagées en concevant des écrans acoustiques de forme complexe. La notion de complexité englobe la variation de la forme permettant d'augmenter l'effet de la diffraction et la variation des matériaux utilisés afin d'absorber une partie de l'énergie acoustique. On peut distinguer dans ce cas, les protections de forme complexe utilisant des moyens naturels ou des moyens artificiels.

1.2.2. Écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens naturels

Dans cette partie on distingue quatre types d'écrans acoustiques: végétation, cristaux soniques, merlons et gabions.

1.2.2.1. Végétation

L'effet d'une bande ou d'une forêt d'arbres sur la propagation des ondes acoustiques a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. La végétation est capable de réduire le niveau sonore de trois façons :

Premièrement, les niveaux sonores peuvent être réduits par interférence destructive des ondes acoustiques. Ce mécanisme est principalement causé par la présence de la surface du sol, conduisant à ce qu'on appelle « effet de sol » [26].

Deuxièmement, un mécanisme d'absorption est causé par la végétation. Cet effet peut être attribué aux vibrations mécaniques des éléments de l'arbre (branches et feuilles) à cause

des ondes acoustiques. Différentes études théoriques et expérimentales de l'effet d'absorption ont fait l'objet de plusieurs publications [27-34]. Elles ont montré que la contribution des feuilles et des branches à l'atténuation des nuisances sonores, principalement par dissipation de l'énergie acoustique sous forme de chaleur, est seulement importante aux hautes fréquences lorsque la longueur d'onde est petite devant le rayon de ces éléments.

Troisièmement, les ondes sonores peuvent être réfléchies ou diffusées par les éléments des arbres comme les troncs, les branches et les feuilles. Les effets de la diffusion et de la réflexion dépendent du nombre d'obstacles diffusants (troncs, branches, feuilles...), de leur taille et de leur composition organique. Ils sont observés principalement quand la dimension de l'objet diffusant est voisine de la longueur d'onde acoustique [35-40].

Dans cette thèse, on s'intéresse au bruit du transport terrestre présentant un spectre riche en basses et moyennes fréquences. Par conséquent, l'effet d'absorption par la végétation ne sera pas étudié dans la suite de notre travail. Concernant l'effet de diffusion, ce sont les troncs qui ont une dimension proche de la longueur d'onde. L'effet de la diffusion par les troncs peut être étudié théoriquement en utilisant des formes simples telles que des cylindres.

Les principaux modèles qui ont été utilisés pour décrire la diffusion par les troncs sont l'approche stochastique développée par Kuttruff [35] reprise par Huisman [36] et l'approche analytique de Twersky [37] reprise par Embleton [38] et Price [39]. Le premier modèle consiste à utiliser un point source émettant une impulsion de particules sonores avec une énergie unitaire dans le plan perpendiculaire aux troncs contenant la source et le récepteur, l'énergie diffusée est obtenue en intégrant la densité des particules qui arrivent aux alentours du récepteur. Cette approche permet d'introduire l'effet d'absorption par l'air en ajoutant une atténuation supplémentaire qui dépend du trajet parcouru (3 dB par doublement de distance). Le deuxième modèle consiste à évaluer analytiquement l'énergie moyenne diffusée par une bande infinie de largeur d des cylindres infiniment longs et parallèles entre eux. Le champ total est calculé comme étant la somme de l'onde plane incidente et du champ diffusé sans tenir compte de la multi-diffusion entre les cylindres. Cette théorie ne permet d'obtenir que l'énergie de la moyenne au carré du champ sonore transmis au lieu de la moyenne quadratique de l'énergie transmise qui est la seule grandeur intéressante. Cette hypothèse néglige la diffusion incohérente entre les cylindres en introduisant une erreur qui a été estimée de manière empirique par Price [39] en comparant ce modèle avec une succession de mesures sur des modèles réduits. Dans le même contexte, Barrière [40] a développé un modèle modal de diffusion basé sur les deux modèles de Twersky et de Felbacq [41]. Le modèle acoustique de diffusion multiple élaboré par Twersky considère une configuration arbitraire de cylindres parallèles pour une onde plane incidente. Le champ incident sur un cylindre est la somme du champ direct et du champ diffusé par les autres cylindres. Cette technique met en évidence

les différents ordres de diffusion qui apparaissent lors de la propagation sonore à travers une rangée de cylindres.

Le modèle optique de diffusion de Felbacp considère un nombre fini de cylindres parallèles et de dimensions aléatoires, éclairés par une onde plane électromagnétique. Le champ total est exprimé comme la somme du champ incident global et le champ diffusé. Ce modèle considère une matrice de diffusion afin d'obtenir un système d'équations linéaires à résoudre.

Pour les deux dernières théories, le calcul de champ total est basé sur le développement de l'onde incidente comme une somme des fonctions cylindriques de Bessel de premier ordre et le développement des ondes diffusées comme une somme des fonctions cylindriques de Hankel.

Barrière [42] a développé un modèle basé sur la méthode de l'équation parabolique en trois dimensions pour calculer l'atténuation acoustique due à une forêt de dimensions finies. L'effet de la diffusion, les effets de sol et les effets météorologiques ont été inclus dans le modèle numérique.

Ces derniers modèles ont montré que l'efficacité d'une bande d'arbres à réduire les nuisances sonores dues au trafic routier est limitée. Cela est dû principalement à la faible perte par transmission de l'énergie acoustique à travers la bande de végétation à cause de l'espacement important entre les arbres.

1.2.2.2. Cristaux soniques

D'autres écrans, constitués de cylindres parallèles, forment la famille des "cristaux soniques". L'étude de leur performance acoustique a été l'objectif de certaines publications dans la dernière décennie [43-55]. Les cristaux soniques (sonic crystals en anglais : SC) présentent un cas particulier des cristaux phononiques (phononic crystals en anglais : PC). Les cristaux phononiques sont des structures périodiques composées des matériaux de propriétés élastiques distinctes. Les cristaux soniques sont des milieux inhomogènes comme les cristaux phononiques, mais avec l'un de ses matériaux étant un fluide (figure 1.8). L'absence des modes propagatifs des ondes acoustiques pour de telles structures, dans une gamme de fréquences donnée, est qualifiée de bande interdite (band gap en anglais : BG). Cela présente le principal avantage de telles structures. Les bandes passantes et les bandes interdites sont une conséquence de la diffusion multiple des ondes dans la structure périodique. La fréquence centrale de la bande interdite f_{BG} est déterminée par la constante du réseau β des diffuseurs qui présente la distance entre deux diffuseurs adjacents [55]:

$$f_{BG} = \frac{c}{2\beta} \quad (1.17)$$



Figure 1.8. Arrangement périodique des diffuseurs (cylindres) dans un cristal sonore.

Trois paramètres jouent un rôle important dans la création de la bande interdite. Le premier paramètre est le rapport de densité $M = \rho / \rho_0$ où ρ est la densité du matériau qui constitue les diffuseurs et ρ_0 est la densité de l'air. Le deuxième paramètre est le facteur de remplissage (filling factor en anglais: ff) qui exprime le rapport entre le volume occupé par les diffuseurs V_D et le volume total V :

$$ff = \frac{V_D}{V} = \frac{\pi d^2}{4\beta^2} \quad (1.18)$$

où d est le diamètre des diffuseurs. Le troisième paramètre est la topologie utilisée pour la conception du cristal sonore.

Nous citons dans ce paragraphe quelques exemples d'études réalisées pour étudier l'efficacité acoustique des cristaux soniques. Sánchez-Pérez et al. [43] sont parmi les premiers qui ont étudié l'efficacité de ces structures périodiques utilisées comme des écrans acoustiques. Il a montré qu'un arrangement bidimensionnel de cylindres creux ou pleins dans l'air, avec un petit nombre d'éléments, peut produire des valeurs significatives d'atténuation acoustique dans une gamme de fréquence bien déterminée. Vasseur et al. [44] ont montré théoriquement et expérimentalement que des cylindres creux ou pleins contribuent à la même perte par insertion. Ceci se produit pour des longueurs d'onde acoustiques qui sont plus grandes que le diamètre des cylindres.

Pour avoir une bande interdite indépendante de la direction de propagation (bande interdite totale), certaines études d'optimisation des cristaux soniques ont été effectuées afin de chercher des distributions des cylindres améliorées [45,46]. Romero-García et al. [47] ont utilisé un algorithme d'optimisation génétique couplé avec un modèle de diffusion multiple. Ils ont montré que la création de certaines zones de vide à l'intérieur du réseau de diffuseurs rigides peut améliorer l'efficacité du cristal sonore autour d'une fréquence bien déterminée. Le remplissage des zones vides créées par des cylindres absorbants permet d'élargir la gamme de fréquences atténuées par le cristal sonore. Dans le même contexte, Sánchez-Pérez et al. [48] ont proposé des géométries fractales formées par des réseaux des cylindres dont la même distribution périodique se répète dans une échelle géométrique de plus en plus petite. Cela permet d'élargir la gamme de fréquences atténuées du cristal par sommation des pics d'atténuation dus aux différents réseaux périodiques.

La performance acoustique d'un cristal sonique peut être améliorée aussi en variant les propriétés physiques des diffuseurs en les rendant absorbants [49, 50] ou des résonateurs acoustiques [51, 52, 53]. Dans le premier cas, où les diffuseurs sont absorbants, les mécanismes de création des bandes interdites sont la réflexion et l'absorption des ondes acoustiques. Dans le deuxième cas, où les éléments constituant le cristal sonique sont des cavités résonantes, il est possible d'atténuer le champ de pression acoustique dans une bande de fréquences au-dessous de la bande interdite. Romero-García et al [54] ont étudié théoriquement et expérimentalement la performance acoustique des cristaux soniques constitués des cylindres creux et perforés. Ils ont montré que la périodicité des perforations dans l'axe perpendiculaire au plan du cristal introduit une atténuation dans une bande de fréquences au-dessous de la bande interdite. La position de cette bande dans la gamme de fréquences dépend de la taille de la cavité intérieure, du rayon de la perforation ainsi que de la distance entre les perforations. Le remplissage des cylindres par un matériau absorbant permet d'avoir une bande de fréquences interdites totale avec une conservation de la bande atténuée due aux perforations.

Dans la plupart des études précédentes, l'efficacité des cristaux soniques a été évaluée par rapport au champ libre. Cependant, l'inclusion de l'effet de sol est indispensable pour représenter le cas réel des écrans acoustiques. Pour cela, Boon Chong et al. [55] ont étudié, dans le cas d'un réseau de cylindres rigides, l'influence de la présence d'un sol réfléchissant sur la création des bandes interdites. Ils ont montré que l'amplitude de ces bandes devient très réduite lorsqu'elles coïncident avec les minimums d'atténuation dus à l'effet du sol.

Le principal avantage des cristaux soniques est donc l'existence d'une bande de fréquences interdites liée à la conception périodique des diffuseurs. Cette propriété intéressante offre aux cristaux soniques la possibilité du contrôle de la propagation des ondes acoustiques et permet par suite d'envisager de nombreuses applications dans le domaine de propagation acoustique en milieu extérieur. L'élargissement de la gamme de fréquences atténuées peut être obtenu par changement des propriétés acoustiques des diffuseurs ou par optimisation de l'arrangement des diffuseurs dans le cristal sonique. D'un point de vue esthétique, les cristaux soniques offrent une meilleure intégration visuelle que les écrans conventionnels grâce à leur semi-transparence optique.

1.2.2.3. Merlons acoustiques

Les merlons acoustiques (ou buttes de terre) assurent un affaiblissement en transmission élevé et permettent d'éviter le problème de réflexion vers la source grâce à la pente de ses surfaces absorbantes face à la source sonore. L'efficacité en diffraction et en réflexion d'un merlon acoustique dépend essentiellement de certains paramètres : forme, hauteur, couverture de la surface et distances à l'infrastructure de transport terrestre et au récepteur.

L'efficacité en diffraction d'un merlon en terre d'une hauteur h est équivalente à celle d'un écran vertical équivalent d'une hauteur $h-u$ situé au point où commence la butte de terre (figure 1.9). La différence u dépend de la position du sommet A. Par conséquent, le merlon acoustique est moins efficace dans ce cas que l'écran droit conventionnel.

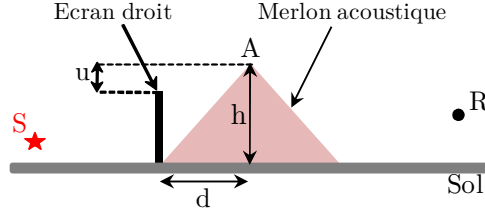


Figure 1.9. Écran droit et merlon acoustique ayant une efficacité en diffraction équivalente.

La pente ($P=h/d$) et le couvrement des surfaces d'un merlon acoustique sont deux facteurs qui influent sur sa performance acoustique. Dans le cas d'une terre compacte, peu absorbante, la performance acoustique du merlon est proportionnelle à sa pente. Dans le cas d'une végétalisation suffisante de sa surface, le merlon de forte pente montre une atténuation par diffraction plus importante mais n'offre pas alors la possibilité, dans le cas d'une source suffisamment proche, d'atténuation par propagation rampante. A contrario, un merlon végétalisé de faible pente pourra entraîner une atténuation significative due à la présence d'une onde rampante sur sa surface mais aura alors une faible performance acoustique en diffraction [56]. En effet, le pouvoir d'absorption augmente avec le degré de porosité des surfaces, la végétalisation des surfaces permet d'augmenter leur porosité par l'intermédiaire des racines qui se répandent à l'intérieur de la terre. Ainsi, deux phénomènes d'atténuation sont présents mais leur impact respectif sur la performance globale du merlon végétalisé est généralement en opposition.

Pour calculer le champ diffracté par un merlon acoustique, on a recours à des modèles simples tels que ceux qui sont utilisés pour calculer le champ diffracté par un dièdre ou un trièdre. Dans ce cas, Kouyoumjan et Pathak [57] ont étendu la théorie géométrique de la diffraction (TGD) à des dièdres réfléchissants. Le nombre de Fresnel est utilisé comme paramètre de diffraction. Il est donné par :

$$N = \text{sign}(a) \frac{\delta}{\lambda / 2} \quad (1.19)$$

où a est la hauteur de l'écran par rapport à la ligne de vue S-R, δ est la différence de marche et λ est la longueur d'onde. L'expression du champ total prend trois formes différentes en fonction de l'emplacement du point récepteur. Dans ce cas, trois régions sont séparées par la limite du champ direct (LCD) et la limite du champ réfléchi sur l'écran côté source (LCR) (figure 1.10). Si ϕ_0 , ϕ_{ref} et ϕ_{dif} sont respectivement le champ direct, le champ réfléchi sur la face côté source et le champ diffracté, le champ total ϕ_{tot} est déterminé par :

$$\begin{aligned}
 \phi_{tot} &= \phi_{dif} && \text{en région 1} \\
 \phi_{tot} &= \phi_{dif} + \phi_0 && \text{en région 2 + LCD} \\
 \phi_{tot} &= \phi_{dif} + \phi_0 + \phi_{ref} && \text{en région 3 + LCR}
 \end{aligned} \tag{1.20}$$

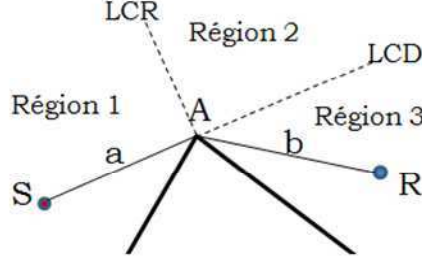


Figure 1.10. Différentes régions de l'espace, pour la solution TGD d'un dièdre, séparées par la limite du champ direct (LCD) et la limite du champ réfléchi sur l'écran (LCR) [57].

Le champ diffracté par l'obstacle s'écrit comme le produit de quatre termes :

$$\phi_{dif} = G \phi_i e^{jkb} D \tag{1.21}$$

où $G = \sqrt{a / b(a + b)}$ est le facteur de divergence géométrique pour une source ponctuelle, $\phi_i = e^{jka} / a$ est le champ incident sur l'arête du dièdre, e^{jkb} est le facteur de phase associé au trajet AR et D est le coefficient de diffraction et dépend du type de la source et de la forme d'obstacle.

Des modèles analytiques de Jonasson [58], Pierce [59] et Nijis [60] ont permis de prévoir l'effet acoustique des merlons ayant des formes triangulaires et trapézoïdales. Ils ont montré que ces merlons sont légèrement moins performants qu'un écran acoustique droit, de même hauteur et situé au niveau de l'axe central du merlon, avec une différence d'efficacité globale entre 1 et 3 dB(A).

L'évaluation de la performance acoustique d'un merlon d'une géométrie complexe nécessite l'utilisation d'autres méthodes plus adaptées que les modèles analytiques telles que la méthode des éléments finis de frontière. Par exemple, Hothersall et al. [61] ont utilisé cette méthode pour étudier la performance acoustique des murs antibruit de 3 m de hauteur et de différentes formes. Dans le cas des merlons acoustiques, plusieurs géométries ont été évaluées avec différentes pentes et conditions d'impédance de surface. Les auteurs ont montré qu'un écran acoustique droit est plus efficace qu'un merlon acoustique conventionnel (triangulaire, rond ou trapézoïdal), en réduction du bruit de trafic routier, lorsque les frontières des différents écrans sont modélisées par des surfaces réfléchissantes. Lorsque les frontières des merlons deviennent absorbantes, seul le merlon trapézoïdal, avec une pente de 1/2 et un sommet de 2 m de largeur, peut atteindre le même gain apporté par l'écran droit rigide. Les auteurs ont montré aussi que, en général, l'efficacité d'un merlon est d'autant plus élevée que la pente de sa surface est grande.

Watts [62] a utilisé aussi la méthode des éléments finis de frontière pour évaluer la performance acoustique des buttes de terre ayant différentes formes et des combinaisons butte/écran de faible hauteur. Pour les merlons de différentes formes, l'auteur a montré, comme dans l'étude précédente, qu'une géométrie trapézoïdale est plus efficace qu'une géométrie ronde ou triangulaire. L'ajout d'une série d'écrans de 0,5 m de hauteur et espacés de 0,5 m au niveau du sommet d'une butte trapézoïdale permet d'améliorer significativement la performance d'une butte de hauteur équivalente. Le gain apporté dans ce cas est proportionnel au nombre des écrans ajoutés. L'auteur a montré aussi qu'un matériau très absorbant placé au niveau du sommet du merlon peut apporter le même gain qu'une série des écrans de faible hauteur. Un sommet rugueux peut aussi améliorer l'efficacité totale du merlon de quelques dB. Dans le même contexte, Crombie et Hothersall [63] ont montré, en utilisant la même méthode des éléments finis de frontière, que l'efficacité d'un merlon acoustique trapézoïdal est extrêmement amélioré lorsque ce merlon est remplacé par une série de deux ou trois merlons plus petits, de même hauteur, ayant des bords très diffractants.

L'évaluation de la performance acoustique des buttes de terre à été aussi effectuée à l'aide des méthodes expérimentales. Hajek [64] a effectué des mesures sur modèle réduit pour comparer la performance acoustique des écrans acoustiques droits, des merlons de terre et des combinaisons merlon/écran de faible hauteur. Il a montré que l'efficacité d'un écran acoustique est plus élevée que celle d'une butte de terre de même hauteur (3 ou 4,9 m), avec un sommet plat et couvert d'herbe, de 1 dB(A). Lorsque le matériau couvrant le sommet du merlon devient très absorbant, l'efficacité globale du merlon peut dépasser celle de l'écran acoustique droit de 2 dB(A). Dans le même contexte, les mesures sur modèle réduit de Bush et Hodgson [65] ont permis de montrer que la pente et l'absorption des surfaces d'un merlon acoustique sont les paramètres les plus importants influençant son efficacité globale.

Il est à noter que l'écran droit de référence pour les études précédentes était placé toujours au niveau de l'axe central du merlon acoustique. Toutefois, les deux types d'écrans doivent être comparés lorsque l'écran droit est placé au point où commence le merlon acoustique du côté de l'infrastructure de transport terrestre.

1.2.2.4. Écrans antibruit en gabions

Les gabions sont des cages métalliques ou en bois destinées à retenir des cailloux. La construction des murs en gabions se fait par un simple empilement des cages. L'utilisation des murs en gabions était à l'origine vouée à la réalisation d'ouvrages de soutènement ou de protection hydraulique. Ces murs en gabions sont également utilisés depuis quelques années dans un rôle de lutte contre le bruit routier (figure 1.11). Les principaux avantages des ces murs par rapport aux murs antibruit conventionnels sont une mise en œuvre rapide et facile par empilement (sans fondation), une facilité d'entretien, un large choix des matériaux de

remplissage et une possibilité de modifier la structure dans le temps. Toutefois, aucune description de la performance acoustique des murs en gabions n'est disponible dans la littérature.



Figure 1.11. Mur antibruit à base de gabions (Livet et Gavet, France).

1.2.3. Écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens artificiels

Nous présentons dans cette section un état de l'art des principaux travaux réalisés pour étudier l'efficacité des écrans acoustiques de forme complexe. Le but d'inclure cette section dans l'étude bibliographique est de s'inspirer des formes complexes des protections conventionnelles afin de concevoir des formes innovantes des murs antibruit utilisant des moyens naturels.

Dans le cas des protections de forme complexe utilisant des moyens artificiels, la plupart des solutions consistent à placer un dispositif au sommet d'un écran droit qui s'appelle «couronnement». Le couronnement ajouté peut ainsi revêtir différentes formes qui sont principalement : le Té, le Y, le cylindre, le champignon, le couronnement asymétrique, le multi-diffracteur, le diffuseur à résidu quadratique QRD et le déphaseur (figure 1.12).

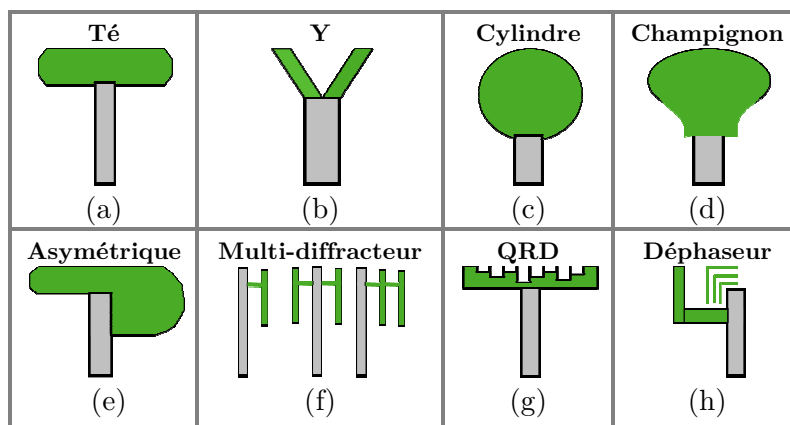


Figure 1.12. Principaux écrans acoustiques de forme complexe utilisant des moyens artificiels [77].

Les écrans en Té ont fait le sujet de plusieurs études de recherche dans les dernières années [66-73]. L'efficacité acoustique de tels écrans augmente suite au mécanisme de double diffraction au sommet de la protection ainsi qu'à la présence des ondes rampantes. Ceci est

équivalent à placer deux écrans acoustiques l'un à côté de l'autre. Les atténuations supplémentaires par rapport à un écran droit peuvent atteindre 3 dB(A) selon la largeur du couronnement, la configuration source-récepteur et l'impédance superficielle. Pour cette dernière, le revêtement du sommet par un matériau absorbant permet d'atténuer l'amplitude des ondes sonores rampantes au dessus de la protection acoustique particulièrement aux hautes fréquences.

Pour les couronnements en Y, l'efficacité acoustique augmente aussi à cause du mécanisme de double diffraction au sommet de la protection. Par contre, ils sont moins efficaces que des écrans en Té parce qu'ils n'ont pas une surface plate continue pour favoriser un phénomène d'interférence durant la double diffraction. L'optimisation de la forme du couronnement en Y dans ce cas peut améliorer la performance acoustique de ces protections [74].

Concernant les écrans antibruit avec des diffuseurs à résidu quadratique (QRD), Monazzam [75] a montré que de telles protections sont plus efficaces qu'un écran droit rigide pour certaines fréquences. Ceci dépend de la conception du diffuseur à résidu quadratique au niveau du sommet de la protection. Les résultats montrent que la meilleure forme de couronnement, parmi les formes testées, pour l'utilisation des QRD est celle en Té.

Concernant les protections acoustiques avec couronnement à surface réactive, Fujiwara et al. [76] ont montré qu'une série uniforme de puits rigides au niveau de la surface supérieure d'un diffracteur en T produit des valeurs de perte d'insertion équivalentes à celles d'une surface absorbante sur une large gamme de fréquences. Cela permet de ne considérer que des matériaux rigides pour atteindre des niveaux d'atténuation aussi élevés qu'avec des matériaux absorbants. Ceci est intéressant car l'efficacité acoustique des matériaux absorbants diminue souvent avec le temps.

Baulac [77] a appliqué une méthode d'optimisation évolutionnaire aux écrans en Té avec des surfaces supérieures réactives. Les résultats d'optimisation ont montré que l'efficacité de telles protections est fortement liée à la fréquence. Leur performance globale augmente avec le nombre de puits considéré sur la surface supérieure. L'amélioration de l'efficacité globale comparée avec celle d'un écran en Té normal peut atteindre 2 à 3 dB (A) pour un nombre total de puits de 5 à 9 (pour une configuration source-receveur donnée et pour un spectre sonore donné).

Concernant les écrans multi-diffracteurs, Crombie et al. [78] ont montré que l'ajout de deux petits baffles supplémentaires au sommet d'un écran droit, créant deux bords diffractants, augmente l'efficacité de la protection acoustique (voir

figure 1.12 (f)). L'ajout d'un nouveau baffle, créant trois bords, augmente de nouveau sa performance. Selon le type d'écran multidiffracteur, les efficacités des baffles ajoutés sont comprises entre 2 dB(A) et 5 dB(A). Dans le cas d'un seul baffle ajouté, la protection est

légèrement plus efficace si le baffle supplémentaire est installé à côté de la surface de l'écran regardant la source. L'addition d'une section horizontale joignant le baffle supplémentaire à l'écran droit central réduit la performance de ce dernier.

Dans le même contexte, Baulac [77] a utilisé un algorithme d'optimisation pour chercher les distances optimales entre les baffles et l'écran central. Elle a montré, selon le type d'écran multi-diffracteur considéré, que les distances optimales varient pour des efficacités comprises entre 2 dB(A) et 6 dB(A). Dans le même contexte, l'auteur a cherché l'inclinaison optimale des baffles par rapport à l'écran central.

Pour d'autres formes complexes, Ho et al. [79] ont montré à travers des mesures en laboratoire qu'un profil de rugosité aléatoire au niveau du sommet d'un écran acoustique peut aboutir à un gain considérable en matière d'efficacité acoustique. Dans ce cas, plus le sommet est rugueux, plus l'atténuation est forte. Toutefois, une dégradation non expliquée de la performance acoustique de l'écran a été observée aux basses fréquences.

Enfin, Defrance et al. [80] ont étudié la performance acoustique en réflexion des différents écrans acoustiques en escalier et en zigzag avec différentes conditions d'impédance et d'inclinaison. Les auteurs ont montré que le gain acoustique par rapport à un écran droit réfléchissant est très sensible à la forme et aux conditions étudiées et il peut dépasser dans certains cas 5 dB(A).

1.3. Méthodes prévisionnelles appliquées aux écrans acoustiques

L'objectif de cette section est d'analyser les méthodes de résolution de l'équation d'onde utilisées pour simuler la propagation acoustique en milieu extérieur en présence des écrans acoustiques. Nous présentons donc brièvement les principales approches en montrant leurs principales avantages et limites. Pour un état de l'art précis, le lecteur pourra se reporter aux références bibliographiques de chaque méthode. On distingue les méthodes prévisionnelles fréquentielles, temporelles et géométriques.

1.3.1. Méthodes fréquentielles

Dans ce paragraphe, nous citerons les deux principales méthodes prévisionnelles dans le domaine fréquentiel : la méthode des éléments finis de frontière (en anglais Boundary Element Method : BEM) et la méthode de l'équation parabolique (en anglais Parabolic equation :PE).

La BEM est une technique développée depuis le début des années soixante et fondée sur la théorie des équations intégrales de frontière. Deux ouvrages de référence sur cette méthode sont ceux de Ciskowski et Brebbia [81] et de Bonnet [82]. Cette méthode apparaît plus ap-

propriété en espace infini que la méthode des éléments finis (en anglais Finite Element Method : FEM) puisque seule la surface de la frontière du domaine doit être discrétisée. Le champ acoustique en tout point de l'espace étant dû au rayonnement de ses frontières.

Un premier avantage de la BEM, c'est qu'elle donne une solution exacte de l'équation intégrale. Cette approche est bien adaptée pour étudier différentes géométries et formes complexes pour différentes conditions d'impédance de surface. Un autre avantage de la BEM est l'approche de domaines multiples: avoir la possibilité de diviser le domaine complet en sous-domaines permettant l'introduction de milieux fluides autres que l'air. Des milieux poreux avec des caractéristiques complexes peuvent être décrits par certains modèles comme le modèle de fluide équivalent. Les frontières absorbantes dans la BEM peuvent être modélisées avec l'aide de n'importe quel modèle d'impédance de surface.

Un inconvénient de la BEM, est qu'elle est une méthode coûteuse en temps de calcul. Plus la fréquence est élevée et plus le nombre des inconnues est grand, plus le temps de calcul est long. Une autre limite est due à l'approche fréquentielle qui implique plusieurs fréquences de calcul par tiers d'octave, ce nombre devient vraiment important (pour la convergence) lorsqu'il s'agit des problèmes de haute diffusion telles que les couvertures de route ajourées. La BEM est aussi limitée à des atmosphères homogènes. Les effets météorologiques ne peuvent pas être efficacement pris en compte. Un profil de célérité linéaire peut être introduit dans la BEM par l'intermédiaire d'une analogie entre la propagation du son au-dessus d'un sol plan avec des effets météorologiques et la propagation du son au-dessus d'un sol courbé en milieu homogène [16]. Cependant, le sol doit être maillé et le temps de calcul devient très élevé.

La PE a été utilisée pour résoudre des problèmes de propagation d'ondes dans plusieurs domaines depuis 1940 tels que le domaine d'électromagnétisme, le domaine d'optique et dans l'acoustique sous-marine. Cette méthode a été adaptée ensuite à la propagation acoustique en milieu extérieur [83, 84]. L'hypothèse de base est que, pour un problème particulier, l'onde provenant d'une source se propage toujours en s'éloignant de la source et que l'énergie rétro-diffusée est négligeable. Cette hypothèse constitue une limitation puisqu'elle empêche de résoudre certains problèmes de diffraction pour lesquels cette énergie n'est plus négligeable.

La PE est une méthode de calcul capable de calculer la propagation du son dans une atmosphère inhomogène avec des gradients de vent ou de température. La turbulence atmosphérique, représentée par un champ aléatoire de fluctuations de l'index de réfraction, peut être directement incluse dans le profil de célérité. Un autre avantage de la PE, c'est que l'impédance du sol et le profil de vitesse du son peuvent varier pour chaque pas de calcul sans augmenter sensiblement les temps de calcul.

Les simulations numériques par la PE peuvent souvent prévoir avec précision la performance acoustique en diffraction des murs antibruit droits classiques. Cependant, des écrans acoustiques de forme complexe ne peuvent pas être modélisés. Différentes méthodes ont été développées au cours de ces dernières années pour pallier ce problème géométrique [85, 86]. La méthode de « Beilis-Tappert parabolic equation » développée par Parakkal et al. [87] permet de prendre en compte des surfaces non planes avec une pente allant jusqu'à 20°.

1.3.2. Méthodes temporelles

Dans ce paragraphe, nous présenterons les deux principaux modèles prévisionnels dans le domaine temporel : le modèle de différences finies temporelles (en anglais finite difference time domain: FDTD) et le modèle de la TLM (Transmission Line Matrix).

La FDTD [88, 89] est basée sur l'intégration numérique des équations d'Euler linéarisées dans le domaine temporel. Elle permet de simuler la propagation acoustique dans des situations avec plusieurs obstacles réflecteurs, tels que des écrans antibruit et des bâtiments, dans une atmosphère homogène ou inhomogène avec des gradients de vent ou de température.

La FDTD offre une solution exacte des équations d'Euler. Elle est capable aussi d'offrir une réponse sur une large gamme de fréquences correspondant au bruit de transport terrestre. Son principal avantage est la facilité de prendre en compte les effets météorologiques dans les simulations de propagation acoustique en milieu extérieur.

Pour modéliser des surfaces absorbantes dans la FDTD, seul le modèle de Zwikker et Kosten [9] peut être implémenté dans le domaine temporel pour modéliser un matériau absorbant reposant sur un fond réfléchissant tandis que le modèle de Delany et Bazley [7] n'est implémenté que pour modéliser le cas des milieux poreux semi-infinis.

La FDTD nécessite des temps de calcul et des capacités de mémoire considérables. Ceci présente le principal inconvénient de la méthode à cause de sa technique de discrétisation du volume avec 10 cellules nécessaires par longueur d'onde et une discrétisation temporelle qui doit être très fine pour assurer la stabilité numérique.

La méthode TLM [90] est basée sur le principe de Huygens. Pour une source ponctuelle qui rayonne sphériquement dans un milieu de propagation, un front d'onde peut être décomposé en un ensemble de sources secondaires qui émettent des ondelettes sphériques de fréquences, d'amplitudes et de phases identiques, dont les enveloppes peuvent à nouveau être décrites par une nouvelle génération de sources rayonnant également des ondelettes sphériques. L'onde se propage donc de proche en proche dans l'espace. D'après le principe de Huygens, les phénomènes ondulatoires peuvent être représentés par des transferts locaux d'impulsions.

La TLM présente une approche numérique dont les différentes étapes d'implémentation sont faciles à mettre en œuvre. C'est une méthode appropriée pour illustrer les phénomènes de propagation. Elle constitue une approche qui ne repose pas sur les équations fondamentales, mais sur une interprétation physique du processus de diffusion présenté à chaque point d'un milieu de propagation discrétisé. La TLM est capable d'offrir, dans un seul calcul, une réponse sur une large gamme de fréquences correspondant au bruit de transport terrestre. Les effets météorologiques peuvent être pris en compte dans les simulations de propagation acoustique en milieu extérieur.

Concernant les inconvénients de la TLM, cette méthode nécessite une taille constante des cellules et un maillage sur tout le domaine simulé. Cela signifie que la TLM est une méthode qui demande des temps de calcul considérables. Pour la limitation du domaine de propagation en milieu extérieur, comme pour les autres méthodes volumiques, il n'existe pas actuellement une implémentation des couches absorbantes parfaitement adaptées à la TLM. Certaines solutions ont été proposées spécialement pour des incidences non rasantes sur la couche absorbante [91]. Le principal inconvénient de la TLM, comme pour l'autre méthode temporelle FDTD, est la définition des conditions aux frontières dépendantes de la fréquence qui est encore un domaine de recherche.

1.3.3. Méthodes géométriques

Nous présentons dans ce paragraphe, dans le cadre de l'acoustique géométrique linéaire, la principale méthode utilisée dans la problématique des écrans acoustiques : la méthode des rayons qui peut être utilisée dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel.

La méthode des rayons est une méthode géométrique inspirée de l'optique qui consiste à suivre au cours de leurs déplacements l'évolution des points d'une surface d'onde créée par une source ponctuelle. Les rayons (trajets acoustiques porteurs d'énergie), sont obtenus par projection des points de cette surface. La méthode des rayons repose sur l'hypothèse d'un milieu lentement variable, ce qui impose une longueur d'onde petite devant l'échelle caractéristique du milieu à étudier (approche hautes fréquences).

Le principal avantage de la méthode des rayons est sa rapidité de calcul. Les calculs sont simples et rapides pour des problèmes simplifiés tels que la réflexion sur des surfaces plates (sol, écrans droits ou des bâtiments rectangulaires), la diffraction par des sommets plats, la propagation dans une atmosphère homogène ou avec des gradients verticaux de célérité constants.

Le principal inconvénient de la méthode des rayons est que la longueur d'onde doit être petite devant la taille de l'obstacle rencontré. Ceci présente une limite majeure de la méthode lorsque le bruit de trafic routier ou ferroviaire est étudié. En effet, la gamme de fréquences où

ce bruit présente le maximum d'énergie est entre 100 et 2500 Hz. La longueur d'onde pour les basses et les moyennes fréquences n'est pas donc petite devant la taille des obstacles rencontrés en milieu extérieur comme les écrans acoustiques.

La méthode des rayons fait apparaître des zones d'ombre lorsqu'un milieu réfractant vers le haut ou des obstacles sont présents. Elles sont provoquées par la courbure des rayons et sont situées au-dessous d'un rayon limite. La pression acoustique calculée est nulle et discontinue entre la zone d'ombre et la zone éclairée, ce qui est physiquement incorrect. L'intensité acoustique devient parfois infinie à cause de forts gradients de célérité provoquant une focalisation des rayons acoustiques pour des faibles angles d'élévation.

1.4. Méthodes expérimentales de l'évaluation de l'efficacité des écrans acoustiques

1.4.1. Mesures in-situ

Les écrans acoustiques installés en bordure de route sont soumis à des tests de performance acoustique. Ces mesures servent à contrôler in-situ les performances intrinsèques (absorption, transmission, diffraction) de la protection acoustique une fois mise en œuvre. Les données obtenues par ces méthodes expérimentales permettent également de valider des modèles de simulation et d'en tester les limites.

La méthode de mesure française NFS 31089 [95], utilisée depuis des nombreuses années, décrit un protocole expérimental pour la réalisation des mesures in-situ permettant de caractériser la performance acoustique des écrans antibruit. Une seconde méthode de mesure a été élaborée au niveau européen. Cette norme européenne (nommée méthode Adrienne) dont la référence est CEN/TS 1793-5 [96] est publiée depuis décembre 2003. Cette méthode de mesure présente aussi des limitations : les microphones placés en milieu extérieur captent l'ensemble des trajets sonores dans la proximité de l'écran (dont les réflexions sur le sol). Or, dans certains cas, il est très difficile de pouvoir séparer ces différentes composantes du signal reçu ce qui demande des traitements appropriés. Les effets climatiques ont un impact sur les mesures et il faut prévoir de faire les mesures dans des conditions invariantes. La mise en œuvre du protocole expérimental pour la mesure in-situ demande des moyens logistiques importants contrairement à la méthode de mesure sur modèle réduit. Les avantages et les inconvénients de cette dernière méthode sont présentés dans le paragraphe suivant.

1.4.2. Mesures sur modèle réduit

Un modèle réduit est un outil simple et peu coûteux qui peut être utilisé pour étudier la propagation du son en milieu extérieur. Il permet entre autre de réaliser en laboratoire des mesures dans des conditions contrôlées et d'étudier des solutions antibruit de formes com-

plexes ainsi que, de façon plus approchée, l'impact d'effets météorologiques [97]. Les maquettes peuvent être construites de manière très précise en simulant chaque détail de l'espace (écrans, arbres, chaussées...). Cependant, les lois de similitude entre échelle réelle et échelle réduite doivent être respectées au mieux. Notamment, l'impédance des matériaux utilisés doit rester la même en fonction des deux échelles de fréquence correspondantes. La sélection des matériaux utilisés dans un modèle réduit dépend donc de l'application du modèle et du facteur de réduction choisi.

Nous citons dans ce paragraphe quelques exemples d'études réalisées en utilisant des modèles réduits pour simuler la propagation acoustique en milieu extérieur. Osman [98] a utilisé des modèles réduits représentant des surfaces de sol à l'échelle 1/16, 1/32 et 1/64 pour estimer l'atténuation de la pression acoustique en fonction de la distance au-dessus du sol. Une source impulsionnelle a été utilisée, des matériaux fibreux ont été recommandés pour modéliser un sol absorbant pour les deux facteurs de réduction de 1/16 et 1/32 et des matériaux en feutrine pour le troisième facteur de 1/64. Le sol réfléchissant a été modélisé par une feuille de vinyle de 10 mm d'épaisseur. Des chevilles en bois et des papiers pliés ont été proposés aussi pour modéliser les arbres. Pirinchievara [99] a utilisé le paramètre de résistivité effective au passage de l'air pour sélectionner les matériaux de son modèle réduit de 1/20 représentant des surfaces impédantes à l'échelle réelle. Le polystyrol, le velvet et la laine minérale ont été choisis pour modéliser le bitume, l'herbe et la neige, respectivement. Busch et Hodgson [100] ont développé à l'aide du paramètre précédent une procédure avancée pour déterminer simultanément le facteur de réduction et les matériaux optimaux représentatifs du modèle réduit. La procédure consiste à comparer les courbes d'atténuation excédentaire (EA) déterminées à partir des mesures sur modèle réduit pour différents facteurs de réduction avec celles estimées à l'échelle réelle pour différentes résistivités au passage de l'air. Les valeurs de résistivité au passage de l'air à utiliser sont celles qui donnent le meilleur accord pour un tel facteur de réduction, la sélection des matériaux est faite pour ceux qui possèdent des résistivités proches des valeurs représentatives des surfaces du sol à modéliser. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1.1. La sélection des matériaux utilisés, par comparaison de la résistance au passage de l'air et de la porosité des matériaux à l'échelle réduite et à l'échelle réelle, a été le sujet des travaux de Delany et al. [101,102]. Ils ont utilisé dans leur modèle un facteur de réduction de 1/30, ils ont modélisé la chaussée par des plaques d'aluminium et par un plastique rigide, le sol absorbant par un tissu de nylon d'une épaisseur de 11 mm reposant sur une plaque isolante et les bâtiments par des plaques en isorel de 3 mm d'épaisseur. Les auteurs ont conclu qu'un matériau choisit doit être plus dense que celui à l'échelle réelle.

Dans le même contexte, Jones et al. [103] ont développé un modèle réduit de 1/80, ils ont utilisé des feuilles en aluminium, des blocs en bois et des polystyrènes sablés couverts par des

tissus absorbants pour modéliser respectivement les chaussées, les bâtiments et les sols couverts d'herbe. Hutchins et al. [104] ont choisi le même facteur de réduction et ils ont sélectionné les mêmes matériaux pour modéliser le sol et les buttes de terre, en se basant sur le modèle d'impédance de Delany et Bazley [7] et les prévisions d'atténuation excédentaire pour des surfaces localement réactives. Les résultats des mesures effectuées ont montré une variation de la perte par insertion d'un écran acoustique réfléchissant pour deux différentes impédances de sol (herbe et bitume). Le fait d'ajouter une forme de terre bien étudiée sur une ou les deux faces d'un écran droit permet de favoriser un phénomène d'interférences destructives pour certaines fréquences au niveau du sommet de l'écran et par suite une augmentation de la performance acoustique de l'écran.

Matériaux	Facteur de réduction n				
	20	25	31,5	40	50
Vernis			5900-95000	2900-24000	3500-15000
Polystyrène dense	8600-23000	7500-39000	8200-20000	7400-50000	3900-27000
Papier d'aluminium		11250-117500	6800-37000	6800-24000	3700-12000
Isorel (lisse)	4500-11000	3000-28000	5400-22000	5200-17000	2800-5000
Polystyrène expansé	5000-8000	3800-21000	6600-14000	3200-8400	4500-8000
Papier coton (une couche)	460-1600	350-1100	320-1000	360-620	400-750
Isorel (rugueux)	260-1200	210-880	320-500	130-480	170-270
Papier coton (deux couches)	170-480	130-350	82-230	72-220	50-130
Feutrine	48-150	38-130	47-79	<44	<50

Tableau 1.1. Intervalles des résistivités effectives au passage de l'air (en kPa.s.m^{-2}) des matériaux du modèle pour différents facteurs de réduction [99].

1.5. Algorithmes d'optimisation des écrans acoustiques

Les méthodes numériques analysées dans la section 1.3 présentent des méthodes prévisionnelles de la propagation acoustique en milieu extérieur. Ces méthodes permettent de mener des études paramétriques en choisissant des configurations bien définies. Les formes des protections acoustiques étudiées sont généralement proposées avec et sans matériaux de revêtement absorbants. Pour améliorer l'efficacité des écrans acoustiques, certains auteurs (voir section 1.2) essaient d'imaginer des formes différentes, par exemple en changeant la partie supérieure de la protection. Cependant, la complexité des phénomènes acoustiques (diffraction et réflexion) ne permet pas d'apercevoir a priori quelles peuvent être les formes intéressantes pour obtenir une performance maximale. Les approches numériques souffrent donc de l'absence d'une méthode systématique pour obtenir des formes innovantes et plus efficaces

que les formes conventionnelles. Le couplage de ces méthodes numériques avec des algorithmes d'optimisation présente une autre stratégie permettant d'obtenir des géométries améliorées. Dans cette section, nous n'aurons pas la prétention de faire un état de l'art des méthodes d'optimisation mais seulement de présenter brièvement les principaux algorithmes d'optimisation ainsi que leurs avantages et inconvénients.

L'objectif d'un algorithme d'optimisation d'un écran acoustique est de déterminer, pour des configurations données, les valeurs optimales des paramètres relatifs à l'écran à envisager pour avoir une efficacité acoustique la plus élevée possible. Les paramètres à optimiser sont en général la forme de la protection et les impédances des matériaux de revêtement. Les méthodes d'optimisation peuvent être divisées en deux catégories : méthode de recherche locale et méthode de recherche globale. On distingue deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif et l'optimisation multiobjectif.

1.5.1. Optimisation mono-objectif

Pour ce type d'optimisation, la recherche des extrema d'une fonction f revient à résoudre un système de n équations à n inconnues :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad (1.22)$$

où f est la « fonction coût » à optimiser et $x_1, \dots, x_n$ sont les paramètres variables à optimiser. Dans notre étude on cherche un maximum de la fonction coût.

On distingue dans cette partie trois principales méthodes mono-objectif : le recuit simulé, méthode du simplexe et les algorithmes évolutionnaires.

- **Le recuit simulé** : Cette méthode provient du processus d'optimisation naturelle de recuit des matériaux cristallins [105]. L'idée est d'amener un solide à basse température après l'avoir élevé à forte température. Lorsque la température du solide est très forte, chaque particule possédant une grande énergie peut effectuer de grands déplacements aléatoires dans la matière. Au cours de refroidissement, chaque particule perd de l'énergie et la capacité de déplacement de chaque particule diminue à cause de la perte d'énergie. Des matériaux homogènes et de bonne qualité sont obtenus suite aux différents états transitoires de refroidissement. L'application de ce comportement à une méthode d'optimisation consiste à effectuer des mouvements aléatoires de chacun des points selon une distribution de probabilité qui dépend de la qualité des différents voisins. Les meilleurs voisins ont une probabilité plus élevée et les moins bons ont une probabilité plus faible. Un paramètre appelé la température (T) est utilisé. Lorsque T est élevée, tous les voisins ont à peu près la même probabilité d'être acceptés et lorsqu'elle est faible, un mouvement qui dégrade la fonction coût a une faible probabilité d'être choisi. Lorsqu'elle est nulle, aucune dégradation de la fonction coût n'est acceptée. Le

paramètre T représente une température qui varie au cours du temps, elle est élevée au début puis diminue et finit par tendre vers 0.

Le recuit simulé est un algorithme simple et souple dans lequel on peut facilement introduire des contraintes liées au problème étudié. L'algorithme du recuit simulé converge lorsque le nombre d'itérations tend vers l'infini et sous certaines conditions de décroissance de température. Cependant, l'algorithme peut engendrer un extremum local à basse température et les temps de calculs peuvent être importants.

- **La méthode du simplexe [106] (Nelder et Mead) :** cette méthode permet une recherche locale d'extremum pour des problèmes avec un petit nombre de variables à optimiser. Elle vise à minimiser une fonction coût $f(x)$ de dimension n , où x est une variable de $\mathfrak{R}^n$, en se basant uniquement sur des considérations géométriques. L'algorithme fait évoluer de manière heuristique un simplexe (figure géométrique) composé de $n+1$ points de $\mathfrak{R}^n$, en fonction de la valeur de la fonction $f(x)$ en chacun des points du simplexe. Le simplexe est ordonné tel que $f(x_1) < f(x_2) < \dots < f(x_{n+1})$. A chaque itération, le moins bon des points (maximum de la fonction coût) est remplacé par un nouveau point issu d'une combinaison linéaire entre le barycentre des n points gardés et x_{n+1} . L'algorithme du simplexe introduit un certain nombre de déformations possibles sur le simplexe : la déformation peut être une réflexion, une expansion, une contraction ou un rétrécissement.

La méthode du simplexe est une méthode simple, facile à mettre en œuvre et efficace pour une recherche locale lorsque le nombre de variables à optimiser est faible. Cependant, elle ne peut pas être utilisée pour résoudre les problèmes avec un grand nombre de variables à optimiser.

- **Algorithmes évolutionnaires :** ces algorithmes s'appuient sur des techniques dérivées de l'évolution naturelle croisements, mutations, sélection, etc. On distingue trois classes utilisant le principe de l'évolution de façon différente : les algorithmes génétiques (GA) développés par Holland en 1962 [107] et Goldberg en 1989 [108], les stratégies d'évolution (ES) de Schwefel [109] et la programmation évolutionnaire (EP) de Fogel [110]. Ces différentes classes se diffèrent par leurs détails d'implémentation des opérateurs.

Concernant les algorithmes génétiques, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus divers généralement tirée aléatoirement au départ. La première étape est de créer une première population qui sera amené à évoluer et on définit la fonction d'adaptation des individus qui est la fonction coût. Ensuite, certaines paires d'individus sont sélectionnées pour participer à la reproduction de la population future. Une fois certains individus sélectionnés, on les fait se reproduire entre eux par deux opérateurs (croisement et mutation). Ceci permet de créer une nouvelle génération constituée des nouveaux individus issus de la

reproduction et de la diversification. On recommence alors au début du processus jusqu'à l'arrêt de l'algorithme.

Pour la programmation évolutionnaire, le seul opérateur de variation utilisé est la mutation, tous les individus de la population sont mutés une seule fois. Le remplacement reconstitue une nouvelle population en prenant les meilleurs individus parmi les parents et les enfants. Ils diffèrent des stratégies d'évolution par l'utilisation des opérateurs de remplacement stochastiques.

À propos des stratégies évolutionnaires, la sélection des meilleurs individus est faite par un choix déterministe suivant l'échelle de valeur de la fonction coût. L'étape de mutation est réalisée par l'ajout d'une valeur aléatoire tirée au sein d'une distribution normale. Les effets que l'évolution a sur le phénotype sont modélisés. Une relation de causalité est supposée entre l'importance des modifications du génotype et l'importance des modifications du phénotype provoquées par celle du génotype.

Les méthodes évolutionnaires sont des méthodes d'optimisation globale robustes adaptées aux espaces de recherche complexes. Elles sont appropriées pour des problèmes d'optimisation multiobjectif. L'algorithme d'optimisation peut être ajusté en fonction du problème étudié et certains aspects peuvent être modifiés et personnalisés. L'implémentation de l'algorithme peut être parallélisée permettant ainsi de réduire le temps d'exécution. Cependant, ces algorithmes évolutionnaires ne donnent pas une garantie de trouver des solutions optimales dans un intervalle de temps fini. Mais cela est vrai pour toutes les méthodes d'optimisation globales.

1.5.2. Optimisation multiobjectif

Pour ce type d'optimisation, on cherche les extrema d'une fonction f :

$$f(x) = y = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), \quad (1.23)$$

où $x = (x_1, \dots, x_m)$ et $y = (y_1, \dots, y_m)$, x est le vecteur paramètre, il appartient à l'espace des paramètres. y est le vecteur objectif, il appartient à l'espace des objectifs. m est le nombre de paramètres à optimiser et n est le nombre d'objectifs.

Il existe deux grandes catégories d'optimisation multiobjectif : les méthodes agrégées et les méthodes Pareto. Pour la première catégorie, le décideur intervient avant la recherche afin de se ramener à une optimisation mono-objectif. Pour les méthodes Pareto, le décideur intervient après la recherche et choisit une solution parmi l'ensemble de solutions Pareto obtenues.

- Méthodes agrégées : pour ces méthodes, le problème est ramené à une optimisation mono-objectif afin d'utiliser les méthodes précédemment présentées. Il existe quatre principales méthodes d'optimisation agrégées : la méthode de la moyenne pondérée [111], la mé-

thode du goal programming [112], la méthode du min-max [113], la méthode du goal attainment [114].

- Méthodes Pareto : On définit la notion de dominance : on dit que le vecteur paramètre A domine le vecteur paramètre B si et seulement si :

$$\forall i, f_i(A) \geq f_i(B) \exists i, f_i(A) > f_i(B), \quad (1.24)$$

où les f_i représentent les critères à maximiser.

Dans l'exemple de la figure 1.13, les points 1, 3 et 5 ne sont dominés par aucun autre, alors que le point 2 est dominé par le point 1 et que le point 4 est dominé par les points 3 et 5.

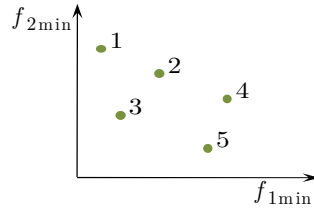


Figure 1.13. Exemple de dominance dans une méthode Pareto.

On appelle frontière de Pareto l'ensemble de tous les points Pareto optimaux. Un point étant dit Pareto optimal s'il n'est dominé par aucun autre point. Tout point du front de Pareto est "optimal", dans la mesure où on ne peut améliorer la valeur d'un critère pour ce point sans diminuer la valeur d'au moins un autre critère.

Les algorithmes génétiques peuvent permettre de trouver l'ensemble de la surface de Pareto et converger la population vers un ensemble de solutions efficaces. Ceci ne permet pas de choisir une alternative plutôt qu'une autre mais il apporte une aide précieuse au décideur.

Il existe des nombreuses méthodes Pareto basées sur des théories évolutionnaires, seules les principales sont présentées ci-dessous [77].

MOGA (**M**ulti **O**bjective **G**enetic **A**lgorithm): Cette méthode a été proposée en 1993 par Fonseca et Fleming [115]. Chaque individu de la population est rangé en fonction du nombre d'individus qui le dominent. Une fonction de notation permet ensuite de prendre en compte le rang de l'individu.

VEGA (**V**ector **E**valuated **G**enetic **A**lgorithm) : Cet algorithme a été proposé en 1984 par Schaffer [116, 117]. Il sélectionne les individus de la population courante suivant chaque objectif, indépendamment des autres (sélection parallèle). A chaque génération, la population est donc divisée en un nombre de sous populations qui est égal au nombre d'objectifs de la fonction coût. La sélection est appliquée à chaque sous population correspondant à un objectif. L'algorithme VEGA compose la population complète, et applique les opérateurs génétiques (croisement, mutation).

PAES (**P**areto **A**rchived **E**volution **S**trategy) : Cette méthode est issue des travaux de Knowles et Corne [118, 119] en 1999. Elle n'est pas basée sur une population. Elle n'utilise qu'un seul individu à la fois pour la recherche des solutions. Par contre, elle utilise une population annexe de taille déterminée permettant de stocker les solutions temporairement Pareto optimales.

SPEA (**S**trength **P**areto **E**volutionary **A**lgorithm) : En 1998 Zitzler et Thiele [120, 121] proposent une nouvelle méthode multiobjectif qui utilise une archive regroupant les solutions Pareto optimales obtenues aux générations précédentes.

NPGA (**N**iched **P**areto **G**enetic **A**lgorithm) : Cet algorithme a été proposé par Horn et Nafpliotis en 1993 [122, 123]. Il repose sur une sélection par tournoi basé sur la notion de dominance de Pareto : deux individus au hasard sont comparés avec une sous population également choisie au hasard et ils sont sélectionnés ou non en fonction de leur dominance par rapport à la sous population.

NSGA (**N**on dominated **S**orting **G**enetic **A**lgorithm) : Cet algorithme, proposé par Srinivas et Deb en 1994 [124], divise la population en plusieurs groupes en fonction du degré de domination au sens de Pareto de chaque individu.

1.6. Conclusions du chapitre

Les phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur en présence d'écrans acoustiques ont été exposés. Les principaux écrans acoustiques dédiés aux transports terrestres ont été aussi présentés. L'état de l'art sur les écrans acoustiques utilisant des moyens naturels, qui nous intéressent ici, a permis de mettre en avant quatre principales protections : la végétation, les cristaux soniques, les merlons acoustiques et les gabions. Les principales méthodes numériques et expérimentales de l'évaluation de l'efficacité des écrans acoustiques et les principaux algorithmes d'optimisation appliqués à ces écrans ont été analysés au regard de leurs avantages et inconvénients. Les choix du modèle numérique de propagation, de la méthode expérimentale, de l'algorithme d'optimisation et des écrans acoustiques à étudier sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Sommaire

2.1. Choix du modèle prévisionnel de propagation	39
2.2. Modèles d'impédance et de milieux poreux utilisés	44
2.3. Choix de la méthode expérimentale	44
2.4. Choix de la méthode d'optimisation	44
2.5. Configurations géométriques	48
2.6. Sources sonores et récepteurs	48
2.7. Spectres routiers et ferroviaires	50
2.8. Hauteurs des protections acoustiques	50
2.9. Choix des protections acoustiques innovantes à étudier	51

On s'intéresse dans ce travail à la propagation acoustique en milieu extérieur en présence d'écrans acoustiques utilisant des moyens naturels. Le bruit dû aux infrastructures de transport terrestre (routières et ferroviaires) est seul considéré, les transports aériens étaient exclus de notre travail de recherche.

Dans un premier temps, les choix de la méthode numérique, de la méthode expérimentale et de l'algorithme d'optimisation sont justifiés dans ce chapitre. Dans un deuxième temps nous présentons les hypothèses de travail dans lesquelles sont effectués les calculs et les mesures acoustiques : configurations géométriques, infrastructures routières et ferroviaires, spectres de puissance des sources sonores et hauteurs des protections acoustiques. Dans un troisième temps, nous faisons le choix de trois protections antibruit innovantes, utilisant des moyens naturels, à étudier dans les chapitres suivants de cette thèse.

