



**HAL**  
open science

# Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe

Marine Baulac

► **To cite this version:**

Marine Baulac. Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe. Acoustique [physics.class-ph]. Université du Maine, 2006. Français. NNT: . tel-00415879

**HAL Id: tel-00415879**

**<https://theses.hal.science/tel-00415879>**

Submitted on 11 Sep 2009

**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.

Académie de Nantes  
THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DU MAINE  
LE MANS, FRANCE

Spécialité  
ACOUSTIQUE

---

Optimisation des Protections Anti-bruit  
Routières de Forme Complexe

---

présentée par  
Marine BAULAC

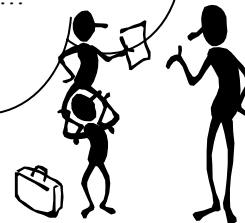
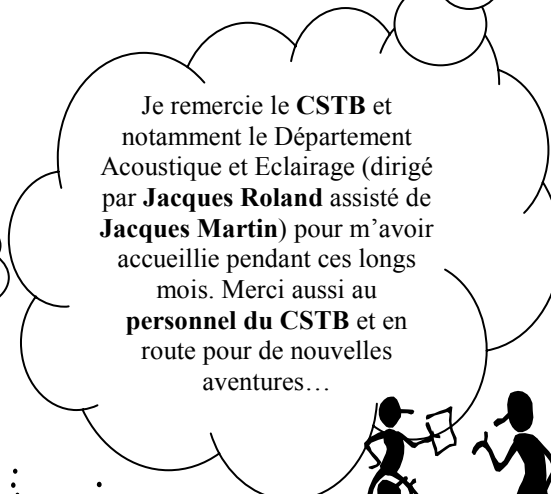
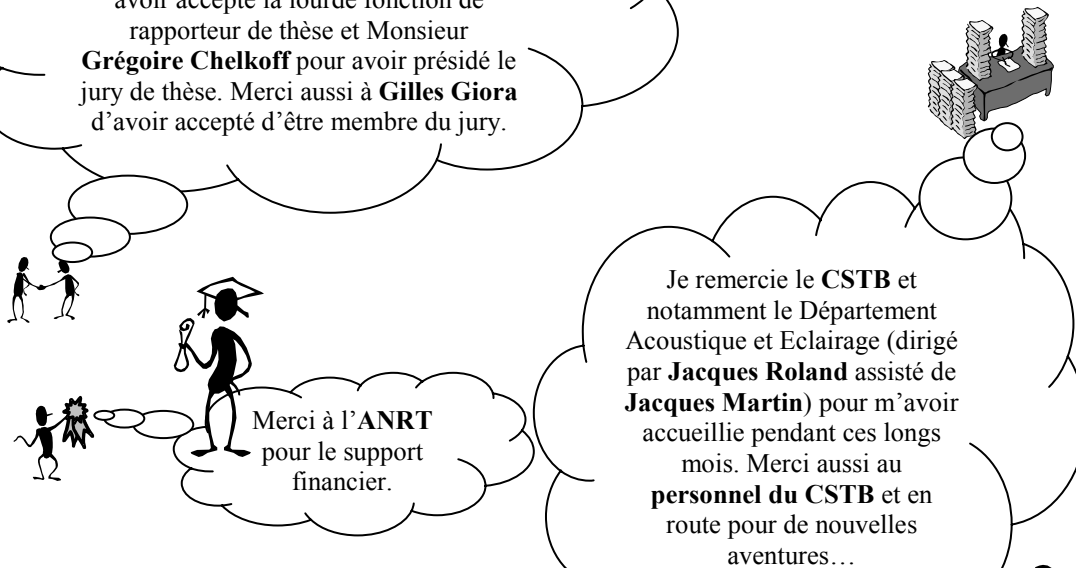
Pour l'obtention du grade de  
Docteur de l'Université du Maine

Soutenue le 12 octobre 2006 devant le jury composé de :

<b>M. Grégoire CHELKOFF</b>	Président du jury	<i>Professeur (ENSAG, Grenoble)</i>
<b>M. Jérôme DEFRANCE</b>	Responsable de thèse	<i>Docteur Ingénieur (CSTB, Grenoble)</i>
<b>M. Claude DEPOLLIER</b>	Directeur de thèse	<i>Professeur (LAUM, Le Mans)</i>
<b>M. Denis DUHAMEL</b>	Rapporteur	<i>Professeur (ENPC - LAMI, Marne La Vallée)</i>
<b>M. Gilles GIORA</b>	Examineur	<i>Ingénieur (IDETEC Environnement, Massy)</i>
<b>M. Franck SGARD</b>	Rapporteur	<i>Docteur HDR (ENTPE - LASH, Vaulx-en-Velin)</i>



# Remerciements





# Résumé

En ce début de 21<sup>e</sup> siècle, le bruit est l'une des principales nuisances, en particulier le bruit issu des transports. Un moyen de protéger le riverain du bruit de la circulation est de placer des écrans anti-bruit le long des grandes voies routières ou ferroviaires. Un important travail a été réalisé par les acousticiens afin d'améliorer l'efficacité de ces écrans acoustiques tout en évitant une dégradation du paysage trop brutale.

Actuellement, les choix des protections anti-bruit se portent souvent sur des solutions triviales (écran droit, écran incliné, écrans absorbants, ...) ou sont effectuées à partir de comparaisons de quelques variantes a priori intéressantes. Or le CSTB possède un certain nombre de codes de calculs numériques avancés dédiés à la simulation de la propagation acoustique en milieu extérieur. Le but de cette thèse est de coupler ces compétences prévisionnelles avec un outil mathématique à développer permettant une véritable optimisation multicritères qui conduise à des solutions optimales.

Une recherche bibliographique a permis de dégager plusieurs algorithmes applicables au cas de l'optimisation de certains paramètres caractérisant un écran acoustique, en particulier des paramètres géométriques. Ces méthodes ont été appliquées avec succès aux écrans dits multi-diffracteurs. Des méthodes d'optimisation multiobjectif ont en outre permis d'optimiser simultanément le prix de revient de la protection et son efficacité acoustique. L'outil d'optimisation a également été appliqué au cas des écrans avec des couronnements à surface réactive. Dans une optique plus liée au développement durable et à l'amélioration de la qualité de vie des citoyens, un travail a été réalisé sur l'efficacité de protections acoustiques de faible hauteur en milieu urbain dans le but de créer des espaces calmes. Des mesures sur modèles réduits ont été confrontées aux simulations acoustiques et l'optimisation de la forme de ces protections a permis de dégager des solutions optimales. Enfin, les méthodes d'optimisation ont été appliquées à la problématique de l'optimisation de trajectoires, en milieu homogène et inhomogène.

Les principaux objectifs de la thèse ont bien été atteints, notamment par le développement d'un outil complet utilisant des algorithmes d'optimisation (Algorithme de Nelder Mead et Algorithmes Génétiques) ainsi que les codes de calculs de simulation de la propagation acoustique en milieu extérieur développés au CSTB.



# Abstract

Nowadays, noise is one of the main bother in people's mind, especially transportation noise. Building noise barriers along motorways and railways is one of the existing solutions to protect inhabitants from noise. Acousticians have worked a lot to increase the acoustical efficiency of such barriers without worsening the landscape.

Currently, noise barriers proposed are mainly classical ones like straight barriers, angled barriers, absorptive barriers. Moreover, some various other kinds of barriers can be anticipated from parametric studies. However, CSTB developed advanced numerical codes which allow to simulate the outdoor sound propagation. The aim of this thesis is to combine the simulating codes with optimization algorithms in order to carry out a true systematic research and to find optimal solutions.

Optimizations methods have been studied and a couple of them chosen to be applied to the optimization of parameters determining noise barriers, especially geometrical parameters. First, they have been successfully applied to multiple edge noise barriers. Moreover, some multiobjective optimization methods have been implemented in order to optimize both the acoustical efficiency and the cost of the protection. A sustainable development approach concerning urban areas has lead to consider low height noise protections in order to improve the environmental quality of life and to create quiet areas. Scale measurements have been performed and compared with simulations. Finally, optimization methods have been applied to low height noise protection to optimize their shape; optimal solutions have been found. Lastly, the optimization tool has been used to optimize trajectories in homogeneous and inhomogeneous mediums.

Main objectives of this PhD thesis have been reached, especially by developing an original tool using optimisation methods (Nelder Mead algorithm and Genetic Algorithms) and numerical codes simulating outdoor sound propagation.





# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>ix</b>
<b>Chapitre 1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 2. Propagation acoustique en milieu extérieur</b> .....	<b>5</b>
2.1. <i>Principes et équations régissant l'acoustique en milieu extérieur</i> .....	6
2.1.1. La divergence géométrique.....	6
2.1.2. L'absorption atmosphérique .....	6
2.1.3. La réflexion sur les parois.....	6
2.1.4. Absorption par les matériaux .....	7
2.1.5. L'effet de sol .....	8
2.1.6. La diffraction .....	8
2.1.7. Les effets météorologiques .....	9
2.1.8. La pression acoustique au récepteur .....	9
2.2. <i>Les protections anti-bruit routières de forme complexe</i> .....	10
2.2.1. Généralités sur les écrans anti-bruit.....	10
2.2.2. Les couronnements d'écran .....	11
2.3. <i>Méthodes de résolution de l'équation d'onde</i> .....	13
2.3.1. Méthodes géométriques .....	13
2.3.2. Méthodes numériques .....	14
2.3.2.1. La méthode des éléments de frontière .....	14
2.3.2.2. La méthode de l'équation parabolique .....	16
2.4. <i>Conclusion du chapitre</i> .....	17
<b>Chapitre 3. Les méthodes d'optimisation</b> .....	<b>19</b>
3.1. <i>Définitions liées à un problème d'optimisation</i> .....	20
3.2. <i>Bibliographie et état de l'art des méthodes d'optimisation directes</i> .....	21
3.2.1. Monte Carlo .....	21
3.2.2. Le recuit simulé .....	21
3.2.3. La recherche Tabou .....	22
3.2.4. Méthode de la descente.....	22
3.2.5. Les Algorithmes Evolutionnaires .....	22
3.2.5.1. Les algorithmes génétiques .....	23
3.2.5.2. La programmation évolutionnaire .....	25
3.2.5.3. Les stratégies évolutionnaires .....	25
3.2.6. Algorithme de Nelder Mead ou algorithme du simplexe .....	26
3.2.6.1. Présentation de l'algorithme de Nelder Mead initial.....	26
3.2.6.2. Description d'une itération de l'algorithme.....	27

3.3.	<i>L'optimisation multiobjectif</i> .....	29
3.3.1.	Méthodes agrégées .....	30
3.3.2.	Méthodes Pareto .....	30
3.4.	<i>Choix de la méthode d'optimisation</i> .....	31
3.4.1.	Optimisation mono-objectif .....	31
3.4.2.	Optimisation multiobjectif .....	32
3.5.	<i>Création d'un outil d'optimisation sous Matlab</i> .....	33
3.6.	<i>Conclusion du chapitre</i> .....	33
<b>Chapitre 4. Optimisation d'écrans anti-bruit multi-diffracteurs .....</b>		<b>35</b>
4.1.	<i>Introduction</i> .....	37
4.2.	<i>The Boundary Element Method</i> .....	37
4.3.	<i>Optimization Algorithms</i> .....	39
4.3.1.	The choice of an optimization method .....	39
4.3.2.	Description of the algorithm of local search: The Nelder Mead Algorithm .....	40
4.3.3.	Modifications of the method .....	41
4.4.	<i>Problem And Geometry</i> .....	43
4.4.1.	Previous studies .....	43
4.4.2.	Geometry and cost function to optimize .....	44
4.4.2.1.	Sources .....	45
4.4.2.2.	Receivers .....	46
4.4.2.3.	Cost function .....	47
4.5.	<i>Results And Discussion</i> .....	48
4.5.1.	Optimization in dB(A) for multiple edge crowning .....	48
4.5.1.1.	One-parameter optimization .....	48
4.5.1.2.	Two-parameter optimization .....	48
4.5.1.3.	Three-parameter optimization .....	50
4.5.1.4.	Four-parameter optimization .....	50
4.5.2.	Influence of Sound power spectrum .....	50
4.5.3.	Global comparison .....	52
4.6.	<i>Conclusion</i> .....	55
4.7.	<i>Autres types d'écrans multi-diffracteurs</i> .....	56
4.8.	<i>Validation de l'outil d'optimisation</i> .....	57
4.8.1.	Cas de l'optimisation à un paramètre .....	57
4.8.2.	Cas de l'optimisation à deux paramètres.....	58
4.9.	<i>Optimisation multiobjectif</i> .....	60
4.9.1.	Modélisation du prix de revient d'une protection .....	60
4.9.2.	Optimisation avec les méthode agrégées .....	61
4.9.3.	Optimisation avec les méthodes évolutionnaires Pareto .....	62
4.9.4.	Conclusion.....	64
4.10.	<i>Conclusion du chapitre</i> .....	65

<b>Chapitre 5. Optimisation d'écrans avec couronnement à surface réactive.....</b>	<b>67</b>
5.1. <i>Introduction.....</i>	68
5.2. <i>Acoustic simulations with a Boundary Element Method.....</i>	68
5.3. <i>Optimization method: Genetic Algorithms.....</i>	69
5.4. <i>Statement of the problem.....</i>	70
5.4.1. Existing results on T-shaped and reactive barriers.....	70
5.4.2. Sources.....	71
5.4.3. Geometry of the noise barrier.....	71
5.4.4. Cost function and receivers.....	73
5.5. <i>Results and discussion.....</i>	74
5.5.1. Configuration with a single receiver.....	74
5.5.1.1. Optimization in each third octave band between 100 and 1250 Hz.....	76
5.5.1.2. Global optimization with absorptive materials.....	77
5.5.1.3. Global optimization with only rigid materials.....	79
5.5.1.4. Influence of the impedance.....	80
5.5.1.5. Optimization of both depths and impedance.....	80
5.5.1.6. Influence of the road traffic noise spectrum.....	81
5.5.2. Configuration with a grid of receivers: Global optimization.....	81
5.6. <i>Conclusion.....</i>	82
5.7. <i>Conclusion du chapitre.....</i>	83
<b>Chapitre 6. Optimisation de protections acoustiques de faible hauteur en milieu urbain.....</b>	<b>85</b>
6.1. <i>Introduction.....</i>	87
6.2. <i>Statement of the problem.....</i>	87
6.2.1. Geometry.....	88
6.2.2. Cost function.....	89
6.3. <i>The Numerical Simulations.....</i>	90
6.3.1. The Boundary Element Method.....	90
6.3.2. The Numerical Results.....	91
6.3.2.1. Effectiveness of low height protectors as a function of frequency.....	91
6.3.2.2. Global effectiveness in dB(A) of low height noise protectors.....	97
6.4. <i>The Experimental Simulations.....</i>	99
6.4.1. Experimental set up.....	99
6.4.2. Experimental Results.....	102
6.5. <i>Conclusion.....</i>	108
6.6. <i>Application de l'outil d'optimisation à la problématique des protections de faible hauteur.....</i>	109
6.6.1. Position du problème.....	109
6.6.2. Méthodes utilisées.....	111
6.6.2.1. Méthode de création de forme.....	111
6.6.2.2. Méthode d'optimisation.....	114