2.1. Choix du modèle prévisionnel de propagation

L'étude de différentes méthodes de résolution de l'équation d'onde dans le chapitre 1 (section 1.3) a permis de mettre en avant les avantages et les limitations de chacune dans la simulation de la propagation acoustique en milieu extérieur. Dans le tableau 2.1, ces méthodes sont comparées au regard de leurs performances en prenant en compte la diffraction par les obstacles, la topographie, les impédances du sol, les ruptures d'impédance et le temps de calcul.

Méthode	Diffraction par les obstacles	Topographie	Impédances du sol	Ruptures d'impédance	Temps de calcul
BEM	A	A	A	A	Élevé (dépend du maillage et de la fréquence)
PE	C	C	A	A	Faible (augmente avec la fréquence)
FDTD	A	A	B	B	Très élevé (aug- mente avec la fréquence)
TLM	A	A	C	B	Élevé (dépend des dimensions du problème)
Méthode des rayons	C	B	A	B	Faible (indépen- dant de la fré- quence)

Tableau 2.1. Comparaison des différentes méthodes de calcul [16]. A : description complète, B : description partielle, C : quelques cas existants.

Concernant notre problématique des protections acoustiques, nous considérons des distances de propagation inférieures à une centaine de mètres pour lesquelles le milieu de propa-

gation peut être considéré comme homogène. La méthode à retenir dans ce travail est donc celle qui permettra de prendre en compte parfaitement la diffraction par les obstacles de forme complexe, la topographie, les impédances du sol et les ruptures d'impédances. Par conséquent, à l'examen du tableau 2.1, la méthode choisie est la méthode des éléments finis de frontière (BEM).

Il existe deux formulations de la BEM : la formulation directe et la formulation indirecte. La formulation directe de la BEM est la plus utilisée des deux grandes familles, elle repose sur l'utilisation de l'équation intégrale de Helmholtz dans laquelle les fonctions inconnues sont la pression et la vitesse acoustiques. Le champ de pression acoustique, en un point M quelconque de l'espace Ω et pour une source ponctuelle S , vérifie l'équation de Helmholtz définie pour une convention $e^{-j\omega t}$ par :

$$(\Delta + k^2)p(M) = f(M), \forall M \in \Omega, \quad (2.1)$$

Où $f(M)$ représente la distribution des sources, k est le nombre d'onde et Ω est l'espace, de volume V , entourant un volume D de surface σ dont la normale n est entrant dans le fluide (figure 2.1).

La fonction de Green pour une source ponctuelle en espace infini vérifie :

$$(\Delta + k^2)G(S, M) = \delta_s(M), \forall M \in \Omega, \quad (2.2)$$

où δ est la mesure de Dirac. La fonction de Green vérifie les conditions de Sommerfeld, tel que :

$$G(S, M) = \frac{\exp(ikr(S, M))}{2ik} \text{ dans } \Re, \quad (2.3)$$

$$G(S, M) = -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr(S, M)) \text{ dans } \Re^2, \quad (2.4)$$

$$G(S, M) = -\frac{\exp(ikr(S, M))}{4\pi r(S, M)} \text{ dans } \Re^3, \quad (2.5)$$

Où r est la distance entre la source et le récepteur et $H_0^{(1)}$ est la fonction de Hankel d'ordre zéro et de première espèce.

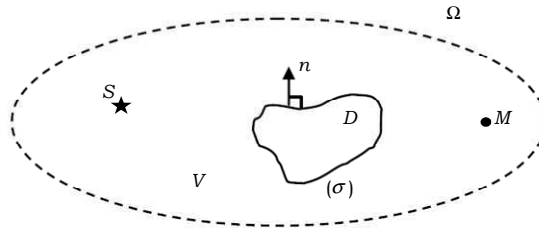


Figure 2.1. Schéma général pour l'établissement de l'équation de Helmholtz.

En multipliant l'équation (2.1) par $G(S, M)$ et l'équation (1.2) par $p(M)$ et en retranchant l'une de l'autre, puis en intégrant l'équation obtenue sur un volume V englobant D et la source S , il vient :

$$\begin{aligned} & \int_V G(S, M) f(M) dV - \int_V p(M) \delta_s(M) dV \\ &= \int_V \left(G(S, M) \Delta p(M) - p(M) \Delta G(S, M) \right) dV \end{aligned} \quad (2.6)$$

Le champ incident est représenté par la première intégrale du membre de gauche de l'équation 2.6 et le champ de pression, en un point M pour une source ponctuelle S , est donné par la deuxième intégrale. Le membre de droite peut être transformé en une intégrale de surface (σ) en appliquant le théorème de Green. On obtient alors :

$$p(M) = p_0(M) - \int_{\sigma} \left(G(S, M) \frac{\partial p(M)}{\partial n_s} - p(M) \frac{\partial G(S, M)}{\partial n_s} \right) dS, M \in \Omega, \quad (2.7)$$

Cette formule peut être généralisée de la manière suivante :

$$c(M) p(M) = p_0(M) + \int_{\sigma} \left(p(M) \frac{\partial G(S, M)}{\partial n_s} - G(S, M) \frac{\partial p(M)}{\partial n_s} \right) dS, M \in \Omega, \quad (2.8)$$

$p(M)$ est le champ de pression en un point M de l'espace Ω .

$p_0(M)$ est le champ de pression incident dans le volume extérieur V .

$c(M)$ est un coefficient fonction de la position du récepteur (avec r la distance entre la source S et le point M). Il est écrit d'une façon générale sous la forme suivante :

$$c(M) = 1 - \frac{1}{4\pi} \int_{\sigma} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS, \quad (2.9)$$

avec les cas particuliers suivants :

$c(M) = 1$ pour M dans le milieu de propagation Ω privé de ses frontières.

$c(M) = 1/2$ pour M sur une surface plane (plan tangent continu).

$c(M) = 1 - \theta / 4\pi$ pour M en un point anguleux en un point où il existe deux plans tangents. θ est l'angle solide sous lequel on voit la surface depuis le point M dans $\mathfrak{R}^3$. Dans $\mathfrak{R}^2$, $c(M) = 1 - \theta / 2\pi$ où θ se réduit à l'angle géométrique en 2D.

La formulation indirecte est basée sur une forme intégrale du principe de Huygens où le champ acoustique diffusé par une frontière peut être représenté par une distribution des monopôles et de dipôles. Filippi [125] montre en effet que la solution de tout problème aux valeurs limites de l'équation de Helmholtz peut s'écrire sous la forme d'un potentiel de couche, de simple couche, de double couche ou la combinaison linéaire entre les deux. La pression acoustique en un point M peut être écrite sous la forme suivante:

$$p(M) = p_0(M) + \psi p_s(M) + \zeta p_d(M), \quad (2.10)$$

avec ψ et ζ des coefficients complexes. Les potentiels de simple et double couche p_s et p_d sont donnés par :

$$p_s(M) = \int_{\sigma} v(P) G(M, P) d\sigma(P), \quad (2.11)$$

$$p_d(M) = - \int_{\sigma} \mu(P) \partial_{n(p)} G(M, P) d\sigma(P), \quad (2.12)$$

Par analogie avec les problèmes d'électrostatique, v est appelé densité de simple couche et μ densité de double couche ; v correspond à une densité de monopôles acoustiques et représente le saut de vitesse normale à la traversée de la surface, μ correspond à une densité de dipôles sur cette surface et représente le saut de pression entre le côté intérieur et le côté extérieur de la frontière.

La BEM a été utilisée extensivement dans le domaine de propagation en milieu extérieur essentiellement dans le cas des protections acoustiques. Des formes conventionnelles et complexes des protections acoustiques (voir section 1.2), des buttes de terre [61], des protections de faible hauteur [126] ont fait l'objet de plusieurs publications. Des simulations numériques ont été réalisées pour différentes configurations routières (sol plat, remblai et déblai) et ferroviaires [127,128]. Ainsi, l'utilisation de la BEM permet d'étudier finement des problèmes de géométries complexes en se focalisant sur les effets de réflexion, absorption, diffraction et diffusion.

Le code de calcul MICADO (Méthode Intégrale pour le Calcul Acoustique de la Diffraction par les Obstacles), développé par Jean [127] et dédié à la prévision du champ acoustique en milieu homogène, est utilisé dans notre travail pour étudier la performance acoustique des écrans acoustiques utilisant des moyens naturels. Il est basé sur la méthode des éléments finis de frontière s'appuyant sur une formulation directe dans une approche variationnelle. La formulation variationnelle se construit en multipliant l'équation intégrale de Helmholtz par une fonction test admissible et en intégrant le résultat sur la surface de la structure étudiée. Le principal intérêt de cette approche est qu'elle permet de surmonter les problèmes de singularités des intégrales et de matrices non symétriques.

Dans MICADO, les frontières sont maillées à chaque fréquence de façon automatique selon des critères de nombre de segments minimal par élément et par longueur d'onde, ce qui optimise les temps de calculs. Les fonctions de Hankel présentées dans la fonction de Green (voir équation 2.13) sont pré-calculées en permettant la division des temps de calculs par plus de 20. Dans le cas d'un baffle, c'est-à-dire une surface infinie plane présentant une surface de sol, la fonction de Green élémentaire est la solution élémentaire pour une source ponctuelle S et un récepteur M placés au dessus de ce baffle qui peut être rigide ou impédant. Cette fonction de Green s'exprime comme la somme d'un terme direct $G_d(M, Q)$, d'un terme réfléchi

$G_r(M, Q)$ par rapport au plan rigide et d'un terme correctif $G_c(M, Q)$ prenant en compte l'impédance du baffle [26] :

$$\begin{aligned} G(M, Q) &= G_d(M, Q) + G_r(M, Q) + G_c(M, Q) \\ &= -\frac{i}{4} H_0(kr) + \frac{i}{4} H_0(kr^-) + p_\alpha(M, Q) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Cela a l'avantage de n'avoir à mailler, pour des simulations des écrans acoustiques, que les frontières hors sol et toute partie du sol de caractéristiques différentes du baffle.

L'approche "multi-domaines" du code MICADO [129] permet aussi de combiner des domaines bafflés et d'autres non bafflés (par exemple dans le cas d'une route en sous-sol, deux domaines sont pris en compte, un domaine 1 au dessus du sol modélisé avec une fonction de Green pour un milieu bafflé et un domaine 2 modélisé à l'aide d'une fonction de Green en champ libre.). Les matériaux absorbants peuvent être ainsi modélisés par des milieux propagatifs (par exemple en utilisant le modèle de fluide équivalent) au lieu d'une condition d'impédance de surface.

La plupart des simulations numériques (calculs BEM) dans notre travail seront réalisées sur des configurations en 2D. L'approche utilisée en 2D est acceptable pour des sources linéaires et pour des protections de grande longueur et présente une bonne approximation de l'approche 3D. L'approche 2D est utile aussi pour comparer les protections antibruit au regard de leur performance acoustique. Nous nous intéressons dans ce travail au bruit des transports terrestres (routiers et ferroviaires) dont les composantes les plus énergétiques sont entre 50 Hz et 4000 Hz. Le temps de calcul BEM augmente avec la fréquence et avec le nombre des inconnues N de maillage. En effet, le temps nécessaire pour résoudre le système matriciel varie en N^3 . A titre d'exemple, la figure 2.2 tiré de l'article de Jean [127] montre l'augmentation du temps de calcul du code MICADO, utilisé dans cette thèse, en fonction de N dans le cas d'un écran conventionnel réfléchissant au-dessus d'un sol rigide.

Certains calculs dans cette thèse seront effectués en $2D\frac{1}{2}$ pour montrer l'effet du type de la source utilisé (point source, ligne source,...) et de la direction de propagation acoustique sur les résultats d'efficacité des protections acoustiques. Pour ces calculs, le post-traitement est plus conséquent.

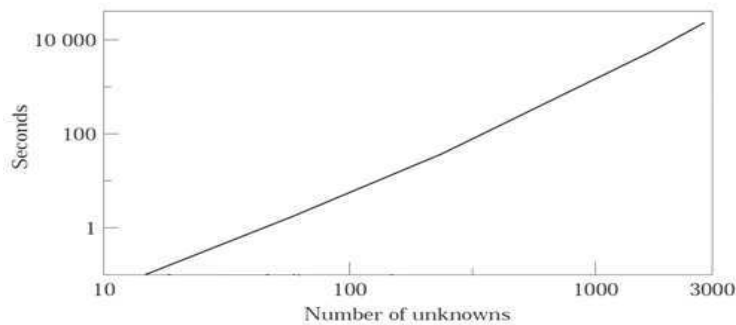


Figure 2.2. Augmentation du temps de calcul BEM en fonction du nombre d'inconnues dans le cas d'un écran réfléchissant au dessus d'un sol rigide [127].

2.2. Modèles d'impédance et de milieux poreux utilisés

Différents modèles d'impédance ont été établis permettant d'exprimer l'impédance en fonction de la fréquence (voir section 1.1.5). Les deux modèles de Delany et Bazley et de Zwikker et Kosten se révèlent adaptés pour modéliser la plupart des sols naturels rencontrés en milieu extérieur. Ils seront donc utilisés dans ce travail pour exprimer les conditions d'impédance ou pour calculer le nombre d'onde et la masse volumique complexes dans le cas des milieux poreux.

2.3. Choix de la méthode expérimentale

Nous avons présenté dans la section 1.4 les deux méthodes de mesure de la performance des écrans acoustiques. Nous choisissons les deux méthodes en raison de leurs nombreux avantages pour traiter des problèmes en 3D et pour valider les calculs numériques en 2D. La méthode de mesure in-situ selon la norme CEN/TS 1793-5 sera utilisée dans notre travail pour caractériser les propriétés intrinsèques d'un mur antibruit installé sur site. Elle est décrite dans le troisième chapitre. La méthode de mesure sur modèle réduit sera utilisée pour mesurer les propriétés intrinsèques du mur antibruit à l'échelle de maquette.

2.4. Choix de la méthode d'optimisation

Nous avons analysé dans le chapitre 1 (section 1.5) les principaux algorithmes d'optimisation et nous avons montré leurs principaux avantages et inconvénients. Concernant l'optimisation mono-objectif, il est nécessaire pour notre problématique des protections acoustiques que la méthode d'optimisation soit directe. En effet, cette méthode ne fait appel qu'à des évaluations de la fonction coût elle-même et non à ses dérivées ou son gradient qui sont difficilement explicites comme dans notre cas où la fonction coût est le résultat d'une simulation numérique. La méthode doit, en outre, rendre possible une recherche globale qui permet de bien explorer l'espace de recherche. L'algorithme d'optimisation mono-objectif retenu dans ce travail est donc l'algorithme génétique. Il est bien adapté lorsque la solution analytique de la fonction coût n'est pas facilement accessible et lorsque l'allure de la fonction n'est pas a priori connue. En addition, il est performant dans le cas où le nombre de paramètres à optimiser est important.

Cinq éléments sont nécessaires dans un algorithme génétique :

- Un principe de codage de l'élément de population. Une structure de données est associée à chacun des points de l'espace d'état. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement employés, notamment pour l'optimisation de problèmes à variables continues.

- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

- Une fonction à optimiser. Elle est appelée fonction d'évaluation de l'individu ou "*fitness*". L'utilisation de cette fonction permet la sélection et la reproduction des meilleurs individus de la population.

- Des opérateurs permettant la diversification de la population au cours des générations et l'exploration de l'espace d'état. L'opérateur de croisement combine les génotypes de deux individus existant dans la population pour en obtenir deux nouveaux, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.

- Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation, nombre total de générations ou critère d'arrêt.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté en figure 2.3. Tout d'abord, on commence par générer de façon aléatoire une population d'individus qui sera amené à évoluer. La taille N des populations choisie dans cette étape ne doit pas être trop faible pour couvrir tout l'espace de recherche ni trop élevée pour que le temps de calcul soit raisonnable. La fonction coût associe à chaque individu une valeur dite d'adaptation. Plus celle-ci est élevée plus la solution donnée par la fonction coût est optimale. Pour que l'algorithme d'optimisation soit le plus rapide possible, la fonction d'évaluation des individus doit être optimisée en temps de calcul car elle est exécutée un grand nombre de fois.

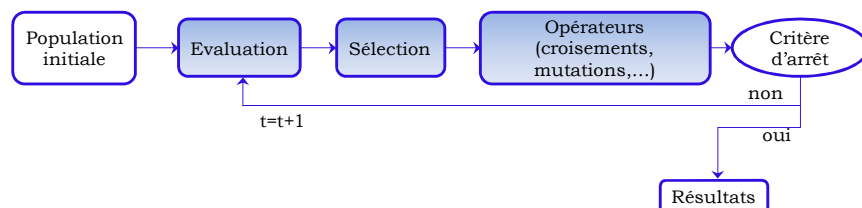


Figure 2.3. Principe général des algorithmes génétiques [77].

Pour passer d'une génération à une génération suivante, les trois opérations suivantes sont répétées pour tous les éléments de la population. Des paires d'individus qui vont participer à la reproduction de la population future sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. On distingue deux types de sélection :

- La sélection déterministe : on sélectionne toujours les meilleurs individus et on écarte totalement les plus mauvais. Cela suppose un tri de l'ensemble de la population. On parle alors d'élitisme.

• La sélection stochastique : on favorise toujours les meilleurs individus mais de manière stochastique ce qui laisse une chance aux individus moins performants. Il se peut qu'un meilleur individu ne soit pas sélectionné aux dépens d'un plus faible. Une fois certains individus sélectionnés, on les fait se reproduire entre eux. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c d'engendrer des couples d'enfants. Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des individus. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Pour effectuer ces croisements sur des individus constitués de M gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaînes terminales de chacun des deux individus, ce qui produit deux enfants E1 et E2 (figure 2.4). On peut étendre ce principe en découpant l'individu en plus de 2 sous-chaînes.

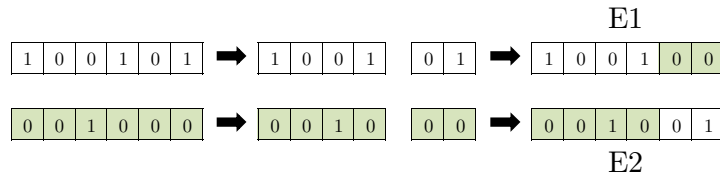


Figure 2.4. Exemple de croisement à 1 point entre deux individus [77].

L'opérateur de mutation est appliqué à deux individus avec une probabilité P_m ($P_m < P_c$) et engendre des individus mutés. Il consiste généralement à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire (figure 2.5). La mutation permet un maintien de la diversité génétique utile pour une bonne exploration de l'espace de recherche. Les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont fortement dépendantes de cet opérateur.



Figure 2.5. Exemple d'une mutation par changement du quatrième bit [77].

Les individus croisés et les individus mutés sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population.

Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis :

- Le nombre de générations ou d'évaluations que l'on souhaite exécuter peut être fixé a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire à cause du temps de calcul
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement.

Concernant l'optimisation multiobjectif, la méthode retenue est de type Pareto, elle est choisie puisqu'elle permet d'offrir plusieurs solutions optimales parmi lesquelles le décideur peut choisir la solution qui l'intéresse. On utilise dans ce travail, l'algorithme NSGA-II qui est une nouvelle version de l'algorithme NSGA publiée en 2002 [130]. Le principe général du

fonctionnement de cet algorithme est représenté en figure 2.6. On commence par générer aléatoirement une population de N individus. Le classement des individus est effectué ensuite selon le principe de non domination et selon leur degré d'éloignement par rapport aux autres solutions. On dit qu'un individu domine un autre si la valeur de chacune de ses fonctions-objectifs est au moins égale à celle de l'autre et qu'au moins une d'entre elles est meilleure. Le classement par non domination revient à donner à chaque individu un rang, et les individus du même rang forment une frontière. La frontière des individus de rang 1 est appelée frontière de Pareto et contient l'ensemble des individus non dominés. La frontière des individus de rang 2 contient les individus dominés uniquement par des individus de rang 1 et ainsi de suite pour les autres rangs. Le degré d'éloignement par rapport aux autres solutions est la distance euclidienne calculée entre les individus d'une même frontière. Plus le degré d'éloignement est élevé, plus la population est diversifiée. Une fois le classement réalisé, l'algorithme se déroule ensuite comme un algorithme génétique standard. Les meilleurs individus sélectionnés sont les individus qui le rang le plus faible, ou le degré d'éloignement le plus élevé si les rangs sont égaux. Ceci permet de conserver une population diversifiée pour éviter la convergence vers des optimums locaux. La population enfant obtenue après l'application des opérateurs de croisement et de mutation est ajoutée à la population parent et l'ensemble des individus est classé selon les principes de non domination et d'éloignement. La génération suivante est créée en sélectionnant les N meilleurs individus de cette population. Le même processus est répété pour engendrer les générations suivantes.

Les principaux avantages de la méthode NSGA-II sont donc de maintenir une diversité de la population et de bien répartir les solutions sur la frontière de Pareto. Cette méthode est utilisable dans des problèmes avec un nombre quelconque des objectifs.

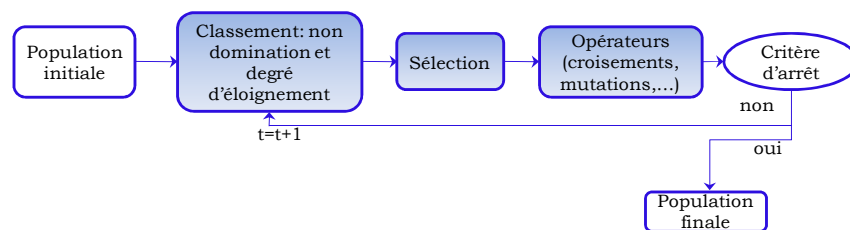


Figure 2.6. Principe d'optimisation par l'algorithme NSGA-II [130].

Nous avons développé dans ce travail un algorithme d'optimisation génétique avec le langage de programmation «python» dont quelques fonctions de base telles que la sélection, le croisement et la mutation sont décrites dans des modules de Python pour les algorithmes évolutionnaires [131]. L'algorithme génétique est couplé avec le code de calcul numérique BEM pour évaluer la fonction coût. La rapidité de l'algorithme d'optimisation est liée essentiellement au nombre d'exécutions de la fonction d'évaluation.

La validation de l'outil d'optimisation développé sur des fonctions peu coûteuses en temps de calcul est présentée en annexe A.

2.5. Configurations géométriques

On considère trois topographies d'infrastructure différentes dans notre travail : infrastructure sur site plan, infrastructure surélevée (remblai) et infrastructure abaissée (déblai). Elles sont représentées en figure 2.7. L'axe central de l'infrastructure est l'axe central des voies routières ou ferroviaires contenant les sources de bruit. Les récepteurs sont situés dans la partie droite de l'infrastructure. Les configurations ont été inspirées du projet 'HOSANNA' et correspondent à des configurations topographiques largement rencontrées en Europe [132].

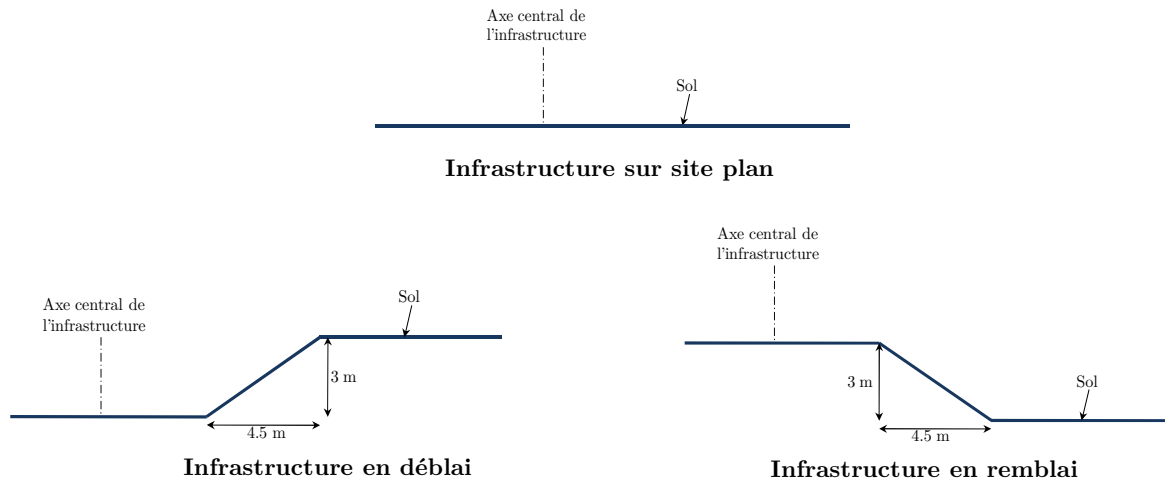


Figure 2.7. Configurations géométriques considérées.

2.6. Sources sonores et récepteurs

Concernant les sources sonores, nous présentons dans ce paragraphe leurs configurations dans des infrastructures du bruit du trafic routier et du bruit du tramway.

Pour le bruit du trafic routier (figure 2.8), nous considérons une route à deux voies ou une autoroute à quatre voies et trois positions de source j par voie i : $S_{i,1}$ représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule léger ou lourd (hauteur de 0,01 m), $S_{i,2}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule léger (hauteur de 0,30 m) et $S_{i,3}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule lourd (hauteur de 0,75 m).

Pour le bruit du tramway (figure 2.9), nous considérons deux voies ferrées. Les calculs seront effectués pour un seul tramway circulant soit sur la voie 1 ou sur la voie 2. Les deux sources sonores, présentant le bruit du contact roue-rail, sont placées à une hauteur de 0,05 m. L'effet des dimensions du tramway ne sont pas négligées à cause du phénomène de multi-réflexions qui peut se produire entre l'écran acoustique et le tramway. Dans la suite de notre

travail, la caisse du tramway est modélisée par une surface réfléchissante de $3,2 \text{ m} \times 2,45 \text{ m}$ pour les calculs en deux dimensions.

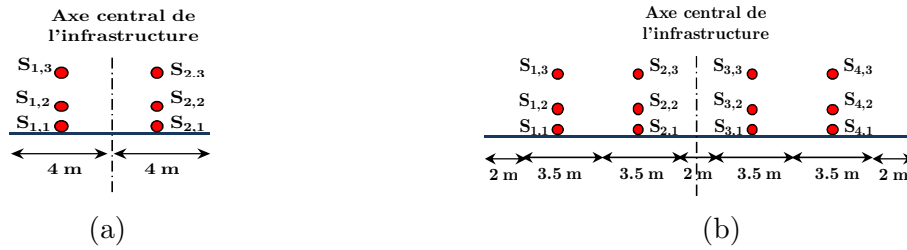


Figure 2.8. Positions des sources sonores pour une configuration d'une route à deux voies (a) ou d'une autoroute (b) à deux voies.

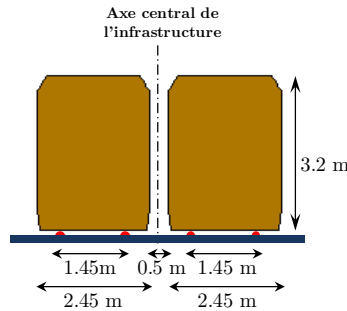


Figure 2.9. Positions des sources sonores (points rouges) pour une configuration des voies ferrées : cas des tramways.

Concernant les récepteurs, nous opterons dans ce travail, pour la plupart des calculs numériques, pour des récepteurs placés à une hauteur moyenne de 1,5 m et 4 m. On définit une région de récepteurs autour de chaque hauteur moyenne (figure 2.10) avec un maillage de 9 points récepteurs par m^2 . La première région (région 1) débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. Elle représente les piétons et les usagers des pistes cyclables. La deuxième région (région 2) débute 10 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m. Elle est représentative des récepteurs situés au premier étage d'un bâtiment. Cette région ne débute pas immédiatement après l'écran acoustique car les bâtiments se trouvent généralement à une certaine distance des voies routières ou ferroviaires. L'efficacité des protections acoustiques à étudier sera moyennée dans chaque région de récepteurs.

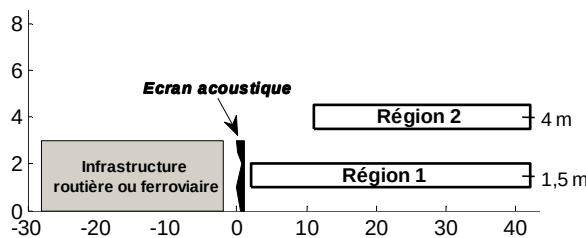


Figure 2.10. Localisation des récepteurs pour une infrastructure routière ou ferroviaire.

2.7. Spectres routiers et ferroviaires

Le spectre routier est un spectre large bande plus riche en basses et moyennes fréquences qu'en hautes fréquences. Dans ce travail, on a choisi une gamme de fréquences entre 50 et 4000 Hz (en tiers d'octave) qui présente les composantes les plus énergétiques contenues dans le bruit du trafic routier. Le niveau de bruit utilisé pour les sources est le spectre défini dans le modèle Harmonoise [133] pour différentes vitesses des véhicules (figure 2.11).

Pour le bruit du tramway, le spectre de niveau de puissance utilisé est défini dans le modèle français NMPB [134] entre 125 Hz et 4000 Hz pour une vitesse moyenne du tramway de 30 km/h, avec une densité de passage de 20 tramways par heure (figure 2.12).

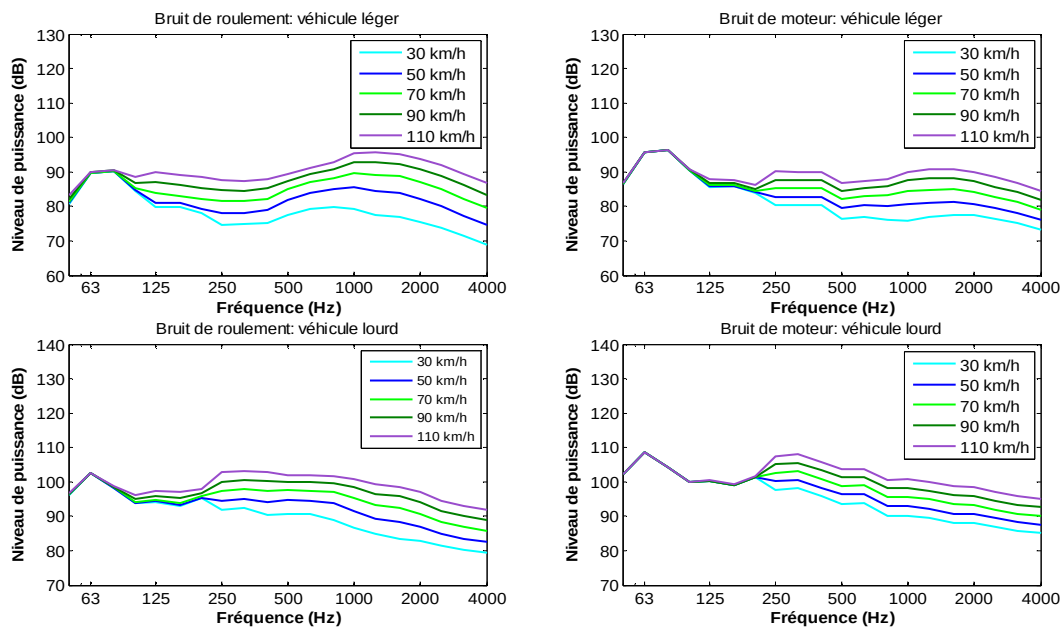


Figure 2.11. Spectres de niveau de puissance par bandes de tiers d'octave pour les bruits de roulement et de moteur, pour les véhicules légers et lourds et pour différentes vitesses des véhicules [133].

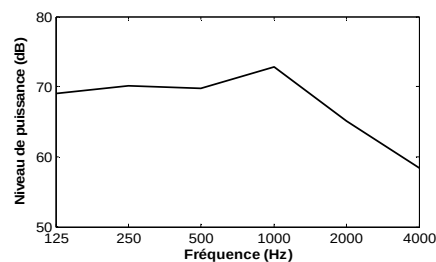


Figure 2.12. Spectre de niveau de puissance du bruit du tramway pour une vitesse de 30 km/h [134].

2.8. Hauteurs des protections acoustiques

Deux types de protections antibruit seront étudiés dans ce travail : les protections de grande hauteur et les protections de faible hauteur. Pour les premières, la hauteur est fixée à 3 ou 4 m. Pour les deuxièmes, la hauteur est fixée à 1 m. L'utilisation des murs antibruit de grande hauteur en milieu urbain, pour réduire le bruit routier, devient parfois limitée pour

des raisons techniques de sécurité et de coût. C'est pourquoi, des protections de faible hauteur sont envisagées dans cette thèse.

2.9. Choix des protections acoustiques innovantes à étudier

L'état de l'art sur les protections acoustiques innovantes utilisant des moyens naturels, qui nous intéressent ici, a permis de mettre en avant quatre principales protections : la végétation, les cristaux soniques, les merlons acoustiques et les écrans en gabions.

Concernant la végétation, différentes études théoriques et expérimentales ont permis de conclure que l'efficacité de ce type de protection acoustique est très limitée notamment dans la gamme de basses et moyennes fréquences où le bruit du trafic routier présente le maximum d'énergie acoustique. Ceci est dû principalement à la faible perte par transmission de l'énergie acoustique à travers la bande de végétation à cause de l'espacement important entre les arbres. Par conséquent, l'étude de l'efficacité de ce type d'écrans ne sera pas abordée dans notre travail.

Pour les cristaux soniques, nous avons noté qu'ils possèdent des propriétés acoustiques intéressantes notamment par prohiber la propagation des ondes acoustiques dans une bande de fréquences bien donnée. La position de cette bande dans la gamme de fréquence est fonction de la constante du réseau du cristal sonique. L'efficacité acoustique de tels écrans sur une large gamme de fréquences peut être améliorée soit par l'utilisation des diffuseurs absorbants ou résonants, soit par l'optimisation de l'arrangement des diffuseurs dans le cristal sonique. Ces cristaux soniques seront donc étudiés dans notre travail. Nous montrerons, dans un premier temps l'effet de certains paramètres qui peuvent influencer leur efficacité acoustique. Pour cela, nous effectuerons d'abord une étude numérique paramétrique en 2D pour étudier la capacité des cristaux soniques de grande hauteur à réduire les nuisances sonores d'une infrastructure routière. Les résultats de leurs pertes par réflexion et par diffraction seront exposés. Ensuite, nous proposerons d'étudier l'efficacité des cristaux soniques lorsqu'ils sont associés à des écrans droits conventionnels. Les simulations numériques réalisées dans cette partie seront en 2D et en 2D½. Enfin, nous effectuerons une étude d'optimisation des cristaux soniques de faible hauteur pour une infrastructure de tramway. L'objectif de cette partie sera d'optimiser certains paramètres qui ont été jugés importants lors de l'étude paramétrique dans les deux premières parties. Pour cela, nous utiliserons un algorithme d'optimisation génétique (choisi dans la section 2.4) couplé à un modèle de propagation BEM (choisi dans la section 2.1).

Puisque nous étudions des écrans acoustiques utilisant des moyens naturels, nous considérerons que les diffuseurs, formant la structure périodique des cristaux soniques, sont consti-

tués d'un matériau naturel présentant une surface rigide comme du bois ou du bambou. Ces diffuseurs peuvent être aussi couverts d'un matériau naturel très absorbant.

Concernant les merlons acoustiques, quelques publications disponibles dans la littérature ont montré que leur efficacité acoustique est légèrement inférieure de celle des protections conventionnelles. De telles protections ont l'avantage aussi d'avoir une bonne intégration dans le site. Leur intégration visuelle est améliorée puisqu'ils sont généralement recouverts de végétation. La facilité de la mise en œuvre et de l'entretien sont aussi des avantages de tels dispositifs antibruit. Par conséquent, nous choisissons aussi d'étudier l'efficacité acoustique des merlons antibruit. Dans un premier temps, nous effectuerons une étude numérique afin de montrer la sensibilité de l'efficacité des merlons à un certain nombre de paramètres. Nous comparerons l'efficacité de tels écrans à celle d'un écran acoustique conventionnel situé au pied du merlon acoustique côté sources sonores. Cela permet de mieux classer ces merlons parmi les différents écrans utilisés contrairement à la plupart des publications présentées dans l'étude bibliographique (voir paragraphe 1.2.2.3) dans lesquelles l'efficacité des merlons est comparée à celle d'un écran conventionnel placé au niveau de l'axe central du merlon. Les simulations numériques dans cette partie seront effectuées en 2D pour des merlons de grande et de faible hauteur. L'efficacité des merlons de grande hauteur sera étudiée pour une infrastructure routière tandis que celle des merlons de faible hauteur sera étudiée pour une infrastructure routière et pour une infrastructure de tramway. Dans un deuxième temps, nous effectuerons une recherche systématique des formes améliorées des merlons de forme complexe en réalisant une étude d'optimisation. La même procédure d'optimisation des cristaux soniques sera utilisée pour les merlons acoustiques.

Concernant les murs antibruit en gabions, nous avons précisé dans le premier chapitre qu'ils sont de plus en plus utilisés. Les principaux avantages de ces écrans est la facilité et la rapidité de la mise en œuvre par rapport aux écrans conventionnels. Cependant, aucune description numérique ou expérimentale de la performance acoustique de ces écrans n'est disponible dans la littérature. Par conséquent, nous avons choisi ces écrans afin d'en étudier l'efficacité acoustique numériquement et expérimentalement. Nous effectuerons, dans un premier temps, deux campagnes de mesures in-situ et sur modèle réduit pour déterminer les pertes par réflexion et par transmission engendrées par des murs en gabions de grande hauteur. Dans un deuxième temps, nous réaliserons une étude numérique paramétrique pour évaluer la perte par insertion des écrans en gabions de faible hauteur. Les simulations numériques seront effectuées en 2D pour une infrastructure routière.

CHAPITRE 3: EFFICACITÉ ACOUSTIQUE DE PROTECTIONS ANTIBRUIT EN GABIONS

Sommaire

3.1. Évaluation expérimentale de la performance acoustique des protections antibruit en gabions.	55
3.1.1. Mesures in-situ conformément à la norme CEN/TS 1793-5:2003.....	55
3.1.2. Mesures sur modèle réduit conformément à la norme CEN/TS 1793-5:2003	65
3.1.3. Nouvelle méthode de mesure in-situ adaptée aux écrans épais.....	67
3.1.4. Conclusions	76
3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur	77
3.2.1. Simulations numériques	78
3.2.2. Conclusions	89
3.3. Conclusions du chapitre	90

Le choix des matériaux ou du type d'écran acoustique dépend de multiples paramètres acoustiques et non acoustiques. De fait pour ces derniers, le coût, les contraintes d'entretien, l'esthétique, entrent aussi en ligne de compte. Dans le cadre de cette thèse, nous présentons une idée originale qui consiste à étudier des écrans antibruit en gabions. Il s'agit d'utiliser dans un premier temps deux méthodes expérimentales (mesures in-situ et sur modèle réduit) pour caractériser les propriétés acoustiques intrinsèques des écrans en gabions d'une hauteur de 3 m. Ensuite, une étude numérique paramétrique pour évaluer l'efficacité acoustique des écrans en gabions de faible hauteur (1 m) est effectuée.

3.1. Évaluation expérimentale de la performance acoustique des protections antibruit en gabions

Nous rappelons que les gabions sont définis comme des cages métalliques grillagées remplies de cailloux. La construction de murs antibruit en gabions se fait par un simple empilement des cages.

L'objectif de cette section est d'évaluer expérimentalement les propriétés acoustiques intrinsèques des murs antibruit en gabions. Nous présentons d'abord les résultats expérimentaux des mesures in-situ sur des murs en gabions en se basant sur la norme européenne CEN/TS 1793-5 :2003 [96]. Ensuite, nous réalisons une étude expérimentale qui consiste à appliquer cette dernière norme de mesure in-situ aux mesures sur modèle réduit pour évaluer les propriétés intrinsèques des gabions. Enfin, nous proposons une nouvelle méthode de mesure in-situ qui permet de s'affranchir de certaines limites de la méthode de mesure basée sur la norme européenne.

3.1.1. Mesures in-situ conformément à la norme CEN/TS 1793-5:2003

3.1.1.1. Principe de la mesure

Dans cette première étape de notre étude expérimentale, nous avons procédé à des tests in-situ à Livet et Gavet (département de l'Isère, région Rhône-Alpes) sur un mur antibruit en gabions de 3 m de haut et 1,1 m d'épaisseur constitué des concassés d'une granulométrie de 7/15 cm (figure 3.1).



Figure 3.1. Vue détaillée des cailloux constituant le mur antibruit en gabions.

Une analyse impulsionnelle est utilisée pour évaluer les propriétés intrinsèques en réflexion et en transmission. Elle consiste à recueillir un ensemble de signaux temporels (directs, réfléchis, transmis...) au niveau d'un récepteur, suite à la génération d'un stimulus bref et intense, par une source sonore, qui interagit avec l'écran acoustique : on parle de la «réponse impulsionnelle». L'intérêt d'un signal impulsionnel est de permettre de discriminer le trajet des ondes sonores entre la source et le récepteur. En analysant la réponse impulsionnelle, il est donc possible d'analyser chaque signal indépendamment. On peut notamment isoler la composante réfléchie et la composante transmise du signal. Pour les tests en réflexion et en transmission, le signal réfléchi ou transmis est comparé au signal direct provenant de la source en absence de l'écran acoustique.

Dans les tests menés, la méthode la plus appropriée à notre étude a été la MLS (Maximum Length Sequence). En effet, cette méthode, de type « impulsionnelle », présente une excellente immunité au bruit de fond (indispensable pour des mesures in situ) ; en outre le signal d'essai est déterministe et exactement répétable. C'est une méthode qui repose sur l'envoi d'une séquence pseudo-périodique binaire de base, composée de 2^N-1 points (0 ou 1) où N est appelée « ordre de la séquence ». Durant les tests, cette séquence représentant un bruit blanc est répétée plusieurs fois avec une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz. Après l'envoi d'un signal source $x(t)$, on enregistre le signal microphonique $y(t)$, puis on calcule la réponse impulsionnelle $h(t)$ en déconvoluant $y(t)$ par $x(t)$. Une fois la réponse impulsionnelle obtenue, il reste encore à filtrer la réponse impulsionnelle pour ne conserver que les composantes intéressantes et enfin à réaliser la FFT (Fast Fourier Transform) du signal filtré pour obtenir la réponse fréquentielle voulue.

La notion de filtrage temporel est primordiale dans notre étude. Elle permet de séparer les différentes composantes de la réponse impulsionnelle dans le temps. Selon la norme, une fenêtre d'analyse Adrienne doit être utilisée pour chacune des composantes que nous devons extraire. Cette fenêtre est constituée d'un front montant correspondant à une moitié gauche d'une courbe de Blackman-Harris d'une longueur de 0,5 ms, d'une partie principale correspondant à la partie haute d'une fenêtre rectangulaire de 5,18 ms, et d'un front descendant

décrivant une moitié droite d'une courbe de Blackman-Harris de 2,22 ms. La longueur totale de cette fenêtre est de 7,9 ms (figure 3.2).

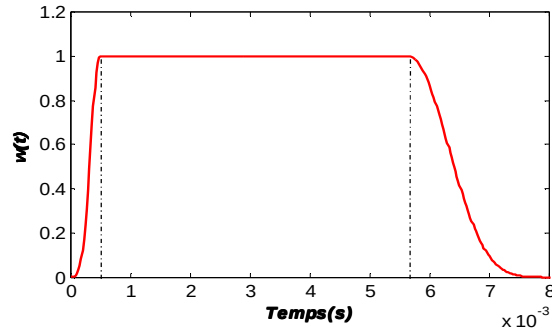


Figure 3.2. Fenêtre temporelle Adrienne : variation de l'amplitude w en fonction du temps.

Concernant le matériel de mesure, la source sonore utilisée est un haut-parleur JBL 2123H précédé d'un amplificateur NAD Electronics (modèle 208 Stereo Power Amplifier), le récepteur est un microphone demi pouce de type Brüel & Kjaer 4133 et un ordinateur portable équipé d'une carte d'acquisition ainsi qu'un logiciel qui génère le signal MLS et transforme les signaux obtenus en réponses impulsionnelles.

Le logiciel MATLAB est utilisé dans ce travail pour traiter les différentes réponses impulsionnelles afin de représenter les résultats fréquentiels de différents indices de performance acoustique indiqués dans la norme CEN/TS 1793-5.

3.1.1.2. Perte par réflexion de l'écran acoustique en gabions

L'objectif ici est d'évaluer la perte de niveau sonore de l'onde lorsqu'elle se réfléchit sur l'écran acoustique en gabions. Dans le dispositif expérimental (figure 3.3), on positionne la source sonore et le récepteur du même côté de l'écran acoustique. Le haut-parleur, placé à 1,5 m de hauteur, émet une onde sonore qui atteint directement le microphone situé à $d_{SM}=1,25$ m du haut-parleur et $d_M=0,25$ m de l'écran acoustique en gabions. Le microphone perçoit également l'onde réfléchie par le mur antibruit suivie par l'onde réfléchie par le sol ou par d'autres obstacles.

Après l'obtention de la réponse impulsionnelle, on cherche à séparer la composante directe et la composante réfléchie ainsi que l'élimination des réflexions parasites. Pour séparer la composante réfléchie $h_r(t)$, on utilise la technique de soustraction. Il s'agit de soustraire de la réponse impulsionnelle $h(t)$ un signal identique au signal incident $h_i(t)$. Ceci est obtenu en effectuant la même mesure en champ libre en gardant la même distance entre la source et le microphone.

La mesure de la perte par réflexion s'effectue en prenant 9 angles allant de -40° à 40° avec un pas de 10° . Ceci est présenté en figure 3.3.

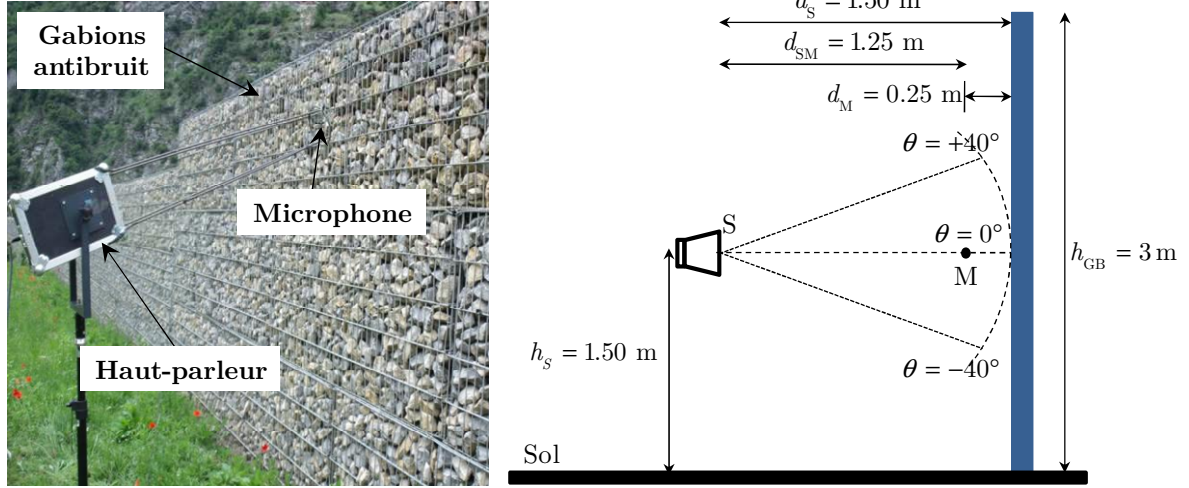


Figure 3.3. Dispositif expérimental de mesure de la perte par réflexion des gabions antibruit.

La caractérisation de la perte par réflexion des gabions est faite dans cette section en calculant les deux indices de réflexion décrits dans la norme de mesure. Pour le premier indice, on cherche à déterminer la perte par réflexion en fonction de la fréquence (en bandes de tiers d'octave Δf_j), c'est l'indice de réflexion RI_j donné par :

$$RI_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \frac{\int_{\Delta f_j} \left| FFT \left[(t.h_{r,k}(t).w_r(t)) \right] \right|^2 df}{\int_{\Delta f_j} \left| FFT \left[(t.h_i(t).w_i(t)) \right] \right|^2 df}, \quad (3.1)$$

Avec les notations suivantes : $w_i(t)$ est la fenêtre temporelle associée à la composante directe de référence (en champ libre), $w_r(t)$ est la fenêtre temporelle associée à la composante réfléchie, FFT est le symbole de la transformation de Fourier, j est l'indice des bandes de tiers d'octave, n_j est le nombre d'angles entrant dans le calcul de la moyenne, t est le temps dont l'origine est le début de la réponse impulsionnelle acquise par la chaîne de mesure. Ce dernier tient compte de l'atténuation de l'amplitude des ondes acoustiques réfléchies ayant parcouru différents trajets avant d'atteindre le microphone M.

Pour le deuxième indice, on cherche à évaluer la perte par réflexion globale à travers l'indice unique de réflexion DL_{RI} après la pondération des indices de réflexion RI_j en fonction du spectre sonore normalisé du trafic routier défini dans la norme EN 1793-3 [135] donnant le niveau L_j pour la bande de tiers d'octave j . L'indice unique de réflexion DL_{RI} est donné par :

$$DL_{RI} = -10 \log \left(\frac{\sum_{j=1}^{18} RI_j 10^{0,1L_j}}{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j}} \right), \quad (3.2)$$

Où le nombre 18 représente le tiers d'octave de 4 kHz. Le spectre de bruit de trafic routier donnant les niveaux L_j est présenté en figure 3.4.

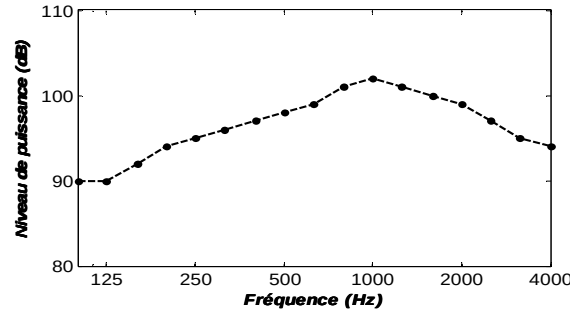


Figure 3.4. Spectre de bruit de trafic routier selon la norme EN 1793-3 :1997[135]. Variation de niveau de puissance du bruit en fonction de la fréquence en tiers d'octave.

Concernant le positionnement de la fenêtre temporelle dans la norme CEN/TS 1793-5, le pic de la composante réfléchiée était supposé se trouver à une durée $2d_M/c$ (où c est la célérité du son dans l'air) de la composante incidente, pour tous les angles d'incidence. Ce raisonnement n'est pourtant valable que pour la mesure à 0° . Par conséquent, nous avons varié la position de la fenêtre en fonction de l'angle de mesure. Pour un angle θ , elle commence à un instant $t_{r,\theta}$ après la composante directe de la réponse impulsionnelle :

$$t_{r,\theta} = 2.(d_s / \cos(\theta) - d_{SM}) / c \quad (3.3)$$

Un problème critique de la norme CEN/TS 1793-5 est la limite inférieure de fréquence f_{min} . Elle est estimée à l'inverse de la durée de la fenêtre d'analyse utilisée. Par conséquent, plus la durée de la fenêtre temporelle est longue, plus le contenu en basses fréquences des signaux transformés est riche. La durée de cette fenêtre dépend de la hauteur de l'écran acoustique et de l'angle de rotation de l'ensemble haut-parleur - microphone (voir figure 3.3). Cette durée est d'autant plus courte que la hauteur de l'écran acoustique est faible. Pour les différents angles de rotation, l'intervalle du temps séparant le signal dû à la réflexion sur les gabions et celui dû à la réflexion sur le sol ne dépasse pas quelques millisecondes. Par conséquent, la largeur de la fenêtre d'analyse doit être rétrécie pour ces angles de rotation. Nous avons effectué un calcul géométrique pour déterminer l'intervalle de temps Δt_θ séparant la composante réfléchiée par l'écran en gabions $h_r(t)$ et celle par le sol $h_s(t)$ (figure 3.5). La durée de la fenêtre d'analyse utilisée est égale par suite à Δt_θ .

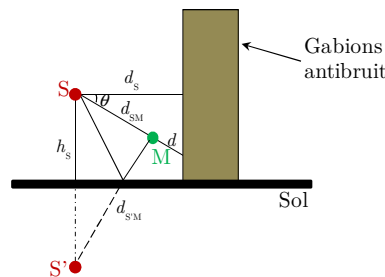


Figure 3.5. Différents trajets des rayons acoustiques atteignant un microphone M situé entre la source sonore S et l'écran antibruit en gabions.

Δt_θ est calculé par la relation suivante :

$$\Delta t_\theta = (d_{s'M} - (d_{SM} + 2d)) / c \quad (3.4)$$

Avec $d_{s'M} = (2h_s)^2 + d_{SM}^2 - 4h_s d_{SM} \cos(\pi / 2 + \theta)$ et $d = (d_s / \cos(\theta)) - d_{SM}$.

Les valeurs de Δt_θ sont données dans le tableau suivant pour les différents angles de rotation.

θ (°)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
Δt_θ (ms)	0	1,2	2,6	3,7	4,4	4,8	4,9	4,6	3,7

Tableau 3.1. Intervalles de temps séparant la composante réfléchie sur l'écran en gabions et celle réfléchie sur le sol en fonction de l'angle de mesure θ .

Puisque l'indice de réflexion est exprimé par une moyenne sur tous les angles de rotation, la limite inférieure de fréquence est par suite proportionnelle à la largeur de la fenêtre la plus étroite. Toutefois, à cause de l'effet de sol (faibles valeurs de Δt_θ), on exclut les trois premiers angles dans le calcul de RI_j . La limite inférieure f_{min} est déterminée par suite par l'inverse de la largeur de la fenêtre appliquée pour l'angle de rotation $\theta = -10^\circ$: $f_{min} = 1/0,0037 = 270$ Hz. Les résultats fréquentiels ne sont donc valables qu'au-dessus du tiers d'octave de 315 Hz.

Nous présentons en figure 3.6, pour quelques angles de mesure, la réponse impulsionnelle reçue ainsi que la composante réfléchie de la réponse impulsionnelle obtenue avec la technique de soustraction et la fenêtre d'analyse appliquée. Il est à noter que l'amplitude maximale de la fenêtre d'analyse est égale à 1 pour toutes les réponses impulsionnelles analysées. Cette amplitude est ajustée dans les figures des réponses impulsionnelles uniquement pour mieux visualiser les composantes fenêtrées.

Nous montrons en figure 3.7, la variation de l'indice de réflexion RI_j en fonction de la fréquence. La perte par réflexion de l'écran acoustique en gabions est d'autant plus grande que l'indice de réflexion RI_j est faible. Nous constatons que les valeurs d'atténuation en réflexion sont moyennes et que certaines fréquences sont plus absorbées que d'autres. Pour la gamme de basses et moyennes fréquences, pour laquelle le bruit de trafic routier est très riche en énergie, l'absorption acoustique de l'écran en gabions est satisfaisante. L'absorption globale, pour toute la gamme de fréquences, est calculée à l'aide de l'indice unique de réflexion DL_{RI} . Il vaut dans notre cas 5 dB, une valeur qui montre, selon la norme CEN/TS 1793-5, que la perte par réflexion globale de l'écran acoustique en gabions est moyenne.

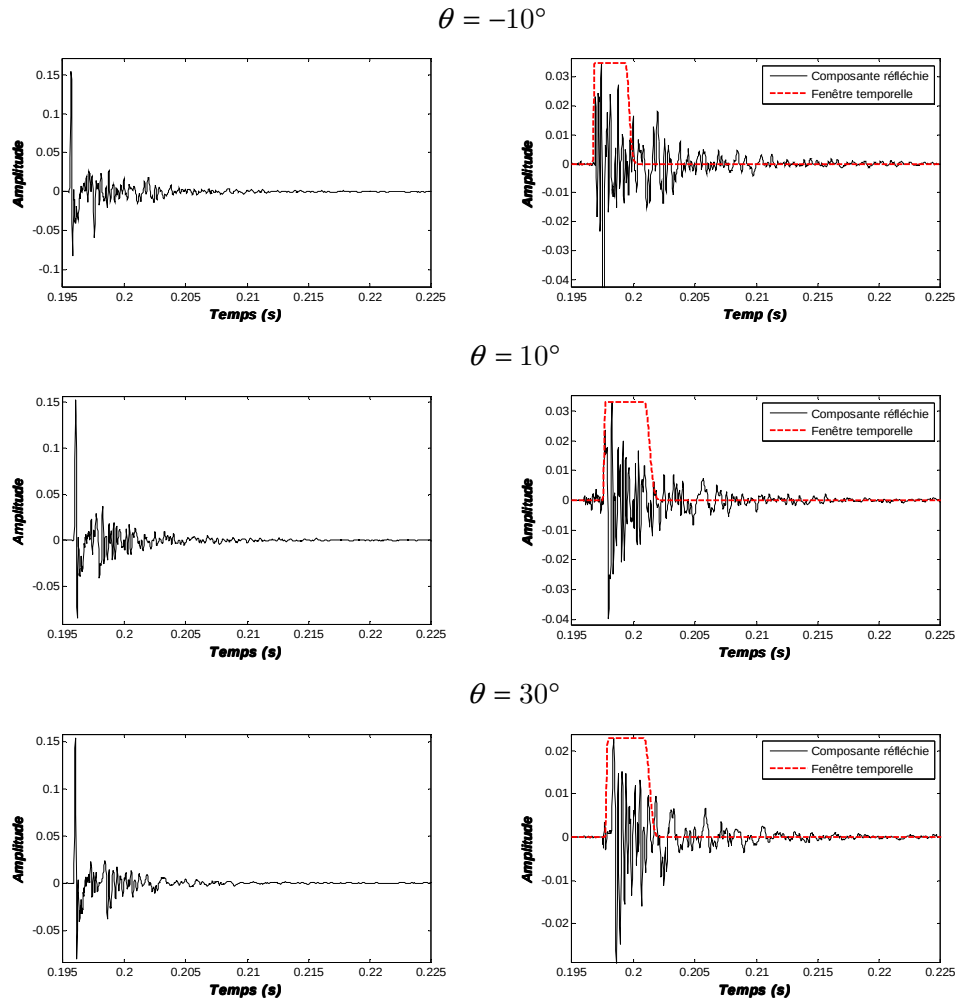


Figure 3.6. Réponses impulsionnelles reçues (à gauche) et composantes réfléchies fenêtrées (à droite) pour quelques angles de rotation.