6.6.3. Résultats préliminaires .....	114
6.6.4. Résultats de l'optimisation .....	116
6.6.4.1. Algorithme génétique et opérateurs.....	116
6.6.4.2. Application de l'algorithme génétique au cas des protection de faible hauteur en milieu urbain .....	120
6.6.5. Conclusion sur l'optimisation .....	122
6.7. Conclusion du chapitre .....	123
<b>Chapitre 7. Optimisation de trajectoires.....</b>	<b>125</b>
7.1. Définitions et méthodes utilisées .....	126
7.1.1. Définition d'une scène et nomenclature des figures de résultats .....	126
7.1.2. Hypothèses de calcul .....	127
7.1.3. Définition de la trajectoire.....	127
7.1.3.1. Trajectoire à deux paramètres.....	127
7.1.3.2. Trajectoire à quatre paramètres .....	128
7.1.4. Définition de la fonction coût.....	128
7.1.5. Méthodes utilisées .....	129
7.2. Etude dans le cas homogène .....	130
7.2.1. Cas simple .....	130
7.2.2. Intérêt de l'optimisation .....	132
7.2.3. Comparaison entre les 3 méthodes de simulations de la propagation acoustique .....	133
7.3. Etude dans le cas d'un vent.....	134
7.3.1. Cas simple et comparaison avec les résultats en milieu homogène .....	134
7.3.2. Autres résultats .....	136
7.4. Etude dans le cas d'une discontinuité d'impédance.....	137
7.5. Etude dans le cas d'un écran longeant la trajectoire.....	139
7.6. Conclusion du chapitre .....	141
<b>Chapitre 8. Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>143</b>
8.1. Conclusions générales.....	143
8.2. Perspectives.....	144
<b>Références .....</b>	<b>147</b>
<b>Références personnelles .....</b>	<b>157</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>159</b>
Annexe A. Outil final d'optimisation.....	161
Annexe B. Validation de l'outil d'optimisation .....	171

# Liste des figures

Figure 2.1	Diffraction par un écran droit vue de côté. Différence de marche : $\delta = a + b - d$ avec a la distance source-arrête de l'écran, b la distance arrête de l'écran-récepteur et d la distance source-récepteur en champ libre. ....	9
Figure 2.2	Ecran anti bruit droit en béton de bois absorbant, Fabriquant : CAPREMIB .....	10
Figure 2.3	Ecran anti bruit partiellement incliné transparent en PLEXIGLAS® installé sur l'A14 en Normandie, Concepteur : IB TRADING .....	11
Figure 2.4	Couronnements les plus courants en France [35, 36] .....	12
Figure 2.5	Écran avec couronnement cylindrique absorbant installé sur la RN 184 à Eragny.....	12
Figure 2.6	Ecran avec couronnement en Té installé à Roanne.....	12
Figure 2.7	Principe des méthodes géométriques dans le cas d'un sol impédant .....	13
Figure 2.8	Schéma général pour l'établissement de l'équation de Helmholtz.....	15
Figure 3.1	Schéma de principe d'un algorithme génétique .....	23
Figure 3.2	Les différentes étapes de l'algorithme de Nelder Mead pour un problème 2D.....	27
Figure 3.3	Description d'une itération de l'algorithme de Nelder Mead.....	28
Figure 3.4	Principe de l'optimisation multiobjectif .....	29
Figure 4.1	Notations for the Boundary Element Method .....	38
Figure 4.2	Geometrical configuration for 2D-BEM calculations.....	38
Figure 4.3	Principle of the globalization of the optimization.....	40
Figure 4.4	Main operators of Nelder Mead algorithm for a bi-dimensional problem.....	40
Figure 4.5	Principle of mutations (top diagram) and crossings (bottom diagram) with a binary code of variables .....	42
Figure 4.6	Principle of an evolutionary algorithm .....	42
Figure 4.7	The four parameters which can be optimized simultaneously: d, $\sigma$ , h and i. ....	44
Figure 4.8	Two configurations for a positive angle $i > 0$ or a negative angle $i < 0$ .....	45
Figure 4.9	Two kinds of source and receivers locations. Top graph: $d_s = 8$ or $15$ m; $d_r = 32$ m. Bottom graph: $d_s = 8$ m; grid of receivers: $d_r = 32$ or $100$ m; $h_r = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32$ m.....	46
Figure 4.10	Straight reference barrier (left) and multiple-edge crowned barrier (right) .....	47
Figure 4.11	Comparison of two different road traffic noise spectra Typical road noise spectrum from European standard EN1793-3:1997 (solid line) and road noise spectrum of Nord2000 method (dashed line).....	52
Figure 4.12	Influence of the number of optimized parameter. Efficiency of several optimization cases: (a) 1-parameter optimization (case 2); (b) 2-parameters optimization (case 8); (c) 3-parameters optimization (case 9); (d) 4-parameters optimization (case 11).....	53
Figure 4.13	Map of the efficiency of the multiple-edge crowned barrier with the four optimal parameters. $d=1.02$ m; $\sigma=10$ kPa.s.m <sup>-2</sup> ; $h=0.1$ m; $i=-23^\circ$ .....	54
Figure 4.14	Map of the efficiency of the multiple-edge crowned barrier with other parameters. $d=1.5$ m; $\sigma=300$ kPa.s.m <sup>-2</sup> ; $h=0.05$ m; $i=0^\circ$ .....	54
Figure 4.15	Map of the efficiency of a multiple-edge crowned barrier previously studied (absorptive materials on the central barrier and rigid lateral edges). $d=0.5$ m; $\sigma=20$ kPa.s.m <sup>-2</sup> ; $h=0.1$ m; $i=0^\circ$ .....	55
Figure 4.16	Optimisations liées à d'autres types d'écrans multi-diffracteurs .....	56
Figure 4.17	Opposé de l'efficacité d'un écran multi-diffracteur en fonction de la distance entre les baffles et l'écran central.....	58

Figure 4.18	Opposé de l'efficacité d'un écran multi-diffracteur en fonction de la distance entre les baffles et l'écran central et en fonction de l'inclinaison des baffles. ....	58
Figure 4.19	Opposé de l'efficacité d'un écran multi-diffracteur en fonction de la distance entre les baffles et l'écran central pour une inclinaison donnée (en haut) et en fonction de l'inclinaison pour une distance donnée (en bas). ....	59
Figure 4.20	Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode PAES. ....	64
Figure 5.1	Geometrical configuration for 2D -BEM calculations. ....	69
Figure 5.2	Principle of an evolutionary algorithm. ....	70
Figure 5.3	Single receiver configuration (top) and configuration with a grid of receivers (bottom)..	71
Figure 5.4	Configuration of the barrier to optimize with absorbing materials (on the left) and with only rigid materials (on the right) .....	72
Figure 5.5	Reference T-shaped barrier .....	72
Figure 5.6	Comparison of two different road traffic noise spectrums. Typical road noise spectrum from European standard EN1793-3:1997 (solid line) and road noise spectrum of Nord2000 method (dashed line).....	74
Figure 5.7	Comparison between a T-shaped barrier with a flat top surface (solid line) and four T-shaped barriers with a reactive top surface. ....	75
Figure 5.8	Optimal shapes in each third octave band for n=3 .....	75
Figure 5.9	Optimal shapes in each third octave band for n=5 .....	76
Figure 5.10	Optimal shapes in each third octave band for n=9 .....	77
Figure 5.11	Results for global optimization in the frequency range 100-2500 Hz.....	78
Figure 5.12	Global efficiency of the reactive barrier with n=5 compared with a flat top T-shaped barrier.....	78
Figure 5.13	Results for global optimization with only rigid materials in the frequency range 100-2500 Hz.....	79
Figure 5.14	Results for global optimization with a grid of receivers and with absorptive materials in the frequency range 100-2500 Hz .....	82
Figure 6.1	Global idea for low height absorbers .....	87
Figure 6.2	Geometrical configuration of the reference case and details of source locations.....	89
Figure 6.3	Road traffic noise spectrum according to EN1793-3:1997 standard [2] .....	90
Figure 6.4	Geometrical configurations considered for a single protector. Three kinds of material are considered: reflective material (solid line), grass-like material (dashed line) and absorbing material (mineral wool-like material, dotted line).....	92
Figure 6.5	Position of receivers R1, R2, R3 and R4.....	93
Figure 6.6	Efficiency of low height noise protections depending on the frequency for 4 receiver positions, and for a single protection configuration: straight protection (dotted line), T-shaped protection (dashed line) and Sigma-shaped protection (solid line). The four receiver positions are: R1 at d = 1 m and h = 1.5 m (top left graph), R2 at d = 3 m and h = 2 m (top right graph), R3 at d = 10 m and h = 2 m (bottom left graph) and R4 at d = 50 m and h = 2 m (bottom right graph).....	94
Figure 6.7	Geometrical configurations considered for two protections. ....	95
Figure 6.8	Efficiency of low height noise protections depending on the frequency for 4 receiver positions, and for a two protections configuration. For the four configurations, a Sigma-shaped protection is located on the right side pavement. The four central reservation configurations are: no protection (thin solid line), a straight protection (dotted line), an I-shaped protection (dashed line) and a the Z-shaped protection (thick solid line). The four receiver positions are: R1 at d = 1 m and h = 1.5 m (top left graph), R2 at d = 3 m and h = 2 m (top right graph), R3 at d = 10 m and h = 2 m (bottom left graph) and R4 at d = 50 m and h = 2 m (bottom right graph). ....	96
Figure 6.9	Details of the area studied for the noise maps.....	97

Figure 6.10	Configuration studied for the creation of noise maps .....	98
Figure 6.11	Insertion loss in dB(A) for a large area.....	98
Figure 6.12	Insertion loss in dB(A) for a zoomed area .....	98
Figure 6.13	Experimental set up of the scale model measurements.....	100
Figure 6.14	The I-shaped protection, the reference microphone and the Grozier spark .....	100
Figure 6.15	The T-shaped protection and the measurement microphone .....	101
Figure 6.16	Preliminary calculation on a rigid ground for validation .....	101
Figure 6.17	Reference configuration for scale measurements (axes are at a scale 1:10) .....	102
Figure 6.18	Scale measurement configuration for case 1: only a straight protection.....	103
Figure 6.19	Results for R1 of scale model measurements for configuration “case 1”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations. ....	103
Figure 6.20	Scale measurement configuration for case 2: only a T-shaped protection.....	104
Figure 6.21	Results for R1 of scale model measurements for configuration “case 2”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations. ....	104
Figure 6.22	Results for R2 of scale model measurements for configuration “case 2”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations. ....	105
Figure 6.23	Scale measurement configuration for case 3: two protections, a T-shaped protection on the pavement and a I-shaped protection on the central reservation .....	106
Figure 6.24	Results for R1 of scale model measurements for configuration “case 3”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations. ....	106
Figure 6.25	Results for R2 of scale model measurements for configuration “case 3”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations. ....	107
Figure 6.26	Configuration source récepteur pour les optimisations dans le cas des protections de faible hauteur. (• : sources, × : récepteurs).....	109
Figure 6.27	Configuration de référence pour les optimisations dans le cas des protections de faible hauteur. (• : sources, × : récepteurs).....	110
Figure 6.28	Exemple de quadrillage 10 x 10 et numérotation des nœuds. Définitions de la notion de voisins dans la création de forme. ....	112
Figure 6.29	Deux exemples de listes de voisins et des formes associées avec un quadrillage 6 x 6... 112	112
Figure 6.30	Liste des voisins et liste des voisins réellement considérés. ....	113
Figure 6.31	Illustration de l'évolution d'un algorithme génétique.....	116
Figure 6.32	Illustration d'un croisement entre deux individus : on garde le début de l'individu A et la fin de l'individu B.....	117
Figure 6.33	Illustration d'un croisement entre deux individus : on garde le début de l'individu B et la fin de l'individu A.....	118
Figure 6.34	Illustration d'un croisement entre deux individus : on garde le début et la fin de l'individu A et le milieu de l'individu B.....	118
Figure 6.35	Illustration de la mutation d'un gène d'un individu. ....	119
Figure 6.36	Courbes de l'efficacité en fonction de la fréquence dans les 6 cas d'optimisation réalisés. L'efficacité globale et l'efficacité aux basses fréquences sont données dans la légende.....	121
Figure 6.37	Formes considérées pour la comparaison entre forme générées et formes conventionnelles. ....	122
Figure 6.38	Comparaison des efficacités du cas optimisé casopt3 et de cas plus conventionnels. ....	122



Figure 7.1	Détails des sources, récepteurs et points particuliers d'une scène en milieu homogène .	126
Figure 7.2	Détails des sources, récepteurs et points particuliers d'une scène en milieu inhomogène.....	126
Figure 7.3	Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Nelder Mead globalisé, trajectoire à 2 paramètres.....	130
Figure 7.4	Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Nelder Mead globalisé, trajectoire à 4 paramètres.....	131
Figure 7.5	Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Algorithme Génétique, trajectoire à 2 paramètres.....	131
Figure 7.6	Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Algorithme Génétique, trajectoire à 4 paramètres.....	132
Figure 7.7	Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Algorithme Génétique, trajectoire à 4 paramètres.....	132
Figure 7.8	Résultat en milieu homogène avec le tir de rayon.....	133
Figure 7.9	Résultat en milieu homogène avec MICADO (BEM) .....	133
Figure 7.10	Résultat en milieu homogène avec ATMOS (GFPE).....	134
Figure 7.11	Trajectoire à deux paramètres optimale en milieu homogène. Méthodes utilisées : GFPE et Nelder Mead globalisé.....	135
Figure 7.12	Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de $10 \text{ m.s}^{-1}$ à $270^\circ$ .....	135
Figure 7.13	Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de $10 \text{ m.s}^{-1}$ à $45^\circ$ .....	136
Figure 7.14	Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de $20 \text{ m.s}^{-1}$ à $135^\circ$ .....	136
Figure 7.15	Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de $20 \text{ m.s}^{-1}$ à $60^\circ$ .....	137
Figure 7.16	Trajectoire optimale sans discontinuité d'impédance .....	137
Figure 7.17	Description des deux cas de discontinuité d'impédance. ....	138
Figure 7.18	Trajectoire optimale dans le cas 1 de discontinuité d'impédance .....	139
Figure 7.19	Trajectoire optimale dans le cas 2 de discontinuité d'impédance .....	139
Figure 7.20	Exemple de scène avec écran situé à 5 m sur la droite de la trajectoire de la source .....	140
Figure 7.21	Trajectoire optimale dans le cas sans écran.....	140
Figure 7.22	Trajectoire optimale dans le cas avec écran .....	140