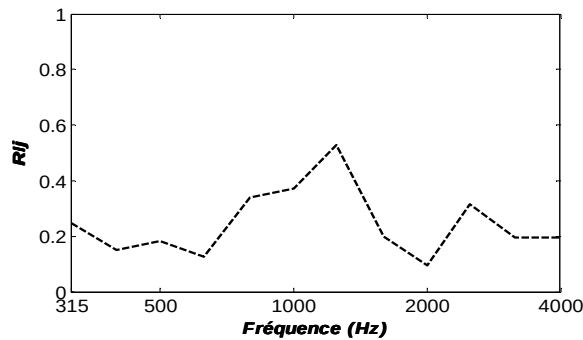


Figure 3.7. Indice de réflexion par tiers d'octave de l'écran acoustique en gabions.

3.1.1.3. Perte par transmission de l'écran acoustique en gabions

L'objectif ici est d'évaluer la perte de niveau sonore de l'onde acoustique après sa transmission à travers l'écran acoustique en gabions en analysant les réponses impulsionnelles reçues derrière l'écran. Dans le dispositif expérimental (figure 3.8), on positionne la source sonore et le récepteur de part et d'autre de l'écran acoustique en gabions. Le haut-parleur, placé à $d_s = 1$ m de l'écran acoustique à une hauteur de 1,5 m, émet une onde sonore qui atteint

le microphone situé à $d_M=0,25$ m derrière l'écran. Le microphone perçoit également l'onde diffracté par l'écran, l'onde diffractée ayant subi une réflexion sur le sol, l'onde réfléchi sur le sol et les ondes réfléchies par d'autres obstacles proches. L'écran en gabions n'est pas infiniment long, et le microphone peut recevoir également la composante diffractée par les arêtes latérales de l'écran. Cette composante arrive en retard par rapport aux autres composantes. Il est donc facile de s'affranchir de cette composante dans la réponse impulsionnelle.

Pour déterminer la perte par transmission, on utilise 9 points récepteurs situés sur une grille de mesure derrière l'écran en gabions. La réponse impulsionnelle est échantillonnée à chaque point de mesure (voir figure 3.8). Les composantes transmises $h_t(i)$ des réponses impulsionnelles, pour les différentes positions dans la grille, sont comparées à celles ($h_i(t)$) obtenues par une autre série de mesure avec la même configuration en absence de l'écran acoustique.

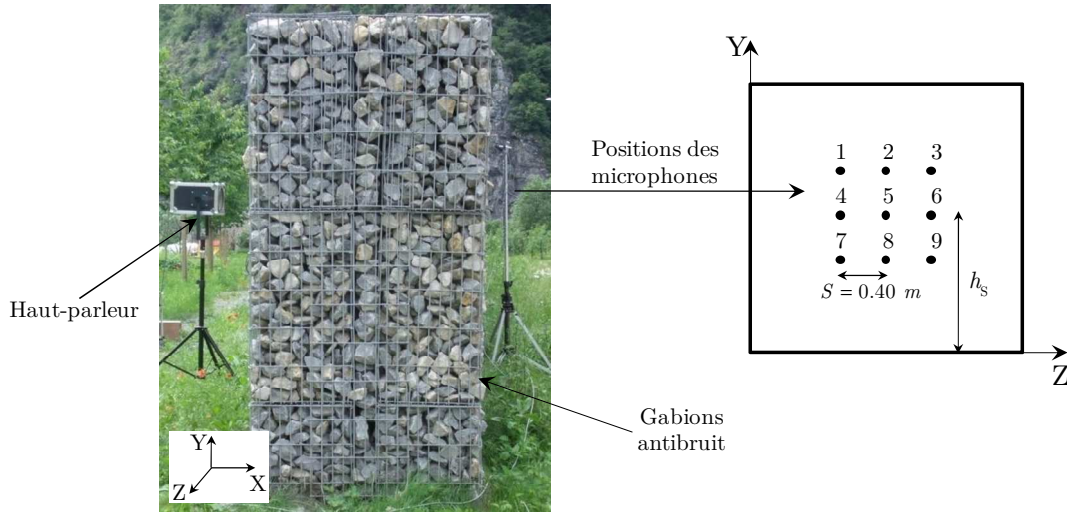


Figure 3.8. Dispositif expérimental de mesure de la perte par transmission des gabions antibruit.

La caractérisation de la perte par transmission des gabions est faite dans cette section en calculant les deux indices d'isolation décrits dans la norme de mesure. L'indice d'isolation acoustique SI_j en fonction de la fréquence (en bandes de tiers d'octave) est donné par :

$$SI_j = -10 \log \left(\frac{\sum_{k=1}^{n_j} \int_{\Delta f_j} \left| FFT \left[(h_t(t) \cdot w_t(t)) \right] \right|^2 df}{n \cdot \int_{\Delta f_j} \left| FFT \left[(h_i(t) \cdot w_i(t)) \right] \right|^2 df} \right) \quad (3.5)$$

Avec les notations suivantes : $w_i(t)$ est la fenêtre temporelle associée à la composante directe de référence, $w_t(t)$ est la fenêtre temporelle associée à la composante réfléchi, n est le nombre de points de balayage dans la grille des récepteurs.

3.1. Évaluation expérimentale de la performance acoustique des protections antibruit en gabions

L'indice unique d'isolation acoustique DL_{SI} permet de déterminer la perte par transmission globale après la pondération des indices d'isolation acoustique en fonction du spectre sonore normalisé du trafic routier :

$$DL_{SI} = -10 \log \left(\frac{\sum_{j=1}^{18} 10^{-0,1SI_j} \cdot 10^{0,1L_j}}{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j}} \right) \quad (3.6)$$

Comme pour les tests en réflexion, la limite inférieure de fréquence f_{min} est inversement proportionnelle à la largeur de la fenêtre temporelle. Cette largeur dépend de la hauteur de l'écran acoustique et du point de mesure derrière l'écran en gabions. Pour les différents points de mesure, le signal transmis à travers les gabions, le signal dû à la diffraction sur le bord de l'écran et celui réfléchi sur le sol sont proches dans la réponse impulsionnelle. Nous avons effectué un calcul géométrique pour déterminer l'intervalle de temps Δt_d séparant la composante transmise $h_t(t)$ et la composante diffractée par le sommet $h_d(t)$ et l'intervalle de temps Δt_s séparant la composante transmise et la composante réfléchie par le sol $h_s(t)$ (figure 3.9). La composante diffractée par le sommet de l'écran ayant déjà subi une réflexion sur le sol est la dernière reçue dans la réponse impulsionnelle.

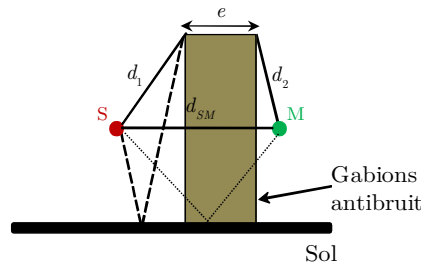


Figure 3.9. Différents trajets des rayons acoustiques atteignant un microphone M situé derrière l'écran antibruit en gabions.

Δt_s est calculé en utilisant l'équation 3.4 et Δt_d est calculé par l'équation 3.7.

$$\Delta t_d = (d_1 + d_2 + e - d_{SM}) / c \quad (3.7)$$

Les valeurs de Δt_d et Δt_s sont données dans le tableau 3.2 pour les différents points dans la grille de mesure. Par approximation, les valeurs sont les mêmes pour chaque ligne horizontale de récepteurs dans la grille.

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Δt_d (ms)	5,2	5,2	5,2	6	6	6	7,1	7,1	7,1
Δt_s (ms)	5	5	5	4,3	4,3	4,3	3,5	3,5	3,5

Tableau 3.2. Intervalles de temps entre la composante transmise et la composante diffractée par le sommet (Δt_d) et entre la composante transmise et la composante réfléchie sur le sol (Δt_s).

La limite inférieure f_{min} est déterminée par suite par l'inverse de la largeur de la fenêtre la plus étroite : $f_{min}=1/0,0035=287$ Hz. Comme pour les tests en réflexion, les résultats fréquentiels sont donc valables seulement au-dessus du tiers d'octave de 315 Hz.

Nous présentons en figure 3.10, pour quelques points dans la grille de mesure, la composante transmise et la composante incidente avec les fenêtres temporelles appliquées. Pour la composante incidente, on peut constater que la composante réfléchi sur le sol est toujours très proche de la composante directe. Pour la composante transmise, les signaux dus à l'effet de sol et à l'effet de diffraction arrivent donc dans un intervalle de temps très court après le début du signal transmis.

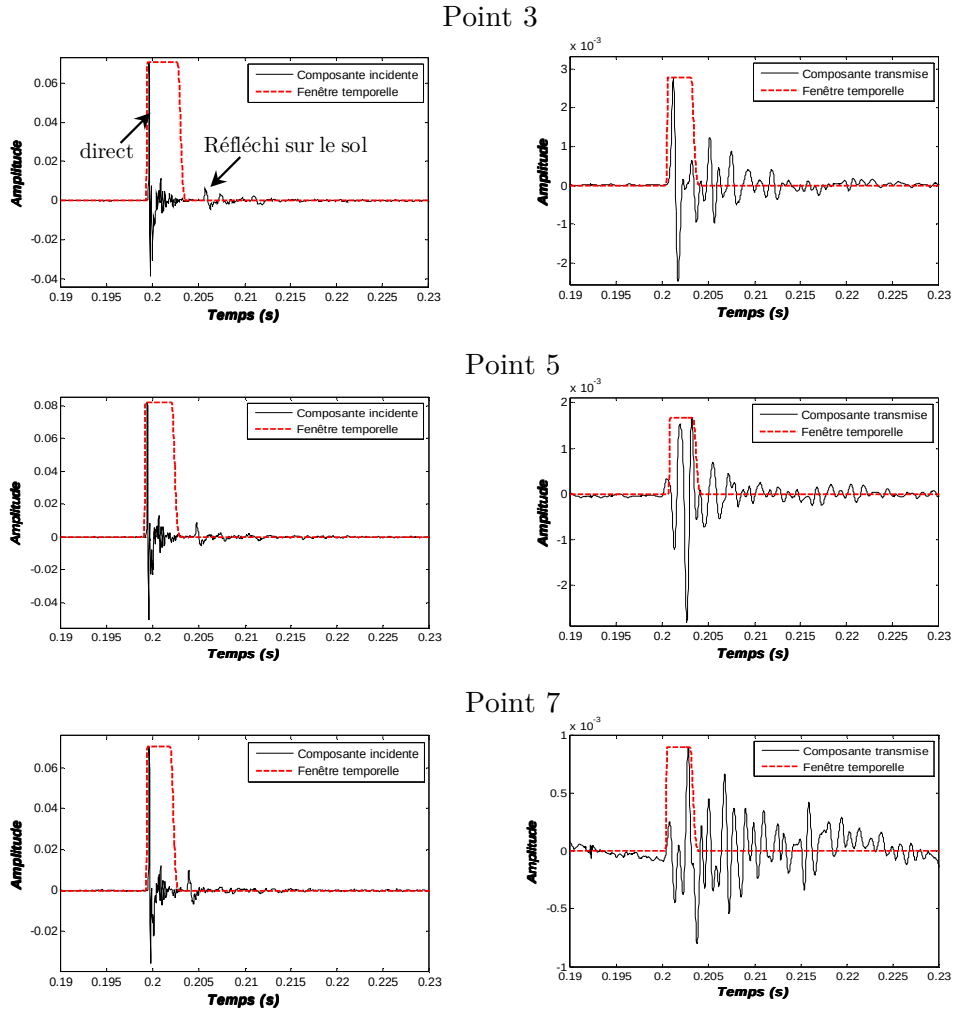


Figure 3.10. Composantes directes (à gauche) et composantes transmises (à droite) fenêtrées pour quelques points dans la grille de mesure.

Nous présentons en figure 3.11 la variation de l'indice d'isolation SI_j en fonction de la fréquence. L'allure de la courbe de SI_j montre que la perte par transmission de l'écran acoustique en gabions est d'autant plus forte que la fréquence est élevée. La pente de croissance de SI_j en fonction de la fréquence est plus forte en hautes fréquences qu'en basses et moyennes fréquences. La forte perte par transmission, aux hautes fréquences, est due aux phénomènes

de diffusion et réflexion des ondes acoustiques lorsque la taille des cailloux devient égale ou supérieure à la longueur d'onde. Les pertes par effet visqueux peuvent être aussi importantes aux hautes fréquences à cause des frottements d'air internes au niveau de la surface de contact cailloux/air induits par l'onde acoustique. La perte par transmission globale, pour toute la gamme de fréquences, est calculée à l'aide de l'indice unique d'isolation acoustique DL_{SI} . Il vaut dans notre cas 20 dB, une valeur qui montre, selon la norme CEN/TS 1793-5, que la perte par transmission de l'écran acoustique en gabions est moyenne.

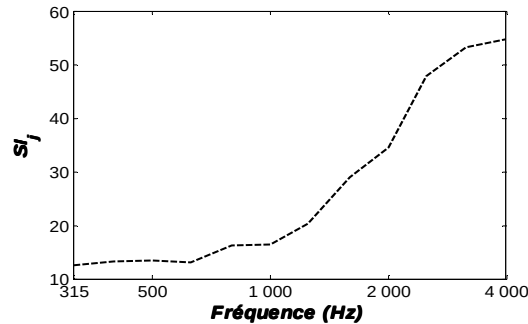


Figure 3.11. Indice d'isolation acoustique par tiers d'octave de l'écran acoustique en gabions.

3.1.2. Mesures sur modèle réduit conformément à la norme CEN/TS 1793-5:2003

Dans cette section, nous présentons une idée originale qui consiste à transposer la norme de la mesure in-situ CEN/TS 1793-5 :2003 à l'échelle réduite en utilisant les mêmes techniques de mesure dans la norme. Le principal avantage de la mesure sur modèle réduit est de mieux contrôler les paramètres environnementaux. Nous proposons de développer un dispositif expérimental de mesure sur maquette (figure 3.12) dans une chambre quasi anéchoïque (centre des maquettes, CSTB, Grenoble). Nous utilisons les mêmes techniques de mesure in-situ (méthode impulsionnelle, filtrage temporel, etc). Le sol est simulé par des panneaux de bois agglomérés. La source sonore est présentée par un tweeter dont les fréquences reproduites sont comprises entre 2000 et 20000 Hz. Les capteurs utilisés sont des microphones demi-pouce de type Bruël & Kjaer 4133. L'acquisition est réalisée avec un système impulsionnel développé par Brüel&Kjaer. Les études de validation sont effectuées, pour s'approcher au mieux des propriétés acoustiques des gabions à l'échelle réelle, en comparant les niveaux de bruit obtenus en utilisant le modèle à l'échelle réduite avec ceux des calculs numériques à l'échelle réelle. Les résultats des mesures ont montré que la réduction de la taille des cailloux par 10 permet d'obtenir une grande similitude en dessous de 2 kHz à l'échelle réelle (20 KHz à l'échelle réduite) (figure 3.13). La méthode de modélisation numérique d'écrans en gabions par la BEM est présentée dans la section 3.2. Par conséquent, le facteur d'échelle choisi pour les mesures sur modèle réduit est de 10. Le rapport entre les dimensions géométriques divi-

sées par le facteur d'échelle et la longueur d'onde du son est conservé lors du passage à échelle réduite. Pour cela, la gamme des fréquences étudiée est multipliée par le facteur d'échelle. La granulométrie des cailloux utilisés pour construire le mur antibruit en gabions à l'échelle réduite est 0,7/1,5 cm. La porosité équivalente des gabions est de l'ordre de 40% pour les deux campagnes de mesure in-situ et à l'échelle réduite. Cette porosité était déterminée par une méthode simple qui consiste à mesurer le volume total V_t d'un échantillon de cailloux rempli d'eau et le volume d'eau V_e obtenu après l'enlèvement des cailloux. La porosité équivalente est alors le rapport entre V_e et V_t . Il est également à noter que la température dans la salle des maquettes est un paramètre qui peut influencer les résultats de mesure; il est contrôlé pendant le processus de mesurage.

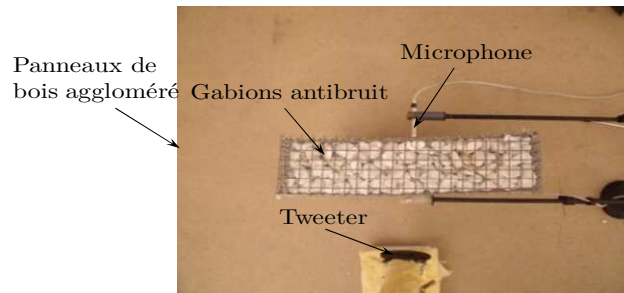


Figure 3.12. Dispositif expérimental de mesure sur modèle réduit à l'échelle un dixième des propriétés intrinsèques de l'écran acoustique en gabions.

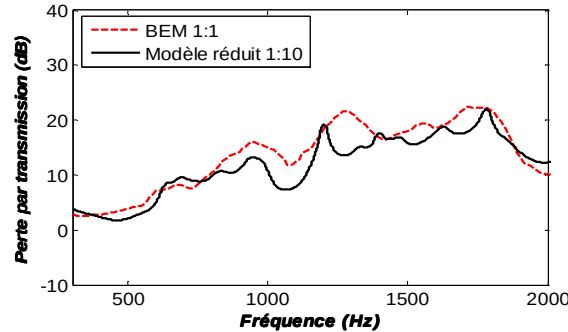


Figure 3.13. Perte par transmission de l'écran acoustique en gabions. Simulation numérique à l'échelle réelle par la BEM : ligne continue, mesure à l'échelle de $1/10^{\text{ème}}$: ligne pointillée.

Les résultats de deux campagnes de mesure sont comparés dans cette section pour les deux tests en réflexion et en transmission. Les propriétés acoustiques d'absorption et de transmission du mur antibruit en gabions sont déterminées par les deux indices de réflexion (RI) et d'isolation acoustique (SI). La comparaison de ces deux indices en fonction de la fréquence pour les deux types de mesure est présentée en figure 3.14. Pour les courbes de RI , les deux courbes ont la même allure et l'accord est acceptable. Le décalage de fréquence entre les deux courbes s'explique probablement par la différence de la rugosité de surface du côté des sources sonores entre les deux échelles de mesure. L'indice unique de réflexion DL_{RI} vaut 4 dB et 5 dB pour les mesures à échelle réduite et à l'échelle réelle, respectivement. Pour les courbes de SI , il y a un bon accord entre les résultats. L'indice unique d'isolation acoustique

vaut respectivement 19 dB et 20 dB pour les mesures à l'échelle réduite et à l'échelle réelle. Globalement, l'accord est satisfaisant entre les résultats de deux campagnes de mesure. Cela montre que nous pouvons mesurer la performance acoustique de murs antibruit de formes complexes sur modèle réduit en utilisant la norme de mesure in-situ CEN/TS 1793-5.

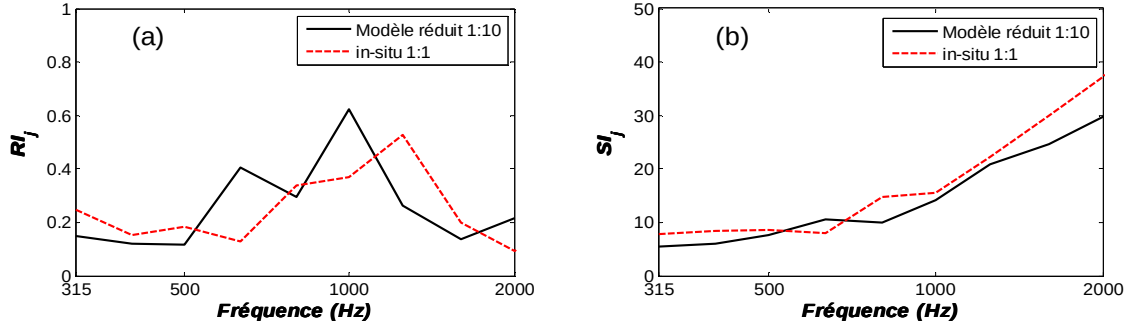


Figure 3.14. Indice de réflexion (a) et indice d'isolation acoustique (b) en fonction de la fréquence: comparaison entre les mesures in-situ (ligne continue) et les mesures sur maquette (ligne pointillée).

Dans les deux dernières sections, nous avons évalué expérimentalement la performance acoustique d'un écran antibruit en gabions. Nous avons effectué deux campagnes de mesure in-situ et sur modèle réduit, en se basant sur la norme européenne CEN/TS 1793-5, pour quantifier ses pertes par réflexion et par transmission. Concernant le filtrage temporel des réponses impulsionnelles, nous avons ajusté la largeur de la fenêtre temporelle pour les différents points de mesure en réflexion et en transmission. Cela a été réalisé, en se basant sur un calcul géométrique, pour séparer les différentes composantes de la réponse impulsionnelle et essentiellement pour s'affranchir de l'effet de sol. Toutefois, à cause de la largeur limitée de la fenêtre d'analyse, on augmente la limite inférieure de fréquence et surtout on risque de ne pas prendre en compte l'énergie des ondes acoustiques qui peuvent parcourir des longs trajets à l'intérieur d'un écran en gabions très épais avant d'atteindre le microphone. Cela est bien remarqué en regardant les différentes réponses impulsionnelles obtenues (figures 3.6 et 3.10) où une quantité d'énergie est captée par le microphone après la réception de la composante réfléchie sur le sol ou celle diffractée par le sommet de l'écran. Bien que la norme CEN/TS 1793-5 ait été développée pour tester tout type d'écran acoustique, nous avons constaté qu'elle devient limitée dans le cas des écrans épais et hétérogènes tels que les écrans en gabions. Par conséquent, nous proposerons dans la section suivante une nouvelle méthode de mesure in-situ adaptée aux écrans épais et tout autre type d'écrans.

3.1.3. Nouvelle méthode de mesure in-situ adaptée aux écrans épais

L'objectif de cette méthode est de concevoir d'autres configurations de mesure permettant d'avoir un fenêtrage temporel le plus large possible afin de contenir le maximum d'énergie acoustique sans être gêné par l'effet de sol ou l'effet de la diffraction.

La première idée dans notre méthode est de positionner la source sonore (haut-parleur) sur un sol rigide pour les deux tests en réflexion et en transmission. Cela permet de s'affranchir de l'effet de sol puisque le phénomène d'interférence est annulé à cause d'une différence de marche très faible ainsi que toute absorption par effet de sol. De cette manière, les fenêtres temporelles appliquées aux signaux réfléchis par l'écran pourront être très élargies. L'idée de placer la source sur le sol présente aussi un cas réaliste du bruit de trafic routier. En effet, cela permet de simuler le bruit de roulement des véhicules, bruit largement dominant dès que la vitesse dépasse 50 km/h. Les configurations conçues dans cette section sont données en figures 3.15 et 3.16 respectivement pour les tests en réflexion et les tests en transmission.

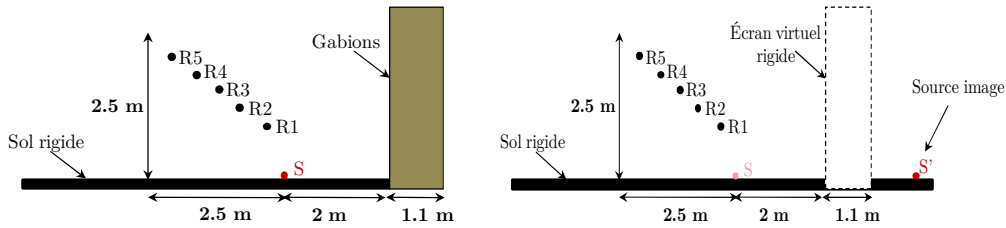


Figure 3.15. Nouveau dispositif expérimental de mesure de la perte par réflexion des gabions antibruit. À gauche : configuration en présence de l'écran en gabions ; à droite : configuration de référence.

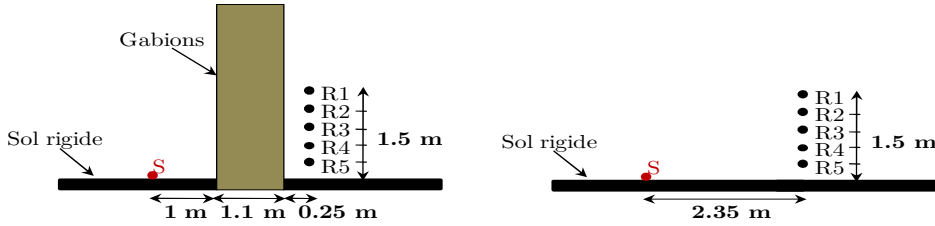


Figure 3.16. Nouveau dispositif expérimental de mesure de la perte par transmission des gabions antibruit. À gauche : configuration en présence de l'écran en gabions ; à droite : configuration de référence.

Pour les tests en réflexion (figure 3.15), la source est placée à 2 m de l'écran en gabions. Ceci présente une distance réaliste séparant une voie routière et un écran acoustique. Concernant le positionnement des points récepteurs, nous cherchons à trouver l'emplacement du microphone qui permet d'avoir une différence de marche supérieur ou égale à 3 m entre le rayon direct et le rayon réfléchi. L'objectif de cet emplacement est d'éloigner suffisamment la composante réfléchie sur l'écran en gabions de celle reçue directement de la source sonore. En effet, dans la méthode de mesure in-situ selon la norme CEN/TS 1793-5, la solution pour éloigner les réflexions parasites consiste à rapprocher le microphone le plus possible de l'écran à tester. L'inconvénient de cette solution est que le signal incident et le signal réfléchi se rapprochent et ne peuvent plus être séparés par une fenêtre temporelle de largeur suffisante. La technique de soustraction a été proposée pour pallier cet inconvénient. La principale contrainte de cette technique est que pour reproduire le signal incident avec une bonne précision,

3.1. Évaluation expérimentale de la performance acoustique des protections antibruit en gabions

il est nécessaire de conserver un emplacement relatif de la source et du microphone parfaitement identique entre les deux mesures. Avec la conservation d'une différence de marche supérieure ou égale à 3 m entre le signal direct et le signal réfléchi par l'écran, il est donc facile de séparer les deux signaux. La fenêtre d'analyse est donc appliquée directement à la composante réfléchie de la réponse impulsionnelle.

Concernant les points récepteurs, si on les positionne sur une ligne verticale au-dessus de la source, la différence de marche, déterminée par un calcul géométrique, diminue lorsqu'on monte en altitude. Pour maintenir une différence de marche de 3 m pour tous les points récepteurs, nous avons donc cherché, pour chaque point récepteur, les points d'intersection de deux cercles dont le rayon de l'un est supérieur au rayon de l'autre par 3 m. Le point cherché est celui qui se situe dans le demi-plan supérieur du cercle (figure 3.17). Les équations de deux cercles permettent d'obtenir une équation du second degré dont l'une de deux solutions est la position du point récepteur cherchée. Le premier cercle est de centre S(0,0) et de rayon SR où S est le point source et R est le point récepteur. Le deuxième cercle est de centre S'(-4,0) et de rayon S'R où S' est le point source image. SR présente le rayon acoustique direct et S'R présente le même trajet du rayon réfléchi sur l'écran en gabions. Pour trouver les positions de cinq points récepteurs, nous avons choisi aléatoirement cinq valeurs de SR et S'R tels que S'R-SR=3. Les positions de cinq points récepteurs sont données dans le tableau 3.3.

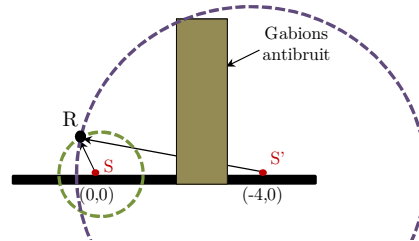


Figure 3.17. Intersection de deux cercles permettant de trouver la position du point récepteur pour une différence de marche entre SR et S'R égale à 3 m.

Récepteur	R1 (SR1=1 ; S'R1=4)	R2 (SR1=1,5 ; S'R1=4,5)	R3 (SR1=2 ; S'R1=5)	R4 (SR1=2,5 ; S'R1=5,5)	R5 (SR1=3 ; S'R1=6)
x (m)	-0,40	-0,85	-1,28	-1,71	-2,10
y (m)	0,91	1,25	1,53	1,81	2,15

Tableau 3.3. Positions de cinq points récepteurs dans la configuration de mesure en réflexion.

Pour déterminer la perte par réflexion de l'écran en gabions, les signaux réfléchis par ce dernier seront comparés à ceux réfléchis par un écran de référence droit et rigide situé à la même position de l'écran en gabions. Pour cela, nous utilisons la méthode des sources images où le champ réfléchi par la surface rigide de l'écran de référence peut être approximé par le champ direct issu d'une source équivalente (figure 3.15). Cette approximation reste valable si la hauteur de l'écran est supérieure à la longueur d'onde étudiée. Une deuxième série de me-

tures, pour les différents points récepteurs, est donc effectuée au-dessus d'un sol rigide en présence de la source S' et en absence de l'écran en gabions.

Pour les tests en transmission (figure 3.16), nous avons placé la source à 1 m de l'écran en gabions. Une ligne de récepteurs est placée à 0,25 m derrière l'écran. Les récepteurs sont espacés par 0,3 m et montent jusqu'à une altitude de 1,5 m. Ceci permet d'éloigner la composante diffractée par le sommet de l'écran de celle transmise à travers l'écran afin d'avoir un fenêtrage temporel le plus large possible. La largeur minimale de la fenêtre d'analyse, déterminée suite à un simple calcul géométrique, est de 12 ms. La limite inférieure de fréquence dans ce cas est de 83 Hz. Pour déterminer la perte par transmission de l'écran en gabions, les signaux transmis à travers ce dernier seront comparés à ceux reçus directement en absence de l'écran en gabions (voir figure 3.15).

3.1.3.1. Mesures de la perte par réflexion

Le dispositif expérimental pour la mesure de la perte par réflexion selon la nouvelle méthode est présenté en figure 3.18. Pour simuler un sol rigide, des panneaux de bois agglomérés de 2 cm d'épaisseur sont utilisés dans cette campagne de mesure.

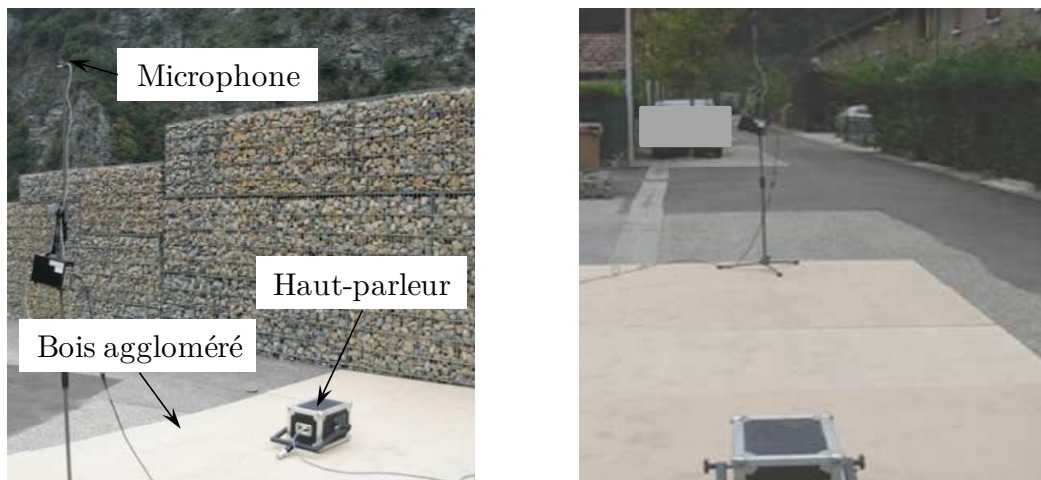


Figure 3.18. Dispositif expérimental de mesure de la perte par réflexion des gabions antibruit. À gauche : configuration en présence de l'écran en gabions ; à droite : configuration de référence.

Il est à noter que le microphone a été placé de telle manière que l'énergie rediffusée par le haut-parleur, après la réflexion du signal émis sur les gabions, arrive au microphone sur un angle de 180° . Comme la directivité du microphone augmente pour cet angle et puisque les dimensions du haut-parleur sont faibles par rapport aux celles de l'écran en gabions, l'énergie rétrodiffusé par le haut-parleur et captée par le microphone est très faible. Cela permet donc de s'affranchir des réflexions parasites qui peuvent perturber la réponse impulsionnelle reçue par le microphone. Pour s'assurer que la rétrodiffusion par le haut-parleur n'influe pas sur la qualité des résultats finaux, nous avons effectué une simulation numérique avec le code de calcul BEM (utilisé dans la section 3.2 de ce chapitre) en deux dimensions. Nous avons calculé

lé le champ de pression au niveau des points récepteurs pour deux cas. Pour le premier cas, nous modélisons un point source, donc nous ne tenons pas compte des dimensions de la source. Pour le deuxième cas, un petit obstacle réfléchissant est modélisé à 1 cm derrière le point source pour se rapprocher du cas du haut-parleur. Dans une première étape, les champs de pression calculés pour les deux cas sont transformés en des signaux temporels par une transformée de Fourier inverse. Dans une deuxième étape, les composantes réfléchies par l'écran ont été fenêtrées avant de passer de nouveau au domaine fréquentiel par une transformée de Fourier pour obtenir les niveaux de pression du champ réfléchi pour chaque cas. En figure 3.19, nous montrons la variation de ces niveaux de pression en fonction de la fréquence. Nous constatons donc que les dimensions du haut parleur influent très légèrement sur les résultats fréquentiels finaux. La différence du niveau global entre les deux spectres ne dépasse pas 0,2 dB(A). Cela permet dans la suite de cette étude de présenter les résultats des mesures avec des faibles valeurs d'incertitude.

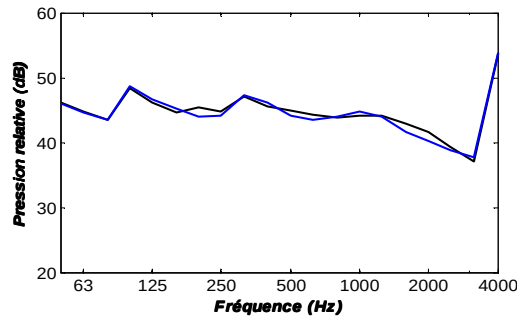


Figure 3.19. Niveaux de pression du champ réfléchi par l'écran en gabions déterminés par la BEM. La courbe en bleu est pour le cas où les dimensions du haut-parleur ne sont pas prises en compte et la courbe en noir est pour le cas où les dimensions du haut-parleur sont prises en compte.

La caractérisation de l'absorption acoustique de l'écran acoustique en gabions est faite dans cette section en calculant la perte par réflexion RL_j en fonction de la fréquence (en bandes de tiers d'octave Δf_j). Elle est donnée par la moyenne logarithmique des pertes par réflexion mesurées aux cinq points récepteurs:

$$RL_j = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^5 10^{L_{ref,i}(\Delta f_j)}}{\sum_{i=1}^5 10^{L_{GB,i}(\Delta f_j)}} \right) \quad (3.8)$$

où $L_{ref,i}(\Delta f_j)$ est le niveau de pression acoustique, au point récepteur i et pour la bande du tiers d'octave Δf_j , pour la configuration de référence; $L_{GB,i}(\Delta f_j)$ est le niveau de pression acoustique, au point récepteur i et pour la bande de tiers d'octave Δf_j , pour la configuration en présence de l'écran acoustique en gabions. Ces niveaux sont obtenus par une transformée de Fourier des signaux temporels. La perte par réflexion globale RL_A en dB(A) est obtenue

après la pondération des coefficients de réflexion RL_j en fonction du spectre sonore du trafic routier défini dans la norme EN 1793-3 [135] donnant le niveau L_j pour la bande de tiers d'octave j .

Nous présentons en figure 3.20, pour le récepteur R1, les réponses impulsionnelles reçues pour la configuration en présence de l'écran en gabions et pour la configuration de référence. Les réponses impulsionnelles obtenues pour les cinq récepteurs sont présentées en annexe B. Pour la configuration en présence de l'écran en gabions, le signal réfléchi arrive presque après 9 ms du signal direct. Le signal réfléchi est donc fenêtré directement sans soustraire de la réponse impulsionnelle un signal identique au signal direct. La durée de la composante réfléchie est beaucoup plus grande que celle du signal direct. En effet, la différence de marche entre un signal réfléchi sur la face de l'écran côté source et un signal réfléchi sur la face de l'écran côté récepteur après la propagation de l'onde dans les gabions est égale à deux fois la largeur de l'écran en gabions. Des signaux réfléchis sont retardés par rapport à d'autres aussi à cause de la nature hétérogène et poreuse des gabions où les ondes peuvent parcourir des longs trajets à l'intérieur des gabions avant d'atteindre le récepteur.

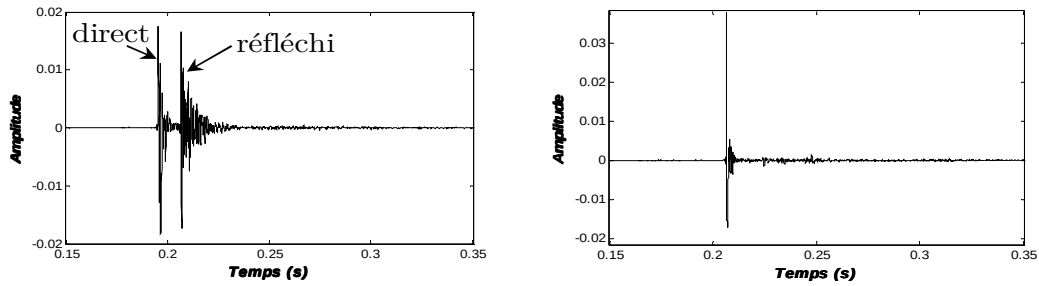


Figure 3.20. Tests en réflexion : réponses impulsionnelles reçues, pour le point récepteur R1, pour la configuration en présence de l'écran en gabions (graphique de gauche) et pour la configuration de référence (graphique de droite).

Afin de vérifier l'utilité de notre nouvelle méthode de mesure, on montre en figure 3.21 la variation de la perte par réflexion de l'écran en gabions en fonction de la fréquence pour différentes largeurs de la fenêtre d'analyse. Pour chaque spectre, la valeur de la perte par réflexion globale en dB(A) est donnée en légende. Nous constatons bien l'influence du fenêtrage appliqué sur les résultats finaux. Pour la plupart des bandes de tiers d'octave, plus la fenêtre d'analyse est large, plus la perte par réflexion est faible. Les valeurs de la perte par réflexion globale en dB(A) montre que nous pouvons surestimer l'absorption de l'écran en gabions si la fenêtre d'analyse n'est pas assez large. En effet, en augmentant la largeur de la fenêtre d'analyse, nous incluons plus d'énergie acoustique captée par le microphone dans le signal fenêtré avant de passer au domaine fréquentiel via une transformée de Fourier. La durée du signal fenêtré doit être aussi suffisamment longue dans notre cas afin de capturer l'énergie relative à l'ensemble des fréquences étudiées. En effet, les diverses composantes fréquentielles

3.1. Évaluation expérimentale de la performance acoustique des protections antibruit en gabions

des ondes acoustiques auront à l'intérieur des gabions des parcours moyens de longueurs différentes provoquant ainsi un étalement temporel de la composante réfléchie de la réponse impulsionnelle. En analysant les différentes courbes de la perte par réflexion en figure 3.21, nous constatons que ce sont principalement les basses et les moyennes fréquences qui ne sont pas prises en compte à cause de la faible durée de la fenêtre d'analyse. Il est à noter que la convergence des résultats est assurée à partir d'une durée de fenêtrage de 20 ms. Au delà de cette durée, la variation de la perte par réflexion globale ne dépasse pas 0,05 dB(A). En effet, les signaux qui atteignent le microphone après cette durée sont très atténués et ne provoquent pas une augmentation des niveaux de pression acoustique. On a alors bien capté l'ensemble de l'énergie réfléchie nécessaire à un calcul exact du RL_j , et non surestimé.

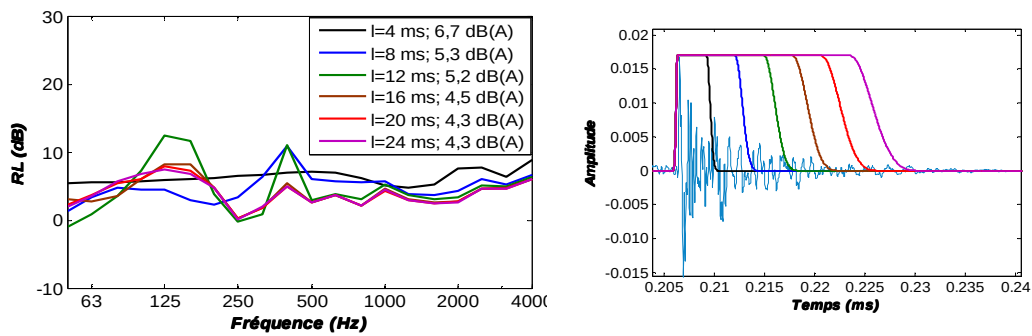


Figure 3.21. Variation de la perte par réflexion RL de l'écran acoustique en gabions en fonction de la fréquence pour différentes largeurs l de la fenêtre d'analyse. Les valeurs de la perte par réflexion globale en dB(A) sont aussi données. Un exemple d'une réponse impulsionnelle avec les différentes fenêtres est donné sur la droite de la figure.

Pour un fenêtrage temporel assez long (30 ms), nous présentons en figure 3.22 les spectres de la perte par réflexion pour les différents points récepteurs ainsi que le spectre de la perte par réflexion moyenne. En analysant les différents spectres, nous pouvons constater que la perte par réflexion des ondes acoustiques varie en fonction de la position du récepteur en restant dans une enveloppe plus large aux basses et aux hautes fréquences qu'aux moyennes fréquences. Cela montre que le nombre de récepteurs choisi dans cette étude est suffisant pour évaluer la perte par réflexion de l'écran antibruit en gabions.

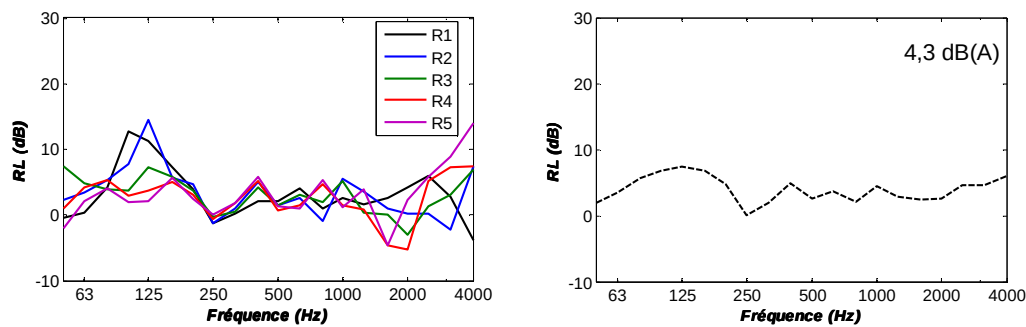


Figure 3.22. Variation en fonction de la fréquence de la perte par réflexion pour les cinq récepteurs (graphique de gauche) et de la perte par réflexion moyenne (graphique de droite).

3.1.3.2. Mesures de la perte par transmission

Le dispositif expérimental de la mesure de la perte par transmission selon la nouvelle méthode est présenté en figure 3.16. Des panneaux de bois agglomérés sont placés horizontalement devant et derrière l'écran acoustique en gabions pour simuler un sol rigide.

Nous déterminons dans cette section la perte par transmission de l'écran acoustique en gabions TL_j en fonction de la fréquence (en bandes de tiers d'octave Δf_j). Elle est donnée par la moyenne logarithmique des pertes par transmission mesurées aux cinq points récepteurs derrière l'écran:

$$TL_j = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^5 10^{L_{ref,i}(\Delta f_j)}}{\sum_{i=1}^5 10^{L_{GB,i}(\Delta f_j)}} \right), \quad (3.9)$$

où $L_{ref,i}(\Delta f_j)$ et $L_{GB,i}(\Delta f_j)$ sont les niveaux de pression respectivement pour la configuration de référence et pour la configuration en présence de l'écran en gabions pour un point récepteur R_i .

Nous présentons en figure 3.23, pour le récepteur R1, les réponses impulsionnelles reçues pour les tests en transmission. Les réponses impulsionnelles obtenues pour les cinq récepteurs sont données en annexe B. Nous remarquons pour cet exemple que la durée de la composante transmise est beaucoup plus grande que celle du signal direct. Cela est dû à l'épaisseur importante et à la nature hétérogène et poreuse de l'écran en gabions : les ondes acoustiques peuvent parcourir des longs trajets à l'intérieur avant d'atteindre le récepteur.

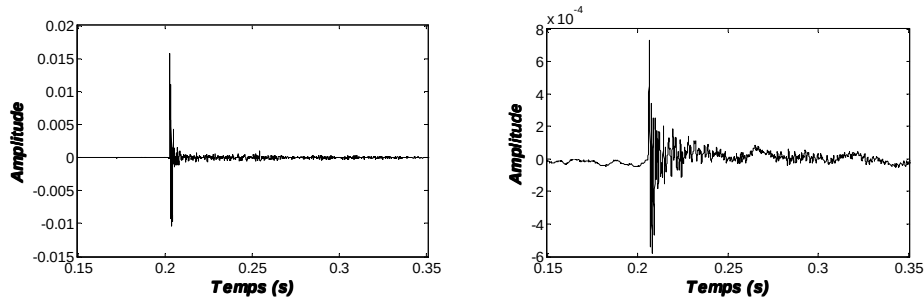


Figure 3.23. Tests en transmission : réponses impulsionnelles reçues, pour le point récepteur R1, pour la configuration en présence de l'écran en gabions (graphique de droite) et pour la configuration de référence (graphique de gauche).

Comme pour les tests en réflexion, nous montrons en figure 3.24 l'influence de la largeur de la fenêtre d'analyse sur la perte par transmission de l'écran en gabions. Sur cette figure, nous traçons les spectres de TL_j pour cinq largeurs de la fenêtre temporelle. Pour chaque spectre, la valeur de la perte par transmission globale en dB(A) est donnée en légende. Nous constatons que les spectres obtenus commencent à se converger à partir d'une durée de fenê-

trage de 12 ms. Cette durée correspond à la limite entre la composante transmise et la composante diffractée par l'écran. La différence de la perte par transmission globale pour la durée maximale qui assure la convergence et la durée de 12 ms ne dépasse pas 0,5 dB(A). Cela montre que l'onde diffractée incluse dans la réponse impulsionnelle fenêtrée, pour une fenêtre d'analyse plus large que 12 ms, n'influe que légèrement sur le spectre de la perte par transmission. Les signaux diffractés aux niveaux des points récepteurs sont donc très atténués par rapport aux signaux transmis et n'influencent quasiment pas sur les niveaux de pression derrière l'écran en gabions. Ces résultats montrent que nous pouvons déterminer la perte par transmission d'un tel écran assez large en utilisant une fenêtre d'analyse très large avec une faible valeur d'incertitude.

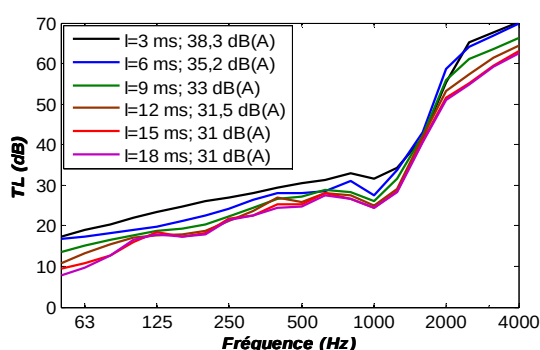


Figure 3.24. Variation de la perte par transmission TL de l'écran acoustique en gabions en fonction de la fréquence pour différentes largeurs l de la fenêtre d'analyse. Les valeurs de la perte par transmission globale en dB(A) sont aussi données.

Nous présentons en figure 3.25, les spectres de la perte par transmission obtenus pour les différents points récepteurs ainsi que le spectre de la perte par transmission moyenne. Nous constatons que la perte par transmission augmente en fonction de la hauteur du récepteur derrière l'écran. En effet, plus la hauteur du récepteur est grande, plus le trajet de propagation de l'onde transmise à l'intérieur des gabions est long et donc plus l'onde est atténuée. Cela montre que l'écartement des récepteurs, sur une hauteur de 1,5 m, choisi dans notre méthode est convenable pour évaluer la perte par transmission de l'écran antibruit en gabions contrairement à la norme de mesure CEN/TS 1793-5 où l'écartement entre les récepteurs ne dépasse pas 0,8 m.

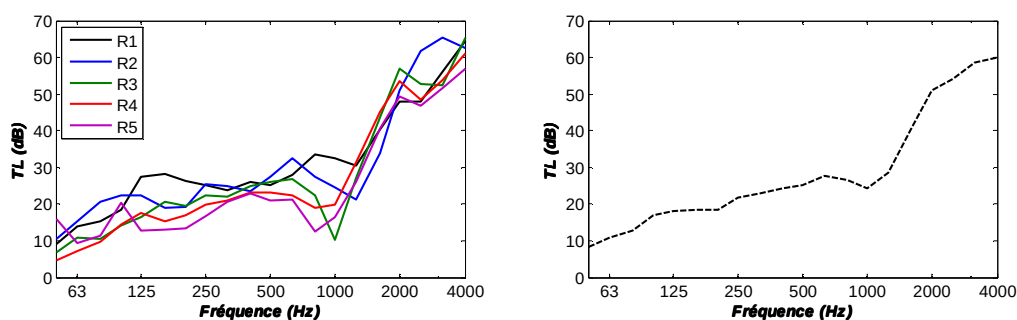


Figure 3.25. Variation en fonction de la fréquence de la perte par transmission pour les cinq récepteurs (graphique de gauche) et de la perte par transmission moyenne (graphique de droite).

Les résultats présentés en figure 3.24 montrent, comme pour les tests en réflexion, que nous pouvons surestimer la perte par transmission de l'écran en gabions en utilisant une fenêtre d'analyse trop étroite comme dans la norme de mesure CEN/TS 1793-5. En figure 3.26, nous présentons un exemple dans lequel nous montrons la différence entre les résultats fréquentiels obtenus par la méthode de mesure selon la norme CEN/TS 1793-5 et celles obtenus par la nouvelle méthode de mesure proposée dans ce travail. Les valeurs de la perte par transmission globale en dB(A) sont données pour les deux spectres en légende. Nous comparons dans cette figure les spectres de la perte par transmission obtenus par la nouvelle méthode avec une fenêtre d'analyse de 30 ms et ceux obtenus par la méthode de mesure selon la norme avec une fenêtre de 3,5 ms de largeur. Les spectres sont comparés dans une gamme de fréquence au-dessus de 315 Hz à cause de la limite inférieure de fréquence pour la méthode de mesure selon la norme. Nous constatons que la perte par transmission obtenue par la nouvelle méthode est plus faible que celle obtenue par la mesure selon la norme. La différence de la perte par transmission globale atteint dans notre cas 4,5 dB(A). Comme nous l'avons expliqué précédemment, cela est dû au fenêtrage temporel étroit utilisé dans la norme de mesure ignorant une quantité d'énergie transmise dans les gabions lors du passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. La différence entre les deux courbes en figure 3.26 montre que l'effet du fenêtrage temporel est plus important aux basses et aux moyennes fréquences où le bruit routier est très riche en énergie. Cela montre aussi la pertinence de notre nouvelle méthode de mesure.

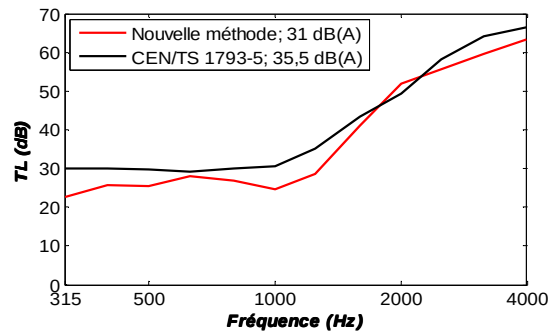


Figure 3.26. Spectres de la perte par transmission obtenus par la nouvelle méthode de mesure (courbe en rouge) et par la méthode de mesure CEN/TS 1793-5 (courbe en noir).

3.1.4. Conclusions

Nous avons effectué, dans la première partie de ce chapitre, trois campagnes de mesure pour évaluer la performance acoustique en gabions en réflexion et en transmission. Les deux premières campagnes ont été réalisées in-situ à l'échelle réelle pour l'une et à l'échelle réduite, au centre des maquettes du CSTB, pour l'autre en se basant sur la norme de la mesure in-situ CEN/TS 1793-5. Les résultats de deux méthodes ont montré un bon accord. Cependant, le principal inconvénient de ces deux campagnes de mesure est au niveau du fenêtrage tem-

porel. La fenêtre d'analyse utilisée est trop étroite (durée de quelques millisecondes) pour capter toute l'énergie acoustique nécessaire à l'analyse, mais indispensable pour s'affranchir des réflexions parasites, particulièrement la réflexion sur le sol. Par conséquent, la limite inférieure de fréquence est élevée (autour de 300 Hz) et le passage au domaine fréquentiel était accompagné par une perte d'information incluse dans la réponse impulsionnelle et liée aux propriétés acoustiques intrinsèques de l'écran en gabions. La troisième campagne de mesure a été réalisée, selon une nouvelle méthode que nous avons proposée dans ce travail, pour pallier le principal inconvénient des deux premières campagnes de mesure. Les résultats de cette campagne de mesure ont montré que la norme de mesure CEN/TS 1793-5 n'est pas bien adaptée pour mesurer les propriétés intrinsèques des murs de grande épaisseur notamment lorsqu'ils sont fortement hétérogènes tels que les murs en gabions. La nouvelle méthode proposée a permis de concevoir des nouvelles configurations source-récepteur permettant d'utiliser une fenêtre d'analyse très large. Cela a l'avantage d'évaluer précisément la performance acoustique des murs de grande épaisseur avec des faibles valeurs d'incertitude et pour une limite inférieure de fréquence suffisamment faible.

Concernant leur performance acoustique, nous avons montré que les écrans en gabions ont des pertes par réflexion et par transmission moyennes en regard d'un écran droit absorbant traditionnel. Pour améliorer la perte par réflexion, il faut augmenter l'absorption acoustique de la face de l'écran du côté des sources sonores. Pour cela, il est peut être utile de créer des zones de vide sur cette face en laissant quelques mailles vides dans les gabions. Pour améliorer la perte par transmission de l'écran en gabions, il paraît efficace de concevoir des gabions avec un noyau constitué d'un autre matériau très absorbant ou réfléchissant.

3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur

L'objectif de cette deuxième partie de chapitre est d'évaluer numériquement la performance acoustique des protections antibruit en gabions. Les calculs numériques de cette partie sont effectués en deux dimensions. Nous étudierons l'efficacité de ces écrans de faible hauteur dans l'objectif de proposer des dispositifs s'intégrant dans l'environnement d'une manière satisfaisante pour les riverains contrairement aux écrans de grande hauteur souvent mal perçus par les résidents à cause de la gêne visuelle occasionnée.

Dans cette étude, l'efficacité des gabions sera évaluée par des simulations numériques en utilisant le code de calcul MICADO (voir annexe C).

3.2.1. Simulations numériques

3.2.1.1. Modélisation des gabions

Il n'existe pas dans la littérature des travaux relatifs à l'évaluation numérique de la performance acoustique d'écrans en gabions. La difficulté réside dans la modélisation d'un milieu de propagation très inhomogène contenant un grand nombre d'éléments et possédant un pourcentage de vides. Si on considère les gabions comme des milieux poreux à squelette rigide, il est possible d'utiliser le modèle du fluide équivalent pour les modéliser. Cependant, quelques hypothèses doivent être prises en compte pour un modèle de fluide équivalent :

- La continuité : on considère une perturbation de petite amplitude de l'état d'équilibre thermodynamique ambiant, perturbation liée au passage de l'onde sonore dans le fluide saturant. On suppose que les dimensions des pores sont suffisamment grandes, de sorte qu'à l'échelle microscopique le fluide peut encore être considéré comme un milieu continu.

- L'homogénéité : comme les matériaux poreux possèdent une structure désordonnée résultante d'une hétérogénéité microscopique, les paramètres décrivant sa géométrie doivent être définis à une échelle macroscopique où la microgéométrie est caractérisée de façon statistique. Les variables décrivant le mouvement sont par conséquent des grandeurs résultant d'une moyenne des quantités définies à l'échelle microscopique sur un élément de volume macroscopique.

- Une grande longueur d'onde : pour appliquer les outils de la mécanique des milieux continus, la longueur d'onde des différentes ondes pouvant se propager dans le matériau est supposée grande devant la taille du volume d'homogénéisation. Cette condition nous permet de négliger les effets de la diffusion et de la dispersion spatiale et de considérer le fluide comme étant incompressible à l'échelle du pore.

- L'isotropie : dans cette étude, les milieux poreux sont supposés isotropes. Cette hypothèse est souvent vérifiée, même si certains matériaux poreux artificiels présentent une légère anisotropie dont on peut tenir compte dans les différents modèles de propagation.

- Une structure rigide : l'hypothèse de structure rigide signifie que l'onde sonore ne se propage que dans le fluide, ce qui est généralement réalisé avec une bonne approximation quand la structure est trop lourde et/ou trop raide, pour être mise en mouvement par les mouvements acoustiques du fluide.