# Liste des tableaux

Table 4.1	Units and interval of variation for the four parameters .....	45
Table 4.2	Road traffic noise sound power spectrum: $L_w$ from EN 1793-3:1997 .....	46
Table 4.3	Results of different cases of optimization with 1 or 2 parameter(s) optimized.....	49
Table 4.4	Results of different cases of optimization with 3 or 4 parameters optimized .....	50
Table 4.5	Road traffic noise sound power spectrum: $L_{wA}$ from Nord2000 method.....	51
Table 4.6	Results of the influence of the road traffic noise spectrum.....	51
Table 4.7	Résultats des trois optimisations multiobjectifs avec une méthode agrégée.....	62
Table 4.8	Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode VEGA .....	63
Table 4.9	Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode PAES.....	63
Table 5.1	Results for global optimization: influence of the impedance (n=5).....	80
Table 5.2	Results for global optimization of both depths and flow resistivity (n=5).....	80
Table 5.3	Results for global optimization: influence of the road traffic noise spectrum (n=5) .....	81
Table 6.1	Results of the influence of the road traffic noise spectrum.....	107
Table 6.2	Exemples de résultats obtenus par création de forme ; cas non conservés pour l'optimisation ( $Eff_A$ est inférieur à -0.25 dB(A)).....	115
Table 6.3	Exemples de résultats obtenus par création de forme ; cas conservés pour l'optimisation ( $Eff_A$ est supérieur à -0.25 dB(A)).....	115
Table 6.4	Formes optimales et efficacités optimales dans les six cas d'optimisation.....	120
Table 7.1	Valeurs du $SEL$ calculé dans différentes configurations inhomogènes pour la trajectoire optimale en milieu homogène.....	135
Table 7.2	Valeurs du $SEL$ calculé dans différentes configurations avec discontinuité d'impédance pour la trajectoire optimale calculée sans discontinuité d'impédance.....	138



# Chapitre 1.

## Introduction

D'après des sondages récents, plus d'un français sur deux met le bruit au premier rang des nuisances et le bruit routier arrive en tête devant même les bruits de voisinage. Le bruit, qui peut être défini comme toute onde sonore nuisible et désagréable, est donc l'une des préoccupations majeures de ce début de 21<sup>e</sup> siècle. Le cadre de l'acoustique environnementale se limite à la propagation des ondes acoustiques en milieu extérieur et concerne donc principalement le bruit des transports et le bruit industriel. Le bruit des transports est généralement divisé en plusieurs catégories : le bruit routier, le bruit ferroviaire et le bruit des avions.

Afin de limiter le bruit reçu par un individu il existe trois familles de solution : soit on réduit le bruit à la source (par exemple réduction du bruit des moteurs des voitures ou amélioration de la performance des enrobés drainants recouvrant les chaussées) ; soit on isole le récepteur (par exemple pose de doubles vitrages ou isolation acoustique des façades) ; soit on modifie la propagation acoustique entre la source et le récepteur pour que le niveau sonore arrivant au récepteur soit réduit. Dans ce travail de thèse on s'intéresse à cette dernière solution appliquée au cas des transports terrestres. Il s'agit dans la plupart des cas de placer un obstacle entre la source de bruit et le récepteur afin de réduire le niveau sonore reçu au niveau de ce dernier. Cet obstacle est appelé, dans le cas des bruits routiers et ferroviaires que nous traiterons ici, écran acoustique, protection acoustique, protection anti-bruit ou encore mur anti-bruit.

Actuellement, les choix des protections anti-bruit se portent souvent sur des solutions triviales (écran droit, écran incliné, ajout de béton bois, ...) ou sont effectués à partir de comparaisons de quelques variantes a priori intéressantes. Or le CSTB possède un certain nombre de codes de calculs numériques avancés dédiés à des phénomènes bien particuliers tels que l'acoustique en champ proche des protections complexes ou les effets météorologiques lors de la propagation extérieure. Il serait alors intéressant de coupler ces compétences prévisionnelles avec un outil mathématique à développer

permettant une véritable optimisation multicritères qui conduise à des solutions optimales d'écrans anti-bruit.

L'objectif de ce travail de thèse est de créer un outil d'optimisation permettant une recherche systématique d'une protection acoustique optimale. Différents domaines de l'acoustique environnementale sont traités dans ce travail, notamment les protections anti-bruit routières de forme complexe en milieu rural ou périurbain mais aussi le mobilier urbain (protections acoustiques dédiées à l'environnement urbain) et les trajectoires de sources mobiles.

Le présent travail est présenté sous forme de thèse sous publication c'est-à-dire que des articles en anglais soumis à des revues scientifiques internationales de rang A (avec comité de relecture) ont été inclus dans la thèse comme chapitre à part entière ou comme des parties de chapitre avec une introduction et une conclusion en français. En conséquence, certains algorithmes et/ou méthodes utilisés dans ce travail sont présentés à la fois dans les premiers chapitres bibliographiques de présentation mais aussi dans les premières parties des articles soumis.

Après le présent chapitre 1 d'introduction, le chapitre 2 rappelle les bases de la propagation acoustique en milieu extérieur, notamment les phénomènes principaux qui entrent en jeu, les objectifs et rôles des protections anti-bruit routières de forme complexe et également les principales méthodes analytiques ou numériques permettant de simuler la propagation acoustique en milieu extérieur.

Le chapitre 3 présente succinctement la théorie de l'optimisation. Des généralités sont exposées puis seules les méthodes d'optimisation directes sont plus précisément décrites car c'est ce type d'algorithme qui est utilisé dans le travail présenté. Le choix de la méthode est explicité en fonction des différentes contraintes imposées par le problème des protections anti-bruit de forme complexe. La manière dont les méthodes ont été utilisées et couplées avec les codes de propagation en milieu extérieur est aussi rapidement présentée.

Le chapitre 4 concerne un type d'écran acoustique appelé "écran multi-diffracteur". Il s'agit d'ajouter à un écran droit un ou plusieurs baffles latéraux afin d'en améliorer la performance acoustique. L'outil d'optimisation a été appliqué à ce type d'écran anti-bruit pour optimiser les paramètres géométriques de la configuration ainsi que les caractéristiques des matériaux mis en œuvre. Les résultats sont satisfaisants et montrent une nette augmentation de l'efficacité de la protection acoustique. Une application de l'optimisation multiobjectif est présentée en fin de chapitre.

Une seconde application de l'outil d'optimisation est présentée dans le chapitre 5. Il s'agit, en s'appuyant sur des théories évolutionnaire, d'optimiser les profondeurs de puits insérés dans des couronnements d'écran pour améliorer leur performance ; on parle alors de surfaces réactives. Les résultats sont encourageants en terme d'efficacité acoustique et font de ce type d'écran des solutions de protections acoustiques prometteuses.

Le chapitre 6 s'inscrit dans une démarche de qualité environnementale et d'amélioration de la qualité de vie des citoyens. Il s'agit de proposer des solutions pour créer des espaces calmes en milieu urbain. Le principe est de placer en bordure de boulevards ou

de places des protections acoustiques de faible hauteur, afin de respecter des contraintes visuelles, qui permettent de créer des espaces suffisamment calmes derrière celles-ci. Des protections de faible hauteur de ce type ont fait l'objet de simulations numériques et de mesures sur modèles réduits. Les algorithmes d'optimisation sont ensuite appliqués à cette problématique afin d'optimiser la forme de ces protections.

Le chapitre 7 ouvre les perspectives du sujet sur les protections de formes complexes en étudiant la problématique de l'optimisation de trajectoires. Il s'agit d'optimiser, en milieu homogène ou en milieu évolutif, la trajectoire d'une source en fonction des récepteurs présents dans une scène définie. Ce chapitre montre que l'outil d'optimisation est applicable à d'autres domaines de l'acoustique environnementale que les écrans acoustiques et qu'il est utilisable avec de nombreuses méthodes de simulation.

Enfin, le 8<sup>e</sup> et dernier chapitre propose une synthèse globale de ce travail de recherche. Il reprend les différents résultats obtenus pour donner une conclusion générale du problème abordé.



# Chapitre 2.

## Propagation acoustique en milieu extérieur

Le bruit des transports est souvent considéré comme l'une des nuisances environnementales les moins bien supportées mais aussi l'une des plus difficiles à appréhender compte tenu de la complexité des éléments qui contribuent à sa propagation. La branche de l'acoustique qui étudie l'impact du bruit routier est appelée acoustique environnementale et traite de la propagation des ondes sonores en milieu extérieur.

Il existe plusieurs moyens de réduire le niveau sonore reçu : réduction à la source, protection du récepteur ou, ce qui nous intéresse dans cette étude, modification de la propagation. Afin de pouvoir modifier la propagation des ondes acoustiques dans le but de réduire le niveau sonore reçu par un récepteur, il est important de bien connaître ses caractéristiques. De manière générale, la propagation acoustique en milieu extérieur dépend simultanément de plusieurs paramètres tels que la position de la (ou des) source(s) et du (ou des) récepteur(s), de la modélisation des source (ponctuelles, linéiques, cohérentes, incohérentes), des effets météorologiques, des obstacles situés dans la zone de propagation ainsi que des matériaux constituant les différentes surfaces rencontrées par les ondes sonores. La propagation acoustique en milieu extérieur est donc relativement compliquée à prévoir d'où l'existence de plusieurs méthodes de résolution (ou simulation) pour prendre en compte les différents effets.

Ce chapitre est divisé en trois parties, la première est dédiée à la description des principaux phénomènes physiques entrant en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur. La deuxième partie traite plus précisément des protections anti-bruit routières (écrans anti-bruit). Enfin, la troisième partie donne les principales méthodes permettant de résoudre l'équation d'onde en milieu extérieur.



## 2.1. Principes et équations régissant l'acoustique en milieu extérieur

La propagation acoustique en milieu extérieur peut être appréhendée au travers de plusieurs effets distincts dont les principaux sont brièvement décrits ci-après.

### 2.1.1. La divergence géométrique

C'est la dispersion de l'énergie dans l'espace en fonction de la distance de propagation ; elle dépend uniquement des paramètres géométriques. Pour une source considérée comme ponctuelle (de petite dimension par rapport à la distance source-récepteur), l'atténuation par divergence géométrique est de 6 décibels (dB) par doublement de distance. Pour une source linéaire telle qu'une route, l'atténuation est de 3 dB par doublement de distance.

### 2.1.2. L'absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique est relativement importante en ce qui concerne la propagation acoustique en milieu extérieur, notamment pour de la propagation à longue distance. Elle prend en compte les effets de viscosité des fluides traversés, la diffusion thermique et les échanges d'énergie entre les molécules.

La réduction du niveau de bruit lorsque l'onde traverse l'air dépend de plusieurs facteurs, en particulier : la distance à la source, le spectre de la source considérée, la température de l'air et l'humidité relative. En première approximation, l'absorption atmosphérique  $Att_{atm}$  peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$Att_{atm} = a_l d \quad (2.1)$$

où  $d$  est la distance entre la source et le récepteur, en mètre ;  $a_l$  est l'atténuation linéique, en décibel par mètre ( $\text{dB.m}^{-1}$ ) qui dépend de la fréquence, de la température et de l'humidité relative. Il existe des normes qui donnent les valeurs de  $a_l$ , par exemple la norme ISO 9613-1 [1].

Dans des gammes de fréquences typiques du bruit routier, l'absorption atmosphérique peut être négligée pour des distances inférieures à une centaine de mètres (ce qui est principalement le cas dans les travaux présentés ici). D'autre part, lorsque les résultats sont donnés sous forme d'atténuation par rapport au champ libre ou d'atténuation relative, l'effet de l'absorption atmosphérique est alors d'autant plus négligeable.

### 2.1.3. La réflexion sur les parois

Lorsqu'une onde acoustique arrive sur une surface, une partie de son énergie acoustique est réfléchiée, une partie est transmise et une partie est absorbée. Si l'absorption et la transmission sont faibles, ce qui est généralement le cas pour les surfaces des bâtiments par exemple, la plus grande partie de l'énergie acoustique est réfléchiée, et la surface est

considérée comme acoustiquement rigide. Au voisinage de la surface, la pression acoustique est donc la somme des contributions de l'onde directe et de la (ou des) onde(s) réfléchi(e)s).

Typiquement, le niveau sonore à 50 centimètres d'une paroi rigide est 3 dB(A) (décibels pondérés A, c'est-à-dire prenant en compte le filtre fréquentiel représentant l'oreille humaine) plus élevé que s'il n'y avait pas de paroi.

Pour des parois absorbantes, l'énergie acoustique réfléchi est calculée à l'aide du coefficient de réflexion en onde plane  $R_p$  sur une surface impédante défini par l'équation suivante :

$$R_p(\theta) = \frac{Z_n \cos(\theta) - 1}{Z_n \cos(\theta) + 1} \quad (2.2)$$

où  $Z_n$  est l'impédance normalisée, considérée comme indépendante de l'angle d'incidence noté  $\theta$ , et explicitée dans le paragraphe suivant.

#### 2.1.4. Absorption par les matériaux

Un matériau absorbant isotrope peut être caractérisé par son impédance acoustique normalisée  $Z_n$  [9, 18, 116] et son nombre d'onde complexe  $k_m$  [7] définis par :

$$Z_n = \frac{Z_1}{Z_0} \quad (2.3)$$

$$k_m = \frac{k_1}{k_0} = \frac{c_0}{c_1} \quad (2.4)$$

où l'indice 0 est associé à l'air et l'indice 1 est associé au matériau.  $c_0$  et  $c_1$  sont les célérités du son exprimées en  $\text{m.s}^{-1}$  dans les milieux 0 et 1 respectivement.