Dans le cas des gabions, les deux hypothèses d'homogénéité et de la grande longueur d'onde du modèle « fluide équivalent » ne sont pas satisfaites. En effet, si on définit un volume d'homogénéisation pour lequel la moyenne des paramètres microscopiques est constante dans un gabion, la longueur d'onde devient comparable, dans le cas de bruit de trafic routier, à la taille du volume élémentaire et à la taille des pores. Pour comprendre le concept de vo-

3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur

lume élémentaire représentatif il est commode de considérer la valeur de la porosité totale et sa variation en fonction du volume utilisé pour l'évaluer. Lorsque ce volume est grand par rapport à la dimension des pores, il englobe un certain nombre de pores et la valeur correspondante de la porosité totale peut être considérée comme représentative de la valeur moyenne de la porosité totale du milieu. Cependant, lorsque le volume d'évaluation diminue, la valeur de la porosité fluctue de plus en plus selon les portions du milieu qui sont comprises dans ce volume. Cette fluctuation devient maximum entre 0 et 1 quand le volume est suffisamment petit pour se trouver, soit que dans la phase solide, soit dans un pore. Lorsque le volume est petit, il peut être entièrement situé dans un pore et la porosité est égale à 1, il peut aussi être situé dans la phase solide et la porosité est égale à 0. Au fur et à mesure que le volume augmente, la porosité des échantillons centrés dans la phase fluide diminue, inversement la porosité des échantillons centrés dans la phase solide augmente. Ces deux porosités tendent vers une même valeur et sont identiques à partir d'un certain volume d'échantillon. C'est le volume élémentaire représentatif V_{er} qui est le volume au delà duquel la porosité moyenne ne varie plus. La notion de porosité totale moyenne du milieu n'a de sens que pour des volumes égaux ou supérieures à V_{er} . Le concept du volume élémentaire représentatif et la comparaison de sa taille avec la longueur d'onde du bruit de trafic routier sont présentés en figure 3.27. Cette figure montre, pour une taille des cailloux qui varie généralement entre 5 et 20 cm, que l'approche «fluide équivalent» est inappropriée dans le cas des gabions puisque le volume d'homogénéisation qui contient un grand nombre de cellules devient comparable et même supérieur à la longueur d'onde. Cependant, ce modèle peut être utilisé lorsque la taille des cailloux devient très faible (petits graviers), ce qui n'est pas l'objet de cette étude.

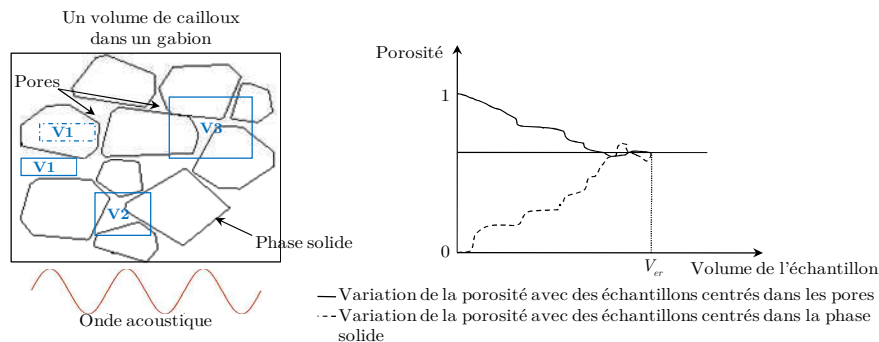


Figure 3.27. Définition du volume élémentaire représentatif dans le cas des gabions et comparaison avec la longueur d'onde du bruit routier.

On a donc recours à une autre approche pour modéliser les gabions. C'est l'approche géométrique "frontière + air" qui consiste à décrire toute la géométrie des cailloux dans un mur en gabions. Les frontières sont maillées en deux dimensions par des éléments simples et le champ acoustique en tout point de l'espace est dû au rayonnement de ces frontières. Ces éléments représentant les cailloux sont modélisés par des polygones de 7 côtés. Ils sont géné-

rés aléatoirement dans une zone donnée à l'aide d'un algorithme géométrique. Dans cette zone, les cailloux sont positionnés un par un. Quand un nouveau caillou est généré, il est testé par rapport aux précédents pour éviter les chevauchements. Une distance minimale entre les cailloux doit être respectée pour le nouveau caillou à retenir. Ceci est proposé pour se rapprocher du cas tridimensionnel où les ondes acoustiques peuvent poursuivre différents trajets dans le fluide à l'intérieur des gabions, sans être stoppées par les cailloux, avant d'atteindre l'autre côté du mur antibruit. Un maximum d'essais est tenté et l'algorithme s'arrête au moment où il ne parvient plus à positionner des cailloux. Les grands espaces laissés entre les cailloux peuvent être remplis de cailloux plus petits en répétant l'étape précédente une ou plusieurs fois avec une taille réduite des cailloux.

Dans la géométrie finale, on obtient un nombre de cailloux d'autant plus grand que la taille des cailloux est petite. Le taux de vide est obtenu autour d'une valeur de 40 % représentant le cas réel des gabions antibruit. Un exemple d'une distribution aléatoire des cailloux dans une zone de 1 m² est donné en figure 3.28 avec une granulométrie de cailloux de 14/18 cm.

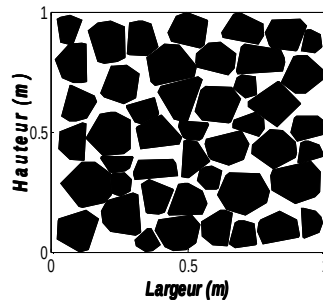


Figure 3.28. Exemple d'arrangements de cailloux par une distribution aléatoire des polygones dans un écran en gabions antibruit de faible hauteur.

Dans cette section, nous étudions l'efficacité des gabions antibruit de faible hauteur pour une infrastructure routière sur terrain plat. Puisque les cailloux sont générés aléatoirement, l'efficacité acoustique des gabions peut varier dans ce cas d'une distribution de cailloux à une autre. Par conséquent, une étude de sensibilité est nécessaire avant de présenter les résultats des simulations numériques des protections antibruit en gabions. Ceci est présenté dans le paragraphe suivant.

3.2.1.2. Étude de sensibilité et distribution des incertitudes

L'analyse de sensibilité étudie la façon dont les incertitudes des variables d'entrée d'un modèle peuvent influencer l'incertitude de sa sortie. Les variables d'entrée dans notre cas sont la forme et la disposition des cailloux et la variable de sortie est l'efficacité acoustique des protections en gabions. Pour trois granulométries différentes, on a étudié la perte par insertion des gabions pour cinq distributions et formes de cailloux différentes. On a associé à

3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur

chaque courbe de sensibilité une courbe qui présente la variation de l'écart type de la variable de sortie en fonction de la fréquence. L'écart type est donné par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (IL_i - \overline{IL})^2} \quad (3.10)$$

Où IL_i et $\overline{IL}$ sont la perte par insertion (décrite dans le paragraphe 3.2.1.3) et sa valeur moyenne pour les n changements des variables d'entrée ($n=5$).

Les résultats de sensibilité sont présentés en figure 3.29.

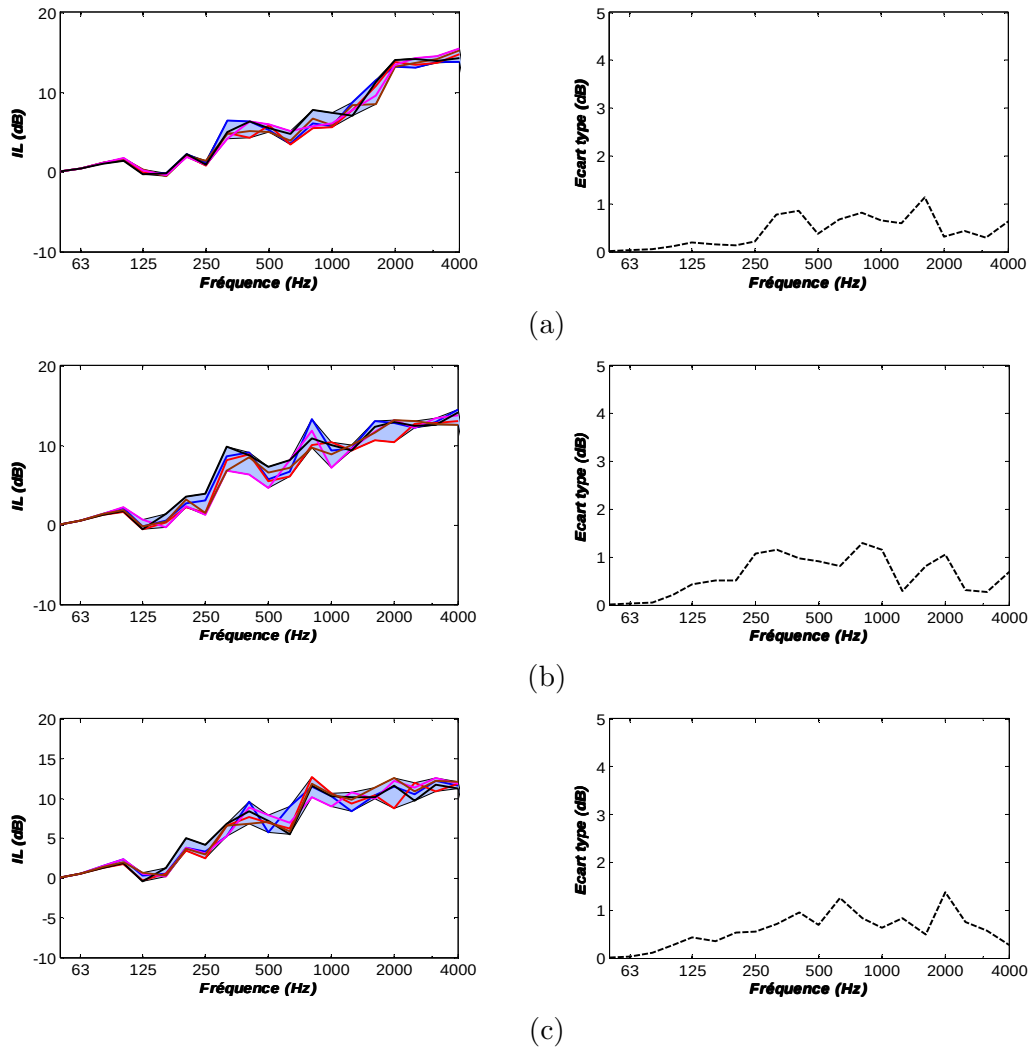


Figure 3.29. Courbes de sensibilité (à gauche) et d'écart-type (à droite) de l'efficacité acoustique des écrans en gabions de faible hauteur en fonction de la fréquence en tiers d'octave. Trois granulométries sont considérées: (a) : 06/10 cm, (b) : 10/14 cm et (c) : 14/18 cm.

Les courbes de sensibilité montrent la dispersion des valeurs de la perte par insertion en fonction de la fréquence pour trois granulométries de 14/18 cm, 10/14 cm et 06/10 cm. La perte par insertion est calculée comme une moyenne énergétique dans une région de récepteurs derrière l'écran en gabions. Cette région débute 1 m derrière l'écran et s'étend sur 40 m

à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. Le comportement des différentes courbes est le même au-dessous de 125 Hz, ceci est dû à la longueur d'onde qui est très grande par rapport aux dimensions des cailloux. Au delà de cette fréquence la disposition des cailloux commence à influencer sur l'allure de la courbe par perturbation de la phase solide et la phase fluide des gabions. La dispersion reste constante pour toutes les bandes de tiers d'octave et pour les trois granulométries dans un intervalle qui ne dépasse pas 4 dB. Les courbes de l'écart type représentent la dispersion de la perte par insertion autour de la valeur moyenne. Elles montrent une faible valeur inférieure à 1 dB aux basses fréquences et à 1,5 dB aux moyennes et hautes fréquences. Pour chaque granulométrie, l'efficacité globale des gabions varie dans un intervalle de 0,7 dB(A). Cela permet dans la suite de notre travail de présenter les résultats des simulations numériques avec de faibles valeurs d'incertitude.

3.2.1.3. Résultats des simulations numériques

Après l'étude de sensibilité présentée dans le paragraphe précédent, nous nous intéressons ici à l'efficacité acoustique des gabions de faible hauteur en dB en fonction de la fréquence et à leur efficacité globale en dB(A). Nous opterons dans cette étude pour différentes structures et conceptions des gabions afin de trouver des formes améliorées ayant une efficacité la plus élevée possible. Les résultats des simulations numériques sont exposés dans cette étude pour la configuration géométrique présentée en figure 3.30. Concernant les sources sonores, on modélise dans cette section une infrastructure routière avec deux voies et quatre sources sonores placées en amont de l'écran acoustique. $S_{1,1}$ et $S_{2,1}$ représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule léger (hauteur de 0,01 m), $S_{1,2}$ et $S_{2,2}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule léger (hauteur de 0,30 m). Concernant les récepteurs, nous définissons deux régions derrière l'écran acoustique pour un maillage de 9 points récepteurs par m^2 . La première région (région 1) débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. Elle représente les piétons et les usagers des pistes cyclables. La deuxième région (région 2) débute 10 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m. Elle est représentative des résidents du premier étage d'un bâtiment.

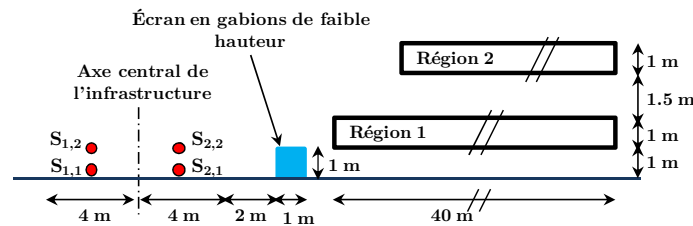


Figure 3.30. Configuration de deux régions de récepteurs pour une infrastructure routière ou ferroviaire en présence d'un écran acoustique de faible hauteur.

Nous étudions dans cette section la perte par insertion des écrans acoustiques en gabions pour une gamme de fréquences entre 50 Hz et 4000 Hz. La perte par insertion est la différence de niveau de pression entre la configuration sans l'écran acoustique et la configuration avec l'écran. Elle inclut l'effet net de l'atténuation de l'écran et de la perte de l'effet de sol après son insertion. Elle est calculée par rapport à une configuration de référence en absence de l'écran en gabions. Pour un point récepteur, elle est donnée en dB pour chaque bande de tiers d'octave Δf par la formule suivante :

$$IL_{\Delta f} = 10 \log_{10} \left(\left| \frac{P_{réf}(\Delta f)}{P_{GB}(\Delta f)} \right|^2 \right), \quad (3.11)$$

où $P_{GB}(\Delta f)$ est la pression acoustique pour la configuration avec l'écran en gabions dans la bande de tiers d'octave Δf et $P_{réf}(\Delta f)$ est la pression acoustique pour la configuration de référence sans l'écran en gabions dans la bande de tiers d'octave Δf .

La perte par insertion moyenne dans une région de récepteurs est donnée par la formule suivante :

$$\overline{IL}_{\Delta f} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |P_{réf}(\Delta f)|^2}{\sum_{i=1}^n |P_{GB}(\Delta f)|^2} \right), \quad (3.12)$$

avec n le nombre de points récepteurs. Pour chaque spectre de perte par insertion en dB, nous calculons aussi la perte par insertion globale IL en dB(A) dans chaque région de récepteurs. Elle est donnée par la formule suivante :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + \overline{EA}_{réf, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + \overline{EA}_{réf, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + \overline{EA}_{GB, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + \overline{EA}_{GB, \Delta f})/10}} \right), \quad (3.13)$$

où $\overline{EA}_{GB, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne (référénciée au champ libre P_{lib}) pour la configuration avec l'écran acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf (champ de pression P_{SC}) et $\overline{EA}_{réf, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration de référence sans la protection acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf :

$$\overline{EA}_{GB, \Delta f} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |P_{lib}(\Delta f)|^2}{\sum_{i=1}^n |P_{GB}(\Delta f)|^2} \right), \quad (3.14)$$

$$\overline{EA_{ref,\Delta f}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |P_{lib}(\Delta f)|^2}{\sum_{i=1}^n |P_{ref}(\Delta f)|^2} \right), \quad (3.15)$$

L_{WR} et L_{WM} sont respectivement les niveaux de puissance relatifs au bruit de roulement et de moteur définis dans le modèle Harmonoise (voir paragraphe 2.7). Les calculs sont effectués pour une vitesse des véhicules de 50 km/h.

a. Gabions avec différentes tailles des cailloux

Dans ce paragraphe, nous étudions l'efficacité de trois murs en gabions possédant trois granulométries différentes, 14/18, 10/14 et 06/10 cm (figure 3.31). Ces écrans en gabions sont comparés, à travers leur perte par insertion, à un écran de référence rigide (REF) qui a les mêmes dimensions que les écrans antibruit en gabions.

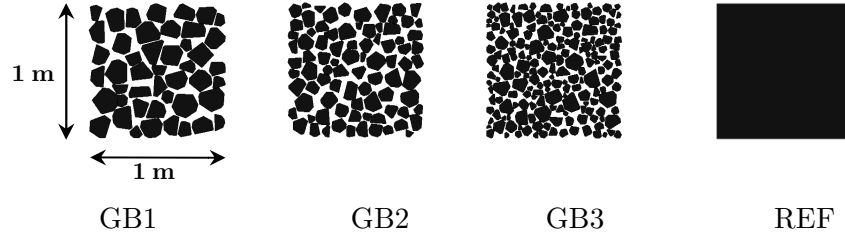


Figure 3.31. Écrans antibruit en gabions étudiés avec différentes tailles des cailloux et écran rigide de référence (coupe verticale).

L'étude de la convergence des résultats numériques est donnée en annexe D. Elle a pour objectif de trouver des valeurs aux paramètres numériques afin d'obtenir un compromis acceptable entre la précision de calcul et le temps de calcul.

Les résultats des simulations numériques sont présentés en figure 3.32 pour les deux régions de récepteurs. Pour la région 1 de récepteurs, les spectres de la perte par insertion présentent deux comportements différents en fonction de la fréquence. Les valeurs de la perte par insertion des trois écrans antibruit en gabions, aux moyennes et hautes fréquences, sont proches de celles de la protection de référence. La diffraction par le sommet de l'écran est peut être le facteur dominant dans cette gamme de fréquences. Cependant, les trois gabions sont légèrement moins efficaces aux basses fréquences au-dessous de la bande de tiers d'octave de 500 Hz. Ils se comportent comme un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure autour de 250 Hz. Les valeurs dégradées de la perte par insertion aux basses fréquences sont dues à la transparence acoustique et à la perméabilité des gabions dont le pourcentage des vides à l'échelle mésoscopique est d'environ 40%. La différence d'efficacité entre les trois gabions antibruit, ayant différentes tailles des cailloux, est notable aux moyennes et hautes fréquences. La perte par insertion est d'autant plus élevée, dans cette gamme de fréquences, que la taille des cailloux est grande. En effet, l'aptitude d'un caillou à diffuser ou diffracter

3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur

une onde acoustique devient plus importante lorsque sa taille est proche de la longueur d'onde.

Pour la région 2 des récepteurs, les écrans en gabions étudiés et l'écran rigide de référence ont des pertes par insertion très proches pour toute la gamme de fréquences étudiée. Leurs faibles pertes par insertion dans cette région, par rapport à la région 1, sont dues à la position de récepteurs qui se trouvent dans une ligne de vue directe des sources situées à gauche de l'écran de faible hauteur.

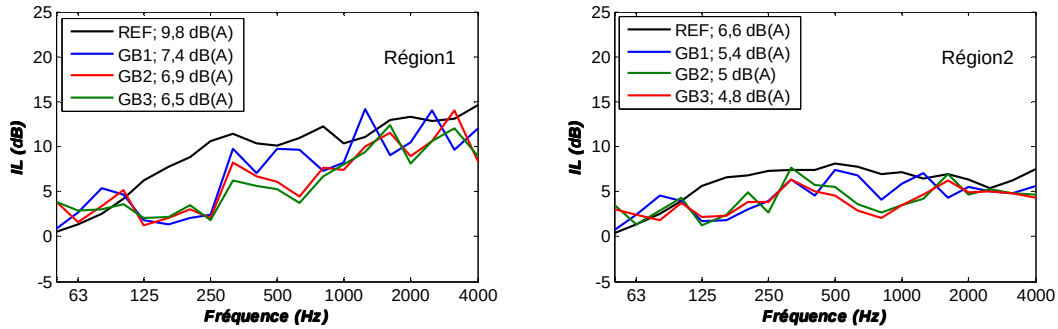


Figure 3.32. Perte par insertion en fonction de la fréquence de trois écrans en gabions étudiés et de l'écran rigide de référence pour les deux régions de récepteurs.

Nous pouvons tirer trois conclusions de ces dernières simulations. Premièrement, l'efficacité acoustique des gabions antibruit est proche de celle d'un écran rigide de référence dans la gamme de moyennes et hautes fréquences. Deuxièmement, la performance acoustique d'un écran antibruit en gabions est d'autant plus significative que la taille des cailloux est grande. Troisièmement, le gain acoustique de ces écrans de faible hauteur est d'autant plus important que la position du récepteur est basse, c'est qui est le résultat recherché au départ.

Pour améliorer la performance acoustique des gabions antibruit de faible hauteur en basses fréquences, nous avons proposé dans ce travail des structures en couches afin d'en évaluer l'effet acoustique dans cette gamme de fréquences. Cela est présenté dans le paragraphe suivant.

b. Gabions structurés en couches

Nous proposons dans ce paragraphe trois nouveaux écrans antibruit en gabions. Ils sont représentés en figure 3.33.

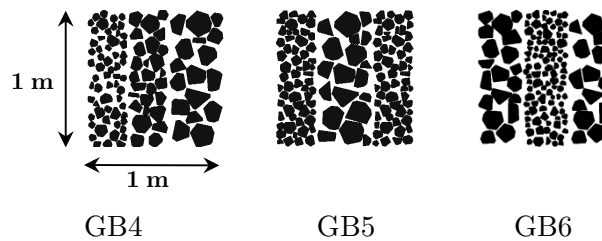


Figure 3.33. Nouveaux écrans acoustiques en gabions étudiés avec différentes structurations en couches (coupe verticale).

Nous utilisons les trois granulométries des cailloux envisagées pour les trois premiers gabions pour faire trois différentes structures en couches. Les trois structures sont comparées, à travers leurs pertes par insertion, à l'écran antibruit en gabions GB1 présentant la meilleure efficacité parmi les trois premiers écrans en gabions étudiés précédemment. Cela est présenté en figure 3.34 pour les deux régions de récepteurs. Une augmentation de quelques dB de la perte par insertion a été remarquée pour quelques bandes de tiers d'octave aux basses fréquences en fonction de la structure étudiée. Cela est dû à des ruptures d'impédance dans les structures en couches qui affectent la propagation de l'onde acoustique à l'intérieur de la structure passant d'une couche à l'autre. Sur chaque interface entre deux couches de propriétés différentes (granulométrie, densité), une partie de l'énergie sonore est réfléchie. Ceci a plus d'importance dans la région 1 que dans la région 2. Pour les trois écrans proposés GB4, GB5 et GB6, l'amélioration de l'efficacité globale de l'écran GB1 ne dépasse pas 0,5 dB(A).

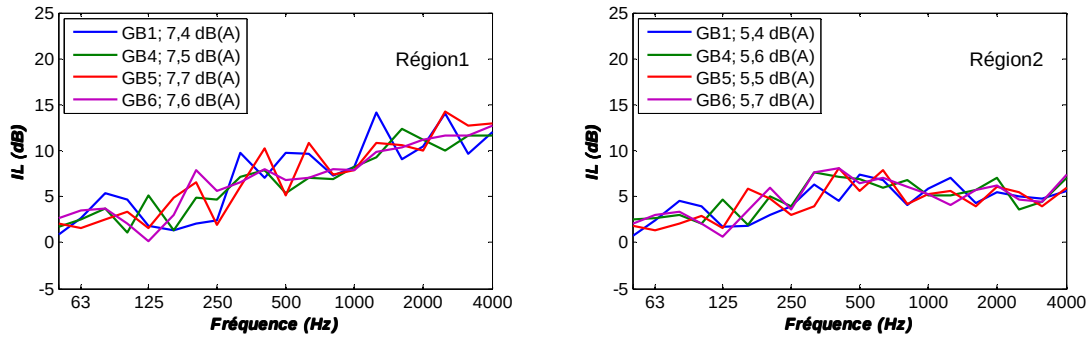


Figure 3.34. Perte par insertion en fonction de la fréquence de trois structures en couches des gabions et de la structure normale des gabions GB1 pour les deux régions de récepteurs.

Pour avoir plus d'amélioration de l'efficacité des gabions conventionnels, nous proposons dans le paragraphe suivant d'étudier la performance acoustique d'autres types de gabions ayant une âme constituée d'un matériau avec des propriétés acoustiques différentes de celles des cailloux.

c. Gabions ayant une âme en terre ou en béton de chanvre

En regardant des sites où des gabions de faible hauteur ont été installés, nous avons constatés que quelques uns ont un noyau granulaire (terre, petits graviers) permettant d'augmenter la perte par transmission de ce type d'écrans (figure 3.35). Par conséquent, comme aucune donnée sur la performance de ces gabions n'est présente dans la littérature, l'idée est d'évaluer par suite l'efficacité acoustique de ce type de gabions par des simulations numériques. On opte pour deux types d'âme : la terre (figure 3.35) et un matériau absorbant naturel. La terre est décrite par une simple condition d'impédance en utilisant le model de Delany et Bazley avec une résistivité au passage de l'air $\sigma = 300 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ (cgs). Cette valeur de résistivité correspond à une terre végétale légère. En plus de son effet acoustique, la terre au milieu des gabions peut être plantée pour obtenir des gabions antibruit végétalisés visuel-

3.2. Étude numérique de la performance acoustique des protections antibruit en gabions de faible hauteur

lement plus agréables que des écrans en gabions conventionnels. L'écran en gabions ayant une âme en terre sera nommé par la suite GB7 (figure 3.37).



Figure 3.35. Gabions antibruit de faible hauteur ayant une âme en terre [138].

Pour le deuxième matériau, après une recherche dans la littérature, nous avons constaté l'existence d'un matériau construit à base de fibres végétales possédant des bonnes propriétés acoustiques [136, 137] : c'est le béton de chanvre. Il est constitué d'un mélange de particules de chanvre d'origine végétale, de chaux et d'eau (figure 3.36). Les caractéristiques du béton de chanvre utilisé dans ce travail sont reprises de la publication de Glé et al. [137]. La densité, la résistivité au passage de l'air, la porosité, la tortuosité sont 400 kg/m^3 , 20 cgs, 0,73 et 3, respectivement. Ce matériau est modélisé comme un milieu poreux avec le modèle de Zwikker et Kosten. L'écran ayant une âme en béton de chanvre sera nommé par la suite GB8 (figure 3.37).

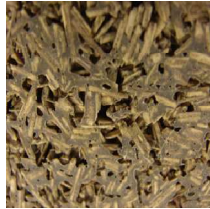


Figure 3.36. Matériau absorbant naturel à base de béton de chanvre [137].

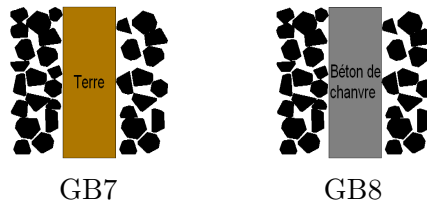
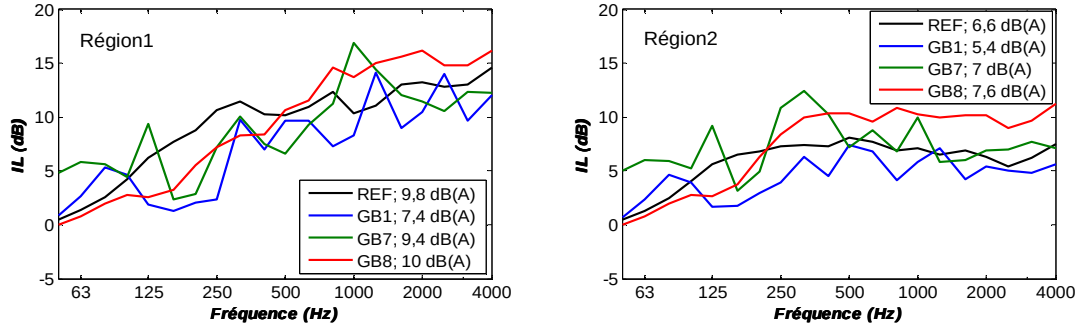


Figure 3.37. Écrans acoustiques en gabions avec une âme en terre (GB7) ou en béton de chanvre(GB8).

Nous présentons en figure 3.38, les spectres de la perte par insertion des deux écrans GB7 et GB8. Pour chaque spectre, la valeur de la perte par insertion globale est donnée en légende. Nous constatons, pour les deux écrans proposés, une augmentation significative de l'efficacité des écrans en gabions conventionnels (GB1). L'amélioration d'efficacité due à l'écran GB7 est remarquée spécialement aux basses et aux moyennes fréquences tandis que celle due à l'écran GB8 est constaté principalement aux moyennes et aux hautes fréquences.

Les deux écrans GB7 et GB8 permettent d'obtenir une efficacité globale égale ou supérieure à celle de l'écran de référence.



Nous montrons dans le paragraphe suivant que nous pouvons atteindre une amélioration de l'efficacité de l'écran en gabions GB1 encore plus élevée en utilisant des cailloux poreux.

d. Gabions constitués des cailloux poreux

Nous proposons, dans cette étude numérique de l'efficacité des écrans antibruit en gabions, un dernier cas des gabions constitués des cailloux poreux. Chaque caillou est modélisé dans cette partie par un milieu poreux. Dans ce cas, le domaine complet est divisé en sous-domaines permettant l'introduction d'autres fluides que l'air notamment pour la modélisation des cailloux poreux par des fluides équivalents. Cela est effectué à l'aide du modèle de Delany et Bazley. Le but est de montrer l'effet global des propriétés acoustiques des cailloux sur la performance acoustique de l'écran acoustique en gabions. Le matériau constituant les cailloux peut être naturel comme de l'argile qui possède des bonnes propriétés acoustiques. Dans notre travail, nous considérons que les cailloux sont constitués des matériaux recyclés. Nous avons pris comme paramètre de description de leur absorption la résistivité au passage de l'air σ qui est le seul paramètre du modèle de Delany et Bazley. L'étude de l'efficacité des écrans en gabions constitués des cailloux poreux est réalisée pour différentes valeurs de σ entre 20 cgs et 500 cgs. Nous présentons en figure 3.39 la variation de la perte par insertion en fonction de la fréquence pour les différentes valeurs de σ . Dans cette figure, l'efficacité de l'écran GB1 est comparée à celle obtenue en rendant les cailloux poreux et en changeant leurs propriétés d'absorption avec cinq valeurs de σ . Pour chaque spectre, la valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée en légende. La meilleure efficacité est obtenue pour les cailloux ayant la résistivité au passage de l'air la plus faible. L'amélioration de l'efficacité de l'écran en gabions GB1 dans ce cas est très significative et peut atteindre environ 5 dB(A).

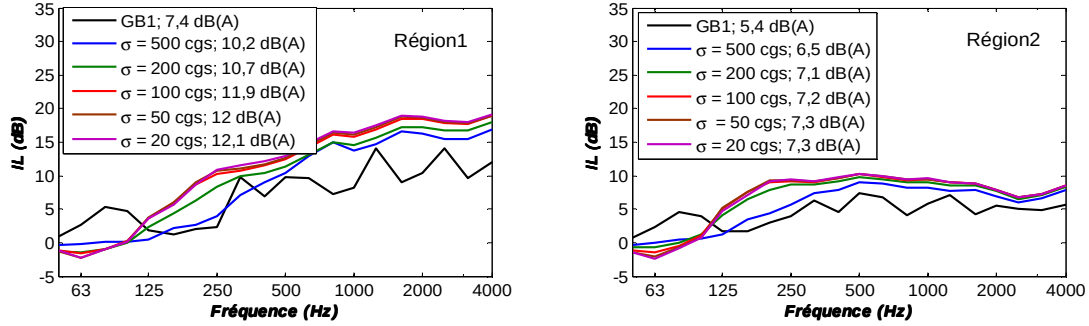


Figure 3.39. Pertes par insertions en fonction de la fréquence des écrans en gabions constitués des cailloux poreux pour différentes résistivité au passage de l'air σ . La courbe en noir correspond à la perte par insertion de l'écran en gabions GB1 ($\sigma = \infty$).

Comme les récepteurs situés dans la région 1 peuvent être mobiles notamment les cyclistes, nous avons étudié l'effet de la distance sur l'efficacité globale des protections en gabions. Dans la figure 3.40, nous montrons la variation de la perte par insertion globale en fonction de la distance derrière la protection pour un récepteur situé à une hauteur de 1,5 m pour GB7, GB8 et GB9 ($\sigma = 20$ cgs). Nous constatons, pour les trois protections, une faible dégradation de la performance globale en fonction de la distance. Cette dégradation ne dépasse pas 1,5 dB(A) pour une distance de propagation de 40 m. Le calcul de la perte par insertion moyenne dans la région de récepteurs est donc approprié pour évaluer la performance acoustique de telles protections.

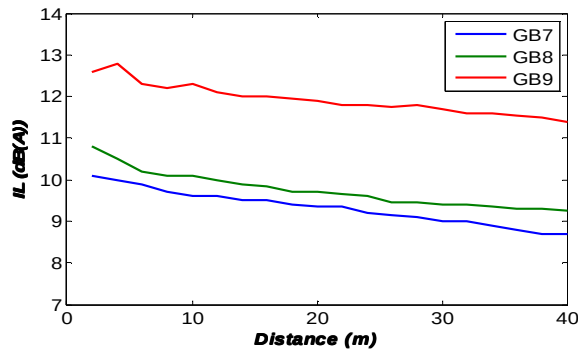


Figure 3.40. Variation de la perte par insertion globale de trois protections GB7, GB8 et GB9 en fonction de la distance pour un récepteur situé à une hauteur de 1,5 m.

Le temps de calcul est d'environ une heure pour les gabions constitués des cailloux solides et de quelques heures pour les gabions constitués des cailloux poreux sur un PC équipé d'un processeur de type AMD Athlon 64 X2 (2.41 GHz).

3.2.2. Conclusions

Nous avons réalisé, dans cette partie d'étude numérique, plusieurs simulations pour évaluer l'efficacité des protections acoustiques en gabions. Nous avons considéré des protections de faible hauteur utilisés dans un rôle de réduction du bruit du trafic routier. L'efficacité des protections en gabions conventionnels, avec une simple distribution aléatoire des cailloux, est

légèrement moins faible que celle d'un écran de référence droit et rigide. Différentes structurations des gabions ont été proposées afin d'améliorer l'efficacité de l'écran en gabions conventionnel. Une première solution a été de développer des structurations en couches avec différentes tailles des cailloux. L'amélioration due à ces structures est faible et n'a pas dépassée 0,5 dB(A). Une deuxième solution a été de concevoir des écrans en gabions avec une âme permettant d'augmenter la perte par transmission à travers l'écran. L'âme utilisée peut être constituée d'un matériau naturel comme de la terre ou du béton de chanvre. Cette deuxième solution est plus efficace que la première et l'amélioration de l'efficacité de l'écran en gabions conventionnel est significative et peut atteindre environ 3 dB(A). Une troisième solution a consisté à changer les propriétés acoustiques intrinsèques des cailloux en les rendant poreux. La meilleure efficacité dans ce cas est obtenue pour des cailloux qui ont une résistivité au passage de l'air très faible ($\sigma=20$ cgs). Cette troisième solution était plus efficace que les deux premières solutions avec une amélioration de l'efficacité de l'écran en gabions conventionnel d'environ 5 dB(A) pour des récepteurs de faible hauteur.

3.3. Conclusions du chapitre

Des études expérimentales et numériques dans ce chapitre ont permis de caractériser la performance acoustique des protections antibruit innovantes en gabions. Les résultats des mesures in-situ et sur modèle réduit réalisées, selon la norme de mesure CEN/TS 1793-5, pour caractériser les propriétés acoustiques intrinsèques des protections en gabions, ont été bien corrélées. Une nouvelle méthode de mesure in-situ a été proposée dans ce chapitre pour pallier certains inconvénients de la mesure selon la norme CEN/TS 1793-5 dans le cas des écrans acoustiques en gabions. Les résultats obtenus ont montré la pertinence d'une telle méthode. Ils ont montré en outre que l'efficacité en réflexion et en transmission des protections acoustiques en gabions est moyenne. Cela nécessite des conceptions améliorées des gabions afin d'atteindre une efficacité plus élevée. Les simulations numériques développées dans ce chapitre ont montré l'intérêt des protections en gabions de faible hauteur (1 m). La perte par insertion de ces écrans est de l'ordre de 7 dB(A) par rapport à une configuration sans écran. Cette efficacité est proche de celle d'un écran conventionnel de même hauteur (9 dB(A)). Dans le même contexte, nous avons étudié d'autres écrans en gabions de faible hauteur en changeant leurs propriétés acoustiques intrinsèques. Pour cette étude, l'amélioration de l'efficacité globale des premiers écrans en gabions étudiés est de l'ordre de 4 dB(A) permettant de dépasser aussi l'efficacité de l'écran conventionnel. Les écrans en gabions de faible hauteur pourraient donc être utilisés dans un rôle de lutte contre le bruit des transports terrestres tout en assurant une bonne efficacité acoustique et une facilité de mise en œuvre et d'entretien.

CHAPITRE 4: EFFICACITÉ ACOUSTIQUE DE PROTECTIONS ANTIBRUIT UTILISANT DES CRISTAUX SONIQUES

Sommaire

4.1. Étude paramétrique de l'efficacité acoustique des cristaux soniques appliqués au bruit routier	93
4.1.1. Perte acoustique par réflexion des cristaux soniques	95
4.1.2. Perte acoustique par insertion des cristaux soniques.....	99
4.2. Étude paramétrique d'efficacité acoustique d'un écran innovant utilisant des cristaux soniques	102
4.2.1. Conception d'un écran innovant utilisant des cristaux soniques	103
4.2.2. Perte acoustique par diffraction du cristal sonore	105
4.2.3. Perte acoustique par réflexion du cristal sonore	112
4.3. Optimisation d'écrans innovants de faible hauteur utilisant des cristaux soniques ..	115
4.3.1. Position du problème	115
4.3.2. Méthode de création de forme du cristal sonore	117
4.3.3. Résultats d'optimisation	117
4.4. Conclusions du chapitre	125

Les cristaux soniques présentés dans l'étude bibliographique (voir paragraphe 1.2.2.2) sont choisis dans ce chapitre afin d'en étudier la performance acoustique. Ces dispositifs possèdent des propriétés acoustiques intéressantes notamment par prohiber la propagation des ondes acoustiques dans une bande de fréquences bien donnée. Nous considérons que les diffuseurs, formant la structure périodique des cristaux soniques, sont constitués d'un matériau naturel présentant une surface rigide comme du bois ou du bambou. Ces diffuseurs peuvent être aussi couverts d'un matériau naturel très absorbant comme le béton de chanvre. Dans un premier temps, nous utiliserons la BEM pour évaluer l'efficacité acoustique des cristaux soniques utilisés comme des dispositifs antibruit appliqués au bruit routier. L'objectif de cette évaluation est d'étudier l'influence de certains paramètres liés aux propriétés des cristaux soniques sur leur efficacité acoustique. Dans un deuxième temps, les paramètres les plus importants déterminés dans la première étude seront optimisés afin de déterminer par une recherche systématique des formes optimales des cristaux soniques de faible hauteur appliqués au bruit de tramway.

4.1. Étude paramétrique de l'efficacité acoustique des cristaux soniques appliqués au bruit routier

L'évaluation de la performance acoustique des cristaux soniques est effectuée dans cette section en déterminant leurs pertes par réflexion et par diffraction dans le cas d'une route à deux voies. Avant de présenter les résultats des simulations numériques, nous rappelons que la propriété acoustique principale des cristaux soniques est l'existence d'une certaine bande de fréquences où l'onde ne peut pas se propager dans le milieu (pas de vecteur d'onde associé). Cette bande est appelée « bande interdite » dont la fréquence centrale f_{BG} est donnée par :

$$f_{BG} = \frac{c}{2\beta} \quad (4.1)$$

où c est la vitesse du son dans l'air et β est la constante du réseau présentant la distance entre deux diffuseurs adjacents.

Pour créer cette bande interdite, trois paramètres jouent un rôle important. Le premier paramètre est le rapport de densité $M = \rho / \rho_0$ où ρ est la densité du matériau qui constitue les diffuseurs et ρ_0 est la densité de l'air. Le deuxième paramètre est le facteur de remplissage (filling factor en anglais: ff) qui exprime le rapport entre le volume occupé par les diffuseurs V_D et le volume total V .

$$ff = \frac{V_D}{V} = \frac{\pi d^2}{4\beta^2} \quad (4.2)$$

où d est le diamètre de diffuseurs.

Le troisième paramètre est la topologie utilisée pour la conception du cristal sonore.

Nous étudierons dans la suite de ce travail l'influence de ces paramètres sur l'efficacité des cristaux soniques en réflexion et en diffraction. Nous simulons cinq cristaux soniques dont la différence est la méthode de conception (figure 4.1). Les calculs numériques seront effectués en deux dimensions, les cylindres sont générés dans une coupe du cristal sonore et sont donc considérés comme infinis dans la troisième direction et parallèles à la surface du sol.

Les trois premiers cristaux soniques SC1, SC2 et SC3 présentent un réseau périodique carré des cylindres. Le diamètre des cylindres est 5 cm, 13 cm et 18 cm respectivement pour SC1, SC2 et SC3. La constante du réseau β est égale à 8,5 cm, 17 cm et 20 cm respectivement pour SC1, SC2 et SC3.

Les deux autres cristaux soniques SC4 et SC5 présentent des distributions des cylindres plus complexes que celles de SC1 et SC2. Le cristal sonore SC4 présente une distribution des cylindres à base du tapis de Sierpiński. Le tapis de Sierpiński est une forme fractale obtenue en découpant une zone géométrique carrée en neuf carrés égaux avec une grille de trois par trois en supprimant le carré central et en appliquant ensuite cette opération aux huit carrés restants. L'opération est ensuite itérée pour différents ordres d'échelle afin d'obtenir la géométrie finale. Pour le cristal sonore SC4, la zone géométrique de départ est un carré d'une arête de 80 cm dont chaque carré central supprimé est rempli par un cylindre. L'algorithme utilisé pour créer la forme finale s'arrête à l'ordre 3 en diminuant le diamètre des cylindres à chaque itération. Nous avons choisi cet ordre afin de ne pas considérer un diamètre des cylindres très faible par rapport à la longueur d'onde. La forme obtenue est répétée quatre fois verticalement afin d'obtenir le cristal sonore SC4 d'une hauteur de 3 m. Les cylindres du cristal sonore SC4 tracés en noir, en bleu et en rouge ont respectivement un diamètre de 24 cm, 9 cm et 4 cm (figure 4.1). Le cristal sonore SC5 présente une distribution périodique des cylindres sous forme d'un treillage à maille losange. Les 3 nœuds de chaque côté des mailles élémentaires sont remplis de cylindres de différents diamètres. Les cylindres du cristal sonore SC5 tracés en noir, en bleu et en rouge ont respectivement un diamètre de 11 cm, 8 cm et 5 cm (figure 4.1).

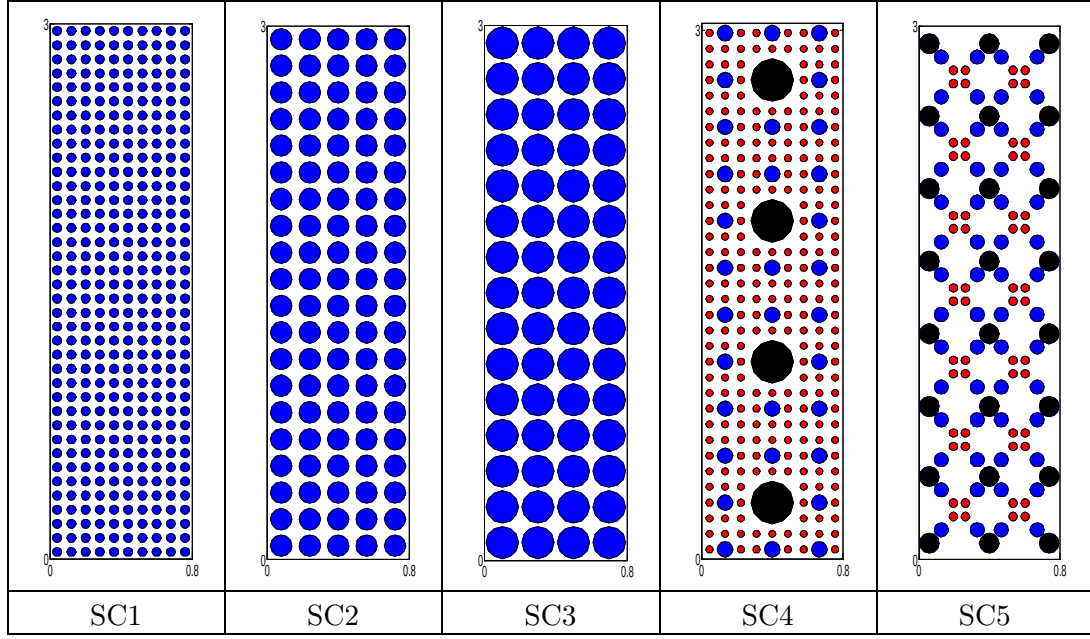


Figure 4.1. Différents cristaux soniques simulés pour l'étude paramétrique.

4.1.1. Perte acoustique par réflexion des cristaux soniques

Pour évaluer la perte acoustique par réflexion des cinq cristaux soniques étudiés, nous déterminons dans cette section les diagrammes de directivité de leur indice de réflexion sur les quatre bandes d'octave 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz et 2000 Hz. L'indice de réflexion est calculé pour caractériser leur perte par réflexion par rapport à un écran droit rigide considéré comme écran de référence. C'est un indice équivalent à un coefficient d'absorption noté α donné pour chaque bande d'octave par [80] :

$$\alpha = 1 - \frac{\sum_{f_1}^{f_2} |p_{sc}|^2}{\sum_{f_1}^{f_2} |p_{réf}|^2}, \quad (4.3)$$

où p_{sc} et $p_{réf}$ sont respectivement la pression rayonnée par le cristal sonique et la pression rayonnée par l'écran de référence. f_1 et f_2 sont respectivement la fréquence minimale et la fréquence maximale de la bande d'octave. Pour obtenir la pression rayonnée, on soustrait du champ de pression total le champ de pression calculé uniquement en présence du sol. À l'aide de l'indice de réflexion α , la perte par insertion RL du cristal sonique est déterminée par la relation suivante :

$$RL = -10 \log(1 - \alpha) \quad (4.4)$$

Selon la valeur de α , nous distinguerons trois cas possibles. Si $\alpha = 0$, le cristal sonore étudié renvoie la même énergie rayonnée en réflexion que l'écran de référence. Si $\alpha > 0$, le cristal sonore étudié renvoie moins d'énergie rayonnée en réflexion que l'écran de référence. Si $\alpha < 0$, le cristal sonore renvoie davantage d'énergie rayonnée en réflexion que l'écran de référence. Par exemple, RL vaut 3 dB et 7 dB respectivement pour $\alpha = 0,5$ et $\alpha = 0,8$. Pour déterminer α , nous effectuons, à l'aide du code de calcul BEM, des calculs en deux dimensions dans le plan vertical perpendiculaire à l'infrastructure. Concernant les sources sonores, on modélise dans cette section une infrastructure routière avec deux voies et quatre sources sonores placées en amont du cristal sonore (figure 4.2). $S_{1,1}$ et $S_{2,1}$ représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule léger (hauteur de 0,01 m), $S_{1,2}$ et $S_{2,2}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule léger (hauteur de 0,30 m). Les champs de pression p_{sc} et $p_{réf}$ seront calculés pour 90 récepteurs (R_1 à R_{90}) placés sur un arc de cercle de centre O (milieu de la face de l'écran côté sources) et de rayon $r=25$ m et ils sont espacés tous les $0,5^\circ$. L'angle entre le segment OR_1 et le segment OR_{90} est égale à 45° . Avec cet emplacement des récepteurs nous pouvons déterminer la directivité du champ réfléchi par les cylindres en différents points en amont du cristal sonore. L'écran rigide de référence de 3 m de hauteur et 0,2 m de largeur est placé à la même position du cristal sonore de manière que le centre de sa face du côté des sources coïncide avec le point O.

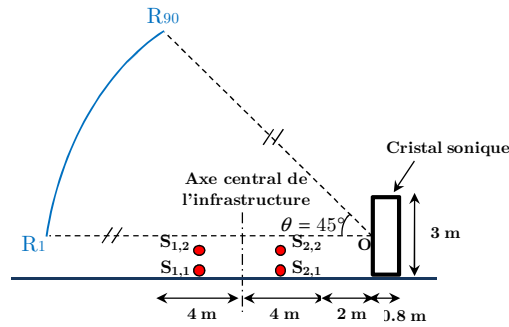


Figure 4.2. Configuration géométrique utilisée pour calculer la perte par réflexion du cristal sonore.

Les résultats de la perte par réflexion des cinq cristaux soniques étudiés sont présentés en figure 4.3. Les courbes de directivité de α sont tracées pour les quatre bandes d'octave après le calcul des champs de pression pour 60 fréquences par octave. Des calculs préliminaires ont montré que ce nombre des fréquences est suffisant pour assurer la convergence des calculs. Concernant les deux cristaux soniques SC1 et SC2, nous constatons que la perte par réflexion diminue avec la fréquence pour tous les récepteurs situés sur l'arc de cercle. En effet, la diffusion et la réflexion des ondes acoustiques augmentent lorsque la longueur d'onde est de même ordre ou inférieure au diamètre des cylindres. Comme la longueur d'onde aux basses fréquences est très grande par rapport à la constante du réseau, le cristal sonore peut être considéré comme homogène dans cette gamme de fréquences. Nous remarquons aussi que lorsque la bande de fréquence coïncide avec la bande interdite du cristal sonore, l'indice de réflexion α

du cristal sonique est proche de 0 pour tous les récepteurs. Les bandes interdites des cristaux soniques SC1 et SC2 sont égales à 2000 Hz et 1000 Hz respectivement. Cela explique les valeurs de α proches de 0 à 2000 Hz pour SC1 et à 1000 Hz pour SC2. En effet, l'énergie bloquée en transmission pour la bande interdite de fréquences est rayonnée en réflexion devant le cristal sonique vers les points récepteurs. Le cristal sonique se comporte alors en réflexion comme un écran rigide pour la bande interdite. Concernant le cristal sonique SC3, une faible perte par réflexion est constatée pour les quatre bandes d'octave. Cela montre que plus la taille des cylindres est grande, plus l'efficacité en réflexion du cristal sonique est faible. Pour les deux cristaux soniques SC4 et SC5 présentant une distribution des cylindres plus complexe que celle de trois autres cristaux soniques, nous constatons que la perte par réflexion est très moyenne au delà de la bande d'octave de 250 Hz. En effet, la présence des cylindres de différentes tailles favorisent une diffusion d'énergie sur une large gamme de fréquences lorsque le rapport entre la longueur d'onde et le diamètre des cylindres n'est pas constant.

Les résultats de la perte acoustique par réflexion, des différents cristaux soniques étudiés, montrent que leur efficacité en réflexion est généralement modérée, c'est-à-dire inférieure à 5 dB. Le diamètre des cylindres est un paramètre important influençant cette efficacité. Elle est d'autant plus faible que le diamètre des cylindres est grand. Il est à noter que la perte par réflexion RL élevée du cristal sonique associée aux valeurs de α autour de 1 (pour SC3 et SC4 à 250 Hz) peut être due à l'effet de diffusion par les cylindres mais elle est principalement due au fait que l'onde passe à travers le cristal sonique et n'est pas absorbée par celui-ci. Nous verrons dans le paragraphe suivant que ces valeurs de α autour de 1 pour certaines bandes de fréquences sont associées à une perte par transmission quasiment nulle derrière le cristal sonique. Pour les valeurs moyennes de α , la perte par réflexion RL du cristal sonique ne dépasse pas quelques dB. Par exemple, pour SC2 à 2000 Hz ou pour SC5 à 500 Hz, la diminution du champ réfléchi par le cristal sonique est autour de 3 dB correspondant à une valeur de l'indice de réflexion α autour de 0,5.

La conception des cristaux soniques avec des distributions complexes des cylindres dans notre étude (SC4 et SC5) n'a pas favorisé une importante perte par réflexion. Concernant la directivité de l'indice de réflexion de différents cristaux soniques étudiés, nous constatons que les ondes acoustiques sont rayonnées dans toutes les directions avec quasiment la même énergie. L'apparition de quelques lobes de directivité, où la perte par réflexion est légèrement élevée, est remarquée pour des angles de rayonnement très faibles aux hautes fréquences.

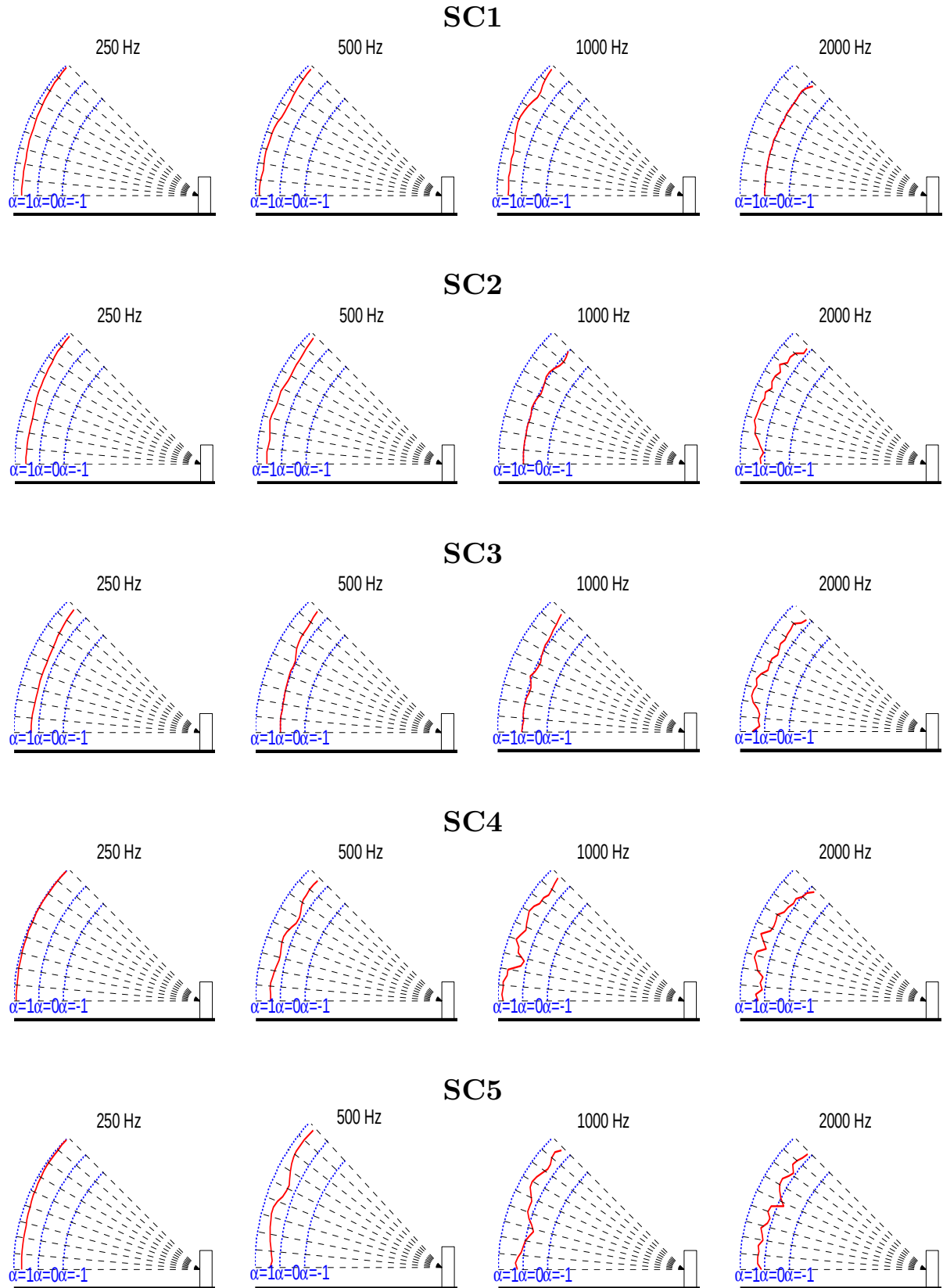


Figure 4.3. Diagrammes de directivité de l'indice de réflexion α de cinq cristaux soniques étudiés pour les bandes d'octave de 250 Hz à 2000 Hz. Par exemple, $\alpha = 0,5$ correspond à une diminution du champ réfléchi par 3 dB et $\alpha = 0,8$ correspond à une diminution du champ réfléchi par 7 dB.

4.1.2. Perte acoustique par insertion des cristaux soniques

Dans cette partie, nous étudions la perte par insertion de cinq cristaux soniques étudiés pour la gamme de fréquences 50-4000 Hz. Elle est la moyenne dans une région de récepteurs derrière le cristal sonique (voir figure 4.4) est calculée sur un maillage de 9 récepteurs par m² :

$$\overline{IL}_{\Delta f} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |P_{ref}(\Delta f)|^2}{\sum_{i=1}^n |P_{SC}(\Delta f)|^2} \right), \quad (4.5)$$

avec n le nombre de points récepteurs, $P_{SC}(\Delta f)$ la pression acoustique pour la configuration avec le cristal sonique dans la bande de tiers d'octave Δf et $P_{ref}(\Delta f)$ la pression acoustique pour la configuration de référence sans le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf .

Nous calculons aussi la perte par insertion globale IL en dB(A) dans chaque région de récepteurs à partir des spectres de la perte par insertion. Elle est donnée par la formule suivante :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + \overline{EA}_{ref, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + \overline{EA}_{ref, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + \overline{EA}_{SC, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + \overline{EA}_{SC, \Delta f})/10}} \right), \quad (4.6)$$

où $\overline{EA}_{SC, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration avec le cristal sonique dans la bande de tiers d'octave Δf et $\overline{EA}_{ref, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration de référence sans le cristal sonique dans la bande de tiers d'octave Δf . L_{WR} et L_{WM} sont respectivement les niveaux de puissance relatifs aux bruits de roulement et de moteur définis dans le modèle Harmonoise [133]. Les calculs sont effectués pour une vitesse des véhicules de 90 km/h.