Un modèle simple, souvent utilisé en acoustique environnementale, est celui de Delany et Bazley [38]. Bien qu'il ait été établi à partir d'une étude sur l'absorption acoustique des matériaux fibreux, il s'adapte parfaitement au cas des sols extérieurs et du bitume. Ce modèle semi empirique ne dépend, à une fréquence donnée  $f$ , que d'un seul paramètre  $\sigma$ , la résistivité au flux d'air.  $\sigma$  s'exprime en  $\text{kPa.s.m}^{-2}$ . Selon ce modèle les paramètres  $Z_n$  et  $k_m$  s'écrivent :

$$Z_n = 1 + 9.08 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} + j11.9 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73} \quad (2.5)$$

$$k_m = 1 + 10.8 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.70} + j10.3 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.59} \quad (2.6)$$

Dans le cas où il s'agit d'une couche de matériau absorbant d'épaisseur  $d_{layer}$  reposant sur un fond réfléchissant, on utilise  $Z_{layer}$  défini par :

$$Z_{layer} = Z_n \coth\left(-j \frac{k_m \omega}{c_0} d_{layer}\right) \quad (2.7)$$

où  $\omega$  est la pulsation angulaire.

Ces équations ne sont considérées originellement comme fiables que dans la limite  $10 < f/\sigma < 1000$  avec  $f$  en Hertz et  $\sigma$  en kilo Pascal seconde par mètre carré ( $\text{kPa.s.m}^{-2}$ ), mais le modèle de Delany et Bazley est toutefois utilisé et considéré comme acceptable, dans ce travail, dans un domaine plus large.

Il existe d'autres modèles d'impédance parfois utilisés en acoustique environnementale, citons par exemple le modèle de Hamet [69], les modèles d'Attenborough [7, 8, 96] ou des modèles hybrides (par exemple le modèle hybride combinant le modèle de Delany et Bazley et le modèle de Hamet [106]).

### 2.1.5. L'effet de sol

L'atténuation due à l'effet de sol est le résultat de l'interférence entre le son réfléchi par la surface du sol et le son qui se propage directement de la source vers le récepteur. Elle est physiquement liée à la nature plus ou moins absorbante des terrains au-dessus desquels le son se propage. Le phénomène d'effet de sol varie selon la fréquence, la nature du sol ainsi que les positions respectives de la source et du récepteur. En première approximation, on peut considérer que pour une propagation au-dessus d'un sol absorbant, l'atténuation due à l'effet de sol est d'autant plus forte que la distance source-récepteur est élevée et que le rayon direct source-récepteur est proche du sol.

### 2.1.6. La diffraction

Les obstacles (comme un écran ou une butte par exemple) influencent de façon prépondérante la propagation de l'onde sonore. Lorsqu'une onde incidente rencontre un obstacle, sa propagation est perturbée. L'obstacle agit alors comme un ensemble de sources secondaires qui ont pour effet de diffuser l'énergie sonore autour de lui avec une directivité non uniforme ; il s'agit du phénomène de diffraction. Généralement, on observe une diminution des niveaux de pression derrière l'obstacle, dans la zone d'ombre géométrique, sans que toutefois le niveau ne soit nul.

Le calcul d'un champ sonore diffracté est un problème complexe auquel on ne sait pas toujours donner une solution. Différentes méthodes de calcul existent cependant. Il s'agit soit de trouver une solution de l'équation de propagation du son satisfaisant les conditions aux limites sur l'obstacle comme dans la théorie de Sommerfeld, soit de calculer une intégrale nécessitant la connaissance du champ sonore à la surface de l'obstacle comme dans la théorie de Kirchhoff. Ces principes ont servi à établir des méthodes analytiques, basées sur les théories de l'optique géométrique, ou encore des méthodes numériques (comme la méthode des éléments finis de frontière).

L'atténuation due à la diffraction est parfaitement connue de façon analytique pour un écran droit réfléchissant (avec pour intermédiaire le calcul de la différence de marche  $\delta$ , voir Figure 2.1) ; par contre, il est généralement délicat de calculer l'atténuation due à la diffraction par un couronnement placé sur un écran avec une méthode analytique simple. C'est pourquoi les méthodes numériques sont indispensables.

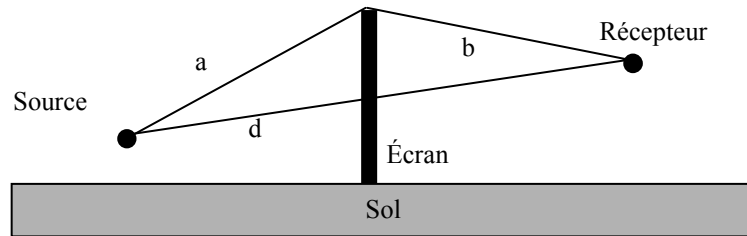


Figure 2.1 Diffraction par un écran droit vue de côté. Différence de marche :  $\delta = a + b - d$  avec a la distance source-arrêt de l'écran, b la distance arrêt de l'écran-récepteur et d la distance source-récepteur en champ libre.

### 2.1.7. Les effets météorologiques

L'atténuation due aux effets météorologiques (principalement les gradients de température et de vitesse de vent ainsi que la turbulence) est une caractéristique importante dans la propagation acoustique en milieu extérieur, surtout pour la propagation à longue distance. Cette atténuation s'avérant difficile à calculer du fait de la complexité des phénomènes et de leur interaction, la plupart des modèles (empiriques, semi-empiriques, modèles issus de la théorie géométrique ou encore méthode d'éléments finis de frontière) sont valables pour la propagation en milieu homogène uniquement. Cependant, certaines méthodes permettent la prise en compte de ces effets météorologiques, souvent aux dépens de la prise en compte de topologies complexes.

Bien que les effets météorologiques aient un rôle important en acoustique environnementale ils sont presque toujours négligés dans ce travail (sauf dans le Chapitre 7). Cette hypothèse est acceptable puisque les distances sont généralement inférieures à une centaine de mètre. Pour plus de précision, il existe des publications détaillées sur le sujet, par exemple l'article de Naz présenté au 7<sup>e</sup> LRSP Symposium [112].

### 2.1.8. La pression acoustique au récepteur

Les principaux phénomènes entrant en jeux dans la propagation acoustique en milieu extérieur étant définis, il est maintenant possible d'écrire de façon analytique le niveau de pression (en dB) en un point récepteur sous la forme suivante [34] :

$$L_P = L_w - Att_{div} - Att_{abs} - Att_{sol} - Att_{dif} - Att_{meteo} \quad (2.8)$$

où :

- $L_P$  est le niveau de pression au récepteur,

- $L_w$  est le niveau de puissance de la source ; il est généralement défini par une pondération issue de la norme NF EN 1793-3:1997 [2] qui tient compte de la pondération A de l'oreille humaine,
- $Att_{div}$  est l'atténuation due à la divergence géométrique,
- $Att_{abs}$  est l'atténuation due à l'absorption par l'air et les surfaces verticales,
- $Att_{sol}$  est l'atténuation due à l'effet de sol,
- $Att_{dif}$  est l'atténuation due à la diffraction par un obstacle,
- $Att_{meteo}$  est l'atténuation due aux effets météorologiques (il est à noter que dans certains cas, l'atténuation due aux effets météorologiques est déjà incluse dans  $Att_{sol}$  et  $Att_{div}$ , il ne faut alors pas considérer  $Att_{meteo}$ ).

## 2.2. Les protections anti-bruit routières de forme complexe

Dans le cadre de cette étude on parle de protection de forme complexe par opposition aux écrans droits et rigides. La notion de complexité englobe la variation de forme et des matériaux utilisés pour absorber une partie de l'énergie acoustique. Les calculs étant faits en deux dimensions, seule la géométrie de la coupe de l'écran perpendiculairement à la direction source-récepteur est complexe (la protection est considérée comme invariante et infiniment longue dans la troisième dimension).



Figure 2.2 Ecran anti bruit droit en béton de bois absorbant, Fabriquant : CAPREMIB

### 2.2.1. Généralités sur les écrans anti-bruit

Actuellement, de nombreuses protections anti-bruit existent ou sont construites afin de protéger les riverains, en particulier le long des grands axes routiers et des voies de chemin de fer (des photos d'écrans sont données sur la Figure 2.2 et la Figure 2.3). Les écrans acoustiques constituent une technique de protection contre les bruits routier et ferroviaire permettant de se conformer à la réglementation en vigueur. Les protections anti-bruit ont pour but de modifier le chemin de propagation de l'onde sonore afin de réduire le niveau acoustique en un (ou plusieurs) point(s) récepteur(s) définis. Deux phénomènes entrent principalement en jeu : la diffraction par le sommet de la

protection et la réflexion et/ou l'absorption par les surfaces. Selon la configuration du site, un mur anti-bruit permet en effet des gains acoustiques de l'ordre de 10 à 15 dB(A) par rapport au champ libre. La zone directement derrière l'écran, dite zone d'ombre, est celle où celui-ci est le plus efficace.



Figure 2.3 Ecran anti bruit partiellement incliné transparent en PLEXIGLAS® installé sur l'A14 en Normandie, Concepteur : IB TRADING

De nombreux travaux de recherche sur la performance des protections anti-bruit ont été réalisés depuis le milieu du siècle dernier. Il existe de nombreuses publications sur les protections anti-bruit routières ; les articles de Watts [129] en 1992 et de Ekici [45] en 2003 en donnant une bonne vue d'ensemble avec des exemples d'applications et des résultats d'efficacités.

### 2.2.2. Les couronnements d'écran

Un couronnement d'écran est un dispositif placé en faitage d'un écran droit afin d'en améliorer la performance sans en augmenter la hauteur totale. Parallèlement à cet enjeu de niveau sonore, il existe des paramètres plus difficilement mesurables mais toutefois importants qui font appel aux domaines de la psycho-acoustique et de la socio-acoustique. Ces paramètres "non physiques" ne sont ici pas pris en compte.

Le principe physique du couronnement est d'augmenter la diffraction et l'absorption de la protection acoustique. Les couronnements présentés peuvent apporter, selon les configurations, une amélioration de 1 à 3 dB(A) (parfois plus) par rapport à un écran droit rigide de même hauteur totale. Actuellement, le couronnement ajouté en tête d'écran peut revêtir différentes formes qui sont principalement : le té, le cylindre, le champignon et le couronnement asymétrique ; la Figure 2.4 les montre dans un plan perpendiculaire à l'écran. Des exemples d'écrans avec couronnement sont présentés sur les photos de la Figure 2.5 (couronnement cylindrique) et de la Figure 2.6 (couronnement en Té).

Les couronnements réfléchissants sont généralement à proscrire. En effet, le phénomène de diffraction peut, dans certains cas, induire une dégradation de la performance de la

protection acoustique par rapport à l'écran droit rigide de même hauteur totale. Les couronnements sont ainsi le plus souvent recouverts de matériaux absorbant (typiquement du béton de bois ou de la laine minérale protégée par de la tôle perforée).

De nombreux travaux sur les couronnements ont été publiés, citons par exemple une publication sur le couronnement en té de Defrance [37], une sur le couronnement cylindrique de Fujiwara [58], une sur les couronnements à surface réactive de Fujiwara également [60] ou une sur le multi-diffracteur de Watts [132]. Des campagnes de mesures sur modèle réduit (par exemple celles de Jin [84] ou Watts [133]) ou en taille réelle (par exemple celle de Watts [130]) ont aussi été réalisées et publiées afin de valider les résultats numériques obtenus.

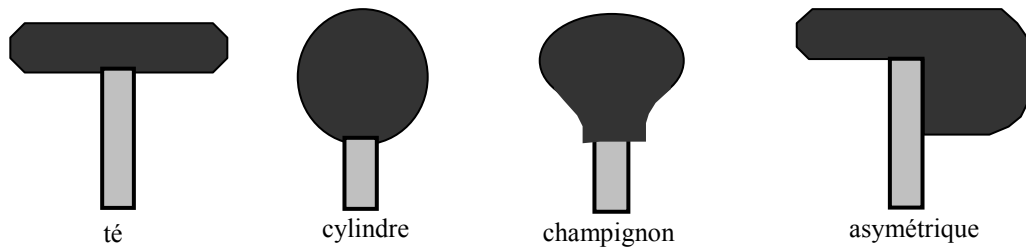


Figure 2.4                      Couronnements les plus courants en France [35, 36]



Figure 2.5                      Écran avec couronnement cylindrique absorbant installé sur la RN 184 à Eragny



Figure 2.6                      Écran avec couronnement en Té installé à Roanne

## 2.3. Méthodes de résolution de l'équation d'onde

Il existe de nombreuses méthodes permettant de résoudre l'équation d'onde. On sépare ici les méthodes analytiques (ou géométriques) et les méthodes numériques. Les premières sont peu coûteuses en temps de calcul mais valables uniquement dans des configurations simples tandis que les secondes permettent d'étudier des configurations plus complexes donc plus réalistes mais avec un temps de calcul plus important.

### 2.3.1. Méthodes géométriques

Il en existe trois principales : la méthode des rayons [27], la théorie géométrique de la diffraction [87, 92] et la méthode des faisceaux gaussiens [23]. Les deux premières sont basées sur la théorie de l'optique géométrique ; la méthode des faisceaux gaussien utilise en outre l'approche parabolique afin d'étendre les possibilités de calcul des rayons aux zones de l'espace telles que les caustiques et les zones d'ombre [62].

La méthode des rayons est ci-après explicitée dans le cas d'un sol impédant (illustration de la configuration sur la Figure 2.7). De nombreux autres calculs analytiques issus de la méthode des rayons sont détaillés dans la thèse de Defrance [34].

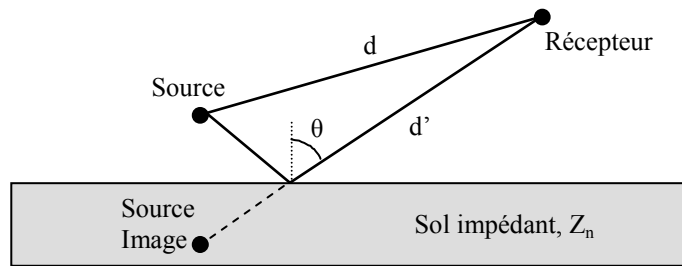


Figure 2.7 Principe des méthodes géométriques dans le cas d'un sol impédant

Le champ acoustique en un point récepteur est égal au champ direct plus le champ réfléchi, les deux trajets sont indiqués sur la Figure 2.7. Le champ total  $\Phi_{tot}$  au point récepteur s'écrit :

$$\Phi_{tot} = \frac{e^{jkd}}{d} + Q \frac{e^{jkd'}}{d'} \quad (2.9)$$

où  $d$  est la distance entre la source et le récepteur,  $d'$  est le distance entre la source image et le récepteur,  $k$  est le nombre d'onde complexe et  $Q$  est le coefficient de réflexion en onde sphérique qui s'écrit :

$$Q = R_p + (1 - R_p)F(w) \quad (2.10)$$

avec  $R_p$  le coefficient de réflexion en onde plane (section 2.1.3) et  $F(w)$  tel que :

$$F(w) = 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw) \quad (2.11)$$

avec  $\operatorname{erfc}(z) = \int_z^\infty e^{-u^2} du$  et  $w = \sqrt{jkd'/2} (1/Z_n + \cos \theta)$ .