La configuration géométrique utilisée dans cette section est présentée en figure 4.4. Nous modélisons la même infrastructure routière à deux voies présentée dans la première partie de cette section. La perte par insertion est calculée comme une moyenne énergétique dans une région de récepteurs avec un maillage de 9 récepteurs par m². Cette région débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m.

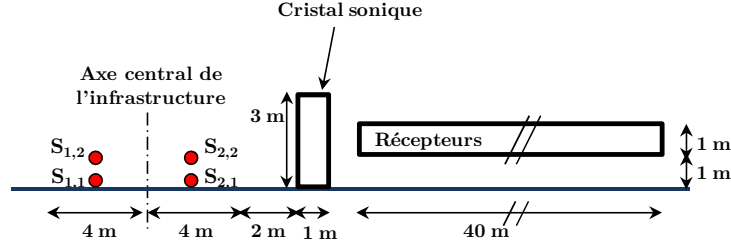


Figure 4.4. Configuration géométrique utilisée pour calculer la perte par insertion du cristal sonore.

Les résultats de la perte par insertion des cinq cristaux soniques étudiés sont présentés en figure 4.5. On donne aussi, pour comparaison, le résultat pour un écran droit rigide de référence (REF). Les spectres de IL sont tracés en considérant 20 fréquences par chaque bande de tiers d'octave. Pour chaque spectre tracé, la valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée en légende.

Concernant les trois cristaux soniques SC1, SC2 et SC3, nous constatons que la perte par insertion est proche de zéro pour toutes les bandes de tiers d'octave sauf pour une bande de fréquences où un pic d'atténuation d'une grande amplitude est visible. Cette bande correspond à la bande interdite (déterminée par l'équation 4.1) de chaque cristal sonore en fonction de sa constante du réseau β (2000 Hz, 1000 Hz et 850 Hz respectivement pour SC1, SC2 et SC3). Cela explique la faible perte par insertion globale en dB(A) pour les trois cristaux soniques. Toutefois, ces résultats fréquentiels montrent un grand intérêt de tels dispositifs antibruit. En effet, en fonction de la bande de fréquences dans laquelle nous voulons atténuer l'amplitude de l'onde acoustique, nous pouvons concevoir un simple arrangement des cylindres en faisant varier uniquement la distance entre les cylindres. Concernant les deux cristaux soniques SC4 et SC5, nous observons qu'il y a davantage de pics dans le spectre de la perte par insertion par rapport aux spectres de trois premiers cristaux soniques. Cela montre que les atténuations dues aux différents ensembles de cylindres ayant différents diamètres sont additives. En effet, par exemple pour SC4, on observe deux pics à 630 Hz et 2000 Hz correspondant respectivement aux deux diamètres de cylindres de 9 cm et 4 cm. Toutefois, l'amplitude de ces pics est faible puisque le nombre de cylindres de chaque groupe n'est pas très important dans la structure totale du cristal sonore. Pour le cristal sonore SC5, nous pouvons constater que la perte par insertion est négative autour de 800 Hz. Cela est dû à une focalisation d'énergie derrière le cristal sonore. Selon Gupta et al. [139], la focalisation des ondes augmente lorsque le cristal sonore présente une forte inhomogénéité comme dans notre cas où différents diamètres des cylindres sont utilisés.

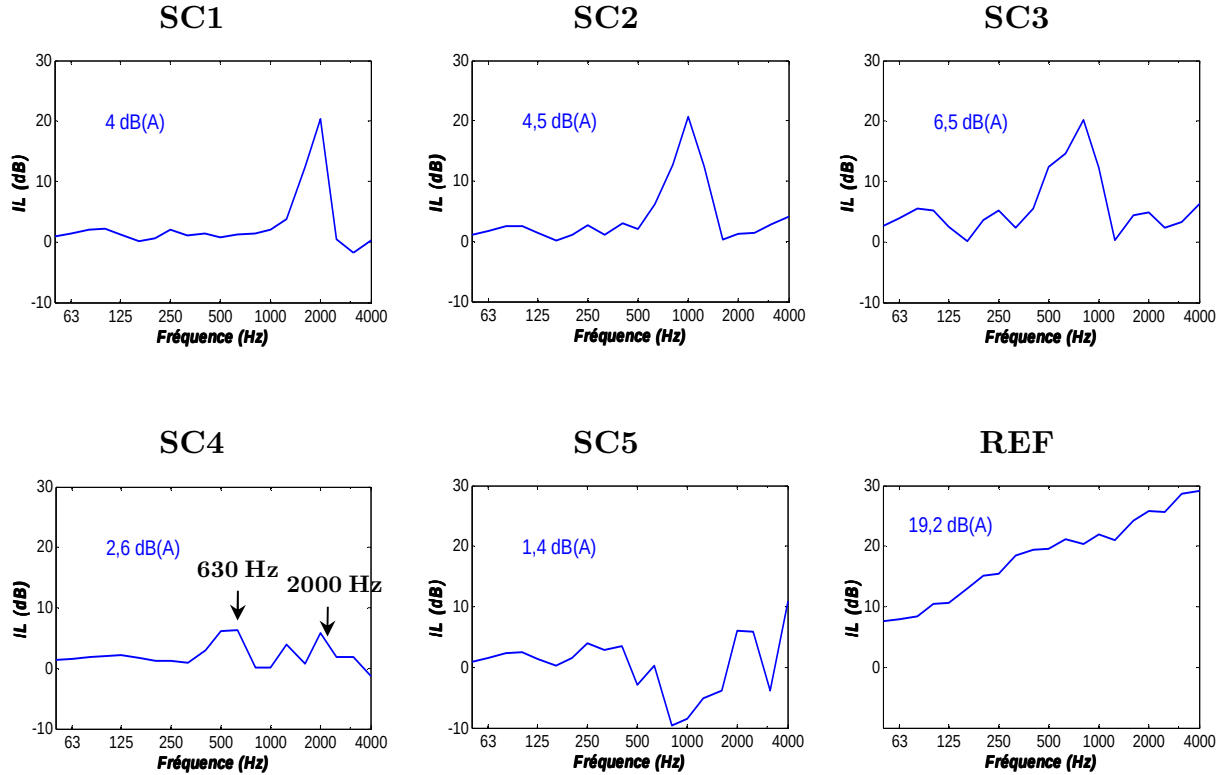


Figure 4.5. Spectres de la perte acoustique par insertion en fonction de la fréquence pour les cinq cristaux soniques étudiés avec les valeurs de la perte acoustique par insertion globale en dB(A).

Pour montrer l'influence du facteur de remplissage ff sur l'efficacité des cristaux soniques, nous montrons en figure 4.6, pour le cristal sonique SC3, cinq spectres d'IL obtenus en faisant varier ff entre 5% et 60%. En analysant les différents spectres, nous constatons que la bande interdite de fréquences obtenue est d'autant plus large que le facteur de remplissage est grand. L'élargissement de la bande interdite est davantage marqué pour les fréquences inférieures à la fréquence centrale de la bande. L'amplitude d'atténuation pour la bande interdite est aussi proportionnelle au facteur de remplissage ff . Cela signifie que le diamètre des cylindres ne doit pas être très petit par rapport à la longueur d'onde pour la bande de fréquences qu'on souhaite atténuer.

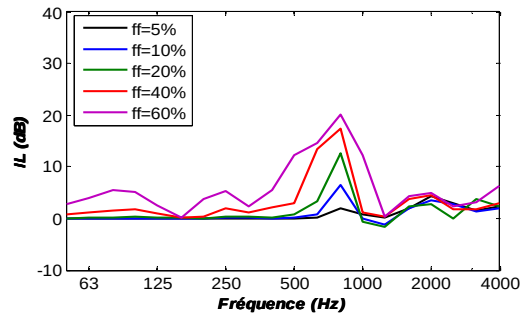


Figure 4.6. Spectres de la perte acoustique par insertion du cristal sonique SC3 en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du facteur de remplissage ff .

Les résultats de la perte par insertion, pour les différents cristaux soniques étudiés, ont montré que leur efficacité est sensible à l'arrangement des cylindres. Un arrangement des

cylindres sous forme d'un réseau périodique permet de prohiber une bande de fréquences liée à la constante du réseau α . La conception des cristaux soniques avec des arrangements complexes des cylindres ne permet pas d'améliorer l'efficacité des cristaux soniques et peut au contraire la dégrader. Nous pouvons conclure, à partir de ces résultats, que l'avantage principal des cristaux soniques est l'existence d'une bande de fréquences, appelée bande interdite, où les ondes ne peuvent pas se propager dans le cristal sonique. Cependant, la transparence acoustique des cristaux soniques pour le reste du domaine fréquentiel présente leur principal inconvénient. Dans la gamme de basses et moyennes fréquences, où le bruit routier présente les composantes les plus énergétiques, l'efficacité en diffraction des cristaux soniques étudiés est quasiment nulle contrairement à l'écran droit conventionnel. Cela explique la faible perte par insertion globale obtenue pour les cristaux soniques ne dépassant pas 6,5 dB(A). Cette perte est très inférieure à celle de l'écran de référence d'environ 19 dB(A). Pour avoir une bonne perte par insertion du cristal sonique pour toute la gamme de fréquences étudiée correspondant au bruit routier, les diffuseurs peuvent être structurés en bandes de manière que chaque bande réduit le bruit dans une plage de fréquences donnée. Dans ce cas, l'épaisseur de la bande est d'autant plus grande que les fréquences sont faibles. Cela est dû à la constante du réseau qui doit être de même ordre que la longueur d'onde associée à la fréquence centrale de la bande interdite. L'épaisseur du cristal sonique peut atteindre dans ce cas plusieurs mètres et le nombre de diffuseurs devient très grand. Cette solution est donc inappropriée à cause de la difficulté de la mise en œuvre et de l'espace important nécessaire pour insérer le cristal sonique. Dans la suite de ce travail, nous proposons une autre solution qui consiste à combiner un cristal sonique de faible épaisseur à un écran droit conventionnel et nous étudions le gain acoustique supplémentaire ainsi apporté.

4.2. Étude paramétrique de l'efficacité acoustique d'un écran innovant utilisant des cristaux soniques

Nous étudions dans cette section l'efficacité d'un écran innovant obtenu par une combinaison de deux écrans ayant des propriétés acoustiques différentes : un écran droit conventionnel et un cristal sonique positionné côté sources (figure 4.7).

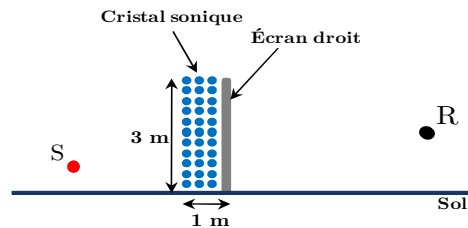


Figure 4.7. Configuration de l'écran innovant : adjonction d'un cristal sonique sur un écran droit.

Nous supposons qu'en amont d'un écran conventionnel, nous disposons d'un espace suffisant pour installer un cristal sonore sans empiéter sur la bande d'arrêt d'urgence et sans engendrer une augmentation de la hauteur de l'écran droit conventionnel.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'effet acoustique de l'insertion du cristal sonore installé en amont de l'écran conventionnel. Il est à noter aussi qu'en plus de l'effet acoustique, la conception de tels dispositifs innovants permet de résoudre un problème d'ordre esthétique d'écrans conventionnels (en béton, métal,...) en améliorant leur impact visuel sur les riverains, les usagers des voies routières et les résidents à côté de l'écran.

Cette section est divisée en trois parties, la première partie présentant la méthode de conception de l'écran innovant utilisant des cristaux soniques, la deuxième partie montrant les résultats de la perte en diffraction obtenue derrière l'écran conventionnel après l'insertion du cristal sonore, et la troisième partie portant sur les résultats de la perte en réflexion en amont de l'écran conventionnel après l'ajout du cristal sonore.

4.2.1. Conception d'un écran innovant utilisant des cristaux soniques

La conception du dispositif antibruit innovant étudié est présentée en figure 4.8. Comme dans la précédente section, les diffuseurs sont générés dans une coupe du cristal sonore et sont donc considérés comme infinis dans la troisième direction et parallèles aux sources routières. L'écran droit conventionnel a une hauteur de 3 m et une largeur de 0,2 m. Concernant le cristal sonore, nous supposons qu'il y a un espace suffisant, en amont de l'écran (côté sources sonores), pour installer un cristal sonore d'une épaisseur de 0,8 m. La hauteur du cristal sonore dans cette étude est de 3 m afin de ne pas dépasser la hauteur de l'écran conventionnel initialement installé. Le cristal sonore conçu à côté de l'écran se compose de deux bandes des cylindres B1 et B2. La première bande présente un réseau périodique de diffuseurs qui s'étend de $x = 0$ m à $x = 0,30$ m avec une constante de réseau $\beta_1 = 0,085$ m. Les diffuseurs utilisés ont un diamètre $d_1 = 0,05$ m. La deuxième bande B2 présente aussi un réseau périodique des diffuseurs et s'étend de $x = 0,30$ m à $x = 0,80$ m avec une constante de réseau $\beta_2 = 0,17$ m. Le diamètre des diffuseurs de cette bande est $d_2 = 0,13$ m.

La première bande B1 en face des sources sonores est proposée pour améliorer la perte par diffraction de l'écran conventionnel dans une bande de fréquences autour de 2000 Hz correspondant à la bande interdite (voir figure 4.5, SC1).

La deuxième bande B2 est constituée par des diffuseurs de taille moyenne. Elle est proposée pour augmenter la diffraction de l'écran conventionnel dans la bande de fréquences de 1000 Hz présentant l'énergie principale du bruit de circulation routière (voir section 2.7). Le facteur de remplissage choisi pour cette bande est environ 50%. Ce facteur est proportionnel

au diamètre des diffuseurs et déterminé par l'équation 4.2. En effet, il a été montré dans la littérature sur les cristaux soniques [43, 48] que la valeur optimale du facteur de remplissage pour la création de la bande interdite est entre 10% et 50%. Puisque nous avons montré que la largeur de la bande interdite et l'amplitude d'atténuation augmentent avec le facteur de remplissage (voir figure 4.6), nous utilisons la valeur maximale de ce facteur.

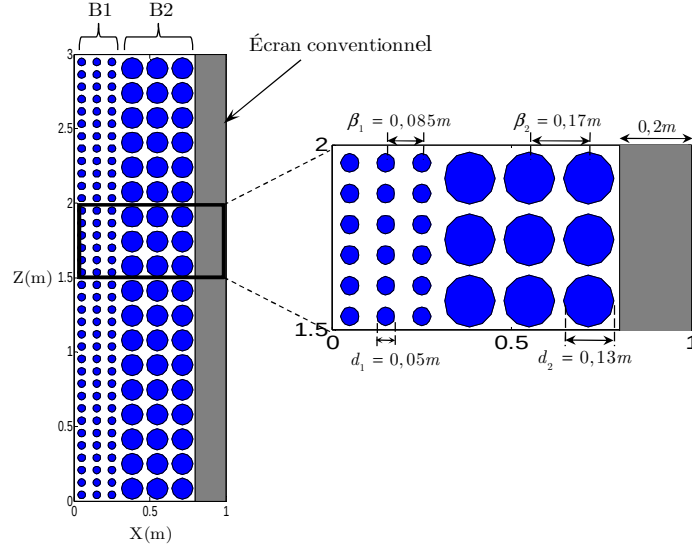


Figure 4.8. Conception du dispositif antibruit innovant utilisant des cristaux soniques.

Pour les calculs en réflexion et en diffraction, nous présentons les résultats d'efficacité des cristaux soniques pour trois types de diffuseurs. Pour le premier type, nous utilisons des cylindres rigides (voir figure 4.8) qui peuvent être constitués en bois. Pour le deuxième type, nous remplaçons les cylindres par des cavités résonantes. Ces cavités peuvent être construites à base de bambou traité. Pour le troisième type, nous utilisons des cavités résonantes dont l'intérieur est couvert d'un matériau absorbant. Ce dernier matériau est le béton de chanvre utilisé dans le paragraphe 3.2.1.3, dont l'impédance de surface est définie par le modèle de Delany et Bazley avec une résistivité au passage de l'air $\sigma = 20 \text{ kPa.s.m}^2$. Le modèle de Delany et Bazley est utilisé dans cette section pour montrer l'effet de l'ajout d'un matériau absorbant à l'intérieur des cavités résonantes. Les cristaux soniques utilisant respectivement des cylindres rigides, des cavités résonantes et des cavités absorbantes seront désignés dans la suite de ce travail par SCB1, SCB2 et SCB3. En figure 4.9, nous présentons le type du diffuseur utilisé pour chaque cristal sonique.

Les deux cristaux soniques SCB2 et SCB3 sont proposés dans cette section pour ajouter des nouveaux effets acoustiques différents de ceux générés par le phénomène de périodicité du réseau des diffuseurs. Pour ces deux cristaux soniques, les deux largeurs d'ouverture e_1 et e_2 des cavités de deux bandes B1 et B2 ont été sélectionnées pour maximiser l'effet de résonance et d'absorption dans les cavités (voir figure 4.10). Nous remarquons que la meilleure efficacité est obtenue pour les deux ouvertures des cavités les plus larges.

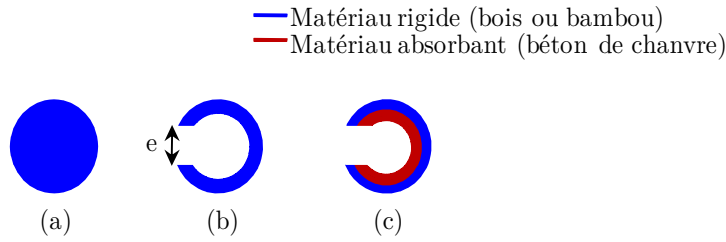


Figure 4.9. Diffuseurs utilisés pour la conception des cristaux soniques SCB1 (a), SCB2 (b) et SCB3 (c).

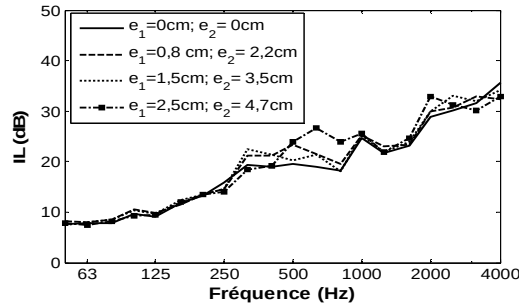


Figure 4.10. Effet de la largeur des ouvertures des cavités du cristal sonique sur son efficacité acoustique.

4.2.2. Perte acoustique par diffraction du cristal sonique

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'atténuation en diffraction supplémentaire du cristal sonique par rapport à la configuration initiale en présence de l'écran conventionnel sans le cristal sonique. C'est la différence ΔIL entre la perte par insertion de l'écran innovant (écran conventionnel+cristal sonique) et celle de l'écran conventionnel seul :

$$\Delta IL = IL_{\text{écran}+SC} - IL_{\text{écran}} , \quad (4.7)$$

où $IL_{\text{écran}+SC}$ est la perte par insertion de l'écran innovant et $IL_{\text{écran}}$ est la perte par insertion de l'écran conventionnel calculées à l'aide de l'équation 4.4.

L'efficacité du cristal sonique sera calculée dans cette partie en 2D et en 2D^{1/2} pour deux régions de récepteurs (figure 4.11). La première région (région 1) débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2m. Elle représente les piétons et les usagers des pistes cyclables. La deuxième région (région 2) débute 10 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m. Elle est représentative des résidents du premier étage d'un bâtiment.

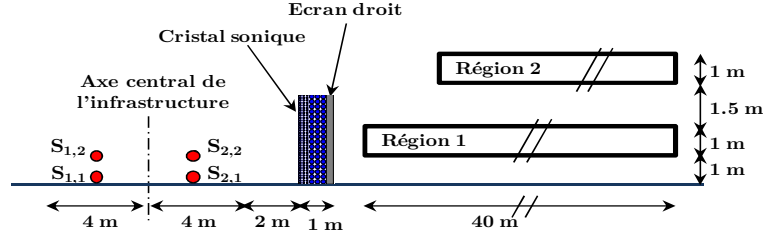


Figure 4.11. Configuration géométrique utilisée pour calculer la perte par insertion du cristal sonore installé à côté d'un écran conventionnel.

Les spectres de la perte par insertion (IL) de l'écran conventionnel et les spectres de la perte par insertion supplémentaire (ΔIL) des trois cristaux soniques SCB1 et SCB2 et SCB3 sont présentés en figures 4.12 et 4.13 pour les deux régions de récepteurs. Les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) sont données pour chaque spectre en considérant une vitesse des véhicules de 90 km/h. Nous montrons en figure 4.13 que la perte par insertion supplémentaire produite par les cristaux soniques est significative aux moyennes et hautes fréquences. L'amélioration de l'efficacité de l'écran conventionnel due au cristal sonore SCB1 est visible pour deux bandes de fréquence autour de 1000 Hz et 2000 Hz. Elles correspondent aux deux bandes interdites créées respectivement par la première bande des cylindres B1 et par la deuxième bande des cylindres B2 du cristal sonore. En effet, pour ces bandes, les ondes acoustiques sont atténuées par le réseau périodique des cylindres avant d'être diffractées par le bord supérieur de l'écran droit.

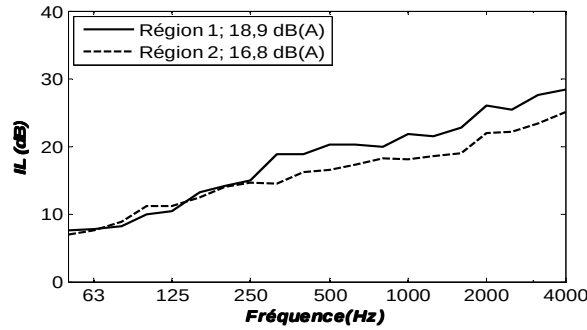


Figure 4.12. Spectres de la perte par insertion IL de l'écran droit rigide pour les deux régions de récepteurs avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A).

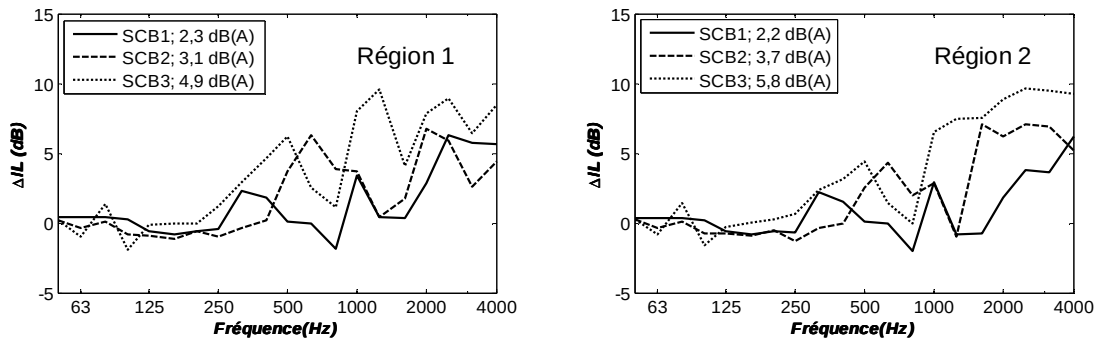


Figure 4.13. Spectres de la perte par insertion supplémentaire ΔIL des cristaux soniques SCB1, SCB2 et SCB3 pour les deux régions de récepteurs avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A).

Pour le cristal sonique SCB2 présentant des cavités résonantes, nous constatons une amélioration de l'efficacité du cristal sonique SCB1 au-dessus de la bande de tiers d'octave de 500 Hz. Afin de montrer l'effet de chaque bande de diffuseurs (BS1 et BS2) sur la réponse globale du cristal sonique, nous présentons en figure 4.14 les résultats de la perte par insertion de chaque bande de diffuseurs sans l'écran droit et sans l'autre bande de diffuseurs. Pour chaque bande, nous comparons la perte par insertion pour des cylindres rigides et pour des cavités résonantes. Pour des cylindres rigides, nous observons deux pics correspondant aux fréquences interdites de deux bandes de cylindres. Pour des cavités résonantes, nous constatons, en plus des pics dus aux bandes interdites, l'élargissement du pic vers les fréquences inférieures à la fréquence centrale de la bande interdite. Ces résultats signifient que les effets de la résonance et de la périodicité des diffuseurs sont additifs dans le spectre de la perte par insertion du cristal sonique. L'augmentation de l'efficacité du cristal sonique SCB2, par rapport à celle du SCB1, autour de 630 Hz et 1600 Hz montre que les atténuations dues aux deux bandes B1 et B2 sont aussi additives.

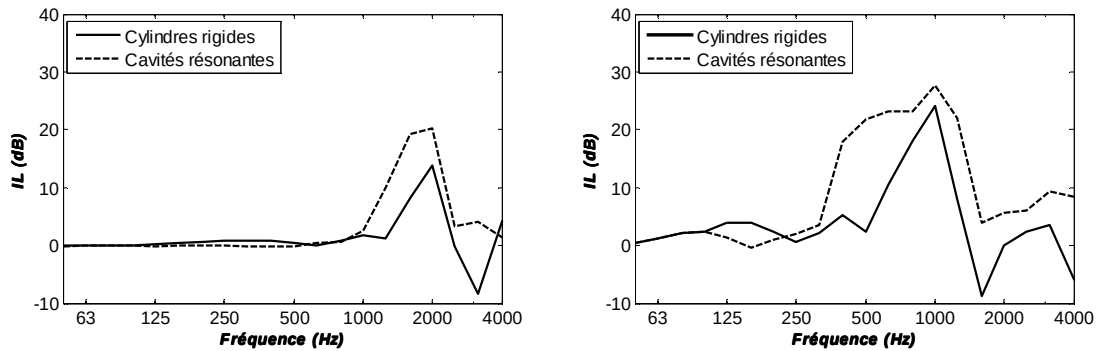


Figure 4.14. Spectres de la perte par insertion de la bande B1 (à gauche) et la bande B2 (à droite) pour des cylindres rigides et des cavités résonantes.

Concernant le cristal sonique SCB3 présentant des cavités absorbantes, nous observons une amélioration de la perte par insertion ΔIL du SCB2 au-dessus de 250 Hz. Cela montre que l'effet du matériau absorbant est significatif dans une large gamme de fréquences.

Aux basses fréquences inférieures à 250 Hz, les trois cristaux soniques étudiés ne conduisent pas à une augmentation de l'efficacité de l'écran conventionnel. En effet, la longueur d'onde à ces fréquences est très grande par rapport à la constante du réseau.

Après l'analyse des résultats précédents, nous pouvons conclure que l'effet de l'ajout d'un cristal sonique en amont d'un écran conventionnel est considérable. Pour atteindre une amélioration la plus élevée possible, il faut concevoir des cristaux soniques avec des propriétés acoustiques supplémentaires de résonance et d'absorption.

Pour la plupart des cas étudiés, nous avons effectué les calculs numériques en deux dimensions. La modélisation des écrans acoustiques en deux dimensions a été souvent réalisée pour comparer plusieurs formes de murs avec ou sans absorption (voir section 1.2.3). Ce-

pendant, pour les calculs en deux dimensions, les sources sonores sont considérées comme des lignes infinies cohérentes émettant en phase ne permettant pas de décrire une situation réelle du bruit du transport terrestre où les sources sont incohérentes (tramway, train, voitures). Par conséquent, dans la suite de cette partie, nous effectuerons des calculs en $2D\frac{1}{2}$ afin de montrer l'effet du type de la source sonore utilisée en considérant des lignes de sources incohérentes. L'effet de l'incidence oblique sera pris en compte aussi en simulant des sources ponctuelles. A l'aide de la BEM, il est possible d'effectuer des calculs tridimensionnels en maillant la surface de l'écran acoustique sur une longueur importante. Cependant, à cause du temps de calcul très important engendré par cette démarche, notamment dans la gamme des moyennes et hautes fréquences, nous avons choisi d'effectuer les calculs en $2D\frac{1}{2}$. Pour ce faire, nous utiliserons la méthode développée par Duhamel [140] et implémentée dans MICADO [141] qui permet d'obtenir les résultats des calculs tridimensionnels à partir du post-traitement des calculs bidimensionnels. Cela est effectué à travers une transformation de type Fourier en considérant des écrans infiniment longs avec une section constante (figure 4.15).

Le champ de pression en un point quelconque dans le domaine 2D est obtenu dans une première étape en résolvant le système matriciel. Dans une deuxième étape, une intégrale de Fourier est utilisée pour calculer le champ de pression en trois dimensions à partir du champ de pression calculé en deux dimensions:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, z, k, Z(k) \frac{K}{k}) e^{-ik_y Y} dk_y, \quad (4.8)$$

où P est la pression 3D pour la position (x, y, z) et pour le nombre d'onde K , p est la pression 2D pour la position (x, z) et pour le nombre d'onde k , $k = \sqrt{K^2 - k_y^2}$, $Y = y - y_s$, où y_s est la coordonnée y de la source ponctuelle. $Z(k)$ représente les différentes impédances des frontières, incluant le sol infini, au nombre d'onde k . Le spectre fréquentiel en deux dimensions nécessaire pour calculer la solution en trois dimensions au nombre d'onde K est limité à k qui est inférieure ou égale à K . Lorsque k_y est supérieur à K , il faut aussi faire le calcul pour les fréquences imaginaires où la pression diminue rapidement avec la fréquence. Cette pression est donc calculée pour les basses fréquences du spectre 2-D.

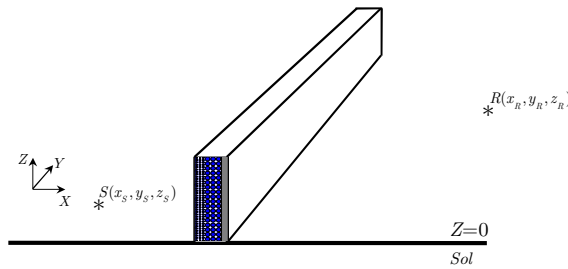


Figure 4.15. Dispositif antibruit infiniment long avec une section constante pour les calculs tridimensionnels.

Dans le cas d'une ligne infinie des sources incohérentes, la solution est obtenue en intégrant une série infinie de sources ponctuelles décorréées. Le carré du rapport de la pression totale à la pression en champ libre est donné par :

$$A(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| p(x, z, k, Z(k) \frac{K}{k}) \right|^2 dk_y \quad (4.9)$$

Dans le cas d'une ligne finie de sources ponctuelles décorréées, les contributions des sources calculées en utilisant l'équation 4.7 sont simplement additionnées en énergie. Lorsque le sol et l'écran acoustique sont acoustiquement réfléchissants, il suffit de ne calculer le spectre 2D qu'une seule fois. Toutefois, lorsque des surfaces impédantes sont introduites au niveau du sol ou au niveau de l'écran, la modification des spectres Z par le facteur K/k implique la nécessité d'un calcul complet de la solution en deux dimensions jusqu'au nombre d'onde K pour chaque nombre d'onde K . Pour cette raison, impliquant une augmentation importante du temps de calcul, nous présentons dans la suite de ce travail uniquement les résultats d'efficacité du cristal sonore SCB2 présentant des cavités rigides pour une gamme de fréquence entre 50 et 2000 Hz.

Nous présentons en figures 4.16 et 4.17, la perte par insertion IL de l'écran conventionnel et la perte par insertion ΔIL du cristal sonore SCB2 respectivement pour une source ponctuelle et pour une ligne des sources incohérentes. Les pertes par insertion sont calculées pour un récepteur situé à 10 m derrière l'écran à une hauteur de 1,5 m. Les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) sont données pour chaque spectre en considérant une vitesse des voitures de 90 km/h.

En figure 4.16, nous présentons les spectres de la perte par insertion de l'écran conventionnel pour quatre angles de propagation (quatre positions Y entre le point source et le récepteur). Il est à noter que la perte par insertion obtenue avec une source ponctuelle pour une incidence normale en 3D est très proche de celle obtenue avec une ligne source infinie cohérente en 2D. L'influence de la direction de propagation sur l'efficacité de l'écran conventionnel est faible au-dessous de $\theta = 30^\circ$. Pour $\theta = 50^\circ$, la dégradation de la perte par insertion, par rapport à l'incidence normale, reste faible et ne dépasse pas 3 dB(A). Au-delà de cet angle, la dégradation devient significative notamment aux basses et moyennes fréquences.

En figure 4.16, nous représentons aussi les résultats de la perte par insertion dans le cas d'une ligne source finie incohérente. Cette dernière est une distribution de 120 sources ponctuelles entre -88° et $+88^\circ$. Le spectre de la perte par insertion, obtenu pour ce type de source, présente une fonction croissante monotone. Nous pouvons le considérer comme la moyenne des spectres de la perte par insertion obtenus pour les différents angles de propagation. La perte par insertion pour une ligne source finie incohérente est plus régulière et de plus faible

amplitude, aux moyennes et hautes fréquences, que pour une ligne source cohérente. La différence d'efficacité globale pour les deux types de source est de 4 dB(A). Cela montre qu'on peut surestimer l'efficacité des écrans acoustique en 2D en considérant des lignes sources cohérentes au lieu des lignes sources incohérentes en 3D. Ces résultats sont en cohérence avec ceux de Jean et al. [141] qui ont trouvé une différence d'efficacité entre les deux types des sources de même ordre pour un écran droit conventionnel. Toutefois, les calculs 3D présentent l'inconvénient d'un temps de calcul très important par rapport aux calculs 2D notamment lorsque des matériaux absorbants sont modélisés. Par ailleurs, les calculs 2D sont utiles pour comparer les efficacités des écrans acoustiques en termes de perte par insertion (IL) ou d'atténuation excédentaire (EA) ou pour étudier l'influence de certains paramètres sur leurs efficacités.

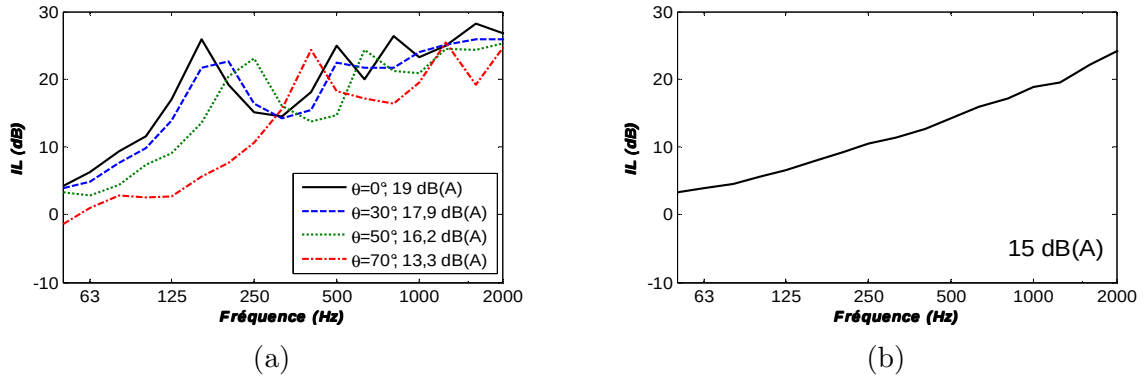


Figure 4.16. Effet du type de source sonore sur la perte par insertion IL de l'écran droit rigide; (a) : source ponctuelle, (b) : ligne source finie incohérente. Les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) sont données pour les différents spectres.

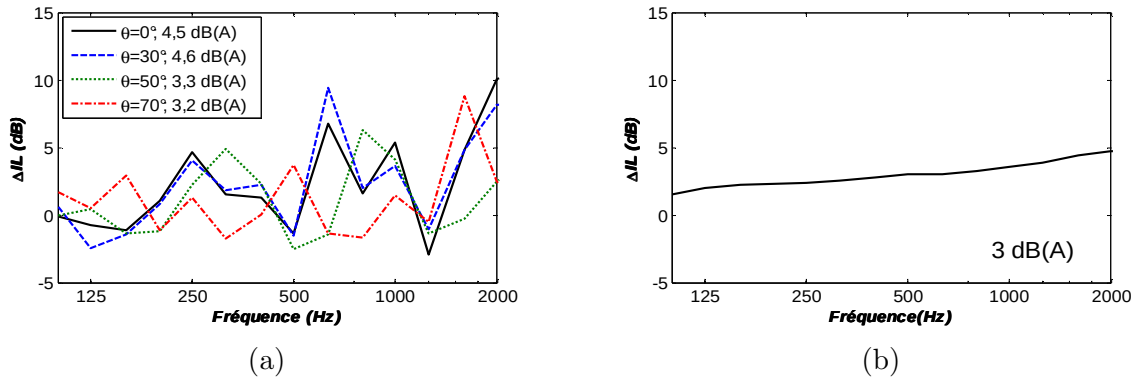


Figure 4.17. Effet du type de source sonore sur la perte par insertion ΔIL du cristal sonique; (a) : source ponctuelle, (b) : ligne source finie incohérente. Les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) sont données pour les différents spectres.

En figure 4.17, nous comparons les pertes par insertion supplémentaires ΔIL du cristal sonique SCB2 pour les quatre angles de propagation. En analysant les différents spectres obtenus, nous constatons une amélioration de l'efficacité de l'écran droit pour certaines bandes de tiers d'octave et pour les différents angles d'incidence suite à l'insertion du cristal sonique à

côté de l'écran droit. Les pics de ΔIL apparaissent à des positions différentes dans la gamme de fréquence étudiée en fonction de l'angle de propagation θ . En effet, la position de la bande interdite dépend de la constante du réseau qui varie en fonction de la direction de propagation. L'amélioration de l'efficacité globale due au cristal sonore SCB2 est significative pour les différents angles de propagation.

En figure 4.17, nous présentons le spectre de ΔIL de SCB2 aussi dans le cas d'une ligne source finie incohérente. Nous remarquons que l'amélioration d'efficacité augmente avec la fréquence pour un maximum de 5 dB à 2000 Hz. Comme pour l'écran droit, le spectre de ΔIL est analysé comme la moyenne des spectres obtenus pour les différents angles de propagation. L'amélioration de l'efficacité globale due au cristal sonore SCB2 atteint 3 dB(A) pour une ligne source finie incohérente.

Nous avons montré dans cette section que les cristaux soniques associés à un écran droit sont acoustiquement efficaces quelque soit le type de la source ou la direction de propagation. Cela montre que de tels dispositifs peuvent être utilisés pour améliorer l'efficacité en diffraction des écrans droits conventionnels. Il est à noter que nous avons effectué d'autres calculs pour comparer l'efficacité acoustique de la protection innovante (écran droit+cristal sonore) à celle d'une protection rigide pleine d'une épaisseur de 1 m utilisée comme deuxième protection de référence (figure 4.18). Pour ces calculs, nous avons déterminé la différence ΔIL entre la perte par insertion de la protection innovante ($IL_{\text{écran}+SC}$) et celle de la deuxième protection de référence ($IL_{\text{écran épais}}$) :

$$\Delta IL = IL_{\text{écran}+SC} - IL_{\text{écran épais}} , \quad (4.10)$$

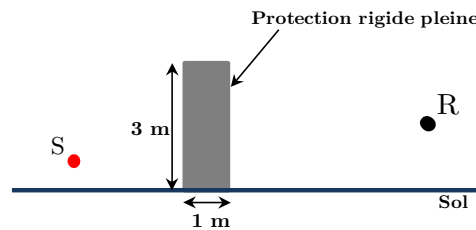


Figure 4.18. Deuxième protection rigide de référence d'une épaisseur de 1 m utilisée pour le calcul de l'efficacité de la protection innovante (écran+cristal sonore).

Les spectres de la perte par insertion ΔIL des trois protections SCB1 et SCB2 et SCB3 (par rapport à la protection de référence pleine) sont présentés en figure 4.19 pour les deux régions de récepteurs. Nous constatons que la protection innovante est aussi plus efficace qu'une protection pleine aux moyennes et hautes fréquences. Aux basses fréquences, des faibles valeurs de dégradation sont remarquées. L'efficacité globale de la protection innovante

est plus élevée que celle de la protection pleine avec une différence qui peut atteindre environ 4 dB(A) pour la protection SCB3.

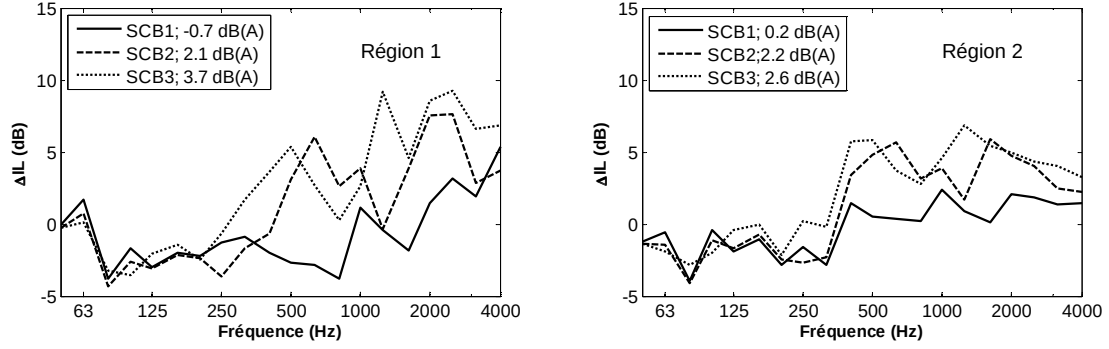


Figure 4.19. Spectres de la perte par insertion ΔIL (par rapport à la protection pleine) des protections SCB1, SCB2 et SCB3 pour les deux régions de récepteurs avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A).

4.2.3. Perte acoustique par réflexion du cristal sonore

L'objectif de cette étude est d'évaluer la perte par réflexion du cristal sonore installé devant un écran droit conventionnel. Pour cela nous utilisons deux indicateurs pour calculer sa perte par réflexion. Le premier indicateur est la perte par réflexion globale “ RL ” en dB(A) qui est la différence logarithmique entre le niveau de pression global dû à l'écran conventionnel seul et le niveau de pression global dû à l'écran innovant (écran conventionnel+cristal sonore). Elle est donnée par la formule suivante :

$$RL = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{ref, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + EA_{ref, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{in, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + EA_{in, \Delta f})/10}} \right), \quad (4.11)$$

où $EA_{ref, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire pour la configuration de référence avec l'écran conventionnel dans la bande de tiers d'octave Δf et $EA_{in, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire pour la configuration avec l'écran innovant dans la bande de tiers d'octave Δf . L_{WR} et L_{WM} sont respectivement les niveaux de puissance relatifs aux bruits de roulement et de moteur. Les calculs sont effectués pour une vitesse des voitures de 90 km/h.

La perte par réflexion RL est calculée sur un arc de cercle devant l'infrastructure routière pour 90 points récepteurs en utilisant la même configuration présentée en figure 4.2.

En figure 4.20, nous présenterons les résultats obtenus pour les trois cristaux soniques SCB1, SCB2 et SCB3. Nous constatons que la perte par réflexion de deux cristaux soniques SC1 et SCB2 est faible. Quelques lobes, où la perte par réflexions augmente, apparaissent pour des petites zones des récepteurs. Les pertes par réflexions moyennes pour tous les points récepteurs sont 1,1 dB(A) et 2,1 dB(A) respectivement pour les deux cristaux soniques SCB1 et SCB2. Pour le cristal sonore SCB3, nous constatons une perte par réflexion plus grande

que celle de deux premiers cristaux soniques pour tous les points récepteurs. La perte par réflexion moyenne obtenue est 3,8 dB(A).

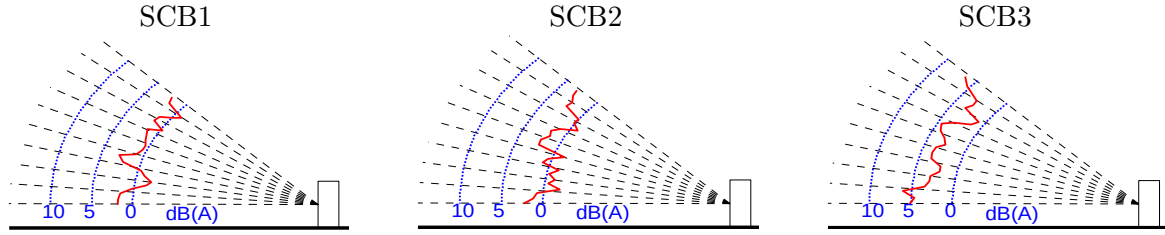


Figure 4.20. Diagrammes de directivité de la perte par réflexion RL de trois cristaux soniques étudiés $SC1$, $SC2$ et $SC3$.

Le deuxième indicateur est l'indice de réflexion RL_j à déterminer pour la configuration présentée en figure 4.21. Cette configuration a été proposée dans le troisième chapitre pour calculer la perte par réflexion des écrans acoustique en gabions dans une nouvelle méthode de mesure in-situ appliquée aux écrans épais et inhomogènes (voir section 3.1.3). Nous rappelons que l'avantage de cette configuration est de s'affranchir des réflexions sur le sol et de permettre un long fenêtrage des signaux temporels.

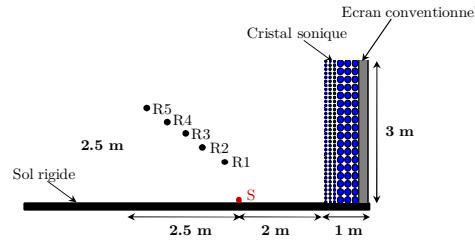


Figure 4.21. Localisations de la source et des récepteurs pour le calcul de l'indice de réflexion RL_j du cristal sonique.

Nous utilisons le code de calcul BEM pour déterminer RL_j . Les signaux temporels utilisés pour le calculer sont obtenus par une transformée inverse de Fourier des champs de pressions calculés dans le domaine fréquentiel. L'indice de réflexion RL_j est donné par la formule suivante :

$$RI_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \frac{\int_{\Delta f_j} \left| FFT \left[(t.h_r(t).w_r(t)) \right] \right|^2 df}{\int_{\Delta f_j} \left| FFT \left[(t.h_{réf}(t).w_{réf}(t)) \right] \right|^2 df}, \quad (4.12)$$

où $h_{réf}(t)$ est la composante réfléchiée par l'écran conventionnel et $w_{réf}(t)$ est la fenêtre temporelle associée à cette composante. $h_r(t)$ est la composante réfléchiée par l'écran innovant et $w_r(t)$ est la fenêtre temporelle associée à cette composante. FFT est le symbole de la transformation de Fourier. j est l'indice des bandes de tiers d'octave. n_j est le nombre des points récepteurs (égale à 5). t est le temps dont l'origine est le début du signal temporel.

L'indice de réflexion globale DL_{RI} en dB(A) est obtenu après la pondération des indices de réflexion RI_j en fonction du spectre sonore normalisé du trafic routier défini dans la norme EN 1793-3 [135] donnant le niveau L_j pour la bande de tiers d'octave j :

$$DL_{RI} = -10 \log \left(\frac{\sum_{j=1}^{18} RI_j \cdot 10^{0.1L_j}}{\sum_{j=1}^{18} 10^{0.1L_j}} \right) \quad (4.13)$$

Un exemple d'un signal obtenu après une transformée de Fourier inverse de la pression acoustique est présenté en figure 4.22. La largeur de la fenêtre temporelle est fixée à 35 ms afin de contenir quasiment toute l'énergie réfléchi sur l'écran acoustique. Les spectres de RI_j pour les trois cristaux soniques étudiés sont présentés en figure 4.23. Il est à noter que la perte par réflexion est d'autant plus grande que l'indice de réflexion RI_j est faible. Pour les deux cristaux soniques SCB1 et SCB2, nous constatons, comme pour le premier indice de réflexion, que leurs pertes par réflexion sont faibles. Ces pertes sont quasiment constantes pour toute la gamme de fréquences étudiée. Pour le cristal sonique SCB3, une perte par réflexion plus grande que celle de deux premiers est constatée au-dessus du tiers d'octave de 125 Hz. L'indice unique de réflexion DL_{RI} vaut 0,8 dB(A), 1,6 dB(A) et 3,7 dB(A) respectivement pour les cristaux soniques SCB1, SCB2 et SCB3.

Les résultats de la perte par réflexion obtenues pour les deux indices RL et RI_j sont corrélées. Elles montrent que l'effet d'absorption des cristaux soniques, lorsqu'ils sont associés à un écran droit, n'est pas important lorsque les diffuseurs sont rigides. Lorsque les diffuseurs sont absorbants, la perte par réflexion obtenue est modérée ne dépassant pas 4 dB(A).

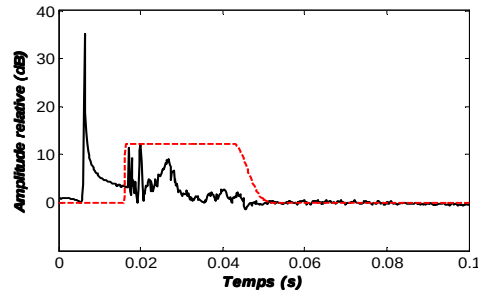


Figure 4.22. Exemple d'un signal temporel (traits continus en noir) obtenu après une transformée inverse du champ de pression calculé avec la BEM. La durée de la fenêtre temporelle (traits pointillés en rouge) est 35 ms.

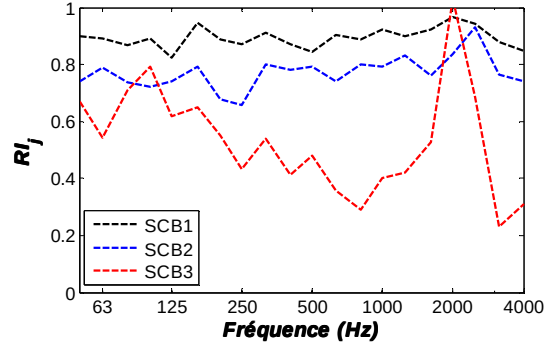


Figure 4.23. Indice de réflexion par tiers d'octave de trois cristaux soniques étudiés SCB1 (courbe en noir), SCB2 (courbe en bleue) et SCB3 (courbe en rouge).

4.3. Optimisation d'écrans innovants de faible hauteur utilisant des cristaux soniques

4.3.1. Position du problème

Les deux premières parties de ce chapitre ont été consacrées à l'étude paramétrique de l'efficacité des cristaux soniques en utilisant le code de calcul BEM. Dans la première partie, nous avons montré que les cristaux soniques ont une perte par réflexion modérée sur une large gamme de fréquences ne dépassant pas 5 dB et une bonne perte par insertion pour une bande de fréquences bien déterminée appelée "bande interdite". Dans la deuxième partie, nous avons montré que la combinaison des cristaux soniques avec des écrans conventionnels permet d'améliorer l'efficacité de ces derniers spécialement lorsque les diffuseurs du cristal sonique sont des cavités absorbantes.

Dans cette troisième partie de chapitre, nous utiliserons une approche différente pour étudier la performance acoustique des cristaux soniques de faible hauteur. Cette approche permet, contrairement à l'étude paramétrique, de réaliser une recherche systématique de cristaux soniques optimaux. Il s'agit d'utiliser le code de calcul BEM en couplage avec l'algorithme d'optimisation développé dans ce travail. Nous considérons des cristaux soniques de faible hauteur dans l'objectif de proposer des dispositifs de réduction du bruit de tramway s'intégrant facilement dans l'environnement urbain, contrairement aux écrans de grande hauteur. Le fait de considérer des écrans de faible hauteur permet aussi de réduire le temps de calcul dans un problème d'optimisation où un grand nombre d'évaluations de la fonction coût est nécessaire pour trouver des géométries optimales. En effet, cela permet de réduire le maillage pour les calculs numériques. La présente étude a pour objectif donc d'optimiser l'efficacité des cristaux soniques dont la hauteur ne dépasse pas un mètre.

Concernant la configuration géométrique étudiée dans cette section, nous considérons une infrastructure de tramway avec deux voies ferrées (figure 4.24). Les calculs d'optimisation seront effectués pour un seul tramway circulant sur la voie 1 ou sur la voie 2. À cause du

phénomène de multiréflexions qui peut se produire entre l'écran acoustique et le tramway, nous modélisons la caisse du tramway par une surface réfléchissante d'une hauteur de 3,2 m et d'une largeur de 2,45 m.

Dans cette étude d'optimisation, nous ne considérons pas des infrastructures routières. En effet, des calculs préliminaires ont montré que l'efficacité du cristal sonore de faible hauteur, pour une infrastructure routière, est faible par rapport à celle d'un écran de référence droit et rigide. Ceci est expliqué par la faible perte par transmission à travers le cristal sonore due à l'espacement entre les cylindres. Pour le bruit du tramway, nous nous attendons à des valeurs d'efficacité plus grandes grâce à la diminution de l'effet des réflexions multiples entre le tramway et l'écran acoustique avec une distribution complexe des cylindres.

La zone à l'intérieur de laquelle le cristal sonore est optimisé est représentée en figure 4.24 par un carré d'une arête de 1 m. La distance entre le cristal sonore et le tramway circulant sur la voie 1 est de 1 m. Les valeurs d'efficacité du cristal sonore seront comparées à celles d'un écran de faible hauteur de référence rigide de 1 m de hauteur et 1 m de largeur situé à la même position du cristal sonore.

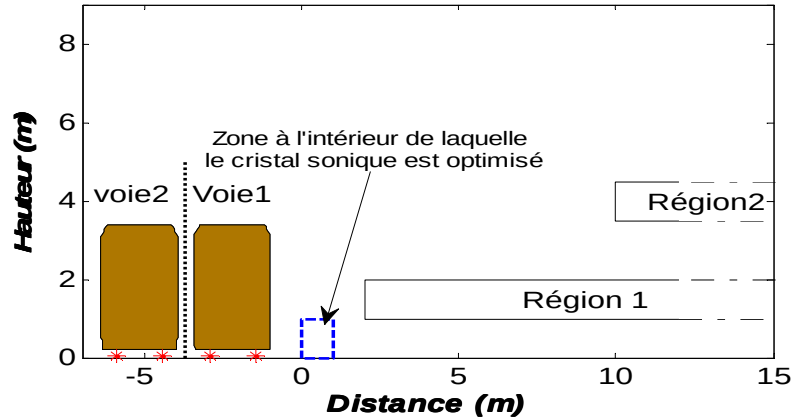


Figure 4.24. Localisations des sources sonores et de deux régions de récepteurs pour l'optimisation des cristaux soniques de faible hauteur.

La fonction coût est la quantité qui doit être maximisée dans le problème d'optimisation. Dans notre cas, l'objectif est d'obtenir une perte par insertion du cristal sonore aussi élevée que possible dans les deux régions de récepteurs. La fonction coût est le résultat des calculs BEM de la perte par insertion moyenne IL en dB(A) :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_W + \overline{EA}_{ref, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_W + \overline{EA}_{SC, \Delta f})/10}} \right), \quad (4.14)$$

où $\overline{EA}_{SC, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration avec le cristal acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf et $\overline{EA}_{ref, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire

moyenne pour la configuration de référence sans le cristal sonore dans la bande de tiers d'octave Δf . L_W est le niveau de puissance relatif au bruit de roulement du tramway défini dans le modèle français NMPB [134] entre 125 Hz et 4000 Hz pour une vitesse moyenne du tramway de 30 km/h, avec une densité de passage de 20 tramways par heure (voir paragraphe 2.7).

4.3.2. Méthode de création de forme du cristal sonore

Nous proposons dans ce travail une méthode de création de forme du cristal sonore en découpant la zone à optimiser en plusieurs cellules organisées selon un réseau régulier (figure 4.25). La création de la forme se fait en générant un cylindre dans chaque cellule avec un rayon r de valeur aléatoire. En fonction des dimensions des cellules on définit un rayon minimal r_{min} et un rayon maximal r_{max} des cylindres. Afin de faciliter la mise en œuvre du cristal sonore à optimiser, nous limitons le nombre total de cellules à 25. Chaque cellule est un carré de $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$. Les rayons des cylindres sont compris entre $r_{min} = 0\text{ cm}$ et $r_{max} = 9\text{ cm}$. Un cylindre de rayon $r = r_{min}$ signifie que la cellule reste vide. Avec cette méthode, certaines zones de vide peuvent être créées à l'intérieur du cristal sonore et des effets de résonance peuvent être observés. Le rayon r_{max} est fixé afin de ne pas sortir de la zone à l'intérieur de laquelle la forme est créée et pour que les cylindres ne se touchent pas.

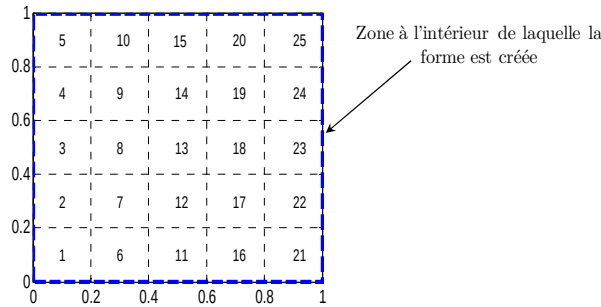


Figure 4.25. Grille des cellules utilisée pour la création de la forme du cristal sonore : cellules numérotées de 1 à 25 à remplir de cylindres de différents rayons.

4.3.3. Résultats d'optimisation

Nous présentons dans cette section les résultats de l'application de l'approche d'optimisation à la problématique des cristaux soniques de faible hauteur constitués des cylindres rigides pour la gamme de fréquences étudiée entre 125 Hz et 4000 Hz.

Dans l'algorithme d'optimisation, nous appelons individu un vecteur de 25 valeurs correspondant aux rayons de 25 cylindres générés dans les cellules et nous appelons gène un rayon de la liste de rayons (figure 4.26). L'algorithme d'optimisation commence par une population initiale de 100 individus, choisis aléatoirement dans le domaine d'étude, qui sera amené à évoluer. Pour chaque individu, 25 rayons sont choisis aléatoirement entre r_{min} et r_{max} . À

chaque génération, la taille de la population est de 100 individus. Une sélection est effectuée en se basant sur les résultats de l'évaluation de la fonction coût pour chaque individu. Après la sélection, l'opérateur de croisements est appliqué avec un taux de probabilité de 0,7 et l'opérateur de mutation est appliqué avec un taux de 0,1. Afin d'éviter les temps de calcul prohibitifs, nous fixons deux critères d'arrêt de l'algorithme d'optimisation. Pour le premier, l'algorithme s'arrête lorsqu'on atteint un nombre maximal de générations de 26. Pour le deuxième, l'algorithme s'arrête lorsque la population n'évolue plus suffisamment rapidement (moins de 0,1 dB d'une génération n à une génération $n+1$). Ces valeurs sont arbitraires et sont définies pour avoir un compromis entre la qualité des résultats finaux et le temps de calcul.