### 2.3.2. Méthodes numériques

Seules les deux méthodes numériques qui ont été utilisées pendant ce travail (la méthode des éléments de frontières et la méthode de l'équation parabolique) sont présentées dans ce paragraphe. Cependant, il en existe d'autres ; citons par exemple le Fast Field Program qui permet de résoudre la propagation en milieu stratifié quelconque sur sol plan [118], la méthode des modes normaux [118, 120], la solution de la série des résidus [119, 120] ou encore les équations d'Euler linéarisées [20, 21].

La méthode des éléments finis de frontière (dite BEM pour Boundary Element Method) permet de déterminer le champ de pression en tout point d'une configuration en fonction du rayonnement acoustique de ses frontières ; de manière synthétique, le champ total en un point récepteur est calculé comme la somme du champ direct et du champ rayonné par les éléments de frontière. La méthode de l'équation parabolique rapide (dite GFPE pour Green's Function Parabolic Equation) permet le calcul du champ de pression dans une atmosphère inhomogène (profils de vitesse du son évolutifs).

#### 2.3.2.1. La méthode des éléments de frontière

La BEM est une technique numérique développée depuis le début des années 60 et fondée sur la théorie des équations intégrales de frontière. Un ouvrage de référence complet sur le sujet est celui de Ciskowski et Brebbia de 1991 [28].

Cette méthode s'est développée en alternative d'une autre grande méthode numérique : la méthode des éléments finis (en anglais Finite Element Method, FEM), en particulier pour des domaines de propagation infini. En effet, la BEM est plus appropriée en espace infini car seule la surface de la frontière du domaine doit être discrétisée. Alors que pour la FEM, il est nécessaire de mailler tout le domaine de propagation. La BEM permet de réduire la dimension du problème, le champ acoustique en tout point de l'espace étant dû au rayonnement de ses frontières. De plus, dans la BEM, la condition de rayonnement à l'infini de Sommerfeld est automatiquement satisfaite par les formulations intégrales qui répondent aux conditions aux limites pour des domaines infinis. La BEM a donc un coût en temps de calcul réduit par rapport à la FEM.

Il existe deux formulations de la BEM : la formulation directe et la formulation indirecte [46]. La formulation directe de la méthode des éléments finis de frontière repose sur l'utilisation de l'équation intégrale de Helmholtz [48], dans laquelle les fonctions inconnues sont la pression et la vitesse acoustique. Le champ de pression acoustique  $p$ , en un point  $M$  quelconque de l'espace  $\Omega$  et pour une source ponctuelle  $S$ , vérifie l'équation de Helmholtz définie par (voir notations sur la Figure 2.8) :

$$\left(\Delta + k^2\right) p(M) = f(M), \quad \forall M \in \Omega \quad (2.12)$$

où  $f(M)$  est la distribution des sources,  $k$  est le nombre d'onde et  $\Omega$  est l'espace, de volume  $V$ , entourant un volume  $D$  de surface  $\xi$  dont la normale  $n$  est orientée vers l'extérieur.

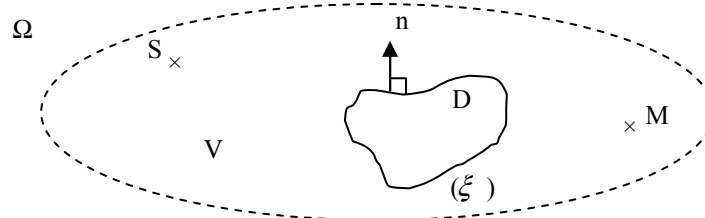


Figure 2.8 Schéma général pour l'établissement de l'équation de Helmholtz

En introduisant la fonction de Green pour une source ponctuelle  $S$  en espace infini, la condition de Sommerfeld de rayonnement à l'infini, et après quelques simplifications mathématiques [28], on obtient l'équation intégrale de Helmholtz (ou de Helmholtz Kirchhoff) donnée par :

$$c(M) p(M) = p_0(M) + \int_{\xi} \left( p(M) \frac{\partial G}{\partial n}(S, M) - G(S, M) \frac{\partial p}{\partial n}(M) \right) dS \quad (2.13)$$

où :

- $c(M)$  est un coefficient fonction de la position du récepteur valant (avec  $r$  la distance entre la source  $S$  et le point  $M$ ) :

$$c(M) = 1 - \frac{1}{4\pi} \int_{\sigma} \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) dS \quad (2.14)$$

- $p(M)$  est le champ de pression en un point  $M$  de l'espace  $\Omega$
- $p_0(M)$  est le champ de pression incident dans le volume extérieur  $V$
- $G$  est la fonction de Green, dont le rappel des notions essentiel se trouve ci-dessous.

La fonction de Green de l'équation de Helmholtz pour l'espace infini est la fonction  $G(S, M)$  qui vérifie la condition de Sommerfeld, tel que :

$$G(S, M) = \frac{\exp(ikr(S, M))}{2ik} \quad \text{dans } \mathfrak{R} \quad (2.15)$$

$$G(S, M) = -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr(S, M)) \quad \text{dans } \mathfrak{R}^2 \quad (2.16)$$

$$G(S, M) = -\frac{\exp(ikr(S, M))}{4\pi r(S, M)} \quad \text{dans } \mathfrak{R}^3 \quad (2.17)$$

où  $H_0^{(1)}$  est la fonction de Hankel d'ordre zéro et de première espèce.

Le champ rayonné par la distribution de sources  $f(M)$  s'écrit alors comme étant la convoluée de  $G$  et de  $f$  (sous l'hypothèse, généralement vérifiée, que  $f$  est une fonction intégrable) :

$$p_0(M) = G * f(M) = \int_{\mathfrak{R}^n} f(M) G(S, M) dV(S) \quad (2.18)$$

Le champ incident  $p_0$  peut être interprété comme la réponse, en un point  $M$ , de la distribution de source  $f(M)$ .

De façon générale, la fonction de Green d'un problème est la solution élémentaire de l'équation de Helmholtz vérifiant les conditions de Sommerfeld et un certain nombre de conditions aux limites. Plus cette fonction de Green prend en compte d'information, plus le domaine d'intégration de l'équation intégrale correspondante est petit. C'est pourquoi après la fonction de Green en espace infini, les chercheurs se sont attachés à trouver la fonction de Green pour la propagation au-dessus d'un sol plan rigide, puis à inclure les effets de sol [24, 47]. Dans de nombreux domaines de l'acoustique des travaux sont en cours pour trouver des expressions judicieuses de ces fonctions de Green, susceptibles d'être utilisées numériquement dans des méthodes d'éléments finis de frontière.

Le code de calcul MICADO (Méthode Intégrale pour le Calcul Acoustique de la Diffraction par les Obstacles), développé au CSTB par Jean [82] et principalement utilisé dans ce travail, est un programme de calcul numérique faisant appel à la méthode des éléments finis de frontière avec une approche variationnelle [82, 125] s'appuyant sur une formulation directe. Ce code a été développé pour des calculs en  $2D$ ,  $2D \frac{1}{2}$  et  $3D$ . C'est la version  $2D$  qui a été utilisée dans ce travail en raison des temps de calculs élevés des autres versions. Il permet de simuler la propagation acoustique en milieu homogène uniquement mais pour n'importe quelle configuration géométrique et avec des impédances quelconques sur chacun des segments considérés de la géométrie.

### 2.3.2.2. La méthode de l'équation parabolique

L'équation parabolique a été introduite au début des années 40 en électromagnétisme puis adaptée à l'acoustique en milieu extérieur à la fin des années 80 par Gilbert [64]. C'est une puissante méthode de calcul en deux dimensions permettant de décrire la propagation du son en milieu inhomogène. Un champ initial connu est propagé pas à pas de la source vers le récepteur. Les discontinuités d'impédance peuvent être prises en compte ainsi que des topographies simples (marches, écrans droits). Cette méthode présente toutefois quelques inconvénients tels que la limitation de l'angle d'ouverture de propagation ainsi que la difficulté de prendre en compte des topographies complexes. 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 empêche de résoudre certains problèmes de diffraction pour lesquels cette énergie n'est plus négligeable.

L'équation de base est l'équation de Helmholtz (donnée en équation 2.12) qui s'écrit, en coordonnées cylindriques et avec la convention temporelle en  $e^{-j\omega t}$ , sous la forme :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + (k(r, z))^2 p = 0 \quad (2.19)$$

où  $k(r, z) = \omega/c(r, z)$  est le nombre d'onde,  $c(r, z)$  est la célérité du son en mètre par seconde,  $\omega$  est la pulsation en radian par seconde,  $p$  est le champ de pression acoustique en Pascal,  $r$  est la distance source-récepteur en mètre et  $z$  est l'altitude en mètre.

Après simplifications [65], on obtient l'équation parabolique standard :

$$\frac{\partial^2 \phi(r, z)}{\partial z^2} + 2jk_0 \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} + (k^2 - k_0^2) \phi(r, z) = 0 \quad (2.20)$$

où  $\phi(r, z)$  est le champ de pression et  $k_0$  est le nombre d'onde de référence.

Cette équation peut être résolue numériquement par une méthode aux différences finies. Le pas de calcul de la différence finie ne doit pas excéder  $\lambda/10$ , avec  $\lambda$  la longueur d'onde. Aux fréquences élevées, le pas est très petit, et le temps de calcul devient très grand pour les grandes distances de propagation.

Afin de réduire ces temps de calcul, une nouvelle méthode, basée sur l'équation parabolique et appelée GFPE, a été proposée par Gilbert et Di [65]. Avec cette nouvelle méthode, le pas peut être très grand devant la longueur d'onde [13]. Le code de calcul ATMOS [5] (Advanced Theoretical Model for Outdoor Sound propagation), développé au CSTB par Aballéa [4], est basé sur la GFPE et est utilisé dans ce travail pour des calculs de propagation en milieu inhomogène.

## 2.4. Conclusion du chapitre

Les bases de l'acoustique environnementale ont été exposées ainsi que les deux principales méthodes numériques de résolutions de l'équation d'onde choisies pour ce travail (la BEM et la GFPE). Ces codes de calculs sont, dans ce travail, utilisés tels quels et considérés comme validés, le but n'étant pas de les améliorer mais d'utiliser leurs performances. Il s'agit, dans les différents chapitres de coupler ces codes de simulation de la propagation acoustique en milieu extérieur avec des méthodes d'optimisation (présentées dans le chapitre suivant) permettant d'optimiser une configuration routière donnée.



# Chapitre 3.

## Les méthodes d'optimisation

La théorie de l'optimisation est un domaine très vaste des mathématiques appliquées. Dans le cadre de ce travail de thèse, ce sujet a été étudié de façon générale, puis certaines méthodes ont été approfondies afin d'appliquer cette théorie aux protections anti-bruit routières de forme complexes. L'objectif n'est pas ici de faire un état de l'art complet et détaillé des méthodes d'optimisation mais seulement d'étudier le sujet pour donner le contexte des principales méthodes qui sont utilisées.

Les algorithmes d'optimisation sont nombreux et pour certains encore en cours d'évolution et d'amélioration. Les progrès de l'informatique ont permis de moderniser les algorithmes et d'accélérer les recherches d'optimum. Il y a cependant toujours un compromis à trouver entre la rapidité de recherche d'optimum et le temps imparti pour le trouver. Ce compromis dépend évidemment du domaine d'application et de la rapidité de calcul des outils informatiques utilisés.

Ce chapitre est divisé en cinq parties. Dans un premier temps, les principales définitions liées à la théorie de l'optimisation sont précisées afin d'établir un cadre précis. Ensuite, une brève bibliographie des méthodes d'optimisation directes est présentée. Les bases de l'optimisation multiobjectif sont également rapidement exposées. Enfin, les choix des méthodes et les critères qui ont amené à ces choix, sont donnés. Pour finir, des détails sur la création d'un outil final sont exposés.

### 3.1. Définitions liées à un problème d'optimisation

D'une manière générale, l'optimisation peut être définie comme une opération permettant d'obtenir le meilleur d'une problématique dans des conditions bien définies.

Dans notre cas, il s'agit de déterminer, pour des positions de source et de récepteur données, les valeurs optimales de paramètres relatifs à l'écran à envisager pour avoir une efficacité acoustique la plus élevée possible. Les paramètres à optimiser sont la forme de l'écran et les impédances des matériaux le recouvrant. Pour considérer une étude plus générale et plus globale, des notions non acoustiques peuvent aussi être prises en compte dans l'optimisation en plus de l'efficacité acoustique de l'écran. Il s'agit alors d'optimisation multiobjectif (voir paragraphe 3.3). Considérons dans un premier temps l'optimisation mono-objectif.

La recherche des extrema d'une fonction  $f$  revient à résoudre un système de  $n$  équations à  $n$  inconnues, linéaire ou non :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = 0 \quad (3.1)$$

$f$  est appelée invariablement "fonction coût" ou "fonction objectif" ;  $x_1 \dots x_n$  sont les paramètres variables à optimiser.

Les différentes méthodes d'optimisation peuvent être partagées en deux catégories : celles qui permettent de déterminer un minimum local (méthode de recherche locale) et celles qui s'efforcent de déterminer un optimum global (méthode de recherche globale). Pour le problème des protections anti-bruit complexe, c'est l'optimum global que l'on cherche à obtenir mais des méthodes de recherche locale peuvent aussi être utilisées (voir paragraphe 3.4).

Pour chaque méthode, on peut choisir de réaliser une minimisation ou une maximisation puisqu'il est possible de passer de l'une à l'autre en prenant l'opposé de la fonction coût.

Compte tenu des systèmes que l'on veut optimiser, on se limite à l'étude des différentes méthodes d'optimisation de processus statiques car toutes les variables considérées sont indépendantes du temps. D'autre part, la fonction coût (c'est-à-dire la fonction que l'on veut optimiser) est, le plus souvent dans ce travail de thèse, le résultat d'une simulation par une méthode numérique ; ses dérivées sont donc difficilement explicites. Ainsi, il faut utiliser ce que l'on appelle une méthode d'optimisation directe, c'est-à-dire ne faisant appel qu'à des évaluations de la fonction coût elle-même (et non à ses dérivées ou son gradient). Lorsqu'une méthode d'optimisation nécessite la connaissance des dérivées de la fonction à optimiser, on parle de méthode indirecte. Il en existe beaucoup, mais aucune n'est présentée ici puisqu'elles ne sont pas utilisées dans le cadre de cette étude. Citons toutefois quelques unes d'entre elles [109] : la méthode de Newton, la méthode de Newton Raphson [136], les méthodes du gradient (ou méthode dite de la plus forte pente), la méthode du gradient conjugué, la méthode de Fletcher et Reeves [51], la méthode de Fletcher Powell [50] et les méthodes random multi-start.