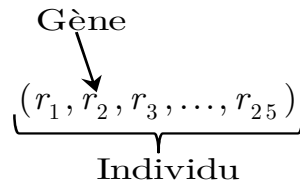


Figure 4.26. Vecteur individu contenant 25 gènes pour la création de la forme du cristal sonore.

Avant de présenter les résultats d'optimisation, nous montrons les étapes intermédiaires d'un processus d'optimisation afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'algorithme génétique. En figure 4.27, nous présentons l'évolution du processus d'optimisation en fonction de la génération. Pour chaque génération g contenant 100 individus, la valeur d'adaptation (valeur de la fonction coût) de chaque individu est présentée. En figure 4.28, nous représentons les formes qui correspondent à la meilleure efficacité du cristal sonore à certaines générations. Pour chaque forme, la valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée. En figure 4.27, nous constatons bien l'évolution de la perte par insertion du cristal sonore qui augmente avec le numéro de la génération. L'algorithme s'arrête à la 26^{ème} génération à cause du premier critère d'arrêt de l'algorithme d'optimisation. En figure 4.28, nous remarquons l'influence de changement du diamètre et de la distribution des cylindres sur l'efficacité globale du cristal sonore.

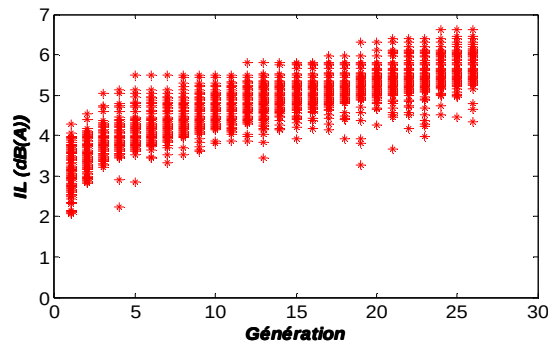


Figure 4.27. Évolution du processus d'optimisation en fonction de la génération. Perte par insertion globale en dB(A) dans la région 1 de récepteurs pour un tramway circulant sur la voie 1.

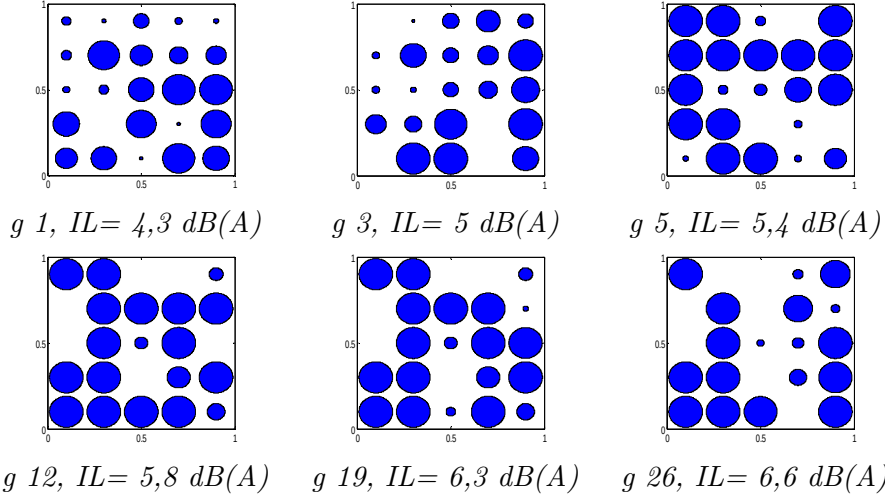


Figure 4.28. Évolution de la forme la plus efficace dans l'algorithme génétique. Cas d'optimisation pour la région 1 de récepteurs pour un tramway circulant sur la voie 1.

En figure 4.29, nous présentons un exemple de croisement à un point entre deux individus dans le cas d'optimisation pour la région 1 des récepteurs pour un tramway circulant sur la voie 2. Le résultat de ce croisement permet de conserver soit le début de l'individu I1 et la fin de l'individu I2, soit le début de l'individu I2 et la fin de l'individu I1. Pour les deux individus servant au croisement I1 et I2 et pour les deux nouveaux individus I3 et I4, les valeurs de la perte par insertion sont données. La position à laquelle s'effectue le croisement est également montrée. Nous remarquons que le nouvel individu peut être plus efficace ou moins efficace que les individus servant au croisement.

En figure 4.30, nous présentons un exemple d'une mutation d'un gène d'un individu dans le même cas d'optimisation que l'exemple précédent. Nous présentons l'individu I1 servant à la mutation et le nouvel individu obtenu I2 ainsi que leurs valeurs de perte par insertion. La position du gène qui a été muté est également montrée en figure. La mutation provoque une modification légère de la forme du cristal sonique en changeant la taille d'un cylindre. Suite à la mutation, l'amélioration de l'efficacité globale du cristal sonique atteint dans ce cas 0,2 dB(A).

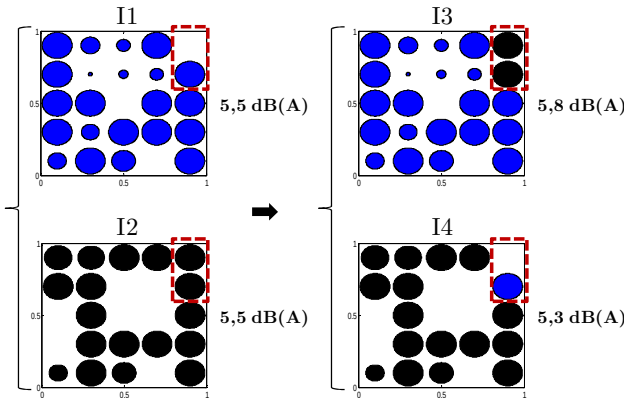


Figure 4.29. Croisement entre deux individus au niveau du 24^{ème} gène.

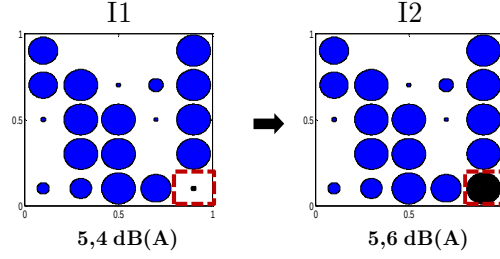


Figure 4.30. Mutation du 21^{ème} gène d'un individu.

Les résultats des optimisations sont présentés dans le tableau 4.1. Le temps de calcul pour une optimisation est d'environ quatre jours sur un PC équipé d'un processeur de type AMD Athlon 64 X2 (2.41 GHz). Pour les deux positions du tramway (voie 1 ou voie 2) et pour les deux régions de récepteurs envisagées, faisant quatre cas d'optimisation au total, nous présentons l'évolution d'optimisation en fonction de la génération et la forme optimale obtenue à la fin de l'algorithme d'optimisation. Les valeurs des pertes par insertion des différentes formes optimales ainsi que celle de l'écran acoustique de référence sont aussi données. Pour les quatre cas d'optimisation, nous constatons bien l'augmentation de l'efficacité des cristaux soniques au fur et à mesure que le processus d'optimisation évolue. L'algorithme s'arrête toujours à la 26^{ème} génération à cause du premier critère d'arrêt de l'algorithme d'optimisation. Nous remarquons que ce nombre maximal de générations est suffisant puisque l'algorithme commence à converger et puisque la population n'évolue plus suffisamment rapidement à partir de la 20^{ème} génération.

La variation de l'efficacité acoustique pour les différentes générations montre l'influence de la forme (distribution et rayons des cylindres) du cristal sonique sur sa performance acoustique. La différence d'efficacité entre la forme la moins bonne (dernier individu de la première génération) et la forme optimale (premier individu de la dernière génération) montre l'utilité de notre étude d'optimisation. Toutefois, la valeur maximale de la perte par insertion atteinte à la fin de l'algorithme d'optimisation ne dépasse pas 7 dB(A). En effet, comme dans le cas des cristaux soniques de grande hauteur (voir section 4.1), la faible perte par transmission à travers le cristal sonique est la cause de cette faible perte par insertion. Par conséquent, nous avons effectué une deuxième étude d'optimisation des cristaux soniques de faible hauteur en ajoutant un écran droit et rigide de faible hauteur derrière le cristal sonique pour augmenter la perte par transmission.

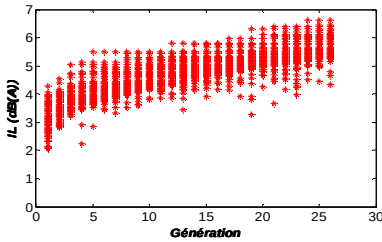
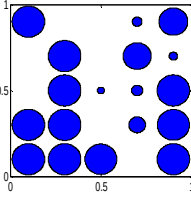
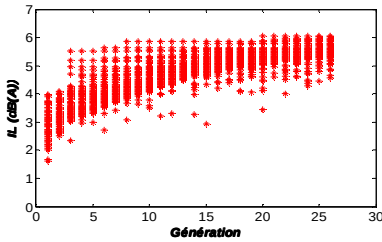
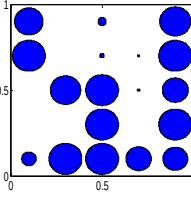
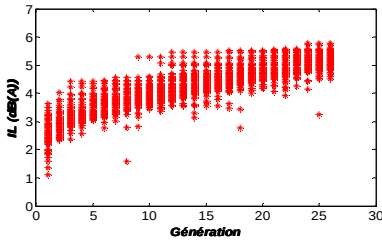
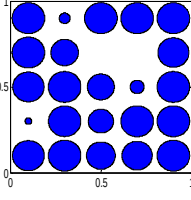
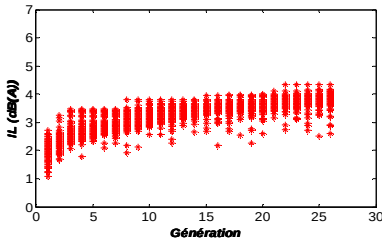
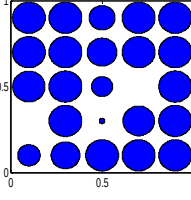
Configuration		Évolution de l'optimisation	Forme optimale
voie 1	Région 1 $IL_{ref}=4,8$ dB(A)		$IL=6,7$ dB(A) 
	Région 2 $IL_{ref}=4,3$ dB(A)		$IL=6,1$ dB(A) 
voie 2	Région 1 $IL_{ref}=3,7$ dB(A)		$IL=5,8$ dB(A) 
	Région 2 $IL_{ref}=2$ dB(A)		$IL=4,3$ dB(A) 

Tableau 4.1. Évolutions de l'optimisation et formes optimales pour les quatre cas d'optimisation. Les valeurs de perte par insertion de l'écran rigide de référence IL_{ref} sont données.

La nouvelle conception du cristal sonique à optimiser est présentée en figure 4.31. La première différence par rapport à la conception précédente est donc la présence de l'écran droit derrière le cristal sonique. La deuxième différence est le nombre des cylindres à optimiser qui est égale à 20 pour la nouvelle conception. Nous conservons la même taille des cellules et les mêmes rayons r_{min} et r_{max} de la conception précédente. Dans cette étude, les calculs d'optimisation sont réalisés en considérant soit des cylindres rigides, soit des cylindres couverts d'un matériau absorbant de 2 cm d'épaisseur. Ce matériau est le béton de chanvre utilisé dans la deuxième partie de ce chapitre. Il est caractérisé par une impédance de surface définie par le modèle de Delany et Bazley avec une résistivité au passage de l'air $\sigma = 20$ kPa.s.m⁻². Dans le cas des cylindres rigides, la performance acoustique du cristal sonique est comparée à celle d'un écran rigide de référence (1m×1m dans une section verticale) situé à la

même position du cristal sonique. Dans le cas des cylindres couverts d'un matériau absorbant, l'efficacité du cristal sonique est comparée à celle d'un écran de référence droit couvert d'une couche de 5 cm du même matériau absorbant et situé à la même position du cristal sonique.

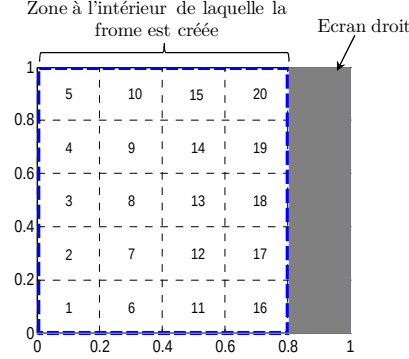


Figure 4.31. Nouvelle conception du cristal sonique à optimiser avec un écran droit rigide. Les cellules numérotées de 1 à 20 sont à remplir de cylindres de différents rayons.

Les résultats de l'optimisation pour le cristal sonique, constitué des cylindres rigides, associé à l'écran droit sont présentés dans le tableau 4.2. Comme pour l'étude précédente, nous présentons, pour les deux positions du tramway (voie 1 ou voie 2) et pour les deux régions de récepteurs, l'évolution d'optimisation en fonction de la génération et la forme optimale (FO) obtenue à la fin de l'algorithme d'optimisation. Les valeurs des pertes par insertion des différentes formes optimales ainsi que celle de l'écran de référence sont aussi données. Les conclusions concernant l'évolution de l'algorithme d'optimisation sont les mêmes que celles issues de l'optimisation sans l'écran droit derrière le cristal sonique. La forme optimale obtenue est toujours sensible à la position des sources sonores et à la position de la région de récepteurs. On remarque toutefois pour le cristal sonique associé à l'écran droit que l'efficacité maximale obtenue est supérieure à celle obtenue pour le cristal sonique seul. Nous constatons que l'amélioration de l'efficacité de l'écran de référence est très significative avec la nouvelle conception d'une combinaison de deux dispositifs antibruit de propriétés acoustiques différentes. Cette amélioration varie entre 4 dB(A) et 5,5 dB(A) en fonction de la configuration étudiée (position du tramway et position de la région de récepteurs).

Afin de limiter le nombre des formes optimales à retenir à la fin de cette étude d'optimisation, nous choisissons deux formes parmi les quatre obtenues. Une forme est choisie pour chaque situation du tramway parmi les deux obtenues pour les deux régions de récepteurs. Pour cela nous calculons l'efficacité de chaque forme obtenue dans l'autre région de récepteurs. La forme choisie est celle qui permet d'obtenir la meilleure efficacité simultanément dans les deux régions de récepteurs. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.3. À partir de ces résultats nous pouvons choisir la forme *FO1* pour le cas d'un

tramway circulant sur la voie 1 et la forme *FO3* pour le cas d'un tramway circulant sur la voie 2.

Configuration		Évolution de l'optimisation	Forme optimale
Voie 1	Région 1 $IL_{ref}=4,8$ dB(A)		<i>FO1</i> ; $IL=10,3$ dB(A)
	Région 2 $IL_{ref}=4,3$ dB(A)		<i>FO2</i> ; $IL=9,5$ dB(A)
Voie 2	Région 1 $IL_{ref}=3,7$ dB(A)		<i>FO3</i> ; $IL=7,9$ dB(A)
	Région 2 $IL_{ref}=2$ dB(A)		<i>FO4</i> ; $IL=6$ dB(A)

Tableau 4.2. Évolutions de l'optimisation et formes optimales pour les quatre cas d'optimisation avec des cylindres rigides. Les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) sont données pour les formes optimales et pour l'écran rigide de référence (IL_{ref}).

Forme optimale		Région 1	Région2
Voie 1	<i>FO1</i>	10,3 dB(A)	9,5 dB(A)
	<i>FO2</i>	9,8 dB(A)	9,5 dB(A)
Voie 2	<i>FO3</i>	7,9 dB(A)	5,4 dB(A)
	<i>FO4</i>	7,2 dB(A)	5,9 dB(A)

Tableau 4.3. Pertes par insertion globale des quatre formes optimales obtenues pour les deux régions de récepteurs : cas des cylindres rigides.

Les résultats d'optimisation pour le cristal sonique, constitué des cylindres rigides couverts d'un matériau absorbant, associé à l'écran droit sont présentés dans le tableau 4.4. Par rapport à l'étude précédente du cristal sonique constitué des cylindres rigides, les conclusions

concernant l'évolution de l'algorithme d'optimisation et les formes optimales obtenues sont les mêmes. Les valeurs d'efficacité sont très significatives pour les formes optimales constituées des cylindres couverts d'une couche absorbante. L'effet négatif des réflexions multiples entre l'écran acoustique et le tramway est très réduit. Même si l'écran droit de référence est couvert d'une couche absorbante, sa perte par insertion reste faible devant celle des nouveaux dispositifs antibruit obtenus (écran droit + cristal sonore optimisé). L'amélioration de l'efficacité de l'écran de référence due à ces dispositifs varie entre 2,8 dB(A) et 5,5 dB(A) en fonction de la configuration étudiée (position du tramway et position de la région de récepteurs).

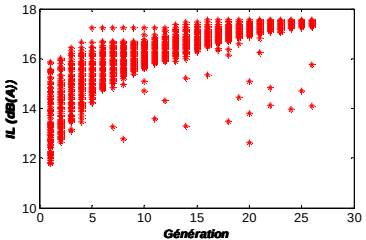
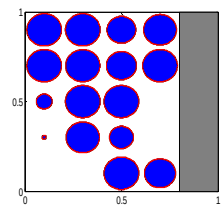
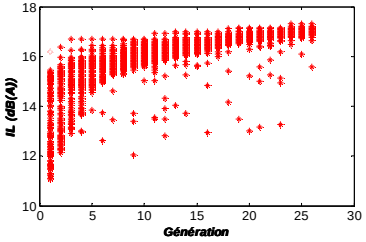
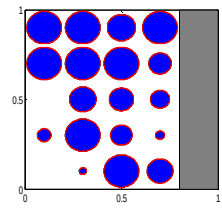
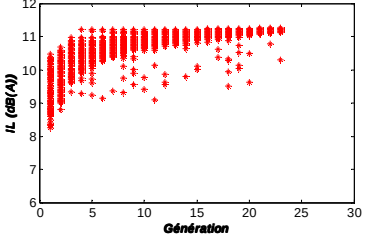
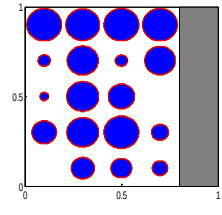
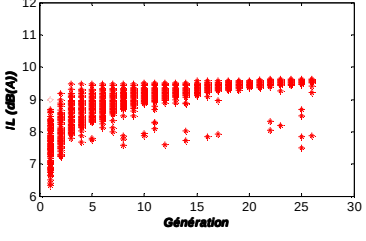
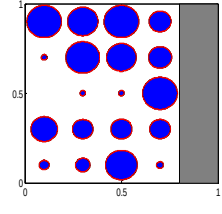
Configuration		Évolution de l'optimisation	Forme optimale
Voie 1	Région 1 $IL_{ref}=12,5$ dB(A)		$FO5, IL=17,6$ dB(A) 
	Région 2 $IL_{ref}=12$ dB(A)		$FO6, IL=17,3$ dB(A) 
Voie 2	Région 1 $IL_{ref}=8,5$ dB(A)		$FO7, IL=11,3$ dB(A) 
	Région 2 $IL_{ref}=6,6$ dB(A)		$FO8, IL=9,6$ dB(A) 

Tableau 4.4. Évolutions de l'optimisation et formes optimales pour les quatre cas d'optimisation avec des cylindres absorbants. Les valeurs de perte par insertion de l'écran absorbant de référence IL_{ref} sont données.

Comme pour l'étude précédente des cristaux soniques constitués des cylindres rigides, nous choisissons les deux formes les plus efficaces, parmi les quatre obtenues, simultanément

dans les deux régions de récepteurs. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.5. À partir de ces résultats nous pouvons choisir la forme *FO6* pour le cas d'un tramway circulant sur la voie 1 et la forme *FO8* pour le cas d'un tramway circulant sur la voie 2.

<i>Forme optimale</i>		<i>Région 1</i>	<i>Région2</i>
<i>Voie 1</i>	<i>FO5</i>	17,6 dB(A)	16.9 dB(A)
	<i>FO6</i>	17,6 dB(A)	17.3 dB(A)
<i>Voie 2</i>	<i>FO7</i>	11,3 dB(A)	9,4 dB(A)
	<i>FO8</i>	11,3 dB(A)	9,6 dB(A)

Tableau 4.5. Pertes par insertion globales des quatre formes optimales obtenues pour les deux régions de récepteurs : cas des cylindres absorbants.

Afin de faciliter la mise en œuvre de quatre formes choisies *FO1*, *FO3*, *FO6* et *FO8*, nous avons enlevé les petits cylindres dont le diamètre ne dépasse pas 3 cm et nous avons recalculé la perte par insertion des nouvelles formes obtenues. La dégradation de la perte par insertion est restée très faible et n'a pas dépassé 0,4 dB(A).

4.4. Conclusions du chapitre

Ce chapitre montre l'intérêt de considérer des dispositifs antibruit innovants en utilisant des cristaux soniques. Des études paramétriques et d'optimisation ont permis d'évaluer leur performance acoustique.

Les résultats d'étude paramétrique ont montré l'influence de certains paramètres sur leur efficacité en réflexion et en diffraction. La meilleure efficacité en réflexion a été obtenue pour des diffuseurs ayant un petit diamètre devant la longueur d'onde. Pour la bande interdite de fréquences, la perte par réflexion du cristal sonique est nulle. La meilleure efficacité en diffraction (pour la bande interdite de fréquences) est obtenue pour des diffuseurs ayant un diamètre proche de la longueur d'onde (facteur de remplissage élevé). Des simulations numériques présentées dans ce chapitre ont montré qu'on peut augmenter l'efficacité d'un écran acoustique droit en associant un cristal sonique à cet écran sans engendrer une augmentation de sa hauteur totale. L'amélioration de l'efficacité en réflexion est faible pour des cylindres rigides ou pour des cavités résonantes rigides et ne dépasse pas 2 dB(A). Pour des cavités absorbantes, cette amélioration devient moyenne et atteint 4 dB(A). L'amélioration en diffraction est moyenne pour des cylindres rigides ou pour des cavités résonantes rigides et atteint 4 dB(A). Pour des cavités absorbantes, cette amélioration devient élevée et atteint 6 dB(A).

Concernant l'étude d'optimisation, une stratégie de recherche des formes améliorées des cristaux soniques a été effectuée en couplant l'algorithme génétique avec le code de calcul BEM. Cette stratégie a permis d'obtenir des valeurs maximales d'efficacité des cristaux soniques de faible hauteur pour une infrastructure de tramway. Ces valeurs varient entre 4

dB(A) et 7 dB(A) en fonction de la configuration source-récepteur étudiée. Les formes optimales obtenues ont présenté des distributions complexes des cylindres de différents diamètres avec des zones de vide à l'intérieur du cristal sonore.

Afin d'améliorer l'efficacité des écrans acoustiques de faible hauteur, nous avons proposé de combiner des écrans droits conventionnels avec des cristaux soniques. Les cristaux soniques ont été placés entre l'écran droit et le tramway pour réduire l'effet négatif des réflexions multiples entre l'écran et le tramway. Les nouveaux résultats d'optimisation des cristaux soniques ont montré l'utilité d'associer des tels dispositifs à des écrans conventionnels de faible hauteur. En fonction de la configuration source-récepteur étudiée, les valeurs maximales d'efficacité ont varié entre 6 dB(A) et 11 dB(A), pour des cristaux soniques constitués des cylindres rigides, et entre 10 dB(A) et 18 dB(A), pour des cristaux soniques constitués des cylindres rigides couverts d'une couche absorbante. Pour les formes optimales obtenues, l'amélioration de l'efficacité d'un écran de référence droit rigide ou absorbant est significative variant entre 3 et 6 dB(A).

CHAPITRE 5: EFFICACITÉ ACOUSTIQUE DE MERLONS ANTIBRUIT DE FORME COMPLEXE

Sommaire

5.1. Étude paramétrique de l'efficacité des merlons acoustiques	129
5.1.1. Merlons de faible hauteur	129
5.1.2. Merlons de grande hauteur	133
5.2. Étude d'optimisation des merlons acoustiques	136
5.2.1. Position du problème	136
5.2.2. Optimisation des merlons de forme triangulaire	137
5.2.3. Optimisation des merlons acoustiques ayant des irrégularités	147
5.2.4. Optimisation des merlons acoustiques pour des remblais et des déblais	149
5.3. Conclusions du chapitre	153

Dans ce chapitre, nous étudions l'efficacité acoustique de merlons antibruit de forme complexe, les principes physiques des merlons conventionnels ayant été présentés dans la section 1.2 de l'étude bibliographique. Dans un premier temps, nous utilisons la BEM pour étudier l'influence de certains paramètres géométriques et d'impédance acoustique sur la performance des merlons pour différentes configurations source-récepteur. Dans un deuxième temps, les paramètres qui ont été jugés importants dans la première étude sont optimisés, en utilisant un algorithme génétique couplé au code de calcul BEM, afin de déterminer par une recherche systématique, des formes optimales de merlons acoustiques.

5.1. Étude paramétrique de l'efficacité des merlons acoustiques

Dans cette section, nous effectuons une étude numérique dont l'objectif est de montrer l'influence de certains paramètres sur la performance acoustique des merlons antibruit. Ces paramètres sont la géométrie, la pente et les conditions d'impédance des surfaces du merlon. On distingue deux types de merlons : merlons de faible hauteur et merlons de grande hauteur. La perte par insertion de tous les merlons est comparée à celle d'un écran rigide de référence situé au pied du merlon côté sources sonores.

5.1.1. Merlons de faible hauteur

Nous optons dans cette partie pour cinq formes différentes de merlon (figure 5.1). MA1 et MA2 présentent deux formes classiques (triangulaire et arrondisse). MA3, MA4 et MA5 présentent des formes complexes en escalier avec des encorbellements de différentes tailles. Tous les merlons (MA1-MA5) ont une largeur de 2 m et une hauteur de 1 m. L'écran de référence (REF) est un écran rigide qui a une largeur de 1 m et une hauteur de 1 m. La condition d'impédance des surfaces des merlons constitués de terre et recouverts d'herbe est définie par le modèle de Delany et Bazley, bien adapté à ce type de sol, avec une résistivité au passage de l'air $\sigma=300 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ (cgs).

La performance de différentes formes est évaluée dans la suite de ce travail pour deux infrastructures de transport terrestre (figure 5.2). Pour l'infrastructure routière, on considère deux voies avec quatre sources sonores. $S_{1,1}$ et $S_{2,1}$ représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule (hauteur de 0,01 m), $S_{1,2}$ et $S_{2,2}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule (hauteur de 0,30 m). Pour l'infrastructure de tramway, les deux sources sonores sont placées à une hauteur de 0,05 m. Le corps du tramway est représenté par une surface réfléchissante de $3,2 \text{ m} \times 2,45 \text{ m}$.

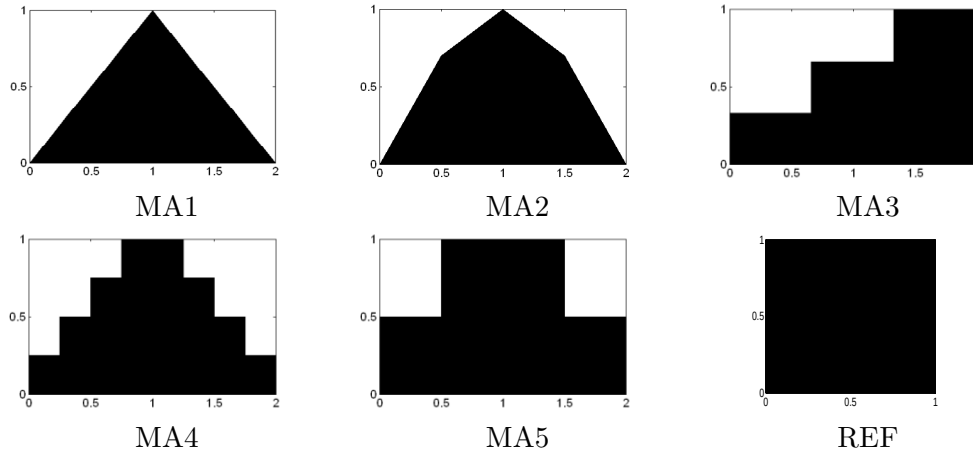


Figure 5.1. Formes géométriques des merlons étudiés (MA1-MA5) et de l'écran rigide de référence (REF) : cas d'écrans de faible hauteur. Tous les merlons ont une largeur de 2 m et une hauteur de 1 m. L'écran de référence a une largeur de 1 m et une hauteur de 1 m.

Pour les différents merlons étudiés, nous présentons les résultats de la perte par insertion moyenne pour les deux régions de récepteurs définies dans la section 2.7. Pour rappel, la première région (région 1) débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. La deuxième région (région 2) débute 10 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m (figure 5.3).

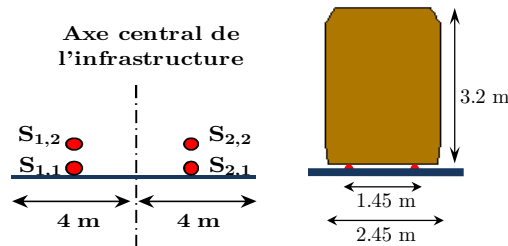


Figure 5.2. Infrastructure routière à deux voies (à gauche) et infrastructure d'un tramway (à droite).

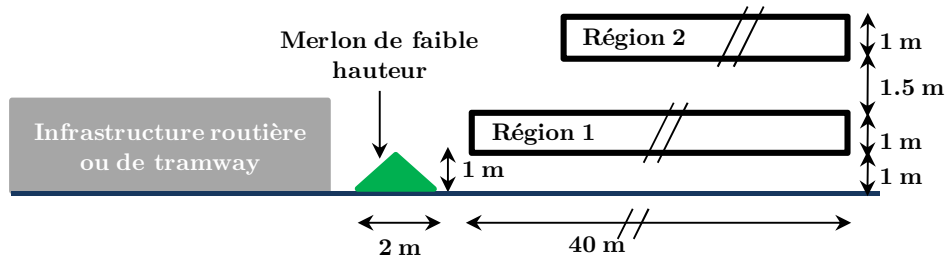


Figure 5.3. Configuration de deux régions de récepteurs pour une infrastructure routière ou ferroviaire en présence d'un merlon acoustique de faible hauteur.

La perte par insertion moyenne dans une région de récepteurs est calculée sur un maillage de 9 récepteurs par m^2 . Elle est donnée en dB par la formule suivante :

$$\overline{IL}_{\Delta f} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n |P_{ref}(\Delta f)|^2}{\sum_{i=1}^n |P_{merlon}(\Delta f)|^2} \right), \quad (5.1)$$

avec n le nombre de points récepteurs, $P_{merlon}(\Delta f)$ la pression acoustique pour la configuration avec le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf et $P_{ref}(\Delta f)$ la pression acoustique pour la configuration de référence sans le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf .

Pour chaque spectre de perte par insertion en dB, nous calculons aussi la perte par insertion globale IL en dB(A) dans chaque région de récepteurs. Elle est donnée par la formule suivante :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + \overline{EA}_{ref, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + \overline{EA}_{ref, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{merlon, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + \overline{EA}_{merlon, \Delta f})/10}} \right), \quad (5.2)$$

où $\overline{EA}_{merlon, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration avec le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf et $\overline{EA}_{ref, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration de référence sans le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf . L_{WR} et L_{WM} sont respectivement les niveaux de puissance relatifs aux bruits de roulement et de moteur définis dans le modèle Harmonoise. Les calculs sont effectués pour une vitesse des voitures de 50 km/h.

Nous nous intéressons dans la première partie de cette étude paramétrique au bruit du trafic routier. Nous présentons en figure 5.4 les spectres de la perte par insertion pour les différents écrans étudiés et pour les deux régions de récepteurs. Le temps de calcul pour chaque spectre est de quelques minutes sur un PC équipé d'un processeur de type AMD Athlon 64 X2 (2.41 GHz). Pour les différents merlons étudiés ainsi que pour l'écran acoustique de référence, les valeurs d'efficacité globale sont données en légende. Nous constatons, pour les deux régions, une différence d'efficacité non négligeable entre les différents merlons étudiés. Les deux merlons les moins efficaces sont MA1 et MA2 qui présentent des profils géométriques simples. Ceci est notamment remarquable dans la gamme de basses et moyennes fréquences. Au-dessus de 1000 Hz les merlons MA3, MA4 et MA5 sont plus efficaces que l'écran de référence. Ces résultats montrent que la forme du merlon est un paramètre important influençant sa performance acoustique. En concevant des formes complexes de merlons, nous pouvons atteindre la même performance qu'un écran droit rigide. La meilleure forme obtenue parmi les différentes formes étudiées est la forme MA4 présentant un profil géométrique en escalier avec plusieurs bords diffractants.

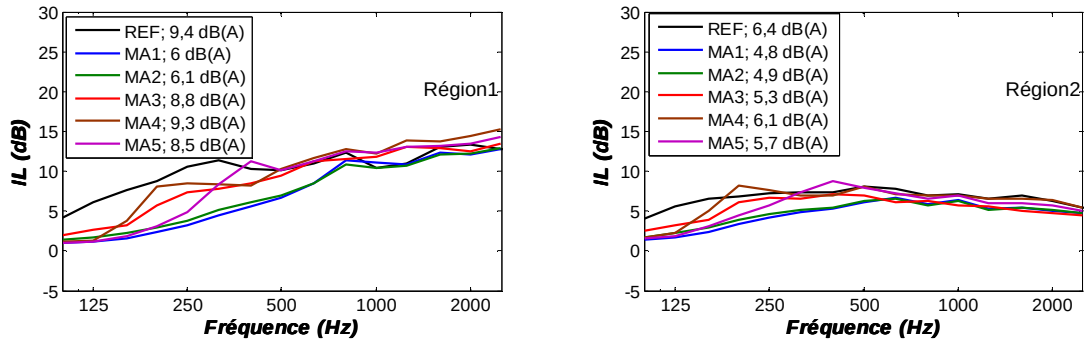


Figure 5.4. Perte par insertion en fonction de la fréquence des merlons acoustiques étudiés et de l'écran rigide de référence pour les deux régions de récepteurs : cas du bruit de trafic routier. La valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée en légende pour chaque spectre pour une vitesse des voitures de 50 km/h.

Dans la deuxième partie de cette section, nous présentons les résultats de la perte par insertion des différents merlons étudiés pour le bruit du tramway (figure 5.5). Les valeurs d'efficacité globale en dB(A) sont données en légende pour une vitesse de tramway de 30 km/h. Pour les deux régions de récepteurs, nous constatons que la différence d'efficacité entre les différents merlons étudiés n'est pas significative. Cela montre que l'effet de la forme des merlons étudiés n'est pas très important dans le cas du bruit du tramway. La fluctuation de la perte par insertion en fonction de la bande de tiers d'octave, pour les différents merlons, montre que l'efficacité de tels dispositifs est très fluctuante avec la fréquence contrairement au cas du bruit du trafic routier. Le phénomène de réflexions multiples, entre le merlon et la caisse du tramway, renforce l'énergie acoustique au récepteur pour certaines fréquences plus que d'autres. Cela peut provoquer une perte par insertion négative pour certaines bandes de tiers d'octave. En analysant les différentes courbes obtenues, nous remarquons aussi que la fluctuation de la perte par insertion est plus importante pour les merlons MA3, MA4 et MA5 que pour les merlons MA1 et MA2. En effet, les deux derniers merlons ont moins de surfaces parallèles à la surface verticale du tramway que les trois premiers permettant de réduire l'effet du phénomène de réflexions multiple. Si nous comparons la perte par insertion globale des merlons étudiés à celle de l'écran de référence, nous remarquons une différence non négligeable qui peut atteindre 2,5 dB(A). Comme pour le cas du bruit du trafic routier, les deux merlons les moins efficaces sont MA1 et MA2 présentant les deux formes les plus simples. Contrairement aux résultats de la première partie de cette section, nous pouvons conclure que la forme du merlon n'est pas un paramètre très important influençant sa perte par insertion globale. Pour diminuer l'effet des réflexions multiples entre la caisse du tramway et le merlon, il faut concevoir des formes géométriques avec des surfaces inclinées par rapport à la surface verticale du tramway. Par contre, cette solution dégrade la perte par diffraction du merlon. Nous présentons en figure 5.6, un exemple de réduction du nombre de fluctuations

de la perte par insertion du merlon MA3 suite à l'inclinaison par 20° de ses trois segments parallèles à la surface du tramway ;

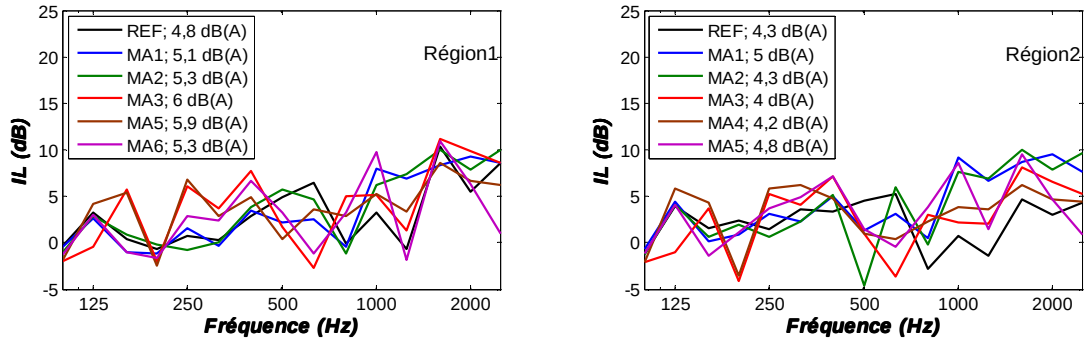


Figure 5.5. Perte par insertion en fonction de la fréquence des merlons acoustiques étudiés et de l'écran rigide de référence pour les deux régions de récepteurs : cas de bruit du tramway. La valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée en légende pour chaque spectre pour une vitesse de tramway de 30 km/h.

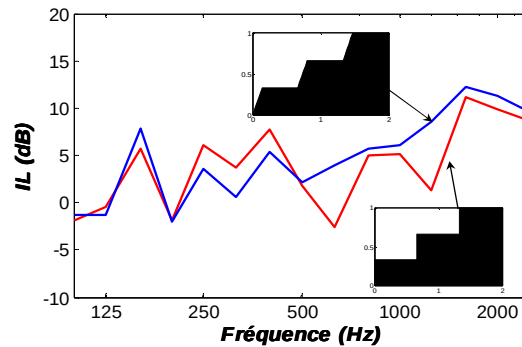


Figure 5.6. Réduction de l'amplitude des fluctuations de la perte par insertion du merlon MA3 par inclinaison de ses surfaces verticales en face du tramway.

5.1.2. Merlons de grande hauteur

Nous nous intéressons dans cette section aux merlons d'une hauteur de 4 m. L'objectif est d'analyser l'influence de certains paramètres sur l'efficacité acoustique de tels dispositifs anti-bruit. Ces paramètres sont la forme du merlon, la pente des surfaces et les propriétés acoustiques de la terre constituant le merlon (impédance des surfaces).

5.1.2.1. Effet de la forme du merlon

Dans un premier temps, nous étudions l'effet de la forme du merlon pour le cas d'une route à deux voies en milieu rural. Nous présentons en figure 5.7 les cinq merlons de grande hauteur étudiés. Ils ont les mêmes formes que les merlons de faible hauteur simulés dans la première partie de cette section. Tous les merlons (MA1-MA5) ont une largeur de 12 m et une hauteur de 4 m. L'écran de référence (REF) est un écran droit rigide d'une hauteur de 4 m et d'une largeur de 0,2 m.

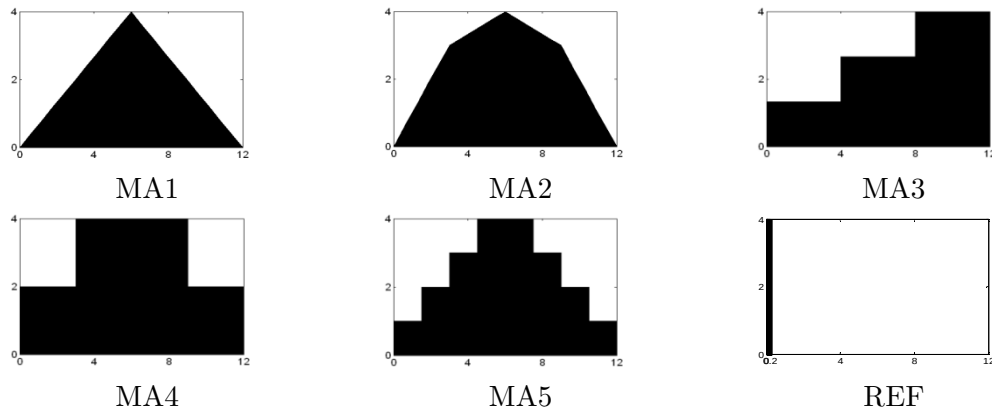
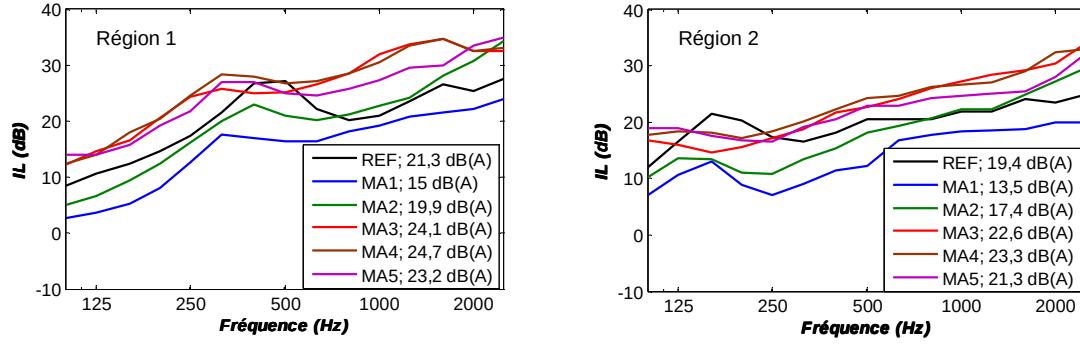


Figure 5.7. Formes géométriques des merlons étudiés (MA1-MA5) et de l'écran rigide de référence (REF) : cas des écrans de grande hauteur. Tous les merlons ont une largeur de 12 m et une hauteur de 4 m. L'écran de référence a une largeur de 0,2 m et une hauteur de 4 m.

L'efficacité des cinq merlons acoustiques est étudiée pour deux régions de récepteurs. La région 1 débute 1 m derrière le merlon et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. La région 2 débute 10 m derrière le merlon et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m.

Nous présentons en figure 5.8 les spectres de la perte par insertion pour les différents merlons étudiés et pour les deux régions de récepteurs. La courbe tracée en noir présente la perte par insertion de l'écran droit de référence. Pour les différents merlons étudiés ainsi que pour l'écran acoustique de référence, les valeurs d'efficacité globale en dB(A) des différentes protections sont données en légende pour une vitesse des voitures de 90 km/h. L'évolution d'efficacité des différents merlons a la même allure pour les deux régions de récepteurs. Nous constatons une différence d'efficacité remarquable entre les différents merlons étudiés. Les deux merlons MA1 et MA2 sont moins efficaces que l'écran droit de référence. Cela est un résultat attendu puisque le point de diffraction au sommet de l'écran de référence est plus proche des sources sonores que celui du merlon. En comparant les courbes d'efficacité de deux merlons MA1 et MA2, nous constatons que l'efficacité du merlon est très sensible au changement de sa forme. Les trois merlons MA3, MA4 et MA5 ont des efficacités acoustiques très proches. Ils sont plus performants que l'écran de référence. Cela est remarquable pour toute la gamme de fréquences. Ces résultats montrent que la forme du merlon d'une hauteur de 4 m est un paramètre très important influençant sa performance acoustique. Des formes triangulaires simples ne favorisent pas une grande perte de l'énergie acoustique derrière le merlon. Pour atteindre une perte par insertion égale ou plus élevée que celle des protections conventionnelles, il faut concevoir des formes complexes des merlons avec plusieurs points de diffraction proches des sources sonores.



5.1.2.2. Effets de la pente et de l'impédance de la surface du merlon

Dans cette partie d'étude paramétrique, nous évaluons les effets de la pente et de l'impédance de la surface du merlon sur sa performance acoustique. Concernant l'effet de la pente, nous présentons les résultats d'efficacité pour cinq différentes pentes P d'un merlon de forme triangulaire. La largeur du merlon varie en fonction de la pente afin de conserver une hauteur de 4 m pour tous les merlons. Par exemple, un merlon d'une pente $P=1$ a une largeur $L=8$ m tandis qu'un merlon d'une pente $P=1/3$ a une largeur $L=24$ m. Les courbes de variation de la perte par insertion en fonction de la fréquence, pour les différentes pentes P et pour les deux régions de récepteurs, sont tracées en figure 5.9. L'allure des spectres d'efficacité des merlons acoustiques étudiés est la même pour les deux régions de récepteurs. Nous constatons que la perte par insertion du merlon est d'autant moins élevée que la pente P est faible. Nous remarquons par exemple que, malgré sa largeur considérable, l'efficacité acoustique du merlon ayant une pente $P=1/3$ est très faible. En effet, plus la pente est faible, plus les ondes acoustiques deviennent rasantes au-dessus du merlon et plus le point de diffraction s'éloigne des sources sonores (plus faible différence de marche entre l'onde directe et l'onde diffractée). Pour augmenter son efficacité acoustique, la surface du merlon ayant une faible pente doit être très absorbante afin d'atténuer l'amplitude des ondes rasantes. Nous montrons en figure 5.10, que la diminution de la résistivité au passage de l'air de la surface du merlon, au fur et à mesure que la pente diminue, permet de réduire la différence d'efficacité entre les merlons de différentes pentes. En effet, plus la surface d'interaction entre l'onde acoustique et le merlon est grande, plus l'effet d'absorption de l'énergie acoustique des ondes rasantes est important.

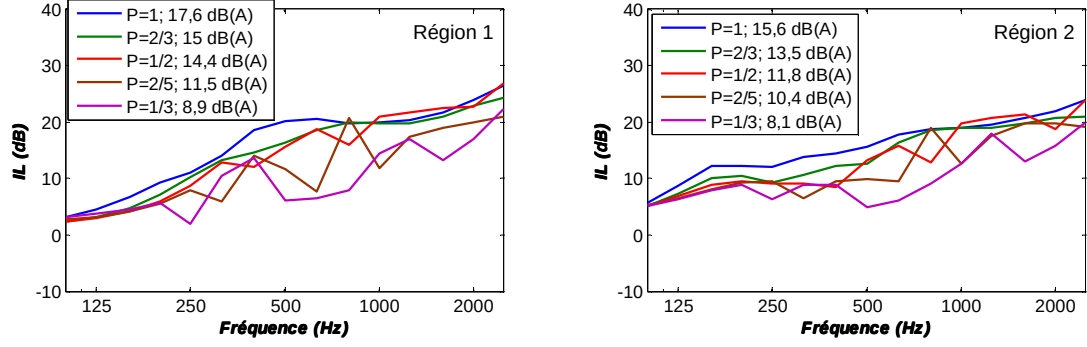


Figure 5.9. Perte par insertion en fonction de la fréquence d'un merlon acoustique de forme triangulaire pour différentes valeurs de P pour les deux régions de récepteurs. La valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée en légende pour chaque spectre.

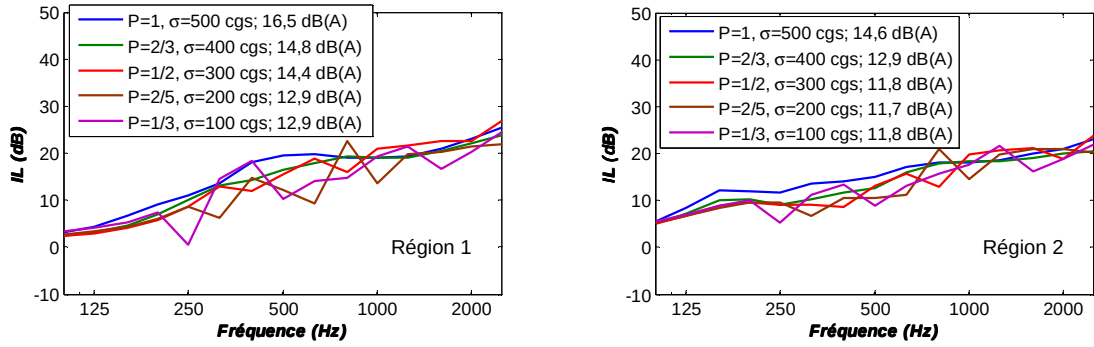


Figure 5.10. Perte par insertion en fonction de la fréquence d'un merlon acoustique de forme triangulaire pour différentes valeurs de P et σ . La valeur de la perte par insertion globale en dB(A) est donnée en légende pour chaque spectre.

5.2. Étude d'optimisation des merlons acoustiques

5.2.1. Position du problème

Nous avons montré dans l'étude paramétrique, présentée dans la section précédente, que l'efficacité des merlons acoustiques est sensible à certains paramètres tels que la pente, la forme et l'impédance des surfaces. L'effet de ces paramètres est plus important pour les merlons de grande hauteur que pour les merlons de faible hauteur. En effet, pour les merlons de faible hauteur, les ondes acoustiques deviennent rasantes à cause de la grande distance entre les sources sonores et le merlon provoquant un effet de diffraction très réduit. Nous nous intéressons donc, dans cette étude d'optimisation, aux merlons de grande hauteur. D'après l'étude paramétrique précédente, le paramètre le plus pertinent influençant la performance de ces protections antibruit est la forme géométrique. Nous effectuerons donc une recherche systématique des formes optimales des merlons afin d'atteindre une efficacité la plus élevée possible. Pour cela, nous utiliserons la même approche d'optimisation utilisée dans le quatrième chapitre en couplant le code de calcul BEM à l'algorithme d'optimisation génétique.

Cette section est divisée en trois parties. Dans la première partie, nous réalisons deux types d'optimisation de merlons acoustiques de forme triangulaire. La première optimisation

est de type mono-objectif dans laquelle nous cherchons une perte par insertion du merlon la plus élevée possible. La deuxième optimisation est de type multiobjectif dans laquelle nous optimisons non seulement la perte par insertion derrière le merlon mais aussi sa perte par insertion de l'autre côté de l'infrastructure autoroutière. Dans la deuxième partie, nous optimisons des merlons acoustiques de forme trapézoïdale avec des surfaces rugueuses. Nous cherchons dans cette partie les meilleurs profils de rugosité rectangulaire ou triangulaire au niveau du sommet du merlon permettant d'améliorer la perte par insertion du merlon acoustique. Dans la dernière partie, nous cherchons à diminuer les niveaux sonores issus d'une infrastructure routière en remblai ou en déblai. Pour cela, nous optimisons la forme du merlon à ajouter à l'infrastructure en considérant trois situations différentes: optimisation en absence d'un écran acoustique rigide, optimisation en présence d'un écran rigide installé du côté de l'infrastructure routière et optimisation en présence d'un écran rigide installé du côté des récepteurs.

5.2.2. Optimisation des merlons de forme triangulaire

5.2.2.1. Optimisation mono-objectif

Cette section est divisée en deux parties. Premièrement, nous effectuons une étude d'optimisation de la forme du merlon pour une configuration autoroutière. Deuxièmement, pour améliorer l'efficacité du merlon optimal obtenu, nous cherchons les positions optimales d'un matériau absorbant couvrant une partie de la surface du merlon. Concernant la configuration géométrique, nous choisissons dans cette section de modéliser une configuration d'infrastructure routière dans un milieu rural. En effet, les merlons de grande hauteur sont plus répandus dans les zones rurales où leur implantation est plus aisée. L'espace est souvent plus propice à l'installation de tels ouvrages qui sont très volumineux avec une emprise au sol importante comparée à la hauteur. La configuration géométrique étudiée dans cette section est présentée en figure 5.11. La forme de base du merlon à optimiser est triangulaire. C'est une forme très répandue pour l'installation de tels ouvrages naturels [55]. La largeur et la hauteur du merlon sont respectivement 12 m et 4 m faisant une section verticale de merlon de 24 m². La pente de ses deux surfaces est de 2/3. Concernant l'infrastructure routière, nous modélisons une autoroute avec quatre voies routières (figure 5.12). Trois positions de source j par voie i sont fixées : $S_{i,1}$ représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule léger ou lourd (hauteur de 0,01 m), $S_{i,2}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule léger (hauteur de 0,30 m) et $S_{i,3}$ représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule lourd (hauteur de 0,75 m). Nous optons pour les mêmes zones de récepteurs utilisées dans l'étude paramétrique de ce chapitre. Pour rappel, la première région (région 1) débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. La

deuxième région (région 2) débute 10 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m.

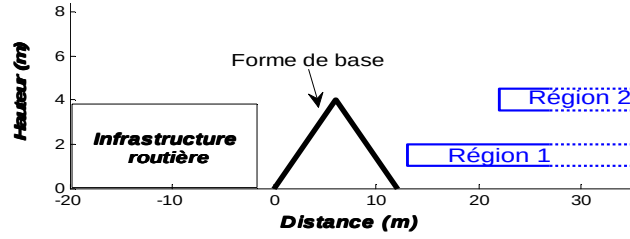


Figure 5.11. Configuration géométrique utilisée pour l'optimisation mono-objectif des merlons acoustiques : positions du merlon à optimiser, de l'infrastructure routière et des régions de récepteurs.

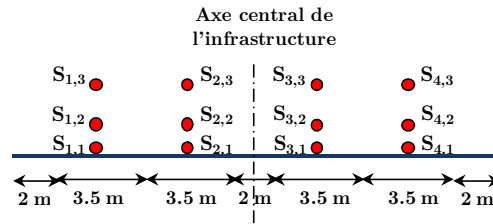


Figure 5.12. Infrastructure d'une autoroute avec quatre voies. Positions des sources de roulement et de moteur pour les véhicules légers et lourds.

La fonction coût est la quantité qui doit être maximisée dans notre problème d'optimisation mono-objectif. L'objectif est d'obtenir une perte par insertion du merlon acoustique aussi élevée que possible dans les deux régions de récepteurs. La fonction coût est le résultat des calculs BEM de la perte par insertion globale en dB(A). Elle est la moyenne des pertes par insertion pour tous les points récepteurs de la région 1 ou 2 et elle est donnée par :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{ref, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + EA_{ref, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{merlon, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + EA_{merlon, \Delta f})/10}} \right) \quad (5.3)$$

où $EA_{merlon, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration avec le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf et $EA_{ref, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire moyenne pour la configuration de référence sans le merlon acoustique dans la bande de tiers d'octave Δf (champ de pression P_{ref}). L_{WR} et L_{WM} sont respectivement les niveaux de bruit de roulement et de moteur définis dans le modèle Harmonoise. Pour les calculs numériques, nous considérons qu'il y a 85% des véhicules légers (voitures) et 15% des véhicules lourds (camions) sur chaque voie. Ces calculs sont effectués pour une vitesse de 120 km/h pour les véhicules légers et de 90 km/h pour les véhicules lourds.

L'algorithme d'optimisation développé dans le cadre de ce travail est utilisé pour chercher une forme optimale du merlon acoustique. Nous avons montré dans l'étude paramétrique de ce chapitre qu'un merlon de forme triangulaire s'oppose moins à la propagation des ondes acoustiques qu'un écran droit malgré l'importante emprise au sol. Ceci est dû principalement

à la position du sommet diffractant du merlon loin des voies routières. Par conséquent, nous proposons dans cette section de rapprocher le point de diffraction vers l'infrastructure routière. L'utilisation d'un écran de soutènement dans ce cas est nécessaire pour retenir la terre et avoir un point de diffraction le plus proche possible des sources sonores. La meilleure forme du merlon est obtenue alors en associant un écran droit rigide à une forme de terre ($\sigma=300 \text{ kPa.s.m}^{-2}$). Pour toutes les formes optimales à chercher, nous conservons une section verticale de terre de 24 m^2 qui est égale à celle du merlon de forme triangulaire.

a. Méthode de création de forme

Pour créer la forme finale du merlon acoustique, nous plaçons l'écran droit au pied du merlon acoustique de base côté sources. La forme du merlon est ensuite optimisée derrière l'écran droit. La méthode de création de la forme consiste à découper la zone à optimiser en six segments (figure 5.13). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'optimiser des formes réalistes pouvant être appliquées pour concevoir des dispositifs antibruit innovants. Quatre points d'optimisation sont sélectionnés aléatoirement et reliés afin d'obtenir la forme finale. Le segment $[AB]$ est un segment fixe qui représente un écran acoustique rigide d'une hauteur de 2 m. La création de la forme se fait d'abord en choisissant aléatoirement un premier point d'optimisation P_1 dans l'intervalle $[BC]$. Ceci permet d'étendre la hauteur de l'écran acoustique droit afin de trouver la position optimale du premier point de diffraction entre 2 et 4 m. Ensuite, le deuxième point d'optimisation P_2 situé à 4 m d'altitude peut prendre n'importe quelle position entre $D(1,4)$ et $E(2,4)$. La pente du segment $[P_1P_2]$ peut donc varier entre 0 et 2. Puis, le troisième point d'optimisation P_3 situé entre $E(2,4)$ et $F(4,4)$ permet d'avoir un sommet de largeur variable en favorisant soit un profil triangulaire soit un profil trapézoïdal du merlon acoustique. Avec l'ancien point d'optimisation, le dernier point d'optimisation P_4 permet d'optimiser l'angle de diffraction du côté des récepteurs. Cet angle peut présenter soit une rupture verticale de forme soit un profil plus ou moins rond. Un exemple de deux cas est présenté en figure 5.14. Enfin, après la sélection du point P_4 , la position du point de terminaison H sera déterminée en fonction des points précédents pour avoir une section verticale constante du merlon acoustique égale à 24 m^2 . Les segments $[P_1P_2]$, $[P_2P_3]$, $[P_3P_4]$ et $[P_4H]$ forment un merlon dont la surface a une résistance au passage de l'air $\sigma = 300 \text{ kPa.s.m}^{-2}$. Le segment $[AP_1]$ présente un écran acoustique rigide d'une résistivité au passage de l'air infinie. Les surfaces du merlon sont modélisées avec une condition d'impédance à l'aide du modèle de Delany et Bazley.

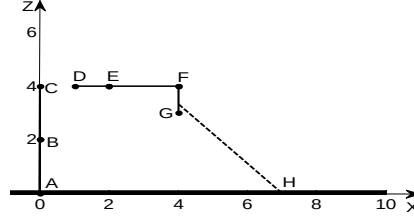


Figure 5.13. Différents segments utilisés pour la création de la forme du merlon acoustique à optimiser.

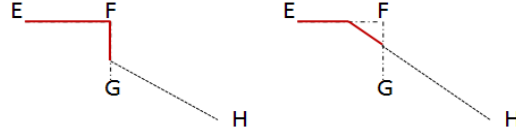


Figure 5.14. Exemple de deux angles de diffraction du côté des récepteurs pour l'optimisation du merlon acoustique.

b. Résultats d'optimisation des merlons associés à un écran droit

Nous présentons dans cette section les résultats de l'application de l'approche d'optimisation aux merlons acoustiques associés à un écran droit pour la gamme de fréquences étudiée entre 50 Hz et 4000 Hz.

Dans l'algorithme d'optimisation, nous appelons individu un vecteur dont les éléments sont les quatre points d'optimisation et nous appelons gène un point de la liste de quatre points. L'algorithme d'optimisation commence par une population initiale de 100 individus, choisis aléatoirement dans le domaine d'étude, qui sera amené à évoluer. Pour chaque individu, quatre points sont sélectionnés aléatoirement. À chaque génération, la taille de la population est de 100 individus. 20% d'individus, qui ont les plus grandes valeurs d'adaptation, sont sélectionnés à chaque génération. Après la sélection, l'opérateur de croisements est appliqué avec un taux de probabilité de 0,7 et l'opérateur de mutation est appliqué avec un taux de 0,1. Deux critères d'arrêt de l'algorithme d'optimisation sont fixés. L'algorithme s'arrête lorsqu'on atteint un nombre maximal de générations de 30. Il s'arrête aussi lorsque la population n'évolue plus suffisamment rapidement (moins de 0,1 dB d'une génération n à une génération $n+1$). Ces valeurs sont arbitraires et sont définies pour avoir un compromis entre la qualité des résultats finaux et le temps de calcul.

En figure 5.15, nous présentons l'évolution de la fonction coût ainsi que la forme optimale, c'est-à-dire la meilleure forme de la dernière génération, obtenue pour les deux régions de récepteurs. Pour chaque région, la valeur de la perte par insertion IL_{REF} du merlon de forme triangulaire (forme de base) est donnée. L'algorithme s'arrête à la 21^{ème} génération pour la région 1 des récepteurs et à la 22^{ème} génération pour la région 2 des récepteurs car il n'y a plus eu d'amélioration significative depuis une génération. Pour les deux régions de récepteurs, le processus d'optimisation commence à converger à partir de la dixième génération.

Pour les premières générations, nous constatons bien la diversité de la perte par insertion montrant l'influence de la forme du merlon sur sa performance acoustique.

Pour chaque région de récepteurs, le temps de calcul de l'optimisation est d'environ deux jours sur un PC équipé d'un processeur de type AMD Athlon 64 X2 (2.41 GHz).

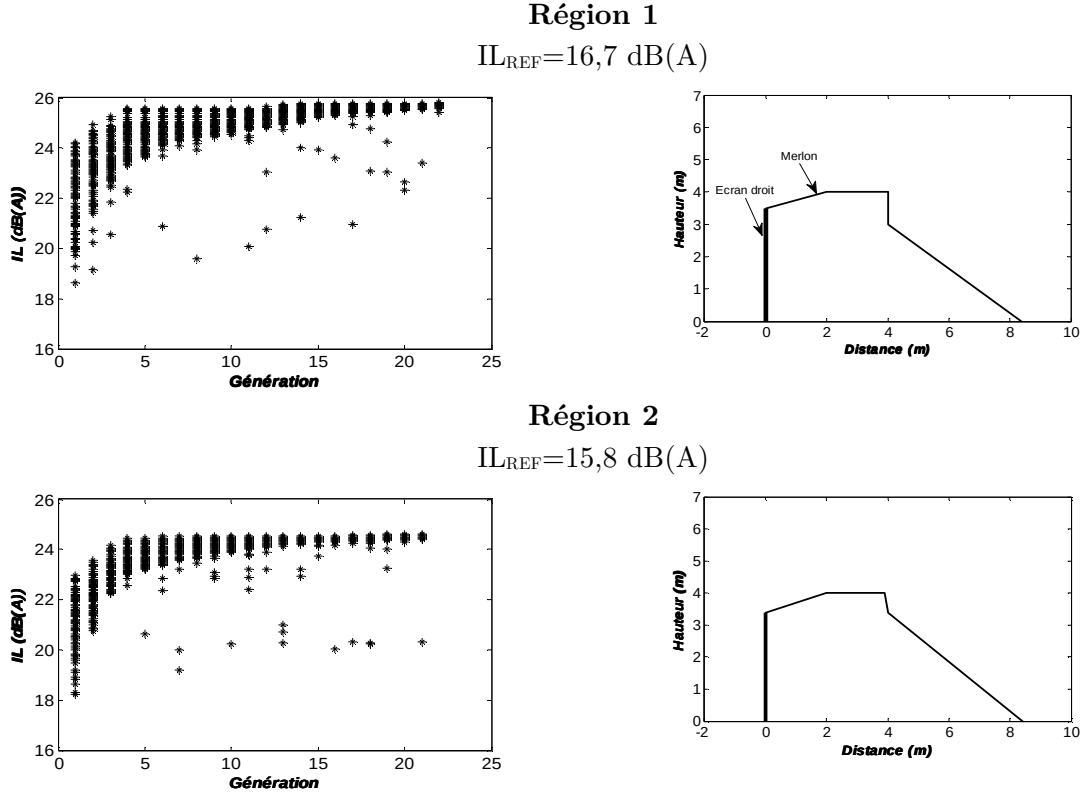


Figure 5.15. Évolution du processus d'optimisation (à gauche) et formes optimales obtenues (à droite) pour les deux régions de récepteurs. Les valeurs de la perte par insertion globale IL_{REF} du merlon de référence sont également données.

Pour montrer l'effet de changement de la forme du merlon sur son efficacité, nous présentons en figures 5.16 et 5.17, pour quelques générations, l'évolution de la forme la plus efficace et la forme la moins efficace pour la région 1 de récepteurs. Pour chaque individu (forme), la valeur d'adaptation (valeur de la fonction coût) est donnée. L'évolution de la forme la plus efficace montre que l'efficacité du merlon est sensible à la forme de deux bords diffractants, du côté de l'infrastructure routière et du côté des récepteurs, et de la largeur du sommet. La forme optimale présente un premier bord diffractant du côté des sources sonores faisant un angle de 105° , un deuxième bord diffractant droit du côté des récepteurs et un sommet de 2 m de largeur. La forme la moins efficace présente un premier point de diffraction situé à une faible hauteur et un profil triangulaire au niveau du sommet ne favorisant pas une amélioration significative de l'efficacité du merlon de base.

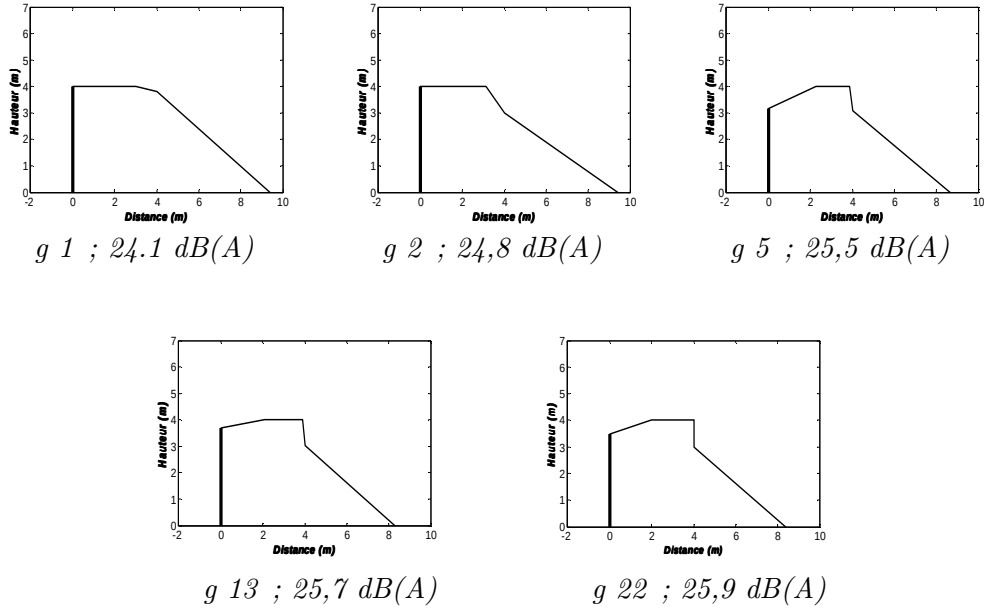


Figure 5.16. Évolution de la forme la plus efficace dans l'algorithme génétique. Cas d'optimisation pour la région 1 des récepteurs. La perte par insertion IL_{REF} du merlon de référence est égale à 16,7 dB(A).

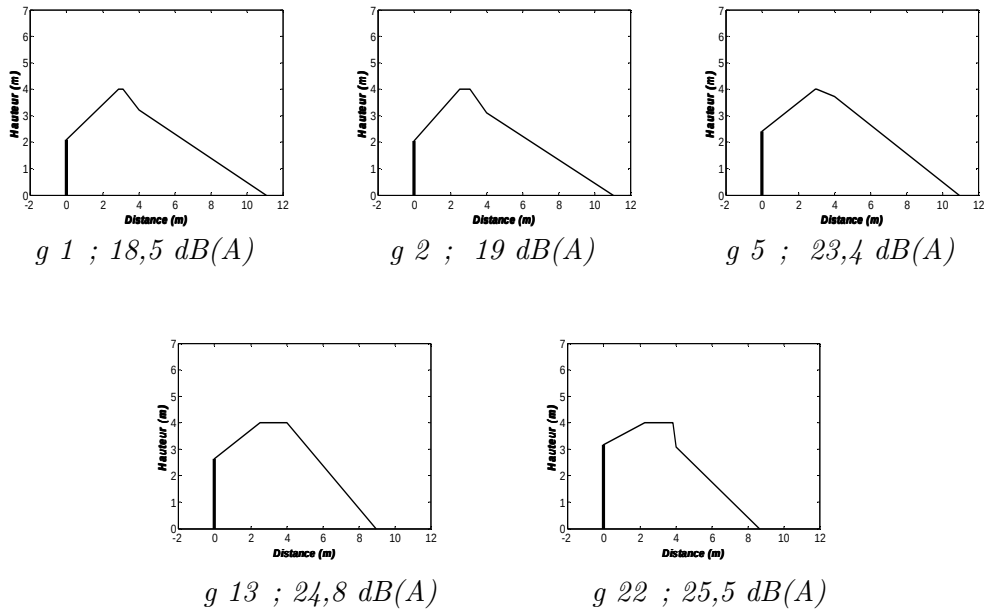


Figure 5.17. Évolution de la forme la plus efficace dans l'algorithme génétique. Cas d'optimisation pour la région 1 des récepteurs. La perte par insertion IL_{REF} du merlon de référence est égale à 16,7 dB(A).

L'étude d'optimisation du merlon acoustique dans cette section a permis d'obtenir un dispositif antibruit innovant associé à un écran droit dont la performance globale est largement supérieure à celle d'un merlon de forme triangulaire. Nous comparons aussi l'efficacité de la forme optimale obtenue à celle d'un écran droit conventionnel de 4 m de hauteur placé au point où débute le merlon du côté des sources. Les valeurs de la perte par insertion de la

forme optimale, du merlon de forme triangulaire et de l'écran droit conventionnel sont rapportées dans le tableau 5.1 pour les deux régions de récepteurs. L'amélioration de la perte par insertion observée pour la forme optimale est d'environ 9 dB(A) par rapport à un merlon de forme triangulaire et 4 dB(A) par rapport à un écran droit conventionnel.

Dispositif antibruit	Région 1	Région 2
Merlon de forme triangulaire	16,7	15,8
Écran droit conventionnel	21,3	20,4
Forme optimale (merlon+écran droit)	25,5	24,6

Tableau 5.1. Perte par insertion en dB(A) du merlon de forme triangulaire, de l'écran conventionnel et de la forme optimale obtenue pour les deux régions de récepteurs.

c. Optimisation d'une distribution des couches absorbantes sur la surface de la protection optimale

Afin d'améliorer l'efficacité de la forme optimale par rapport à l'écran droit, nous proposons dans la suite de cette section de couvrir une partie du merlon par un matériau très absorbant. Il s'agit de trouver les positions optimales pour une quantité limitée de ce matériau sur le contour du merlon en utilisant notre approche d'optimisation utilisée précédemment.

Dans ce travail, nous fixons à 2 m le linéaire de ce matériau absorbant utilisable sur le contour du merlon. Comme dans les deux chapitres précédents, nous utilisons ici le béton de chanvre dont l'impédance de surface est modélisée par le modèle de Delany et Bazley, adapté à ce type de matériau, avec une résistivité au passage de l'air $\sigma = 20 \text{ kPa.s.m}^{-2}$. Dans notre étude, nous avons choisi d'optimiser la répartition de plusieurs couches du béton de chanvre afin de considérer un grand nombre des cas possibles. Il s'agit d'utiliser quatre couches de 50 cm qui seront placées aléatoirement sur la surface du merlon.

La méthode utilisée pour trouver les positions optimales des couches absorbantes est présentée en figure 5.18. Elle consiste à découper la surface du merlon en 28 segments de 50 cm de longueur et de choisir par suite quatre segments aléatoirement qui seront couverts par le matériau absorbant. Un individu dans l'algorithme d'optimisation est un vecteur dont les éléments sont les numéros de quatre segments sélectionnés aléatoirement et un gène est un numéro d'un segment. L'algorithme d'optimisation commence par une population initiale de 100 individus. Pour chaque individu, quatre segments seront sélectionnés aléatoirement.

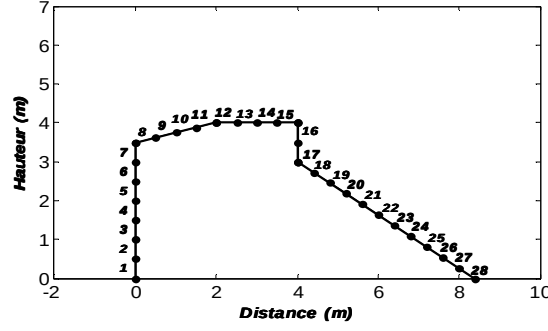


Figure 5.18. Découpage de la surface du merlon optimal en 28 segments pour l'optimisation des positions des couches absorbantes.

Pour les deux régions de récepteurs, l'algorithme d'optimisation converge rapidement et s'arrête après 140 évaluations de la fonction coût (trois générations). Les positions optimales du matériau absorbant, pour les deux régions de récepteurs, sont présentées en figure 5.19. Nous constatons, pour les deux merlons optimaux, que le meilleur emplacement du matériau absorbant est autour du premier point de diffraction du côté des sources sonores. En effet, cet emplacement permet de réduire le niveau de pression de l'onde acoustique avant d'être diffractée plusieurs fois par le sommet du merlon. L'amélioration globale due au matériau absorbant est d'environ 2 dB(A) pour les deux régions de récepteurs. L'efficacité globale du merlon atteint donc 27,5 dB(A) pour la région 1 et 26,5 dB(A) pour la région 2.

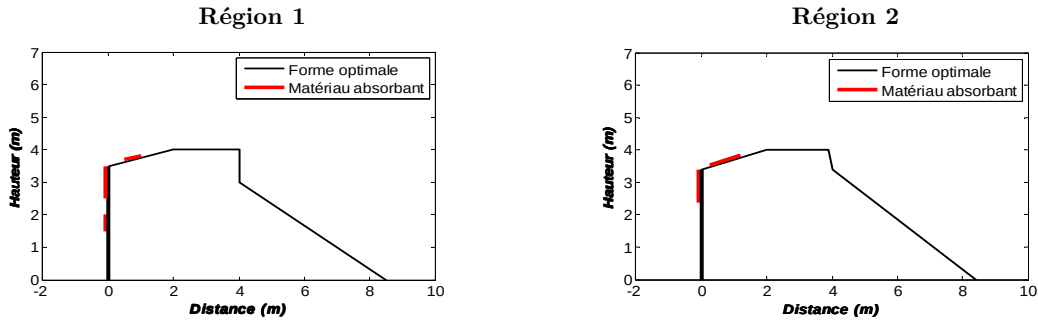


Figure 5.19. Positions optimales du matériau absorbant sur la surface du merlon dans les deux régions de récepteurs.

5.2.2.2. Optimisation multiobjectif

Nous avons réalisé dans la section précédente, une étude d'optimisation mono-objectif pour obtenir une perte par insertion la plus élevée possible derrière le merlon acoustique associé à un écran droit. Dans cette section, il s'agit de réaliser une optimisation multiobjectif afin d'optimiser non seulement la perte par insertion derrière le merlon acoustique mais aussi sa perte par insertion de l'autre côté de l'infrastructure autoroutière. Il s'agit donc d'une optimisation à deux objectifs. La configuration géométrique étudiée dans cette section est présentée en figure 5.20. Nous conservons dans cette section la même infrastructure autoroutière et la même forme de base du merlon de la section précédente. Nous définissons quatre régions

de récepteurs. Les deux régions 1 et 2 sont modélisées pour optimiser la perte par insertion derrière le merlon. Les deux régions 3 et 4 sont définies pour optimiser la perte par insertion du merlon de l'autre côté de l'infrastructure. La région 3 débute 2 m derrière l'infrastructure de l'axe routier et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2m. La région 4 débute 10 m derrière l'infrastructure et s'étend sur 30 m à une hauteur comprise entre 3,5 m et 4,5 m.

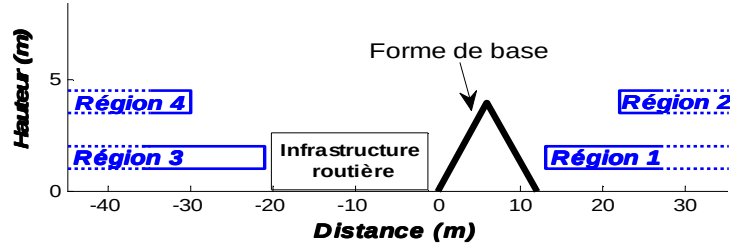


Figure 5.20. Configuration géométrique utilisée pour l'optimisation multiobjectif des merlons acoustiques : positions du merlon à optimiser, de l'infrastructure routière et des régions de récepteurs.

La même méthode de création de forme pour l'optimisation mono-objectif est utilisée ici. La présence d'un écran droit rigide face à l'autoroute entraîne une réflexion quasi-totale d'énergie acoustique vers les récepteurs situés de l'autre côté de l'infrastructure (régions 3 et 4). Par conséquent, nous définissons, en plus du premier paramètre d'optimisation, qui est la forme du merlon, un autre paramètre d'optimisation qui est l'angle d'inclinaison de l'écran variant entre 0° et 15° .

Dans cette section, nous utiliserons une méthode Pareto pour réaliser une étude d'optimisation multiobjectif (voir section 2.4). La fonction objectif à calculer dans les deux régions de récepteurs 1 et 2 est la perte par insertion IL en dB(A) définie dans la section précédente. La fonction objectif à calculer dans les deux régions de récepteurs 3 et 4 est la perte par insertion IL' en dB(A) calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$IL' = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{\text{écran}, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + EA_{\text{écran}, \Delta f})/10}}{\sum_{\Delta f} 10^{(L_{WR} + EA_{in, \Delta f})/10} + \sum_{\Delta f} 10^{(L_{WM} + EA_{in, \Delta f})/10}} \right) \quad (5.4)$$

où $EA_{in, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire pour la configuration avec la protection innovante à optimiser (écran conventionnel et merlon acoustique) dans la bande de tiers d'octave Δf et $EA_{\text{écran}, \Delta f}$ est l'atténuation excédentaire pour la configuration avec l'écran conventionnel droit de référence dans la bande de tiers d'octave Δf .

Nous définissons dans la suite de ce travail quatre cas d'optimisation suivant les deux régions de récepteurs devant et derrière le merlon acoustique. Les résultats pour les quatre cas d'optimisation sont présentés en figure 5.21.

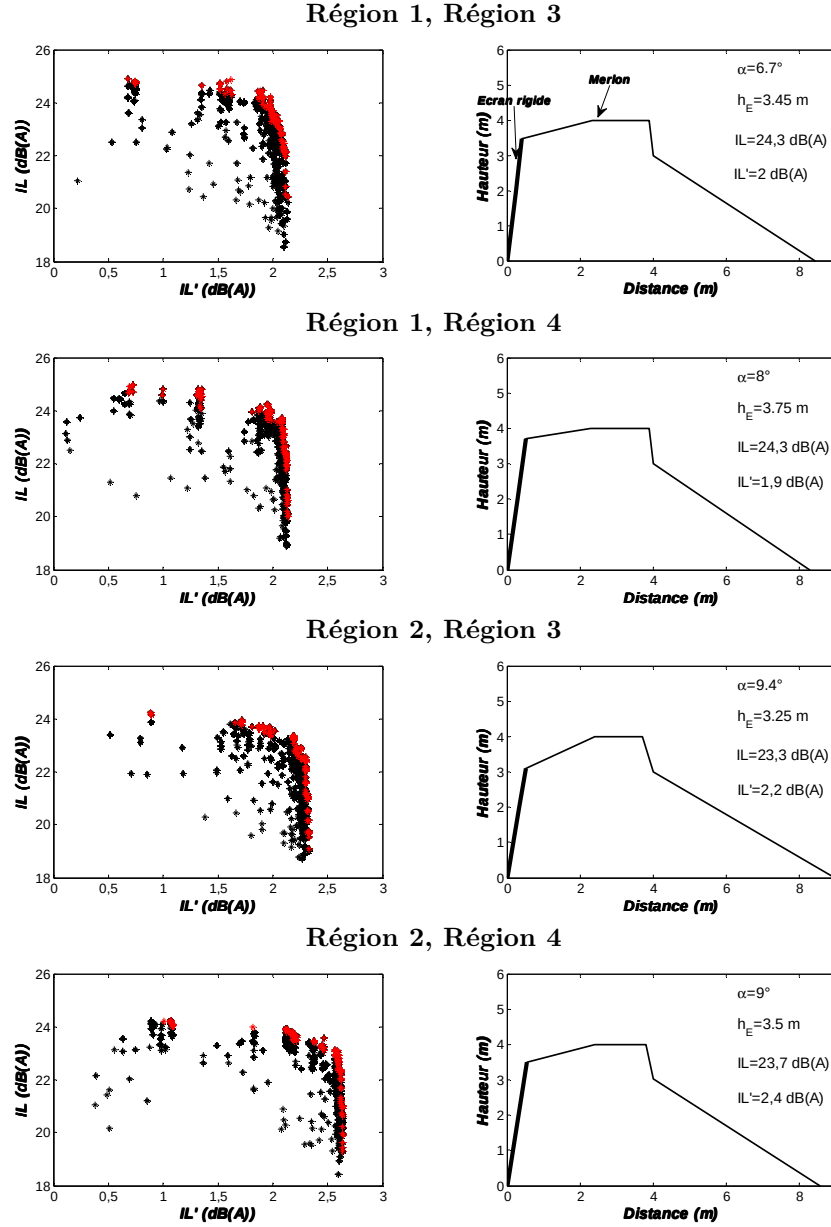


Figure 5.21. Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode Pareto. Les figures de gauche présentent l'évolution de l'algorithme d'optimisation jusqu'à la dernière génération (surface Pareto en points rouges). Les figures de droite présentent les formes optimales correspondant à des éléments Pareto choisis aléatoirement.

Les figures de gauche représentant les valeurs des pertes par insertion IL et IL' correspondant aux évaluations de la fonction coût lors de l'application de l'algorithme d'optimisation. Les solutions les plus en haut à droite correspondent aux meilleures solutions (pertes par insertion les plus élevées). La surface Pareto, représentée en rouge, présente la dernière génération de l'algorithme d'optimisation (éléments dominants au sens de Pareto). Pour chaque cas, un élément Pareto est donné avec les valeurs de α , h_E , IL et IL' où h_E est la hauteur de l'écran rigide en face des sources sonores. Nous constatons que les différentes formes optimales ont le même profil géométrique. Les deux principales différences entre les formes obtenues sont la hauteur et l'angle d'inclinaison de l'écran rigide. Les éléments Pareto,

présentés en figure 5.21, sont choisis aléatoirement parmi les éléments des frontières de Pareto. Ces éléments permettent d'avoir simultanément des meilleures pertes par insertion derrière et devant la protection acoustique. Toutefois, le décideur peut choisir parmi les solutions Pareto celle qui lui convient le mieux.

En analysant l'évolution du processus d'optimisation pour les différents cas étudiés, nous constatons que l'évolution d'IL' est moins importante que l'évolution d'IL. Par exemple, dans le cas d'optimisation pour les deux régions 1 et 3, la différence d'IL entre deux formes peut atteindre 7 dB(A) tandis que la différence d'IL' entre deux formes ne dépasse pas 2,5 dB(A). En effet, la valeur maximale d'IL' de 2,5 dB correspond à une perte par réflexion quasi totale dans la région de récepteurs due à l'effet de l'inclinaison de l'écran où le récepteur reçoit l'énergie acoustique de l'onde directe provenant de la source et l'énergie de l'onde réfléchie sur l'écran incliné très faible. Concernant la perte par insertion IL, la valeur maximale de 7 dB(A) correspond à l'effet d'une forme complexe avec plusieurs bords diffractants permettant d'améliorer significativement la perte par insertion derrière le merlon. Nous pouvons conclure donc que l'optimisation de la perte par insertion derrière la protection est plus intéressante que celle devant la protection. Une optimisation mono-objectif de la perte par insertion derrière la protection s'avère donc suffisante. À partir de la forme optimale obtenue par cette optimisation mono-objectif, nous pouvons ajouter une inclinaison de quelques degrés de l'écran rigide permettant de renvoyer l'énergie acoustique vers le ciel et aboutissant ensuite à une bonne perte par réflexion. La dégradation de la perte par insertion derrière le merlon à cause de l'inclinaison de l'écran dans ce cas est très faible.

5.2.3. Optimisation des merlons acoustiques ayant des irrégularités

Dans les trois sections précédentes, nous avons montré que l'optimisation de la forme d'un merlon acoustique permet d'augmenter significativement sa capacité à réduire le bruit du trafic routier. Dans cette section, nous n'envisageons pas de changer la forme globale d'un merlon. Nous ajoutons un profil d'irrégularités au niveau de son sommet sans l'utilisation d'un matériau très absorbant. Ce dernier a deux principaux inconvénients. Premièrement, son efficacité acoustique diminue avec le temps en raison des facteurs environnementaux. Deuxièmement, il est plus cher que des matériaux naturels ou rigides. Par conséquent, il pourrait être intéressant de concevoir des merlons acoustiques sans utiliser des matériaux absorbants. Nous considérons donc dans cette section des merlons acoustiques construits entièrement en terre. La configuration du merlon à optimiser est présentée en figure 5.22. La forme de base du merlon à optimiser est trapézoïdale. Comme pour la forme triangulaire, la forme trapézoïdale est très répandue pour l'installation de tels ouvrages naturels [55]. L'épaisseur et la hauteur du merlon sont respectivement 15 m et 4 m. La largeur de son

sommet est de 3 m. La pente de ses deux surfaces du côté des sources sonores et du côté des récepteurs est de $2/3$. Puisque l'optimisation requiert un grand nombre d'évaluations de la fonction coût, nous choisissons de ne considérer dans cette section qu'une seule région de récepteurs derrière le merlon acoustique. Elle débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. Dans cette section, nous considérons la même configuration des sources sonores utilisée dans la section précédente en modélisant une autoroute à quatre voies.

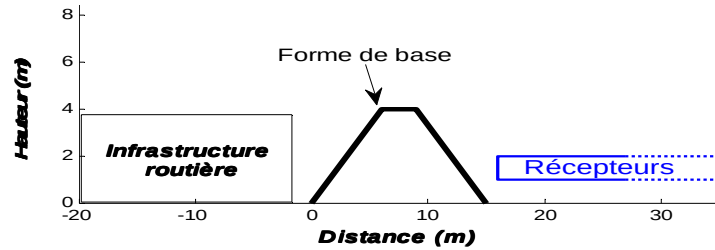


Figure 5.22. Configuration géométrique utilisée pour l'optimisation mono-objectif du merlon acoustique ayant des irrégularités au sommet.

Nous optimisons dans cette section un profil d'irrégularités au niveau du sommet du merlon. Cela est réalisé sans engendrer une augmentation de la hauteur du merlon fixée à 4 m. La méthode de génération d'irrégularités consiste à insérer une série des puits rectangulaires ou triangulaires dans une zone à optimiser de 3 m de largeur et 0,5 m de profondeur (figure 5.23). Cette méthode a été utilisée dans plusieurs études d'optimisation des protections acoustiques tels que des protections en Té [76, 77]. Le gain acoustique maximal apporté par l'ajout des surfaces rugueuses au sommet des tels écrans était de 3 dB(A) (effet des matériaux absorbants inclus). Nous nous attendons, dans notre cas des merlons acoustiques, à un gain plus élevé grâce à une largeur du sommet plus grande. La méthode de l'insertion de la rugosité consiste à diviser la zone à optimiser en 6 cellules de 0,5 m de largeur et 0,5 m de hauteur. Pour les deux formes des puits (triangulaire et rectangulaire), 1 point sera sélectionné aléatoirement dans chaque cellule. Pour des puits de forme triangulaire, les points sélectionnés seront reliés pour obtenir le profil final de rugosité. Pour créer des puits de forme rectangulaire, les points seront reliés par des segments verticaux et horizontaux. L'avantage de notre méthode d'insertion des puits est la possibilité de faire varier la largeur et la profondeur des puits en même temps.

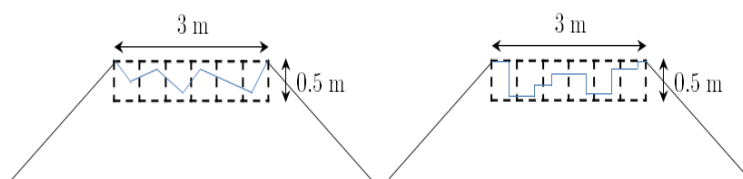


Figure 5.23. Exemples de géométries de puits au sommet du merlon acoustique avec une forme triangulaire (graphique de gauche) ou rectangulaire (graphique de droite).

Les résultats d'optimisation pour les deux types de rugosité sont présentés en figure 5.24. Dans cette figure, nous montrons l'évolution du processus d'évolution et les profils de rugosité les moins et les plus efficaces obtenus. Les profils les moins efficaces sont présentés aussi pour montrer le type de rugosité qui ne peut pas apporter une amélioration significative de l'efficacité du merlon et donc à ne pas mettre en œuvre. L'amélioration de l'efficacité du merlon trapézoïdale de base est de 4,3 dB(A) pour des irrégularités rectangulaires et de 2,5 dB(A) pour des irrégularités triangulaires. Ces résultats montrent que le premier type d'irrégularités est plus efficace que le deuxième. En analysant les meilleurs profils de rugosité obtenus, nous pouvons conclure que la meilleure façon de concevoir un profil d'irrégularités performant est d'introduire un simple profil de puits larges et profonds. Les irrégularités les moins efficaces ont une faible profondeur de puits.

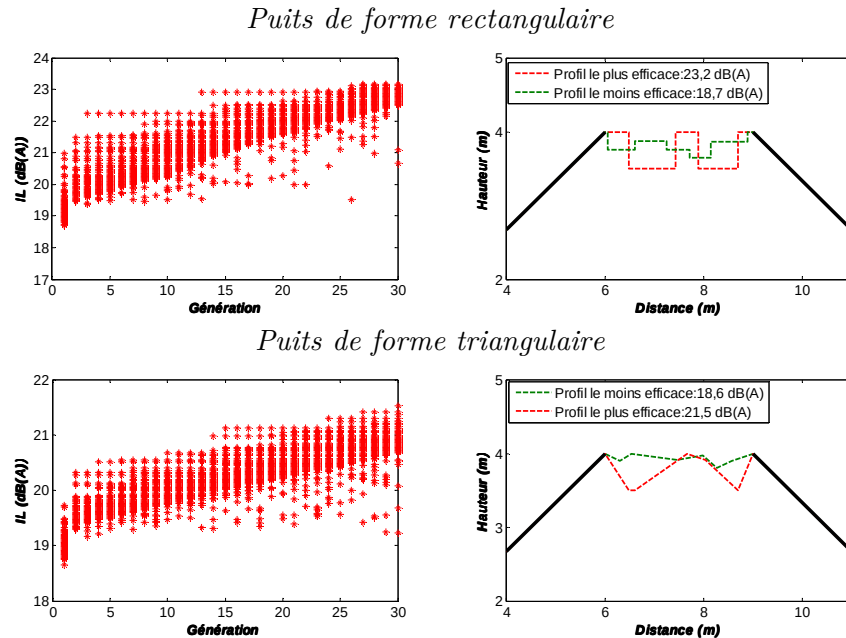


Figure 5.24. Évolution du processus d'optimisation (à gauche) et formes optimales (à droite) pour les deux formes des puits utilisées.

5.2.4. Optimisation des merlons acoustiques pour des remblais et des déblais

Dans les milieux urbains ou ruraux, des infrastructures en déblai ou en remblai sont répandues dans certains aménagements de voies routières et ferroviaires. Les sources sonores se trouvent en bas de l'infrastructure et le récepteur en haut pour un remblai et vice versa pour un déblai (figure 5.25). Le but de cette section est d'ajouter une forme de terre optimisée aux infrastructures en remblai et en déblai afin d'obtenir une efficacité la plus élevée possible au niveau du récepteur. Concernant l'infrastructure routière, on considère deux voies routières avec quatre sources sonores (figure 5.26). $S_{1,1}$ et $S_{2,1}$ représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule (hauteur de 0,01 m), $S_{1,2}$ et $S_{2,2}$ représentent les sources de bruit de mo-

teur d'un véhicule (hauteur de 0,30 m). La région de récepteurs s'étend sur 40 m derrière l'infrastructure, à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m pour un remblai et entre 4 m et 5 m pour un déblai.

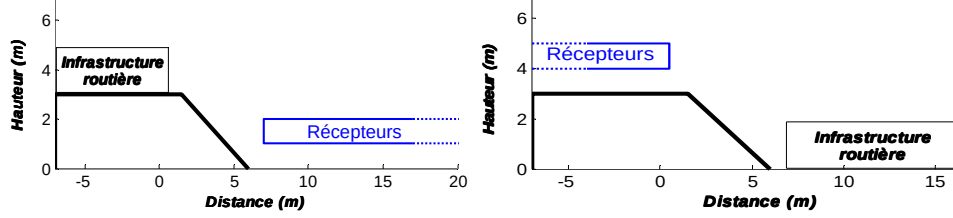


Figure 5.25. Infrastructures routières en remblai (à gauche) et en déblai (à droite).

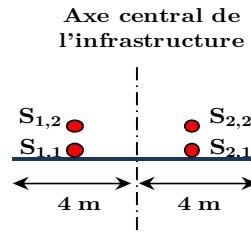


Figure 5.26. Positions des sources de roulement et de moteur pour une infrastructure d'une route à deux voies

La fonction coût qui doit être maximisée dans notre problème d'optimisation est la perte par insertion en dB(A) du merlon acoustique. Elle est calculée à l'aide de l'équation 5.3 où $EA_{réf,\Delta f}$ est l'atténuation excédentaire pour la configuration de référence de l'infrastructure en remblai ou en déblai sans le merlon acoustique. Nous définissons dans notre étude trois configurations de référence (figure 5.27). La configuration (a) présente une infrastructure conventionnelle d'un remblai ou d'un déblai, la configuration (b) présente une infrastructure avec un écran acoustique de faible hauteur installé du côté des récepteurs pour un déblai et du côté des sources sonores pour un remblai, la configuration (c) présente une infrastructure avec un écran acoustique de faible hauteur du côté des récepteurs pour un remblai et du côté des sources sonores pour un déblai.

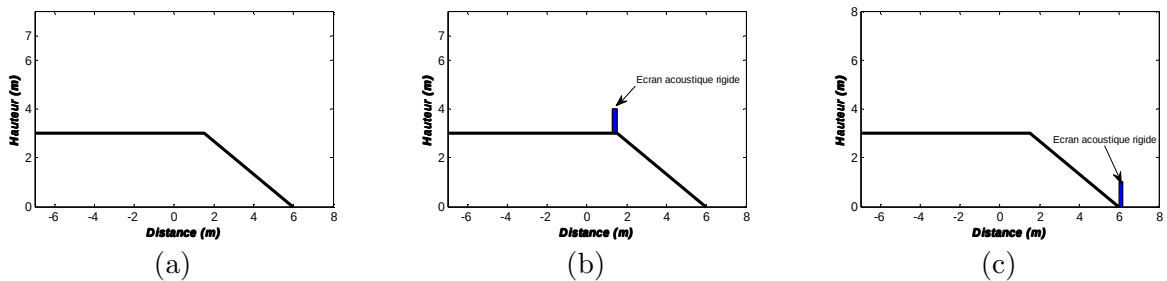


Figure 5.27. Configurations géométriques de référence des infrastructures en remblai ou en déblai pour l'optimisation des merlons acoustiques.

La même méthode de création de forme présentée dans le paragraphe 5.2.2.1 est utilisée ici pour créer des formes réalistes. La seule différence entre une optimisation d'un remblai et une optimisation d'un déblai est la position des sources sonores et des récepteurs.

Pour la configuration (a), on fixe un point A situé à 3 m de hauteur et à 1 m du bord du remblai. A partir de ce point, la création de la forme se fait en sélectionnant aléatoirement trois points P_1 , P_2 et P_3 respectivement dans les trois segments [BC], [CD] et [DE]. Les segments $[AP_1]$, $[P_1P_2]$, $[P_2P_3]$, $[P_3F]$ définiront alors la forme optimale du merlon acoustique. Le point de terminaison F se situe toujours à $x=6,5$ m (figure 5.28). Concernant les deux configurations (b) et (c), une forme plus simple que celle de la configuration (a) est à optimiser. Un seul point d'optimisation est sélectionné dans le segment [BC]. Les deux segments $[AP_1]$ et $[P_1D]$ définiront la forme optimale du volume de terre ajouté. Pour les différents cas d'optimisation, une forme de terre sera donc optimisée sans dépasser 4 m de hauteur.

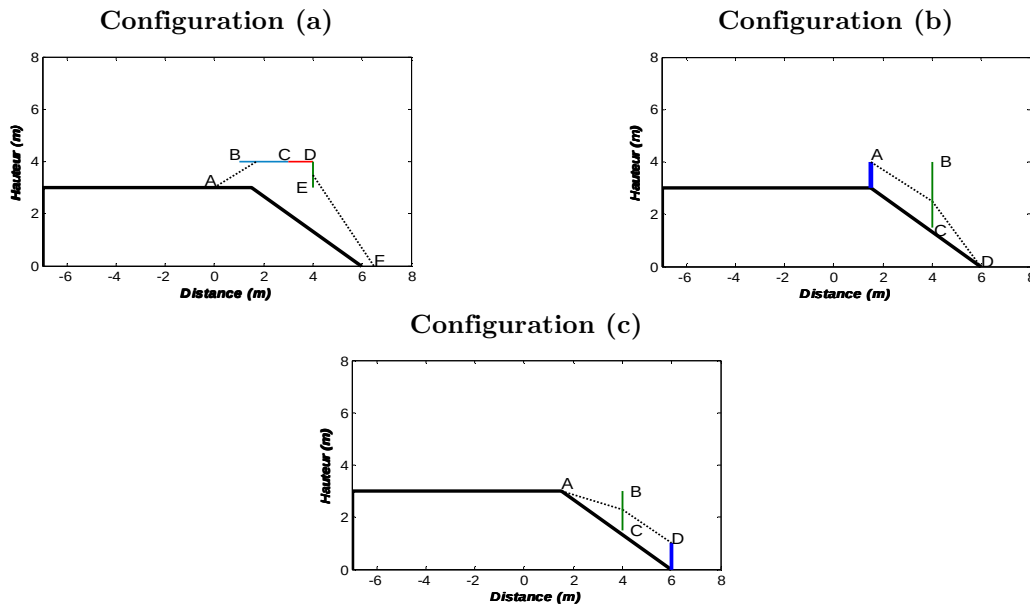


Figure 5.28. Différents segments utilisés pour la création de la forme du merlon acoustique à optimiser pour les trois configurations du remblai et du déblai étudiées.

Nous présentons en figures 5.29 et 5.30 la forme optimale (meilleur individu de la dernière génération) et la forme la moins efficace (individu le moins efficace de la première génération) obtenues pour les trois configurations de remblai et de déblai étudiées. Pour chaque forme, la valeur de la perte par insertion par rapport à la configuration de référence est donnée en légende.

Tout d'abord, nous constatons que les formes optimales du merlon obtenues sont presque les mêmes pour les deux topographies d'infrastructure en remblai et en déblai. En effet, selon le principe de réciprocité [139], on peut intervertir les rôles de la source sonore et du récepteur dans une configuration source-récepteur en présence d'un écran acoustique. Ensuite, nous remarquons que les formes optimales sont celles qui présentent un premier point de dif-

fraction au sommet le plus proche possible des sources sonores et une largeur du sommet la plus élevée possible. Enfin, nous constatons que la valeur d'efficacité de la forme optimale varie en fonction de la configuration étudiée sans ou avec un écran droit de faible hauteur. L'efficacité d'une forme optimale pour une configuration sans écran droit est plus élevée que celle pour une configuration avec écran droit.

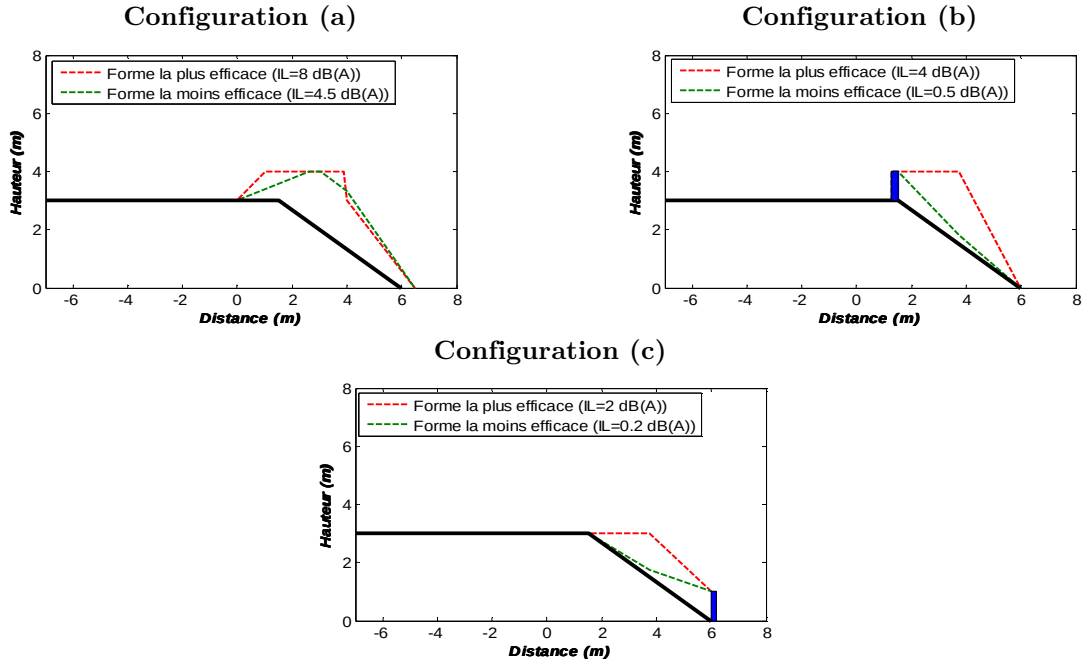


Figure 5.29. Formes les plus et les moins efficaces obtenues pour les différentes configurations : cas d'un remblai.

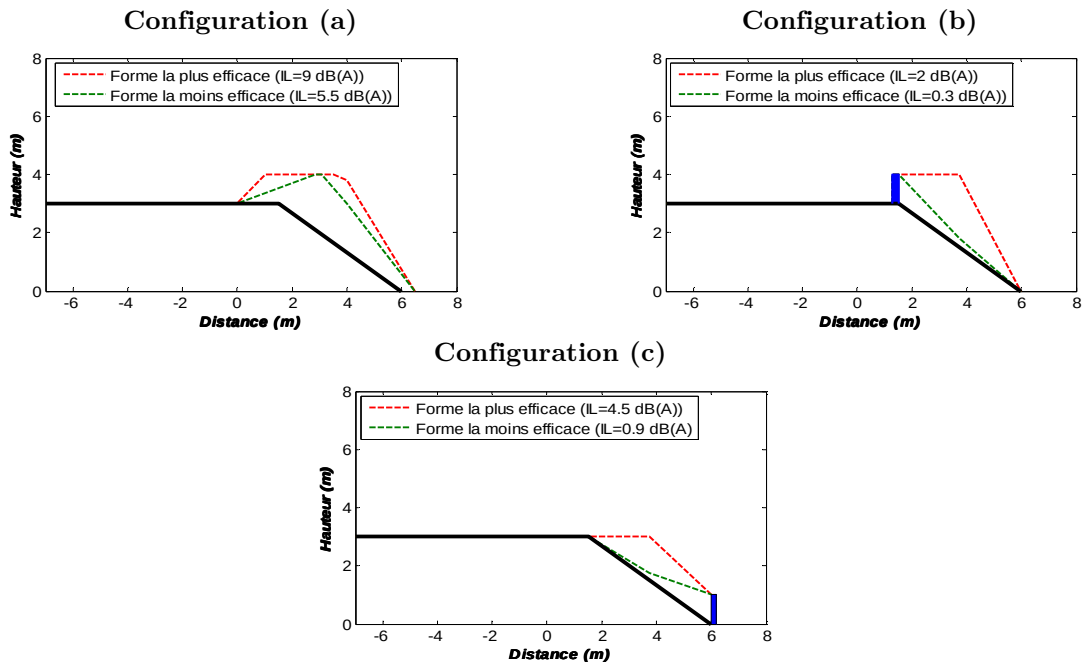


Figure 5.30. Formes les plus et les moins efficaces obtenues pour les différentes configurations : cas d'un déblai.

En figure 5.31, nous traçons les spectres de la perte par insertion en fonction de la fréquence pour les deux formes les moins et les plus efficace pour la configuration géométrique sans écran droit. Nous constatons que les formes obtenues ont une perte par insertion positive quasiment pour toutes les bandes de tiers d'octave. Par contre, une perte par insertion négative peut être observée autour d'une certaine basse fréquence. Cela peut être expliqué par la formation des ondes de surface qui atteignent la zone d'ombre provoquant une augmentation de niveau de pression acoustique.

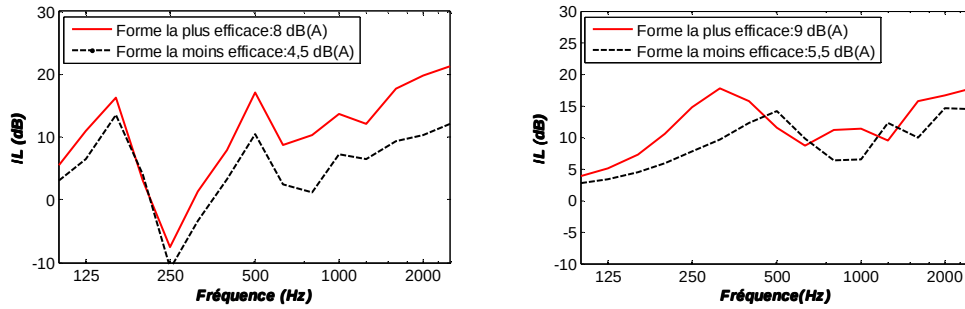


Figure 5.31. Spectres de la perte par insertion de deux formes la plus et la moins efficace pour la configuration sans écran droit. A gauche : cas d'un remblai, à droite : cas d'un déblai.

Les derniers résultats d'optimisation montrent l'utilité de concevoir des formes améliorées des merlons acoustiques pour une topographie d'infrastructure abaissée ou surélevée. La performance des formes optimales obtenues est significative. Elles présentent des formes réalistes qui peuvent être utilisées pour des applications pratiques.

5.3. Conclusions du chapitre

Des études numériques et d'optimisation ont été effectuées dans ce chapitre pour évaluer l'efficacité acoustique des merlons antibruit de forme complexe.

Les résultats de l'étude numérique ont montré l'influence de certains paramètres sur la perte par insertion des merlons de faible et de grande hauteur. La performance des merlons de faible hauteur a été évaluée pour une infrastructure routière et une infrastructure de tramway. Pour l'infrastructure routière, différentes formes des merlons ont été étudiées. Les résultats des simulations numériques ont montré que la forme est un paramètre important influençant l'efficacité du merlon. Les merlons qui ont une efficacité très proche de celle d'un écran droit de référence sont ceux qui ont un profil géométrique complexe avec plusieurs bords diffractants. Pour l'infrastructure de tramway, les différentes formes de merlon étudiées ont montré presque la même efficacité et sont légèrement plus performants qu'un écran droit de référence. La performance acoustique des merlons de grande hauteur a été étudiée pour une infrastructure de type autoroutière. La forme du merlon s'est avérée un paramètre très important influençant son efficacité. Des merlons de forme triangulaire ou trapézoïdale sont moins efficaces qu'un écran droit de même hauteur. La différence d'efficacité entre les deux

types d'écrans peut atteindre 3 dB(A). Par contre, les merlons de forme complexe étudiés sont plus performants que l'écran droit et la différence d'efficacité peut atteindre 4 dB(A). Concernant l'effet de la pente du merlon acoustique, nous avons montré que la performance acoustique en diffraction du merlon augmente avec sa pente. Par contre, un merlon végétalisé de faible pente peut entraîner une atténuation significative due à la présence d'ondes rasantes malgré sa faible performance acoustique en diffraction.

L'application de l'approche d'optimisation pour des merlons acoustiques a permis d'obtenir des formes améliorées avec des valeurs maximales d'efficacité. Trois topographies d'infrastructure différentes ont été considérées pour optimiser la forme du merlon acoustique : infrastructure sur site plan, infrastructure surélevée (remblai) et infrastructure abaissée (déblai).

Pour l'infrastructure sur site plan, deux types d'optimisation ont été utilisés : optimisation mono-objectif et optimisation multiobjectif. Concernant l'optimisation mono-objectif, nous avons effectué une recherche systématique d'une forme optimale du merlon pour maximiser sa perte par insertion. Le merlon optimal obtenu a une perte par insertion largement supérieure à celle d'un merlon de forme triangulaire avec une différence de 9 dB(A). De plus, ce merlon optimal est plus efficace qu'un écran droit de même hauteur, situé au pied de merlon côté sources, avec une différence de perte par insertion de 4 dB(A). L'optimisation des positions d'un matériau naturel très absorbant sur la surface du merlon optimal obtenu a permis d'améliorer son efficacité de 2 dB(A) supplémentaires. Concernant l'optimisation multiobjectif, nous avons cherché un ensemble des solutions permettant d'augmenter simultanément les pertes par insertion devant et derrière la protection acoustique. Les résultats de cette recherche ont montré que l'optimisation de la perte par insertion derrière la protection est plus intéressante que celle devant la protection. Une optimisation mono-objectif de la perte par insertion derrière la protection est donc suffisante. A partir de la forme optimale obtenue, une inclinaison de quelques degrés de l'écran rigide en face des sources sonores permet d'améliorer significativement la perte par insertion devant la protection.

Pour les deux autres infrastructures en remblai et en déblai, différentes formes optimales ont été obtenues dans un problème d'optimisation mono-objectif. Les valeurs maximales de la perte par insertion obtenues ont été entre 2 dB(A) et 9 dB(A) en fonction de la configuration étudiée avec ou sans un écran droit de faible hauteur.

Une autre étude d'optimisation a été réalisée pour chercher le profil de rugosité optimal au sommet d'un merlon de forme trapézoïdale permettant d'obtenir une perte par insertion la plus élevée possible sans changer la forme globale du merlon. Le profil optimal obtenu est constitué des puits larges et profonds. L'amélioration de l'efficacité du merlon, après l'ajout

d'un profil d'irrégularités à son sommet, atteint 2,5 dB(A) et 4 dB(A) respectivement pour des puits de forme triangulaire et de forme rectangulaire.

Les résultats de ce chapitre montrent la possibilité de concevoir des dispositifs antibruit innovants en utilisant des merlons acoustiques de forme complexe avec une efficacité équivalente ou supérieure à celle d'un écran conventionnel. Par ailleurs, les merlons présentent une solution préconisée pour réduire le bruit des transports terrestres lorsque l'on dispose de l'emprise nécessaire à leur implantation. Ils présentent également des avantages paysagers par leur possibilité de végétalisation et du travail sur leur forme.

CONCLUSION

Ce travail de thèse avait pour objectif d'étudier la performance acoustique des protections antibruit innovantes utilisant des moyens naturels. Cette étude a été effectuée en utilisant des approches expérimentales et numériques, les dernières étant parfois couplés avec un algorithme d'optimisation.

Une synthèse bibliographique a permis de choisir les méthodes appropriées pour les approches utilisées. Pour l'approche numérique, la BEM s'est révélée adaptée à notre problématique d'écrans acoustiques. Elle permet de prendre en compte parfaitement la diffraction par les écrans de forme complexe, la topographie, les impédances du sol, et les ruptures d'impédances. Un code de calcul développé au CSTB et basé sur la méthode des éléments finis de frontière a ainsi été utilisé. Pour l'approche expérimentale, nous avons choisi les deux méthodes de mesure in-situ et sur modèle réduit grâce à leurs nombreux avantages pour traiter des problèmes en trois dimensions. Pour l'étude d'optimisation, nous avons choisi une méthode directe ne faisant appel qu'à des évaluations de la fonction coût elle-même et non à ses dérivées. Cette méthode est basée sur l'algorithme génétique permettant d'effectuer une recherche globale qui permet de bien explorer l'espace de recherche. L'algorithme génétique d'optimisation développé dans cette thèse a été utilisé en couplage avec le code de calcul numérique BEM pour chercher des géométries optimales des écrans acoustiques innovants étudiés.

Dans un premier temps, l'approche expérimentale et l'approche numérique ont été utilisées pour étudier l'efficacité acoustique des protections antibruit en gabions. Concernant l'approche expérimentale, nous avons réalisé d'abord des mesures in-situ selon la norme européenne CEN/TS 1793-5. Ensuite, nous avons effectué des mesures sur modèle réduit en utilisant la même norme de mesure transposée à une échelle de réduction de 1/10, afin de comparer les résultats obtenues aux deux échelles. Les résultats des deux campagnes de mesure ont montré un bon accord. Cependant, ces résultats ont aussi montré que la norme de mesure CEN/TS 1793-5 n'est pas appropriée pour caractériser la performance acoustique des écrans épais et hétérogènes tels que les écrans en gabions. Cela est dû notamment à la difficulté de

séparation, lors de traitement des réponses impulsionnelles, des différentes composantes impliquant un fenêtrage temporel très étroit. À cause de ce fenêtrage étroit, des signaux réfléchis, parfois de façon diffuse, par l'écran en gabions, ou transmis à travers l'écran peuvent être ignorés et la limite inférieure de fréquence devient élevée. Par conséquent, nous avons développé une nouvelle méthode de mesure in-situ pour pallier les inconvénients de la méthode d'évaluation standard. Les résultats obtenus ont montré la pertinence de cette nouvelle méthode dans le cas d'écrans acoustiques épais comme tout autre type d'écrans. Les résultats obtenus suite aux différentes campagnes de mesure réalisées ont montré que les écrans en gabions ont des efficacités en réflexion et en transmission moyennes nécessitant des nouvelles conceptions de telles protections antibruit. Concernant l'approche numérique, différentes simulations ont été effectuées pour étudier l'efficacité d'écrans acoustiques en gabions de faible hauteur en considérant différentes conceptions. La perte par insertion de ce type d'écrans est entre 7 dB(A) et 11 dB(A) par rapport à une configuration sans écran en fonction de la conception des gabions développée. La meilleure efficacité est obtenue pour des cailloux poreux ayant une faible résistivité au passage de l'air. Cela montre que les écrans en gabions de faible hauteur pourraient donc être utilisés dans un rôle de lutte contre le bruit des transports terrestres en milieu urbain en assurant une bonne efficacité acoustique pour les piétons et les cyclistes. La facilité de mise en œuvre et d'entretien présente aussi un avantage de tels dispositifs antibruit.