## 3.2. Bibliographie et état de l'art des méthodes d'optimisation directes

La fonction à optimiser dans ce travail est généralement l'efficacité acoustique (ou son opposé) de la protection, par rapport à une situation de référence précisée. Cette fonction, issue de calculs numériques, est difficilement dérivable. Il faut alors utiliser une méthode d'optimisation appropriée. Seuls les principaux algorithmes d'optimisation en recherche directe sont présentés ici. Peu de détails sont donnés pour les premières méthodes présentées car elles n'ont pas été utilisées dans ce travail. Par contre, les algorithmes évolutionnaires [12] et la méthode de Nelder Mead [113], qui sont les deux méthodes d'optimisation retenues et utilisées dans la suite de ce travail, sont plus précisément décrites.

### 3.2.1. Monte Carlo

C'est la plus simple des méthodes stochastiques [49] (les méthodes d'optimisation sont dites stochastiques dès lors qu'il y a une part d'aléatoire dans l'algorithme). Cette méthode consiste à tirer à chaque itération une solution au hasard. La fonction objectif est évaluée en ce point. La nouvelle valeur est comparée à la précédente. Si elle est meilleure que la précédente, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante, et le processus continue. Sinon on repart du point précédent et on recommence le procédé, jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient atteintes.

### 3.2.2. Le recuit simulé

La méthode du recuit simulé (une présentation détaillée de cette méthode est donnée dans [3]) est basée sur une analogie avec le processus physique de recuit des matériaux cristallins [22, 88]. Ce dernier consiste à amener un solide à basse température après l'avoir élevé à forte température. Lorsque le solide est à une forte température, chaque particule possède une très grande énergie et peut effectuer de grands déplacements aléatoires dans la matière. Au fur et à mesure que la température est abaissée, chaque particule perd de l'énergie et sa capacité de déplacement se réduit. Les différents états transitoires de refroidissement permettent d'obtenir des matériaux très homogènes et de bonne qualité.

Pour appliquer ce comportement à une méthode d'optimisation, les déplacements aléatoires de chacun des points sont associés à une probabilité dépendante d'une variable  $T$  représentant, pour l'analogie, la température du matériau.

On effectue des déplacements aléatoires à partir d'un point initial. Pour une maximisation, si un déplacement mène à une valeur plus grande de la fonction coût  $f$ , il est accepté. Sinon, il est accepté avec une probabilité :  $p = \exp(-|\Delta f|/(kT))$ , où  $\Delta f$  est la variation de la fonction,  $T$  est assimilé à une température qui décroît au cours du temps et  $k$  est une constante.



### 3.2.3. La recherche Tabou

La recherche Tabou a initialement été développée en 1986 par Glover [66, 67] et Hansen [70] indépendamment. C'est une méthode heuristique (qui procède par hypothèses provisoires) de recherche locale utilisée pour résoudre des problèmes complexes et de grande taille. Le principe de base est de poursuivre la recherche de solution même lorsqu'un optimum local est trouvé (cela signifie que des déplacements dégradant la solution sont autorisés). Un système de mémoire taboue est utilisé pour éviter temporairement les retours en arrière. Cette liste taboue évolue au cours de la résolution permettant ainsi une diversification des solutions potentielles.

### 3.2.4. Méthode de la descente

La méthode de la descente vise à déterminer une solution  $s(x)$  dans le voisinage de la solution courante  $x$ , telle que  $f(s(x)) < f_{min}$ ,  $f_{min}$  désignant la valeur minimale courante de  $f$ . La méthode consiste à engendrer, à chaque itération, un  $N$ -échantillon (suivant un procédé aléatoire ou cyclique, ou suivant une loi de distribution uniforme) dans le voisinage de la solution courante  $x$ . La fonction à optimiser  $f$  est évaluée en chaque point de l'échantillon, et on note  $x'$  la solution correspondant à la plus petite valeur de  $f$  obtenue :  $f(x') = f(s(x)) = \min[f(s_i(x))]$  pour  $i$  variant de 1 à  $N$ .

Cette nouvelle valeur  $f(x')$  est comparée à la valeur minimale courante  $f_{min}$ . Si elle est meilleure, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante, et le processus continue. Sinon l'algorithme prend fin, on a atteint un minimum local.

### 3.2.5. Les Algorithmes Evolutionnaires

Depuis les travaux de Darwin, on sait que l'évolution naturelle a permis de créer des systèmes biologiques très complexes adaptés à de nombreuses conditions. Ses mécanismes reposent sur le principe de compétition entre les individus. Les individus les mieux adaptés aux conditions survivent et peuvent laisser une descendance qui répandra ses gènes. Devant ces possibilités, quelques chercheurs des années 50 [57] ont tenté d'en adapter le principe à l'ingénierie. Mais la faible puissance des machines de l'époque et des connaissances de la génétique naturelle n'a pas permis d'avoir de résultats concluants. Plus tard, dans les années 60 et 70, trois écoles utilisant le principe de l'évolution de façon différente apparurent : les algorithmes génétiques (GA) développés par Holland [73] et Goldberg [68], la programmation évolutionnaire (EP) de Fogel [54] et les stratégies d'évolution (ES) de Schwefel [124]. Plus tard encore, une autre classe d'algorithmes évolutionnaires vit le jour, la programmation génétique (GP) de Koza [93] qui était auparavant un sous groupe des GA.

Ces différentes classes d'algorithmes évolutionnaires ne se différencient que sur les détails d'implémentation des opérateurs et sur les procédures de sélection et remplacement de la population. Bien que leurs buts soient différents à l'origine, ils sont maintenant surtout utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation.

### 3.2.5.1. Les algorithmes génétiques

Une bonne description des algorithmes génétiques est donnée dans "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs" [107], ouvrage auquel on peut se rapporter pour plus de détails.

Il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus divers (généralement tirée aléatoirement au départ) à laquelle on applique différents opérateurs (croisements, mutations) et que l'on soumet à une sélection, à chaque génération. Si la sélection s'opère à partir de la fonction coût, alors la population tend à s'améliorer [10, 11]. Un tel algorithme ne nécessite aucune connaissance du problème : on peut représenter celui-ci par une boîte noire comportant des entrées (les variables) et des sorties (résultats de la fonction coût). L'algorithme ne fait que manipuler les entrées, lire les sorties, manipuler à nouveau les entrées de façon à améliorer les sorties, etc. [135]. C'est ainsi qu'ont procédé les éleveurs pendant des millénaires : ils ont réussi à modifier selon leurs désirs de nombreuses espèces animales sans connaissance en génétique ou biologie moléculaire. Actuellement, ces algorithmes sont de plus en plus utilisés dans l'industrie car ils sont particulièrement adaptés aux problèmes d'optimisation comportant de nombreux paramètres. Un algorithme génétique est donc une procédure d'optimisation stochastique dont le principal avantage est la puissance de la recherche globale sur un grand espace. Le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté par le schéma de la Figure 3.1.

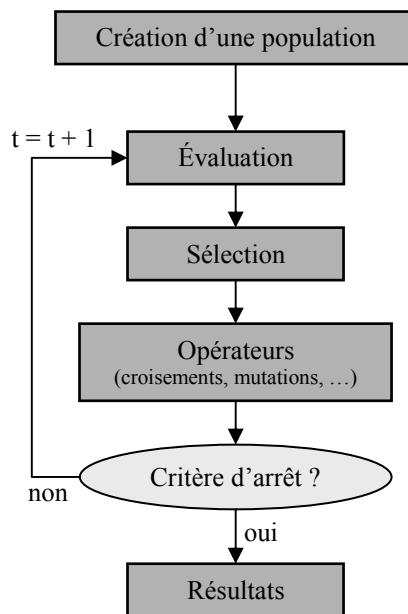


Figure 3.1 Schéma de principe d'un algorithme génétique

Tout d'abord, on fixe l'espace de recherche ; en général, il s'agit de  $\{0,1\}^N$  pour des raisons de simplicité (mais il est aussi possible de travailler sur des paramètres réels). On crée ensuite des fonctions de codage et de décodage entre le génotype d'un individu qui est inclus dans l'espace de recherche et son phénotype qui est la valeur de la fonction pour cet individu. Le génotype correspond aux valeurs considérées des variables à optimiser et le phénotype au résultat de la fonction coût.

Puis on crée la première population qui sera amenée à évoluer. On définit ainsi à cette étape la taille des populations  $N$  qui ne doit pas être trop élevée pour que le temps de calcul soit raisonnable, ni trop faible pour que la solution trouvée soit intéressante. Pour composer cette première population, on fixe par exemple aléatoirement la valeur des gènes d'un individu.

On définit au préalable la fonction d'adaptation (en général on prend la fonction coût elle-même) qui associe à chaque phénotype une valeur dite d'adaptation ; c'est la note de l'individu. Plus celle-ci est élevée (dans le cas d'une maximisation), plus la solution donnée par ce phénotype est optimale.

La construction de cette fonction doit être particulièrement optimisée en temps de calcul car elle est exécutée un grand nombre de fois, parfois plus de  $N$  fois à chaque génération, ce qui fait que la rapidité de l'algorithme dépend essentiellement d'elle. Elle doit aussi pouvoir tenir compte des phénotypes invalides si le problème doit satisfaire des contraintes que les opérateurs de mutation et croisement ne respectent pas.

La sélection consiste à choisir les paires d'individus qui vont participer à la reproduction de la population future. La fonction de sélection calcule une probabilité de sélection pour chaque individu, en fonction de sa valeur d'adaptation et de celle de tous les autres individus de la population. 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. Pour cela on utilise l'opérateur croisement. C'est l'opérateur essentiel de recherche d'un algorithme génétique. Il combine les génotypes de deux individus pour en obtenir deux nouveaux. Il existe plusieurs méthodes de croisement, la plus simple étant le croisement en un point : on choisit au hasard un point de coupure identique sur les deux génotypes et on échange les fragments situés après le point de coupure pour donner les deux nouveaux génotypes. Il est également possible de considérer un opérateur de croisement en plusieurs point du génotype.

Après les croisements, on applique l'opérateur de mutation qui modifie aléatoirement la valeur de certains bits d'un génotype avec une faible probabilité, typiquement entre 0.05 et 0.1. Si cette dernière est trop élevée, on risque de ne pas avoir une bonne convergence, et si elle est trop faible, cela réduit son effet. L'intérêt de cet opérateur est d'éviter une dérive génétique : certains gènes favorisés par le hasard peuvent se répandre au détriment des autres et sont ainsi présents au même endroit sur tous les génotypes. La mutation permet alors un maintien de la diversité génétique utile pour une bonne exploration de l'espace de recherche. Un autre intérêt est de permettre une meilleure recherche locale, notamment quand la plupart des individus ont convergé autour de l'optimum global. A ce moment, le croisement est assez inefficace car les individus sont

souvent identiques. La mutation leur donne alors la chance de s'approcher du maximum global d'autant que le permet la précision du codage.

La nouvelle génération est alors créée ; elle est constituée des nouveaux individus issus de la reproduction et de la diversification. On recommence alors au début du processus jusqu'à arrêt de l'algorithme.

Il existe plusieurs critères d'arrêt de l'algorithme. Par exemple il s'arrête lorsque le meilleur individu d'une génération a atteint un objectif fixé au préalable, ou lorsqu'un certain nombre d'individus sont identiques à la solution locale optimale (convergence partielle), ou encore lorsqu'il n'y a pas eu d'amélioration depuis un certain nombre fixé de génération. Bien sûr, un critère d'arrêt peut aussi être le nombre d'évaluations de la fonction objectif à ne pas dépasser (à cause du temps de calcul) ou un nombre maximal de générations.

### **3.2.5.2. La programmation évolutionnaire**

La programmation évolutionnaire a été introduite par L.J. Fogel [55], elle était initialement utilisée afin de faire de la prédiction dans des séries temporelles. Les algorithmes de programmation évolutionnaire n'utilisent pas de sélection, tous les individus de la population sont mutés une seule fois (la mutation étant le seul opérateur de variation présent). Le remplacement, qui est déterministe, reconstitue une nouvelle population en prenant les meilleurs individus parmi les parents et les enfants ; toutefois des variantes récentes utilisent un tournoi stochastique pour le remplacement. Pour une introduction plus complète sur la programmation évolutionnaire se rapporter aux travaux de D.B. Fogel [52, 53].

### **3.2.5.3. Les stratégies évolutionnaires**

L'optimisation par stratégie d'évolution est basée sur l'hypothèse que, durant l'évolution biologique, les lois régissant cette évolution ont elles-mêmes évolué, dans le but de faire acquérir à l'espèce une capacité d'adaptation phylogénique performante. Ce type d'algorithme évolutionnaire a notamment été développé par Rechenberg [121] et Schwefel [124].

Contrairement aux algorithmes génétiques, les stratégies d'évolutions modélisent les effets que l'évolution a sur le phénotype. Elles supposent une relation de causalité entre l'importance des modifications du génotype et l'importance des modifications du phénotype provoquées par celle du génotype. Par exemple, si ces modifications sont dues à des mutations, ceci signifie qu'une petite mutation dans un gène produit un individu légèrement différent de l'individu qui aurait été produit si la mutation n'avait pas eu lieu, tandis qu'une mutation importante produit un individu très différent.

L'existence de cette relation de causalité est confortée par l'existence des "fenêtres d'évolution". Il s'agit de la marge de manœuvre relativement étroite entre des mutations trop faibles pour être efficaces et des mutations si fortes qu'elles sont destructives. La force des mutations doit donc être bien réglée ; dans les stratégies d'évolutions, elle peut se régler automatiquement.

Les notations  $(1+1)$ -ES,  $(1+\lambda)$ -ES,  $(1,\lambda)$ -ES,  $(\mu,\lambda)$ -ES et  $(\mu+\lambda)$ -ES caractérisent des stratégies d'évolution qui sont de plus en plus proches de l'évolution biologique.  $\mu$  est le nombre de parents et  $\lambda$  le nombre d'enfants. La virgule signifie que la sélection est effectuée parmi les enfants et le signe + signifie que la sélection est effectuée parmi les parents et les enfants.  $(1+1)$ -ES est historiquement le premier algorithme. Il s'agit de faire muter un parent pour produire l'enfant puis de sélectionner celui qui, du parent ou de l'enfant, a la meilleure évaluation.  $(1+\lambda)$ -ES fonctionne de même, la différence étant qu'on produit  $\lambda$  enfants à partir du parent (mais on ne sélectionne que le meilleur individu parmi les enfants et le parent). Au contraire, dans l'algorithme  $(1,\lambda)$ -ES on ne sélectionne le meilleur individu que parmi les enfants. Enfin, les algorithmes  $(\mu,\lambda)$ -ES et  $(\mu+\lambda)$ -ES sont les plus utilisés ( $\mu \ll \lambda$ ). L'avantage d'avoir plusieurs parents permet d'utiliser un opérateur de croisement (du même type que ceux utilisés dans les algorithmes génétiques). A partir des  $\mu$  parents on obtient une population  $P'$  de  $\lambda$  enfants en appliquant un opérateur de croisement. On sélectionne alors de manière déterministe les  $\mu$  meilleurs enfants. On leur applique alors l'opérateur de mutation pour obtenir une nouvelle population  $P''$  de  $\lambda$  enfants. On sélectionne enfin les  $\mu$  meilleurs enfants de  $P''$  qui deviendront les parents de la génération suivante.

### 3.2.6. Algorithme de Nelder Mead ou algorithme du simplexe

La méthode de Nelder Mead (aussi appelée méthode du simplexe) est une méthode d'optimisation locale et directe. Elle a été pour la première fois décrite en 1965 par Nelder et Mead [113]. Cette méthode est surtout appréciée pour sa robustesse, sa simplicité de programmation, sa faible consommation de mémoires (peu de variables) et son relativement faible temps de calcul. Elle est particulièrement efficace pour des problèmes avec un petit nombre de variables à optimiser. On choisit ici de présenter la méthode dans le cas d'une minimisation.

#### 3.2.6.1. Présentation de l'algorithme de Nelder Mead initial

L'algorithme de Nelder Mead [113] permet de minimiser une fonction de dimension  $n$  à valeurs réelles. Au départ, la méthode de Nelder Mead utilise un polytope (ou simplexe), c'est à dire une figure géométrique de  $n+1$  points,  $n$  étant la dimension du problème (le nombre de variables à optimiser). Le polytope  $x_i$  est ordonné tel que  $f(x_1) < f(x_2) < \dots < f(x_{n+1})$  où  $f$  est la fonction coût. A chaque itération, on remplace le moins bon des points par un nouveau point issu d'une combinaison linéaire entre le barycentre des  $n$  points gardés et  $x_{n+1}$ .

Il faut au préalable définir quatre coefficients : le coefficient de réflexion  $\rho_{NM}$ , le coefficient d'expansion  $\chi_{NM}$ , le coefficient de contraction  $\gamma_{NM}$  et le coefficient de rétrécissement  $\sigma_{NM}$ . D'après la publication originelle [113], ces coefficients doivent vérifier les inégalités suivantes :

$$\rho_{NM} > 0, \chi_{NM} > 1, 0 < \gamma_{NM} < 1 \text{ et } 0 < \sigma_{NM} < 1 \quad (3.2)$$

Traditionnellement, on attribue à ces coefficients les valeurs suivantes :

$$\rho_{NM} = 1, \chi_{NM} = 2, \gamma_{NM} = 1/2 \text{ et } \sigma_{NM} = 1/2 \quad (3.3)$$

### 3.2.6.2. Description d'une itération de l'algorithme

L'algorithme de Nelder Mead est bien décrit dans les références [95, 105], les différentes étapes d'une itération sont présentées sur la Figure 3.3.

Les différentes actions sont illustrées sur la Figure 3.2 dans le cas d'un problème à deux dimensions ( $n = 2$ ).

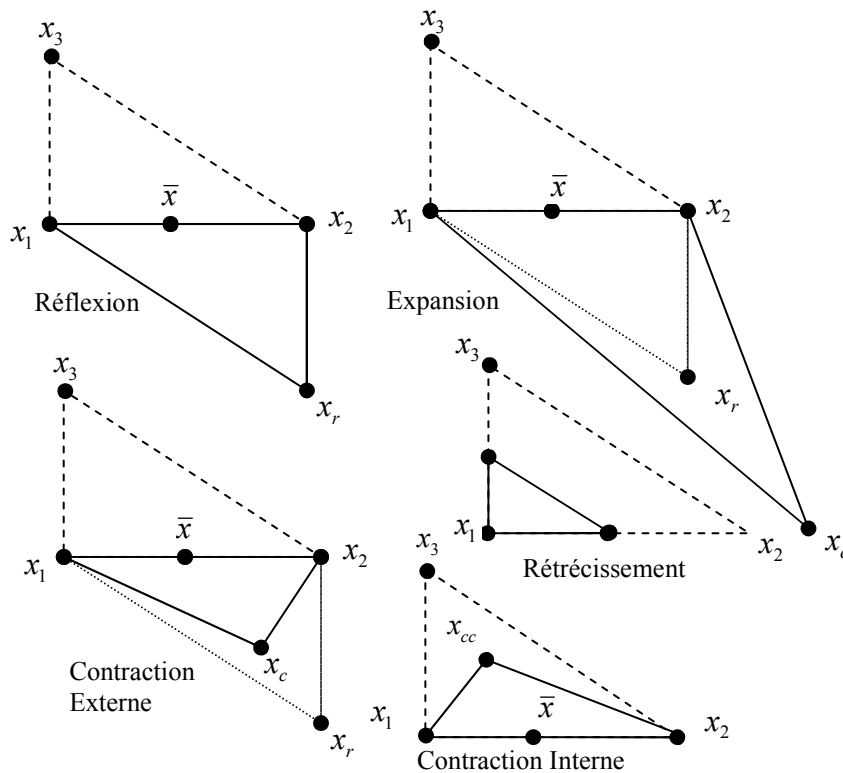


Figure 3.2 Les différentes étapes de l'algorithme de Nelder Mead pour un problème 2D.

Le polytope de départ peut être soit choisi aléatoirement dans l'espace  $\mathfrak{R}^{n+1}$ , soit imposé (intéressant lorsqu'on sait dans quelle zone se trouve le minimum recherché).

Les conditions d'arrêt de l'algorithme dépendent de la différence de valeur de la fonction entre le meilleur et le plus mauvais point : aussitôt que cette différence est inférieure à un certain seuil, l'algorithme est interrompu. Un autre critère d'arrêt peut être le nombre d'évaluations de la fonction pour limiter le temps de calcul.

Il est important de préciser que si la convergence n'est pas assurée, une stagnation en un non minimum est possible. D'autre part, cette méthode ne permet qu'une recherche locale d'extremum.

Classement du polytope issu de l'itération précédente : les  $x_i$  sont alors tels que :  $f(x_1) < f(x_2) < \dots < f(x_{n+1})$

REFLEXION

On pose  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , barycentre des  $n$  premiers points du polytope.

Création du point de réflexion :  $x_r = \bar{x} + \rho_{NM}(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 + \rho_{NM})\bar{x} - \rho_{NM}x_{n+1}$

Si  $f(x_1) \leq f(x_r) < f(x_n)$  on accepte le point  $x_r$  et l'itération est terminée.

Sinon :

si  $f(x_r) < f(x_1)$  passer à l'étape d'expansion

si  $f(x_r) \geq f(x_n)$  passer à l'étape de contraction

EXPANSION

Création du point d'expansion :

$x_e = \bar{x} + \chi_{NM}(x_r - \bar{x}) = \bar{x} + \rho_{NM}\chi_{NM}(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 + \rho_{NM}\chi_{NM})\bar{x} - \rho_{NM}\chi_{NM}x_{n+1}$

Si  $f(x_e) < f(x_r)$  on accepte le point  $x_e$  et l'itération est terminée.

Sinon, on accepte le point  $x_r$  et l'itération est terminée.

CONTRACTION

Si  $f(x_n) \leq f(x_r) < f(x_{n+1})$  on fait une contraction extérieure.

Création du point de contraction extérieure :

$x_c = \bar{x} + \gamma_{NM}(x_r - \bar{x}) = \bar{x} + \rho_{NM}\gamma_{NM}(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 + \rho_{NM}\gamma_{NM})\bar{x} - \rho_{NM}\gamma_{NM}x_{n+1}$

Si  $f(x_c) \leq f(x_r)$  on accepte le point  $x_c$  et l'itération est terminée.

Sinon, passer à l'étape de rétrécissement.

Si  $f(x_r) \geq f(x_{n+1})$  on fait une contraction intérieure.

Création du point de contraction intérieure :

$x_{cc} = \bar{x} - \gamma_{NM}(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 - \rho_{NM}\gamma_{NM})\bar{x} - \gamma_{NM}x_{n+1}$

Si  $f(x_{cc}) < f(x_{n+1})$  on accepte le point  $x_{cc}$  et l'itération est terminée.

Sinon, passer à l'étape de rétrécissement.

RETRECISSEMENT

Pour  $i = 2 \dots n+1$  on calcule des nouveaux points  $v_i = x_1 + \sigma_{NM}(x_i - x_1)$  pour le polytope, on ne garde que  $x_1$ . Le nouveau polytope qu'il faudra ordonner à l'itération suivante est donc  $x_1, v_2, \dots, v_{n+1}$ .

Fin d'une itération

Figure 3.3

Description d'une itération de l'algorithme de Nelder Mead.

### 3.3. L'optimisation multiobjectif

Un problème d'optimisation multiobjectif peut être décrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser } y = f(x) &= (f_1(x_1, x_2, \dots, x_m), \dots, f_n(x_1, \dots, x_m)) \\ \text{où } x &= (x_1, \dots, x_m) \in X \text{ et } y = (y_1, \dots, y_n) \in Y \end{aligned} \quad (3.4)$$

$x$  est appelé vecteur décision (ou vecteur paramètre),  $X$  étant l'espace des paramètres ;  $y$  est appelé vecteur objectif avec  $Y$  l'espace des objectifs ( $m$  est le nombre de paramètres à optimiser et  $n$  est le nombre d'objectifs).

Les méthodes d'optimisation multiobjectif (c'est-à-dire permettant d'optimiser plusieurs fonctions simultanément) sont très nombreuses [30] ; elles sont explicitées, voire uniquement citées, dans ce paragraphe. Elles peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes dites agrégées (ou méthodes a priori car le décideur intervient avant la recherche) et celles dites Pareto (ou méthode a posteriori car le décideur intervient après la recherche). Les premières sont les plus simples à concevoir, les secondes nécessitant quelques définitions qui sont également présentées. Le schéma de la Figure 3.4 illustre les deux types de méthode.

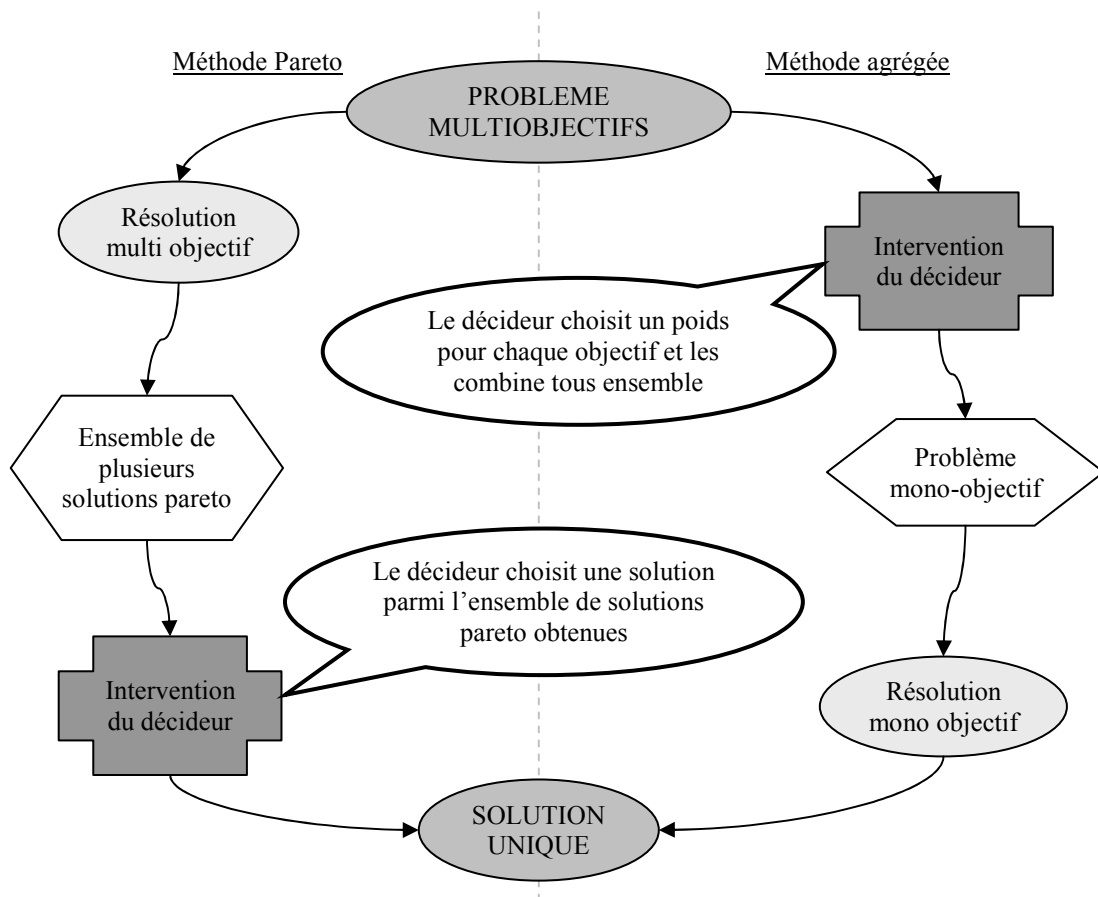


Figure 3.4 Principe de l'optimisation multiobjectif



### 3.3.1. Méthodes agrégées

Il s'agit de se ramener à une optimisation mono-objectif afin d'utiliser les méthodes précédemment présentées. Il existe quatre principales méthodes d'optimisation multiobjectif dites agrégées [19] :

- la méthode de la moyenne pondérée [101],
- la méthode du goal programming [86],
- la méthode du min-max [29],
- la méthode du goal attainment [26].

Seule la première, la plus simple et la plus naturelle, est utilisée dans la suite de ce travail ; elle est explicitée ci-après.