Dans un deuxième temps, l'approche numérique et l'approche d'optimisation ont été utilisées pour étudier l'efficacité acoustique des cristaux soniques seuls ou associés à des écrans droits. L'objectif de l'étude numérique a été d'évaluer l'efficacité des cristaux soniques en montrant l'influence de certains paramètres sur cette efficacité. La perte par réflexion des cristaux soniques a été d'autant élevée que le diamètre des diffuseurs, constituant le cristal sonique, est petit. Cette perte est due au fait qu'une partie de l'énergie acoustique est transmise à travers le cristal sonique. Pour les bandes de fréquences correspondant aux bandes interdites, l'énergie acoustique est totalement réfléchie par le cristal sonique. Concernant la perte par insertion, nous avons démontré l'existence d'une bande interdite de fréquences liée à la distribution des diffuseurs. Cette bande interdite est plus large et l'amplitude d'atténuation est plus élevée lorsque le diamètre de diffuseurs est proche de la longueur d'onde. L'évaluation de l'efficacité des cristaux soniques a été réalisée aussi lorsque ces derniers sont associés aux écrans droits conventionnels. Les résultats des simulations numériques ont montré que l'adjonction d'un cristal sonique sur un écran droit, face à l'infrastructure, permet d'augmenter l'efficacité acoustique de ce dernier en réflexion et en diffraction. Les valeurs d'atténuation calculées dépendent des propriétés acoustiques des diffuseurs. Concer-

nant l'étude d'optimisation, un algorithme génétique a été couplé au code de calcul BEM pour chercher des formes améliorées des cristaux soniques de faible hauteur lorsqu'ils sont placés le long d'une infrastructure de tramway. Les formes optimales obtenues présentent des profils complexes de distribution des cylindres. Les valeurs de la perte par insertion de tels dispositifs sont entre 4 dB(A) et 7 dB(A) en fonction de la configuration source-récepteur étudiée. Afin d'améliorer l'efficacité des cristaux soniques et pour réduire l'effet négatif des réflexions multiples entre la caisse du tramway et un écran droit, nous avons optimisé aussi des cristaux soniques lorsqu'ils sont placés entre le tramway et l'écran droit. Des nouvelles formes optimales de cristaux soniques ont été obtenues. Les valeurs d'efficacité de ces formes sont très significatives. En fonction de la configuration source-récepteur étudiée, ces valeurs varient entre 6 dB(A) et 11 dB(A), pour des cristaux soniques constitués des cylindres rigides, et entre 10 dB(A) et 18 dB(A), pour des cristaux soniques constitués des cylindres rigides couverts d'une couche absorbante. Ces résultats montrent l'intérêt du développement et d'utilisation de tels dispositifs pour réduire le bruit issu des infrastructures des transports terrestres.

Dans un troisième temps, nous avons utilisé une approche numérique et une stratégie d'optimisation pour étudier l'efficacité acoustique des merlons antibruit de forme complexe. Les résultats de l'étude numérique ont montré l'influence de certains paramètres sur la perte par insertion des merlons de faible et de grande hauteur. Pour les merlons de faible hauteur (1 m), la forme du merlon a été un facteur important influençant sur son efficacité. En fonction de la forme étudiée, les valeurs de la perte par insertion des merlons étudiés varient entre 5 dB(A) et 10 dB(A) pour une infrastructure routière et entre 4 dB(A) et 6 dB(A) pour une infrastructure de tramway. Pour les merlons de grande hauteur (4 m), nous avons montré aussi que leur efficacité dépend essentiellement de leur forme. Les formes les moins efficaces sont des formes conventionnelles triangulaires ou trapézoïdales. Les formes les plus efficaces sont des formes ayant plusieurs bords diffractants proches des sources sonores. L'efficacité de telles formes peut dépasser celle d'un écran droit, situé au pied du merlon côté sources, de 4 dB(A). L'effet d'autres paramètres sur l'efficacité du merlon, tels que la pente et l'impédance de ses surfaces a été également étudié. Nous avons démontré que la performance acoustique en diffraction du merlon est proportionnelle à sa pente. Par contre, un merlon végétalisé de faible pente peut entraîner une atténuation significative due à la présence d'ondes rasantes malgré sa faible performance acoustique en diffraction. Concernant l'étude d'optimisation, plusieurs calculs ont été réalisés pour obtenir des formes réalistes et améliorées avec des valeurs maximales d'efficacité. Une première étude d'optimisation a permis d'obtenir une forme optimale d'un merlon associé à un écran droit avec une perte par

insertion largement supérieure à celle d'un merlon de forme triangulaire avec une différence de 9 dB(A). Ce merlon optimal est plus efficace aussi qu'un écran droit de même hauteur, situé au pied du merlon côté sources, avec une différence de perte par insertion de 4 dB(A). L'optimisation des positions des couches absorbantes sur la surface du merlon optimal obtenu a permis d'améliorer son efficacité de 2 dB(A) supplémentaires. Une deuxième étude d'optimisation a permis de trouver un ensemble des solutions permettant d'augmenter simultanément les pertes par insertion derrière et devant le merlon acoustique. La troisième étude d'optimisation a été effectuée pour chercher des formes améliorées de merlons acoustiques pour des infrastructures en remblai et en déblai. Différentes formes optimales ont été obtenues dont les valeurs maximales de la perte par insertion obtenues ont été entre 2 dB(A) et 9 dB(A) en fonction de la configuration étudiée. Une dernière étude d'optimisation a été réalisée pour chercher le profil de rugosité optimal au sommet d'un merlon de forme trapézoïdale. Deux profils de rugosité optimaux ont été obtenus présentant des puits larges et profonds. Le premier profil présente une forme rectangulaire des puits avec une efficacité de 4 dB(A) par rapport à un sommet plat. Le deuxième profil présente une forme triangulaire des puits avec une efficacité de 2,5 dB(A) par rapport à un sommet plat. Les résultats de l'étude numériques et de l'étude d'optimisation sur les merlons acoustiques montrent que de telles protections sont des solutions prometteuses pour réduire le bruit du transport terrestre. Ils sont envisageables dans un milieu rural ou périurbain.

L'étude de l'efficacité acoustique de nouveaux dispositifs antibruit utilisant des moyens naturels représente l'aboutissement de cette recherche. Les objectifs ont bien été atteints notamment par répondre aux questions posées avant de mener cette étude. En effet, nous avons montré que des écrans acoustiques novateurs utilisant la pierre, le sol ou le bois ont une efficacité acoustique équivalente ou supérieure à celle d'écrans droits conventionnels. Les formes complexes proposées dans une étude paramétrique ou déterminées par une stratégie d'optimisation présentent des formes réalistes pouvant être utilisées pour des applications pratiques. L'étude des protections de faible hauteur a montré la capacité de tels dispositifs à réduire le bruit routier ou ferroviaire. Ces protections pourraient être utilisées en milieu urbain pour développer des modes doux et améliorer la qualité acoustique pour les piétons et les cyclistes.

Les perspectives de ce travail de thèse s'orientent principalement dans trois directions. Tout d'abord, d'autres infrastructures de transport terrestre, telles que des infrastructures de trains à grande vitesse (TGV), pourraient être envisageables dans l'étude de la performance acoustique des murs antibruit. D'autres configurations géométriques, telles que des routes en

viaduc, et d'autres protections innovantes, telles que des couvertures ajourées et des couronnements d'écran en utilisant des moyens naturels, pourraient également être étudiés. Ensuite, l'effet des conditions météorologiques sur l'efficacité des écrans acoustique utilisant des moyens naturels pourra être étudié, pour des grandes distances d'infrastructures des transports terrestres, notamment dans le cas d'un vent portant ou d'une inversion de température typique d'une nuit étoilée. Pour cela, il serait possible d'utiliser le code de calcul BEM en couplage avec la PE ou la FDTD. Enfin, d'autres problématiques davantage urbaines pourraient être étudiées comme par exemple l'insertion des solutions innovantes de faible hauteur dans des rues en "U" ou dans des quartiers denses en prenant en compte les phénomènes de réflexion, de diffraction et de diffusion des ondes par les bâtiments.

Références bibliographiques

- [1] J.E. Piercy, T.F.W. Embleton, L.C. Sutherland, “Review of noise propagation in the atmosphere”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 61, pp. 1403-1418, 1977.
- [2] ISO 9613-1. Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993.
- [3] M.C. Bérengier., M.R. Stinson, G.A. Daigle, J.F. Hamet, “Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, pp. 155–162, 1997.
- [4] T.F.W. Embleton, “Tutorial on sound propagation outdoors”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, pp. 31-48, 1996.
- [5] K. Attenborough, “Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces,”*J. Sound vib.*, vol. 99, pp. 521-544, 1984.
- [6] K. Attenborough, I. Bashir, S. Taherzadeh, “Outdoor ground impedance models”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, pp. 2806–2819, 2011.
- [7] M. E. Delany, E. N. Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”, *Applied Acoustics*, vol. 3, pp. 105-116, 1970.
- [8] K. B. Rasmussen, “Sound propagation over Grass covered Ground”, *J. Sound Vib*, vol.78, pp. 247-255, 1981.
- [9] C. Zwikker, C.W. Kosten, “Sound absorbing materials”, New York: Elsevier publishing company, 1949.
- [10] G. Taraldsen, “The Delany–Bazley impedance model and Darcy’s Law,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 91, pp. 41–50, 2005.
- [11] J.F. Hamet, M. Bérengier, “Acoustical characteristics of porous pavements : a new phenomenological model”, *Internoise*, Louvain, Belgique, 1993.
- [12] K. Attenborough, “Acoustical characteristics of rigid absorbents and granular materials”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, pp. 785-799, 1983.
- [13] D.K. Wilson, “Relaxation matched modeling of propagation through porous media including fractal pore structure”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, pp. 1136-1145, 1993.

- [14] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in Fluid saturated porous materials", J. Fluid Mech., vol. 176, pp. 379-402, 1987.
- [15] Prévion du bruit routier - 2 - Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008), SETRA, 0924-2, 2009.
- [16] F. Aballéa , "Propagation acoustique en milieu extérieur: Application de l'équation parabolique rapide au couplage d'effets météorologiques et de topographies complexes", Thèse de doctorat, Université du Maine, France, 2004.
- [17] G.F. Butler, "A note on improving the attenuation given by a noise barrier, J. Sound Vib., vol. 32, pp. 367-369, 1974.
- [18] A.D. Rawlins, "Diffraction of sound by a rigid screen with an absorbent edge". J. Sound Vib., vol. 47, pp. 523-541, 1976.
- [19] D.N. May, M.M. Osmans, "The performance of sound absorptive, reflective, and t-profile noise barriers in Toronto", J. Sound Vib., vol. 71, pp. 65-71, 1980.
- [20] A.D. Rawlins, "Diffraction of sound by a rigid screen with a soft or perfectly absorbing edge", J. Sound Vib., vol. 45, pp. 53-67, 1976.
- [21] Z. Maekawa, "Noise reduction by screens", Applied Acoustics, vol. 1, pp. 157-173. 1968.
- [22] P. Jean, "The effect of structural elasticity on the efficiency of noise barriers", J. Sound Vib., vol. 237, pp. 1-21, 2000.
- [23] W.F. Cheng, C.F. Ng, "The acoustic performance of an inclined barrier for high-rise residents", J. Sound Vib., vol. 242 , pp. 295-308, 2001.
- [24] D.N. May, M.M. Osmans, "Highway noise barriers: new shapes", J. Sound Vib., vol. 71, pp. 73-101, 1980.
- [25] B.J. Jin, H.S. Kim, H.J. Kang, J.S. Kim, "Sound diffraction by a partially inclined noise barrier", Applied Acoustics, vol. 62, pp. 1107-1121, 2001.
- [26] K. Attenborough, T. Waters-Fuller, K.M. Li, J.A. Lines, "Acoustical properties of Farmland", Journal Agricultural Engineering Research, vol. 76, pp. 183-195, 2000.
- [27] M.J.M. Martens, A. Michelson, "Absorption of acoustic energy by plants leaves", J. Acoust. Soc. Am., vol. 69, pp. 303-306, 1981.
- [28] S.H. Tang, P.P. Ong, H.S. Woon, "Monte-Carlo simulation of sound propagation through leafy foliage using experimentally obtained leaf resonance parameters", J. Acoust. Soc. Am., vol. 80, pp. 1740-1744, 1986.

- [29] M.J.M. Martens, “Noise abatement in plant monocultures and plant communities”, *Applied Acoustics*, vol. 14, pp. 167-189, 2003.
- [30] M.J.M. Martens, “Foliage as a low-pass filter : experiments with model forests in anechoic chamber”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, pp. 66-72, 1980.
- [31] T.F.W. Embleton, “Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35, pp. 1119-1125, 1963.
- [32] D. Aylor, “Noise reduction by vegetation and ground”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 51, pp. 197-205, 1972.
- [33] S. Yamada, T. Watanabe, S. Nakamura, H. Yokoyama, S. Takeoka, “Noise reduction by vegetation”, *Internoise*, Switzerland, 1977.
- [34] G. Reethof, L.D. Frank, O.H. McDaniel, “Absorption of sound by tree bark,” *USDA Forest service research paper NE-341*, 1976.
- [35] H. Kuttruff, “Ueber Nachhall in medien mit unregelmässig verteilten streuzentren, insbesondere in Hallräumen mit aufgehängten Streuelementen”, *Acustica*, vol. 77, pp. 11-23, 1967.
- [36] W.H.T. Huisman, K. Attenborough, “Reverberation and attenuation in a pine forest”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, pp. 2664-2677, 1991.
- [37] V. Twesky, “Multiple scattering of waves by a volume distribution of parallel cylinders”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 74, pp. 1314-1329, 1964.
- [38] T.F.W. Embleton, “Scattering by an array of cylinders as a function of surface impedance”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 40, pp. 667-670, 1966.
- [39] M.A Price, “sound attenuation in woodland”, *Thesis*, Milton Keynes, England: The Open University, 1988.
- [40] N. Barrière, “Étude Théorique et expérimentale de la propagation du bruit de trafic en forêt,” *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Lyon, France, 1999.
- [41] D. Felbacp, G. Tayeb, D. Maystre, “Scattering by a random set of parallel cylinders”, *J. Optical. Soc. Am.*, vol. 11, pp. 2526-2538, 1994.
- [42] N. Barrière, Y. Gabillet, “Prediction of traffic noise control by forests using a three dimensional GFPE model”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105 , pp. 1335, 1999.
- [43] J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia, V. Gómez. “Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers ”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 5240-5242, 2002.

- [44] J.O. Vasseur, P.A. Deymier, A. Khelif, P. Lambin, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, L. Dobrzynski, N. Fettouhi, J. Zemmouri, “Phononic crystal with low filling fraction and absolute acoustic band gap in the audible frequency range: A theoretical and experimental study”, *Phys.Rev. E.*, vol. 65, 056608, 2002.
- [45] V. Romero-García, E. Fuster, L.M. García-Raffi, E.A. Sánchez-Pérez, M. Sopena, J. Llinares, J.V. Sánchez Pérez, “Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol 88, 174104, 2006.
- [46] J. M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. Garcia-Raffi, “Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm”, *Struct. Multidisc. Optim.*, vol. 39, pp. 203-215, 2009.
- [47] V. Romero-García, E. Fuster-Garcia , L.M. Garcia-Raffi, J.V. Sánchez-Pérez, “Acoustic Barriers Based on Sonic Crystals”, *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2007)*, Nevada, USA , 2007.
- [48] J.V. Sánchez-Pérez , S. Castineira-Ibanez, V. Romero-García, , L.M. Garcia-Raffi, “ New arrangements of acoustic scatterers with high attenuation properties”, *Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [49] W. Kuang, Z. Hou, Y. Liu, “The effects of shapes and symmetries of scatterers on the phononic band gap in 2D phononic crystals”, *Physical Letters A*, vol. 332, pp. 481– 490, 2004.
- [50] O. Umnova, K. Attenborough, C.M. Linton, “Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders” , *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, pp. 278-284, 2006.
- [51] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Zhu, Z. Yang, C. Chan, P. Sheng, “Locally Resonant Sonic Materials”, *Science*, vol. 289, pp. 1734, 2000.
- [52] A.B. Movchan, S. Guenneau, “Split-ring resonators and localized modes”, *Phys. Rev.B*, vol. 70, pp. 125116, 2004.
- [53] M. Hikerson, P.P. Delsanto, N.K. baltra, P. Matic, “ Modelling and simulation of acoustic wave propagation in locally resonant sonic materials”, *Ultrasonics*, vol. 42, pp. 231-235, 2004.
- [54] V. Romero-García, E. Fuster-Garcia, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi, “Sonic crystal acoustic barriers based on scatterers with added acoustical properties”, *Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.

- [55] A.Y. Boon Chong, K. Attenborough, S. Tahaerzadeh, “ The performance of vertical and horizontal sonic crystal noise barriers above a ground surface”, *Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [56] Ministry of Transportation and Highways. “Noise Control Earth Berms- Guidelines for the use of Earth Berms to Control Highway”, Canadian cataloguing in publication Data, ISBN 0-7726-2964-1, 1997.
- [57] R.G. Kouyoumjan, P.H. Pathak, “A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface”, *proc. IEEE*, vol.62, pp. 1448-1461, 1974.
- [58] H.G. Jonasson, “Diffraction by wedges of finite acoustic impedance with applications to depressed roads”, *J. Sound Vib.*, vol. 25, pp. 577-585, 1972.
- [59] A.D. Pierce, “Diffraction of sound around corners and over wide barriers”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 55, pp. 941–955, 1974.
- [60] L. Nijs, “Combined effects of ground absorption and diffraction by obstacles”, *Internoise*, Miami, USA, 1980.
- [61] D.C. Hothersall, S.N. Chandler-Wilde, M.N. Hajmirzae, “Efficiency of single noise barriers”, *J. Sound Vib.*, vol. 146, pp. 303-322, 1991.
- [62] G.R. Watts, “Effectiveness of novel shaped bunds in reducing traffic noise”, *PROC. I.O.A.* vol. 21, pp. 41-50, 1999.
- [63] D.H. Crombie, D.C. Hothersall, “The Performance Of Multiple Noise Barriers”, *J. Sound Vib.*, vol.176, pp. 459-473, 1994.
- [64] J.J. Hajek, “Are earth berms acoustically better than thin-walled barriers,” *Noise Control Engineering Journal*, vol.19, pp. 41-48, 1982.
- [65] T. Bush, M. Hodgson, “Scale-model study of the effectiveness of highway noise barriers”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 114, pp. 1947-1954, 2003.
- [66] G.R. Watts, “Acoustic performance of traffic noise barriers a state of the art review, part 1”, *Acoust. Bull.*, vol. 18, pp. 13–18, 1993.
- [67] I. Ekici, H.A. Bougdah. “Review of research on environmental noise barriers” *Build Acoust*, vol. 10, pp. 289–323, 2003.
- [68] J. Defrance, P. Jean, “Integration of the efficiency of noise barrier caps in a 3D ray tracing method. Case of a T-shaped diffracting device”, *Applied Acoustics*, vol. 64, pp. 765–780, 2003.

- [69] D.C. Hothersall, D.H. Crombie, S.N. Chandler-Wilde, “The performance of T-profile and associated noise barriers”, *Applied Acoustics*, vol. 32, pp. 269–87, 1991.
- [70] M. Hasebe, “A study on the sound reduction by T-profile noise barrier”, *J. Acoust. Soc. Jpn.*, vol. 14, pp. 113–115, 1993.
- [71] T. Ishizuka, K. Fujiwara, “Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions”, *Applied Acoustics*, vol. 65, pp. 125–41, 2004.
- [72] D.N. May, M.M. Osman, “The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in Toronto. *J. Sound Vib.*, vol. 71, pp. 65–71, 1980.
- [73] G.R. Watts, D.H. Crombie, D.C. Hothersall, “Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: full scale tests”, *J. Sound Vib.*, vol. 177, pp. 289–305, 1994.
- [74] D. Greiner, J. J. Aznárez, O. Maeso, G. Winter, “Single- and multi-objective shape design of Y-noise barriers using evolutionary computation and boundary elements”, *Advances in Engineering Software*, vol. 41, pp. 368–378, 2010.
- [75] M.R. Monazzam, Y.W. Lam, “Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers”, *Applied Acoustics*, vol. 66, pp. 709–730, 2005.
- [76] K. Fujiwara, D.C. Hothersall, C. Kim, “Noise barriers with reactive surfaces”, *Applied Acoustics*, vol. 53, pp. 255–72, 1998.
- [77] M. Baulac, “Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe”. Thèse de doctorat, Université du Maine, France, 2006.
- [78] D. H. Crombie, D. C. Hothersall, S. N. Chandler-Wilde, “Multiple-Edge Noise Barriers”, *Applied Acoustics*, vol. 44, pp. 353–367, 1995.
- [79] S.S.T. Ho, I.J. Busch-Vishniac, D.T. Blackstock, “Noise reduction by a barrier having a random edge profile”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 55, pp. 2669–2676, 1997.
- [80] J. Defrance, M. Teytu, P. Jean, “Effet de réflexion sonore diffuse par des protections anti-bruit non planes”, *Congrès Français d’Acoustique*, Tours, France, 2006.
- [81] R.D. Ciskowski, C.A. Brebbia, “Boundary Element Methods in Acoustics”, Elsevier Applied Science, London, 1991.
- [82] M. Bonnet, “Équations intégrales et éléments de frontière : applications en mécanique des solides et des fluides”, Paris : CNRS Editions, Eyrolles, 1995.
- [83] K.E. Gilbert, M.J. White, “Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, pp. 630–637, 1989.

- [84] P. Chevret, P. Blanc-Benon, “A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, pp. 3587–3599, 1996.
- [85] X. Di, K.E. Gilbert, “The effect of turbulence and irregular terrain on outdoor sound propagation”, 6th International Symposium on Long Range Sound Propagation, pp. 315-333, 1994.
- [86] N. Blairon, “Effet de la topographie sur la propagation des ondes acoustiques dans l’atmosphère, modélisation avec l’équation parabolique et validation sur site extérieur”, Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, France, 2002.
- [87] S. Parakkal, K.E. Gilbert, X. Di, “Application of the Beilis–Tappert parabolic equation method to sound propagation over irregular terrain”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, pp. 1039–1046, 2012.
- [88] V.E. Ostashev, D.K. Wilson, L. Liu, D.F. Aldridge, N.P. Symons, D. Marlin. “Equations for finite-difference, time domain simulation of sound propagation in moving inhomogeneous media and numerical implementation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, pp. 503–517, 2005.
- [89] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, “Prediction-step staggered-in-time FDTD: an efficient numerical scheme to solve the linearised equations of fluid dynamics in outdoor sound propagation”, *Applied Acoustics*, vol. 68, pp. 201-216, 2007.
- [90] Y. Kagawa, T. Tsuchiya, B. Fujii, K. Fujioka, “Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation”, *J. Sound Vib.*, vol. 218, pp. 419-444, 1998.
- [91] G. Guillaume, “Application de la méthode TLM à la modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain”, Thèse de doctorat, Université du Maine, 2009.
- [92] V. Cervený, M.M. Popov, I. Psencik, “Computation of wave fields in homogeneous media. Gaussian beam approach”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 70, pp. 109-128, 1982.
- [93] M.B. Porter, H.P. Bucker, “Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 82, pp. 1349-1359, 1987.
- [94] 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”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, pp. 3105-3116, 1993.
- [95] Norme française NF S-31089, 2000.
- [96] European Standard CEN/TS 1793-5:2003, Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 5: Intrinsic characteristics - In situ values of sound reflection and airborne sound insulation.

- [97] E. Premat, J. Defrance, A. Mos, H. Chartier, “Towards an experimental benchmark test cases database for the validation of numerical models for outdoor sound propagation”, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 89, pp. 992–997, 2003.
- [98] M.M. Osman, “MTC Scale Model Facility for Transportation Noise Problems: Materials Choice and Validation for Scale Modeling”, Ontario Ministry of Transportation and Communications Report 77-AC-4, 1977.
- [99] R.K. Pirinchievara, “Model study of sound propagation over ground of finite impedance”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, pp. 2678-2682, 1991.
- [100] T. A. Busch, M. R. Hodgson “Improved Method for Selecting Scale Factors and Model Materials for Scale Modelling of Outdoor Sound Propagation”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 243, pp. 173-181, 2001.
- [101] M.E. Delany, A.J. Rennie, K.M. Collins, “Scale-model investigations of traffic-noise propagation”, National Physical Laboratory Report Ac58, 1972.
- [102] M.E. Delany, A.J. Rennie, K.M. Collins, “A scale-model technique for investigating traffic-noise propagation”, *J. Sound Vib.*, vol.56, pp. 325-340, 1978.
- [103] H.W. Jones, D.C. Stredulinsky, P.J. Vermeulen, “An experimental and theoretical study of the modelling of road traffic noise and its transmission in the urban environment”, *Applied Acoustics*, vol. 13, pp. 251-265, 1980.
- [104] D.A. Hutchins, H.W. Jones, L.T. Russell, “Model studies of acoustic propagation over finite-impedance ground”, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 52, pp. 169-178, 1983.
- [105] V. Cerny, “Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm”, *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 45, pp. 41-51, 1985.
- [106] J. Nelder, R. Mead, “A simplex method for function minimization”, *Computer journal*, vol. 7, pp. 308-313, 1965.
- [107] J.H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press”, 1975.
- [108] D.E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”, Addison Wesley, U.S.A, 1989.
- [109] H.P. Schwefel, “Numerical Optimization of Computer Models”, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1981.

- [110] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh, “Artificial Intelligence Through Simulated Evolution”, John Wiley & Sons, New York, U.S.A, 1966.
- [111] J.L. Marichal, “On Sugeno integral as an aggregation function”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, pp. 347-365, 2000.
- [112] D. Kalyanmoy, “Solving goal programming problems using multi-objective genetic algorithms”, *Congress on Evolutionary Computation*, Washington, U.S.A, 1999.
- [113] C.A.C. Coello, A.D. Christiansen, A. Hernandez Aguirre, “Multiobjective Design Optimization of Counterweight Balancing of a Robot Arm using Genetic Algorithms”, *Seventh International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Virginia, U.S.A, 1995.
- [114] Y.L. Chen, C.C. Liu, “Multiobjective VAR planning using the goal-attainment method. Generation, Transmission and Distribution”, *IEE Proceedings*, vol. 141, pp. 227-232, 1994.
- [115] C.M. Fonseca, P.J. Fleming, “Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization”, *Fifth International Conference on Genetic Algorithm*, California, U.S.A, 1993.
- [116] J.D. Schaffer, “Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms”, *PhD Thesis*, Vanderbilt University, 1984.
- [117] J.D. Schaffer, “Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms”, *First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, U.S.A, 1985.
- [118] J.D. Knowles, D.W. Corne, “The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimisation”, *Congress on Evolutionary Computation*, Washington, U.S.A, 1999.
- [119] J.D. Knowles, D.W. Corne, “Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy”, *Evolutionary Computation*, vol. 8, pp. 149-172, 2000.
- [120] E. Zitzler, L. Thiele, “Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms- A Comparative Case Study”, *Parallel Problem Solving from Nature 5*, Berlin, Germany, 1998.
- [121] E. Zitzler, L. Thiele, “Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 257-271, 1999.
- [122] J. Horn, N. Nafpliotis, “Multiobjective Optimization using the Niche Pareto Genetic Algorithm”, *IlliGAL Report 93005*, 1993.

- [123] J. Horn, N. Nafpliotis, D.E. Goldberg, “A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization”, First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, New Jersey, U.S.A, 1994.
- [124] N. Srinivas, K. Deb, “Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms”, *Evolutionary Computation*, vol. 2, pp. 221-248, 1994.
- [125] P.J.T. Filippi, “Layer potentials and acoustic diffraction”, *J. Sound Vib.*, vol. 54, pp. 473-500, 1977.
- [126] M. Baulac, J. Defrance, P. Jean, “Optimization of low height noise protections in urban areas”, *ForumAcusticum*, Hongrie, 2005.
- [127] P. Jean, “A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise”, *J. Sound Vib.*, vol. 212, pp. 275–294, 1998.
- [128] J. Defrance, M. Beyret, M. Baulac, P.Jean, “Road traffic noise from viaducts in mountainous areas”, *Euronoise Acoustics’08*, Paris, France, 2008.
- [129] P. Jean, “A multi domain bem approach. Application to outdoor sound propagation and tyre noise”, *Euronoise*, Tempere, Finland, 2006.
- [130] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 182-97, 2002.
- [131] <http://packages.python.org/ecspy/>
- [132] J. Defrance, J. Forssén, T. Van Renterghem, K. Attenborough, M. Hornikx, “ Innovative barriers exploiting natural materials : proposal for common cases of study”, HOSANNA project, Technical report HSNNA_23_TRP_2011_02_21_CSTB04, 2004.
- [133] H. Jonasson, U. Sandberg, G. van Blokland, J. Ejsmont, G. Watts, M. Luminari, “Source modelling of road vehicles”, Deliverable 9 of the Harmonoise project, Technical report HAR11TR-041210-SP10, 2004.
- [134] J. Defrance, Y. Gabillet, D. van Maercke, C. Dine, P.E. Gautier, “A new French Method for Railway Noise Prediction”, *Internoise*, Nice, France, 2000.
- [135] EN 1793-3: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance - Part 3: Normalized traffic noise spectrum, 1997.
- [136] V. Cerezo, “Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique”, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005.

- [137] P. Glé , E. Gourdon, L. Arnaud, “Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity”, *Applied Acoustics*, vol. 71, pp. 249-259, 2011.
- [138] http://www.maccaferri.fr/biblio/media/10_biblio.pdf
- [139] R. Josse. “Notions d’acoustiques à l’usage des architectes ingénieurs urbanistes. Eyrolles, Paris, 1977.
- [139] B.C. Gupta, Z. Ye, “Theoretical analysis of the focusing of acoustic waves by two-dimensional sonic crystals”, *Phys. Rev. E*, vol. 67, 036603, 2003.
- [140] D. Duhamel, “Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier”. *J. Sound Vib.*, vol. 197, pp. 547-571, 1996.
- [141] P. Jean, J. Defrance, Y. Gabillet, “The importance of source type on the assessment of noise barriers”. *J. Sound Vib.*, vol. 226, pp. 201-216, 1999.
- [142] S.N. Chandler-Wilde, D.C. Hothersall, “Efficient calculation of the green function for acoustic propagation above a homogeneous impedance plane”. *J. Sound Vib.*, vol. 180, pp. 705-724, 1995.

Références personnelles

Revue internationale

F. Koussa, J. Defrance, P. Jean, P. Blanc-Benon, “Acoustic performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches”, Applied Acoustics, vol. 74, pp. 189-197, 2013.

F. Koussa, J. Defrance, P. Jean, P. Blanc-Benon, “Acoustical efficiency of innovative sonic crystal assisted noise barriers”, Soumis à Acta Acustica united with Acustica, 2012.

Congrès internationaux

F. Koussa, J. Defrance, P. Jean, P. Blanc-Benon, “Transport noise reduction by low height sonic crystal noise barriers”, Acoustics 2012, Nantes, France.

F. Koussa, J. Defrance, P. Jean, P. Blanc-Benon, “Optimization of low height sonic crystal noise barriers for tramway noise reduction”, Euronoise, Prague, Czech Republic, 2012.

J. Defrance, S. Lallement, P. Jean, F. Koussa, “Acoustical performance of complex-shaped earth berms”, Acoustics 2012, Nantes, France.

F. Koussa, J. Defrance, P. Jean, P. Blanc-Benon, “Efficiency of gabions noise barriers: theoretical approach and scale model measurements”, Forum Acusticum, Aalborg, Denmark, 2011.

ANNEXES

Sommaire

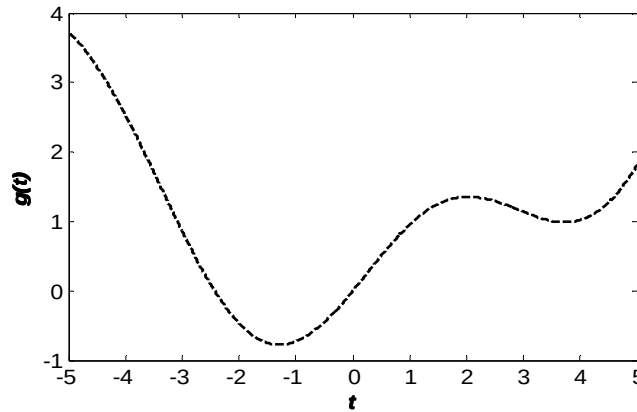
Annexe A : Validation de l'algorithme d'optimisation	177
Annexe B : Réponses impulsionnelles obtenues avec la nouvelle méthode de mesure in-situ.....	179
Annexe C : Code de calcul BEM : MICADO.....	183
Annexe D : Étude de convergence des simulations numériques d'écrans acoustiques en gabions	187

Annexe A : Validation de l'algorithme d'optimisation

Dans cette section, nous étudions différentes fonctions numériques simples dont les temps de calculs sont très faibles, en calculant dans un premier temps le résultat en chaque point du domaine d'étude puis en utilisant dans un deuxième temps l'outil d'optimisation pour plusieurs cas. On effectue à chaque fois une minimisation de la fonction coût. On donne dans les tableaux les résultats obtenus par l'algorithme d'optimisation. On montre l'intérêt de l'optimisation par rapport à une étude totale du domaine par comparaison des nombres d'évaluation de la fonction coût. Le gain en temps de calcul pour ces fonctions dont l'évaluation est très rapide n'est pas considérable. Par contre, dans le cas des écrans acoustiques, l'évaluation de la fonction coût peut durer jusqu'à plusieurs minutes ou plusieurs heures, le gain en temps de calcul dans ce cas est très important. Les résultats montrent que l'algorithme d'optimisation développé permet une bonne recherche de l'optimum global.

a) Fonction simple à un paramètre :

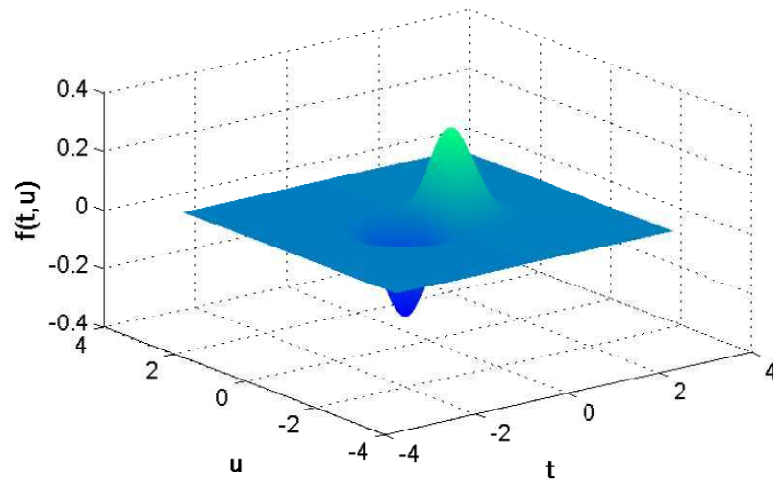
$$g(t) = \sin(t) + t^2 / 9, \text{ où } t \in [-5; 5], \Delta t = 0.01 \quad (\text{A.1})$$



Méthode	Paramètre optimal t	Valeur minimum de g(t)	Nombre d'évaluations de g(t)
Recherche exacte de la totalité du domai- ne	-1,28	-0,77	1001
Algorithme génétique (100 éléments par population)	-1,29	-0,77	300

b) Fonction simple à deux paramètres :

$$f(t, u) = t.e^{-2t^2-3u^2}, \text{ où } t \in [-3; 3], u \in [-3; 3], \Delta t = 0.01 \quad (\text{A.2})$$



Méthode	Paramètres optimaux t; u	Valeur minimum de f(t)	Nombre d'évaluations de f(t)
Recherche exacte de la totalité du domai- ne	-0,50; 0,00	-0,3	361201
Algorithme génétique (100 éléments par population)	-0,51; 0,01	-0,3	660

Annexe B : Réponses impulsionnelles obtenues avec la nouvelle méthode de mesure in-situ

Nous présentons dans cette annexe les différentes réponses impulsionnelles obtenues pour les mesures en réflexion en en transmission selon la nouvelle méthode de mesure in-situ proposée dans cette thèse et présentée dans la section 2.1.2.

• Mesures en réflexion

La configuration géométrique utilisée pour les mesures en réflexion est présentée en figure B.1. En figure B.2, nous présentons les réponses impulsionnelles obtenues pour la configuration en présence de l'écran en gabions (à droite) et celles obtenues pour la configuration de référence (à gauche) pour les cinq points récepteurs.

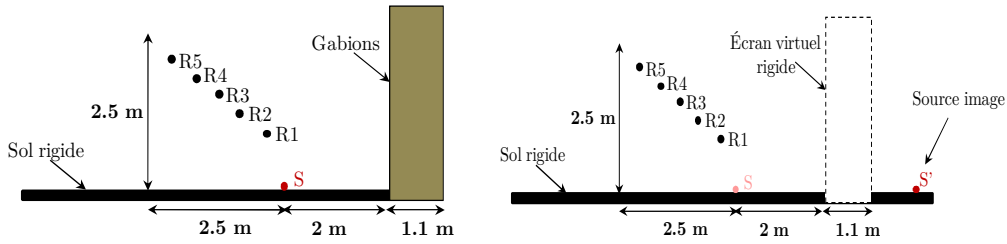
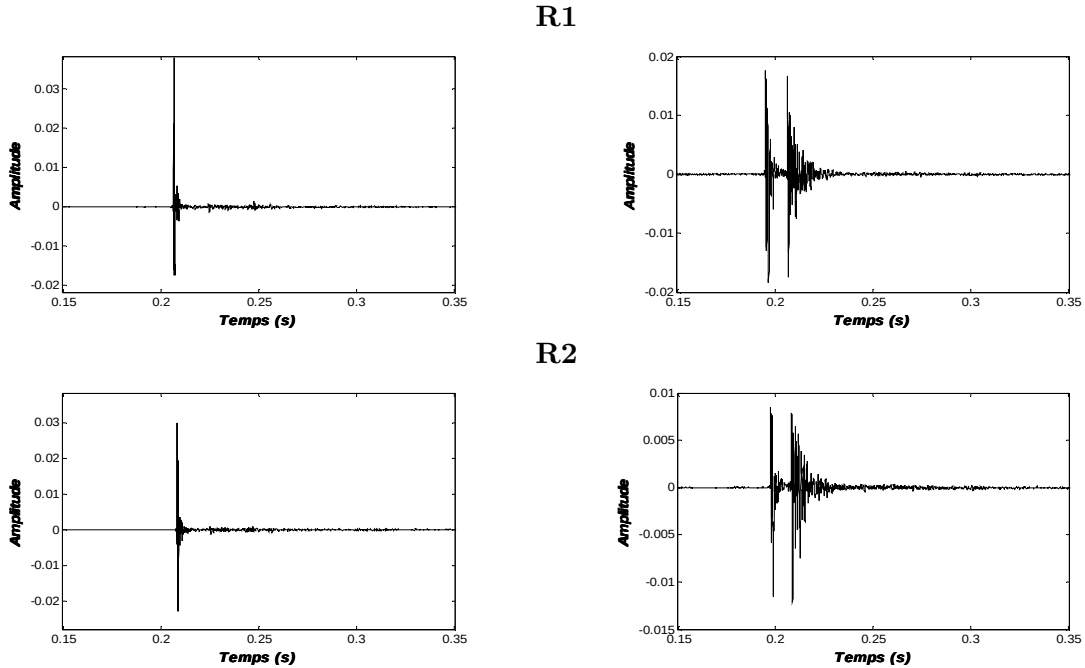


Figure B.1. Nouveau dispositif expérimental de mesure de la perte par réflexion des gabions antibruit. À gauche : configuration en présence de l'écran en gabions ; à droite : configuration de référence.



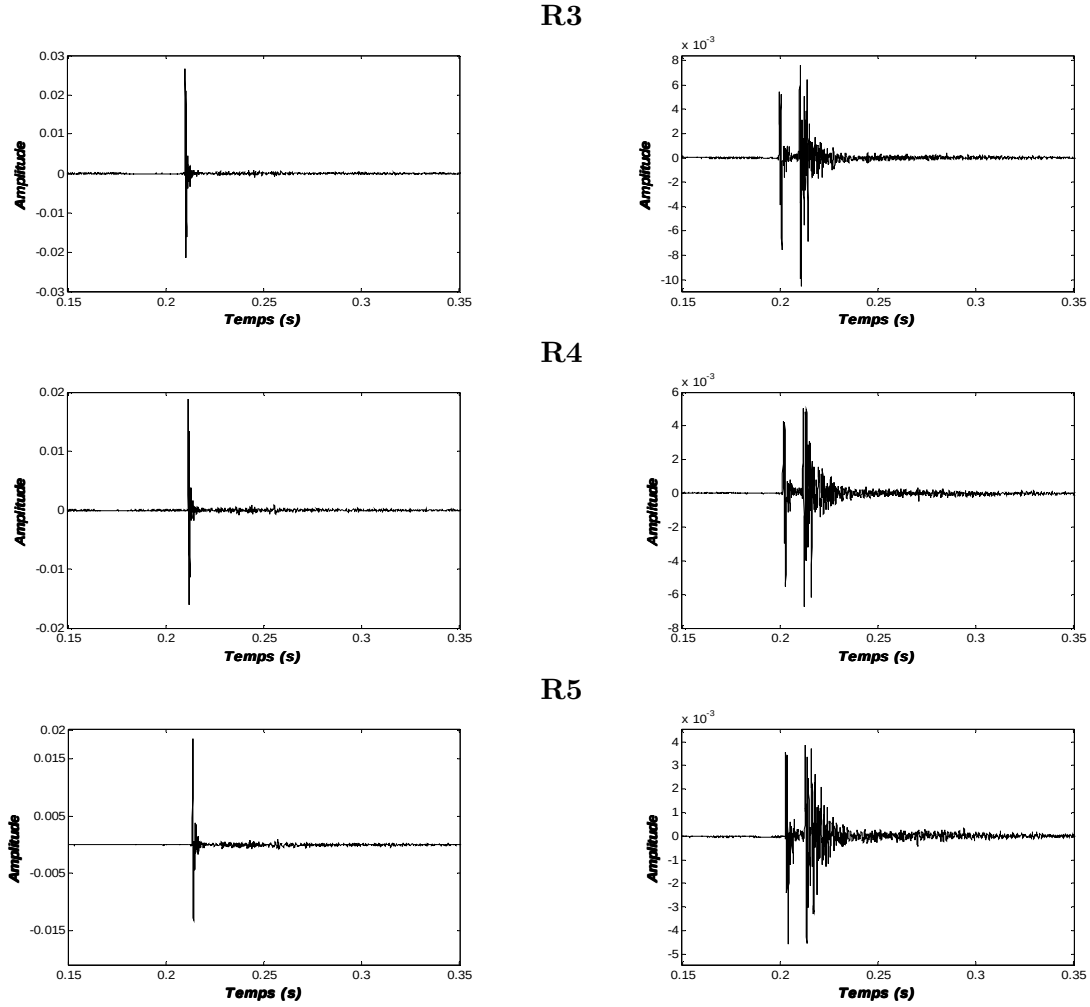


Figure B.2. Mesures en réflexion : réponses impulsionnelles obtenues pour la configuration en présence de l'écran en gabions (à gauche) et celles obtenues pour la configuration de référence (à droite) pour les cinq points récepteurs.

• Mesures en transmission

La configuration géométrique utilisée pour les mesures en transmission est présentée en figure B.3. En figure B.4, nous présentons les réponses impulsionnelles obtenues pour la configuration en présence de l'écran en gabions (à droite) et celles obtenues pour la configuration de référence (à gauche) pour les cinq points récepteurs.

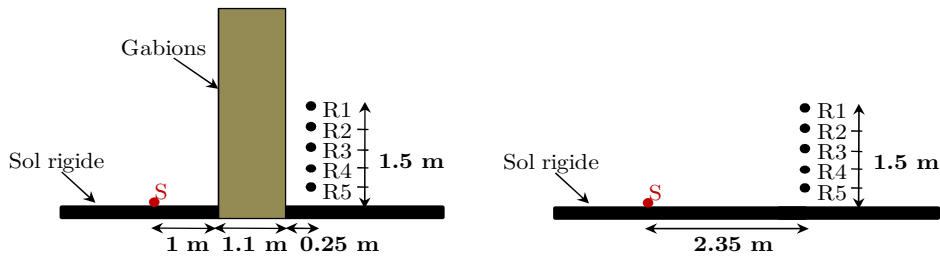


Figure B.3. Nouveau dispositif expérimental de mesure de la perte par transmission des gabions anti-bruit. À gauche : configuration en présence de l'écran en gabions ; à droite : configuration de référence.

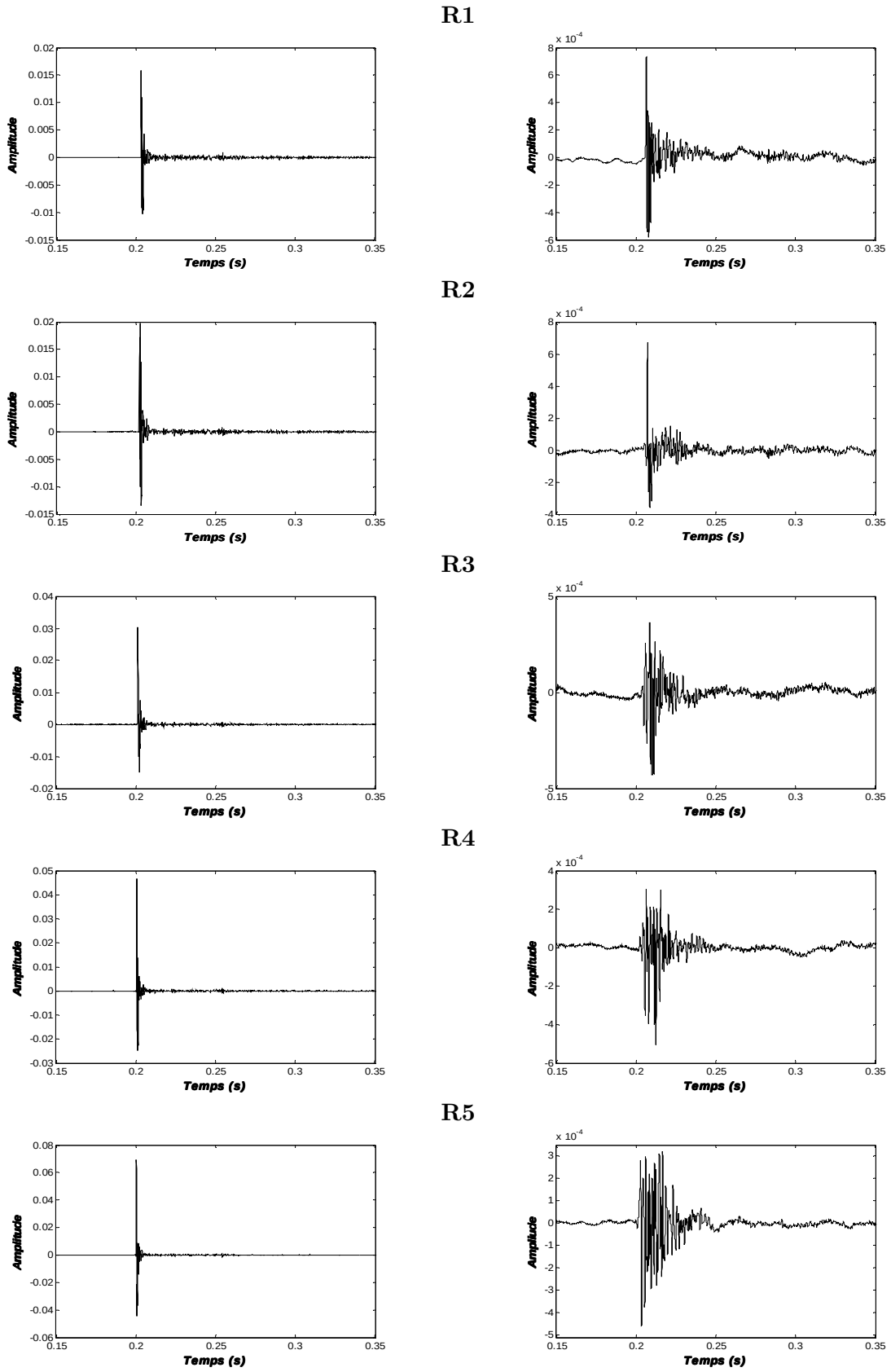


Figure B.4. Mesures en transmission : réponses impulsionnelles obtenues pour la configuration en présence de l'écran en gabions (à gauche) et celles obtenues pour la configuration de référence (à droite) pour les cinq points récepteurs.

Annexe C : Code de calcul BEM : MICADO

C.1. Présentation du code

Le code MICADO (Méthode Intégrale pour le Calcul Acoustique de la Diffraction par les Obstacles) est un code d'éléments finis de frontière s'appuyant sur une formulation directe dont la résolution est basée sur un formalisme variationnel en 2D [127]. Le travail de Chandler-Wilde et Hothersall [142] pour le calcul des frontières de Green avec d'un sol impédant est intégré dans le code de calcul. Le code permet donc de mailler uniquement la partie du domaine où il y a des conditions aux limites, car le reste du problème est contenu dans la fonction de Green correspondante. Ainsi pour le cas d'un écran posé sur un sol rigide, uniquement l'écran sera maillé. Si le sol comporte une partie finie d'impédance non nulle, seule la partie absorbante du sol sera maillée. La prise en compte de sources ponctuelles et de lignes de sources decorréliées est possible dans le code selon l'approche $2D\frac{1}{2}$ de Duhamel [140]. Le code permet donc d'effectuer des calculs pour des configurations différentes :

- sans sol ou avec sol plan rigide ou impédant,
- avec ou sans obstacle, représenté par un ensemble de segments, chacun ayant sa propre impédance,
- une ou plusieurs sources cohérentes ou incohérentes entre elles,
- un ou plusieurs récepteurs.

C.2. Paramètres de calcul

Paramètres généraux :

- La condition de sol : il peut y avoir absence de sol ou un sol rigide ou un sol impédant.
- L'absorption atmosphérique : prise en compte ou non.
- La masse volumique du fluide où le son se propage (en Kg/m^3).
- La célérité du son dans le fluide (en m/s).
- La ou les fréquences de calcul : le calcul peut être effectué à une fréquence donnée ou à un peigne de fréquences. Dans ce cas il est conseillé d'effectuer le calcul avec un spectre en tiers d'octave (nombre de fréquences N_f par tiers d'octave). C'est à dire pour chaque bande de tiers d'octave, il faut entrer les fréquences centrales extrêmes et le nombre de fréquence par bande. Ce dernier paramètre est important pour la convergence de la solution.
- Le type de spécification de l'impédance des matériaux. L'impédance d'un matériau peut être définie de plusieurs manières :
 - par son coefficient de réflexion normal (complexe),
 - par son coefficient d'absorption normal (alpha sabine, compris entre 0 et 1),
 - par son impédance normalisée.
- Nombre de milieux.

- Type de milieu (solide, fluide, poreux).

Génération de la géométrie et des revêtements :

- Le facteur d'échelle.
- Le nombre de segments.
- La géométrie de l'obstacle (écran, merlon,...) est définie par segments (les arcs de cercles sont une suite de segments). A chaque segment il faut affecter son impédance et les critères de maillage (nombre de mailles par longueur d'onde SITE.T1 et nombre minimum de mailles par élément SITE.T2), l'enchaînement de segment définissant la géométrie doit être tel que la normale soit entrante dans le fluide.

Construction de la matrice :

- Nombre de points de Gauss nécessaire au calcul de la matrice MATR.NG.

Construction du second membre (sources) :

- Nombre de points de Gauss SOUR.NG.
- Nombre de sources ponctuelles (cohérentes entre elles) ou de groupes de sources (incohérentes entre elles).
- Position de chaque source avec son amplitude et sa phase.

Calcul du champ de pression à partir de la solution (récepteurs) :

- Choix de la quantité gardée dans le fichier résultat entre : Ptot (Pression totale), Plib (Pression en champs libre), Psol (Pression avec le sol mais sans l'obstacle), Pray (contribution de l'obstacle), Ptot/Psol (perte par insertion), Ptot/Plib (atténuation excédentaire), Psol/Plib.
- Nombre de points de Gauss PRES.NG.
- Nombre de points récepteurs.
- Pour chaque point : son numéro et ses coordonnées.

Pour les protections en gabions (chapitre 3), les valeurs des principaux paramètres sont :

- SITE.T1 = 3
- SITE.T2 = 8
- SOUR.NG = 9
- MATR.NG =
 - 5 pour des segments qui n'ont pas de segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins.
 - 15 pour des segments qui ont un segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins.
- PRES.NG = 3
- Nf = 20

Concernant les protections en cristaux soniques (chapitre 4), les valeurs des principaux paramètres sont :

- SITE.T1 = 3
- SITE.T2 = 12
- SOUR.NG = 9
- MATR.NG =
 - 5 pour des segments qui n'ont pas de segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins.
 - 15 pour des segments qui ont un segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins.
- PRES.NG = 3
- Nf = 20

Pour les merlons acoustiques (chapitre 5), les valeurs des principaux paramètres sont :

- SITE.T1 = 3
- SITE.T2 = 5
- SOUR.NG = 9
- MATR.NG =
 - 5 pour des segments qui n'ont pas de segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins.
 - 15 pour des segments qui ont un segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins.
- PRES.NG = 3
- Nf = 15

Annexe D : Étude de convergence des simulations numériques d'écrans acoustiques en gabions

L'objectif de cette étude est de trouver des valeurs aux paramètres numériques afin d'obtenir un compromis acceptable entre la précision et le temps du calcul dans le cas des écrans acoustiques en gabions présentés dans la section 3.2. L'écran en gabions étudié dans cette annexe est présenté en figure C.1. Il est constitué d'une distribution aléatoire des cailloux. La configuration géométrique utilisée pour les tests de convergence est présentée en figure C.2.

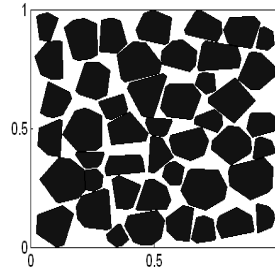


Figure C.1. Écran acoustique en gabions étudié.

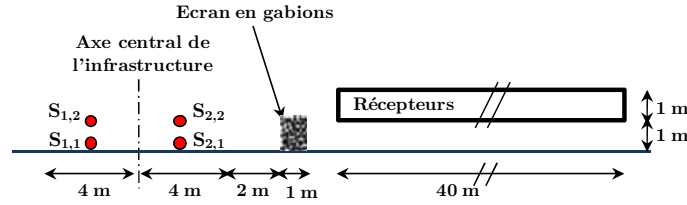


Figure C.2. Configuration géométrique utilisée pour les tests de convergence.

Nous présenterons les résultats de convergence pour deux paramètres numériques importants du modèle. Ce sont le nombre de points de Gauss NG utilisés pour le calcul de la matrice et le nombre de fréquences Nf par tiers d'octave. Dans cette étude, nous supposons que les paramètres du modèle ont une influence indépendante sur le résultat. On étudie donc la variation des résultats en faisant varier un seul paramètre à la fois. Pour étudier la variation des résultats en fonction d'un paramètre, on augmente la valeur de ce paramètre jusqu'à la convergence des résultats. Cette convergence est atteinte si les résultats ne varient pas au-dessus d'une certaine valeur du paramètre (valeur maximale). Pour réduire le temps de calcul, on retient enfin la valeur du paramètre pour laquelle la différence entre l'efficacité globale pour cette valeur et l'efficacité globale pour la valeur maximale est inférieure ou égale à 0.1 dB(A). Il est à noter que la valeur de NG est variée pour les éléments qui ont un segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins. Pour des éléments qui n'ont pas de segment en vis-à-vis à 5 cm ou moins, une valeur suffisante de NG est fixée à 5.

Nous présentons en figure C.2, les spectres de la perte par insertion obtenues pour quatre valeurs de NG et de Nf dans la région de récepteurs. Le temps de calcul et la valeur de la

perte par insertion globale en dB(A) sont donnés dans le tableau C.1 pour les quatre valeurs de NG et de Nf . A partir de cette étude de convergence, nous concluons que 15 points de Gauss et 20 fréquence par tiers d'octave sont suffisants pour obtenir un compromis entre la précision et le temps de calcul.

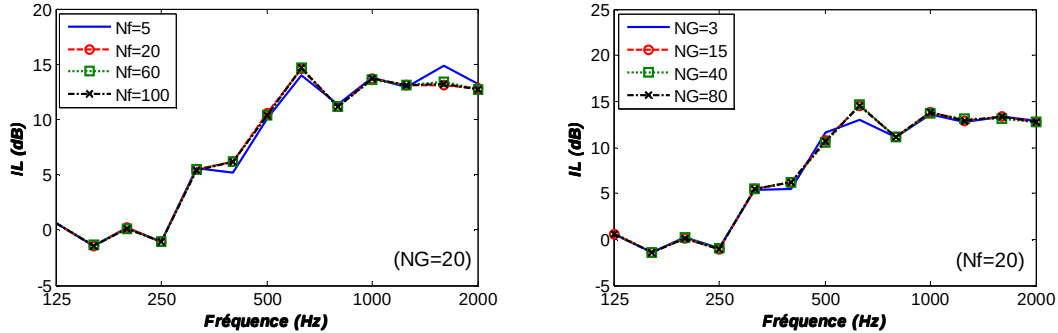


Figure C.1. Variation du spectre de la perte par insertion de l'écran acoustique en gabions en fonction du nombre des points de Gauss NG (graphique de droite) et en fonction du nombre des fréquences par tiers d'octave (graphique de gauche).

Nf	5	20	60	100
Temps de calcul en minutes	1,6	35,5	119,3	142,1
IL en dB(A)	9,2	9,7	9,8	9,8
NG	5	20	40	80
Temps de calcul en minutes	8,9	35,5	51	65
IL en dB(A)	9,3	9,7	9,8	9,8

Tableau C.1. Influence de NG et Nf sur le temps de calcul et sur l'efficacité globale en dB(A) de l'écran en gabions.

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 7 août 2006,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Monsieur Ph. BLANC-BENON

et les rapports de

Monsieur K. ATTENBOROUGH
Professeur - 18 Milebush -Leighton Buzzard - Bedfordshire - LU7 2UB - Royaume-Uni

Et de

Monsieur D. DUHAMEL
Professeur - ENPC - Laboratoire Navier UMR 8205 - 6 et 8 avenue Blaise Pascal - Cité Descartes -
Champs-sur-Marne - 77455 MARNE LA VALLEE cedex 2

Monsieur KOUSSA Faouzi

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL ET ACOUSTIQUE

Fait à Ecully, le 18 septembre 2012

P/Le directeur de l'E.C.L.
La directrice des Etudes