La méthode de la moyenne pondérée consiste à additionner tous les objectifs  $f_i$  en affectant à chacun d'eux un coefficient de poids  $w_i$ . Ce coefficient représente l'importance relative que le décideur attribue à l'objectif. La fonction coût  $F$  du problème mono-objectif est définie par ( $n$  étant le nombre d'objectifs du problème) :

$$F = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (3.5)$$

### 3.3.2. Méthodes Pareto

Le concept a été introduit par le mathématicien du même nom au 19<sup>e</sup> siècle [115]. Il dit que : "dans un problème multiobjectif, il existe un équilibre tel que l'on ne peut pas améliorer un critère sans détériorer au moins un des autres critères".

Par définition, on dit qu'un vecteur paramètre  $a \in X$  domine un autre vecteur paramètre  $b \in X$  (notation  $a \succ b$ ) si et seulement si :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} \quad f_i(a) \geq f_i(b) \quad \wedge \quad \exists j \in \{1, \dots, n\} \quad f_j(a) > f_j(b) \quad (3.6)$$

On appelle frontière de Pareto l'ensemble de tous les points Pareto optimaux. Un point  $x \in X$  étant dit Pareto optimal s'il n'est dominé par aucun autre point.

C'est Goldberg qui propose d'utiliser la notion de dominance Pareto pour des problèmes multiobjectifs afin de respecter l'intégralité de chaque critère. Dans le cadre des algorithmes évolutionnaires, la dominance au sens de Pareto permet de faire converger la population vers un ensemble de solutions efficaces. Il existe de nombreuses méthodes multiobjectifs Pareto, seules les principales sont listées ci-dessous [31]. Elles sont toutes basées sur des théories évolutionnaires.

- VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm).

Cet algorithme a été proposé en 1984 par Schaffer [122, 123]. 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).

- MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm).

Cette méthode a été proposée en 1993 par Fonseca et Fleming [56]. 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.

- NPGA (Niche Pareto Genetic Algorithm).

Cet algorithme a été proposé par Horn et Nafpliotis en 1993 [74, 75]. 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 (Non dominated Sorting Genetic Algorithm).

Cette méthode, proposée par Srivinas et Deb en 1994 [126], divise la population en plusieurs groupes en fonction du degré de domination au sens de Pareto de chaque individu.

- SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm).

En 1998 Zitzler et Thiele [137, 138] proposent une nouvelle méthode multiobjectif qui utilise une archive regroupant les solutions Pareto optimales obtenus aux générations précédentes

- PAES (Pareto Archived Evolution Strategy).

Cette méthode est issue des travaux de Knowles et Corne [90, 91] 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. Elle est très simple à mettre en œuvre (elle s'inspire d'une stratégie d'évolution (1+1)-ES [121]).

- PESA (Pareto Envelope based Selection Algorithm).

Il s'agit d'une méthode très proche de la méthode PAES. Elle a été développée par Corne [32] en 2000. Au lieu d'être basée sur les stratégies d'évolution comme PAES, PESA est basée sur la théorie des algorithmes génétiques avec des populations internes comme dans les algorithmes génétiques et une population externe qui joue le rôle de population archive.

### **3.4. Choix de la méthode d'optimisation**

#### **3.4.1. Optimisation mono-objectif**

Dans le cas des études présentées ici, il est nécessaire de choisir une méthode d'optimisation directe car on ne connaît pas le gradient de la fonction coût à optimiser.

La méthode doit en outre permettre une recherche globale. Cependant, les méthodes de recherche locales et globales ne s'excluent pas. Afin d'améliorer les performances d'une recherche d'optimum, plusieurs auteurs (Glover [66], Durand [42]) combinent les deux types d'algorithmes. Une recherche globale permet de bien explorer l'espace de recherche ; cette phase est appelée "diversification". Ensuite, une recherche locale permet de bien exploiter une "zone prometteuse" (susceptible de contenir un minimum global), localisée lors de l'exploration du domaine de recherche ; cette phase est appelée "intensification".

Deux méthodes d'optimisation mono-objectif ont été retenues dans ce travail de thèse :

- L'algorithme de Nelder Mead
- Les algorithmes génétiques

La méthode de Nelder Mead a été retenue pour sa robustesse en recherche locale et pour sa facilité de mise en œuvre bien qu'elle ne permette pas de recherche globale. Afin de globaliser la recherche, cette méthode peut être associée, soit à un algorithme génétique soit à des considérations plus simples comme des réinitialisations probabilisées ou aléatoires. Luersen et Le Riche ont proposé une globalisation de l'algorithme de Nelder Mead par réinitialisations probabilisées [98-100]. Dans ce travail de thèse, il est en général choisi d'effectuer des réinitialisations déterminées de manière stochastique. D'autres combinaisons entre algorithme évolutionnaire et algorithme d'optimisation locale sont possibles, citons par exemple les travaux de Dutilleul [43, 44].

Les algorithmes génétiques ont eux été retenus car ils permettent une recherche globale et pour leur performance, dans les cas où le nombre de paramètres à optimiser est important.

De façon générale, on utilise l'algorithme de Nelder Mead globalisé dans les cas où le nombre de paramètres à optimiser est inférieur ou égal à 4 ; et on utilise les algorithmes génétiques dans les cas où ce nombre est plus important.

Généralement, les algorithmes d'optimisation opèrent en milieu non contraint, cependant, le fait de réduire l'espace de recherche à un domaine plausible permet de réduire grandement le temps de calcul. Les deux méthodes utilisées (Nelder Mead et Algorithmes Génétiques) ont été programmées de manière à réaliser la recherche d'optimum dans un espace restreint.

### 3.4.2. Optimisation multiobjectif

En ce qui concerne l'optimisation multiobjectif, les deux approches différentes (présentées au paragraphe 3.3) sont utilisées et comparées.

Concernant les méthodes agrégées, seule la méthode de la moyenne pondérée est utilisée dans ce travail. Le problème étant ramené à un problème d'optimisation mono-objectif, la discussion est alors la même qu'au paragraphe 3.4.1. Dans ce cas, la difficulté est d'attribuer le bon poids à chaque objectif pour atteindre une solution optimale plausible (ce qui est d'autant plus difficile lorsque les différents objectifs sont de dimensions différentes et d'ordres de grandeur différents).

Concernant les méthodes Pareto, on utilise, dans ce travail, les méthodes PAES et VEGA notamment pour leur simplicité de mise en œuvre. Le résultat est alors un ensemble de solutions parmi lesquelles une est choisie par le décideur.

### 3.5. Création d'un outil d'optimisation sous Matlab

Ce travail de thèse a finalement mené au développement d'un outil complet d'optimisation d'écrans acoustiques de forme complexe. La programmation de cet outil, appelé OPTIMEA pour Optimization in Environmental Acoustics, a été réalisée sous l'environnement Matlab. Celui-ci a été choisi notamment parce qu'il est nécessaire de faire appel à des calculs MICADO (code développé en Fortran mais dont beaucoup de fonctions de post-traitement sont écrites sous Matlab). Des détails sur cet outil d'optimisation sont donnés dans l'Annexe A.

Concernant la méthode de Nelder Mead, il existe une fonction `fminsearch.m` présente dans une toolbox de Matlab spécialisée dans l'optimisation de fonctions. Cette fonction a été le point de départ pour la réalisation de l'algorithme de Nelder Mead utilisé dans ce travail. Des modifications y ont été incluses notamment pour la prise en compte des bornes de l'espace de recherche et pour éviter de refaire des calculs acoustiques déjà effectués. En ce qui concerne les algorithmes génétiques, il existe de nombreuses fonctions déjà écrites, que l'on peut trouver dans des toolboxes de Matlab ou directement accessibles sur Internet, l'une d'entre elle a été choisie puis modifiée pour l'adapter à notre problème.

L'outil d'optimisation permet de choisir entre différentes méthodes d'optimisation et éventuellement de les globaliser ou de les coupler entre elles. Ces choix dépendent du nombre de paramètres, du nombre d'objectifs à atteindre, des configurations étudiées, ou encore des éléments entrant en jeux.

L'outil d'optimisation a été validé dans un premier temps sur des fonctions numériques peu coûteuses en temps de calcul comme rapporté en Annexe B, puis sur des cas d'optimisation de protections acoustiques comme rapporté au paragraphe 4.9 du Chapitre 4.

### 3.6. Conclusion du chapitre

L'optimisation est un vaste sujet des mathématiques appliquées dont une étude bibliographique a permis de dégager principalement deux méthodes d'optimisation mono-objectif : Algorithme de Nelder Mead et Algorithme Génétique. Ce sont les deux méthodes qui sont utilisées dans les chapitres suivant afin d'optimiser des protections anti-bruit de forme complexe.

En ce qui concerne l'optimisation multiobjectif, deux méthodes spécifiques ont été retenues : VEGA et PAES. Elles sont utilisées à la fin du Chapitre 4 pour optimiser simultanément l'efficacité acoustique et le prix de revient d'un écran.



# Chapitre 4.

## Optimisation d'écrans anti-bruit multi-diffracteurs

Des couronnements d'écran sont de plus en plus souvent placés sur le dessus des écrans conventionnels (droits ou inclinés) afin d'augmenter leur efficacité sans en augmenter la hauteur. Il existe de nombreux types de couronnements, les plus classiques étant les couronnements en forme de T ou en forme de cylindre. Dans le cadre de ce travail de thèse il s'agit d'utiliser une méthode d'optimisation directe afin de déterminer par une recherche systématique les dimensions optimales du couronnement pour avoir une efficacité acoustique la plus grande possible. Les propriétés des matériaux recouvrant la protection acoustique peuvent aussi être optimisées puisque les méthodes d'optimisation retenues permettent d'optimiser plusieurs paramètres simultanément.

L'outil OPTIMEA d'optimisation développé dans le cadre de ce travail de thèse a tout d'abord été appliqué au cas des couronnements de type cylindrique [14]. Les optimisations ont été réalisées d'une part à des fréquences pures pour étudier le comportement du couronnement en fonction de la fréquence ; et d'autre part, en niveau global en dB(A), en utilisant un spectre de bruit routier pour étudier des configurations réalistes. Les paramètres optimisés dans ce cas étaient le rayon du couronnement cylindrique et la résistivité au flux d'air (utilisée pour le modèle d'impédance acoustique de surface de Delany et Bazley) du matériau recouvrant le couronnement. Les résultats ont montré un comportement du couronnement cylindrique fortement dépendant de la fréquence. Pour les optimisations en niveau global, les paramètres optimaux obtenus dans la configuration étudiée sont un rayon de 25 cm et une résistivité au flux d'air de  $29 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ , ce qui correspond, compte tenu du spectre de bruit routier choisi et pour une configuration source-récepteur déterminée, à une efficacité de 1 dB(A) environ pour l'écran avec couronnement par rapport à l'écran droit de même hauteur totale (3 m). Cela ne représente pas une augmentation significative de

l'efficacité mais l'étude sur les couronnements cylindrique a permis une première application simple de l'outil d'optimisation.

Ici, un type de couronnement un peu moins habituel et plus efficace est proposé : le multi-diffracteur. Il s'agit de placer, de part et d'autre d'un écran droit, un ou plusieurs baffle(s), dont certaines surfaces sont absorbantes, afin de créer de la multi-réflexion et d'améliorer la performance acoustique de la protection. Il existe plusieurs types d'écrans multi-diffracteurs qui se distinguent par leur nombre de baffles de part et d'autre de l'écran droit central et par la position des matériaux absorbants. Un premier type d'écran, avec un baffle latéral de chaque côté de l'écran et des matériaux absorbants placés uniquement sur la surface des baffles regardant l'écran central, a été étudié en détail et les résultats sont présentés ci-après.

Ce sont les paramètres géométriques et les caractéristiques des matériaux considérés qui sont optimisés dans ce chapitre avec l'outil OPTIMEA. Cependant, il est important de noter que de nombreux facteurs qui sont fixés pour les calculs d'optimisation, tels que la configuration source-récepteur, les propriétés du sol ou le spectre de bruit routier considéré, ont une influence importante sur les résultats obtenus.

L'étude des écrans acoustiques multi-diffracteurs a fait l'objet d'une publication, intitulée "Optimization of multiple edge barriers with Genetic Algorithms coupled with a Nelder Mead local search", qui a été acceptée pour publication au journal international *Journal of Sound and Vibration*. Cet article est présenté dans son intégralité ci-après ; il fait l'objet de la première partie de ce chapitre (sections 4.1 à 4.6).

A la suite de cet article, trois paragraphes ont été ajoutés, l'un pour présenter d'autres types d'écrans multi-diffracteurs et les résultats d'optimisation leur correspondant (section 4.7), un autre pour présenter une validation de l'outil d'optimisation (section 4.8) et enfin un dernier pour présenter une optimisation multiobjectif (section 4.9). Pour finir, une conclusion générale rappelle les principaux résultats du chapitre.

## **4.1. Introduction**

More and more noise barriers are built along motorways and railways in order to protect people from transportation noise. Research is always in progress to improve the performance of such protections taking into account aesthetic and cost points of view. Crownings added at the top of noise barriers have the advantage of improving the barrier performance without increasing its overall height. Many types of complex noise barriers have been proposed within the last decades by manufacturers and acoustics experts. They vary by their shapes or by the materials they are made of. These protections are usually selected according to an empirical approach which consists in imagining a shape and a material and then carrying out tests on a prototype in order to determine the efficiency of the noise abatement device. However the complexity of the reflection and diffraction phenomena does not make it possible neither to guess in advance which can be the interesting shapes from an acoustical point of view nor where to place the absorbing materials to obtain a maximum efficiency. The 'manual' study of some supposed acoustically interesting cases does not allow a true optimization of an acoustical protection.

Here a more systematic analysis is proposed. The purpose of this work is to use an optimization method to directly determine the optimal shapes and impedances and thus to build a noise barrier with a maximum efficiency. The function to be optimized is the average pressure field in a zone to be protected and the optimization variables are the shape and the surface impedance of the acoustical protection. This study is limited to multiple-edge barriers since they are more efficient than classical capped barriers but there are many other possible realistic applications. This paper aims at showing that this kind of optimisation allows a noticeable improvement of the performance of the acoustic protection. In the following sections we present the boundary element method for prediction of outdoor sound propagation, optimization algorithm together with the geometrical aspects of this problem. Then results are given and discussed.

## **4.2. The Boundary Element Method**

The Boundary Element Method relies on the Integral Equation theory. It has been developed in the 60s and used extensively to predict sound diffraction by complex impedance discontinuities [28]. Its main advantage is that it allows any kind of shape and impedance condition values on the surfaces to be accounted for in a homogeneous atmosphere.

Two families of boundary-element methods can be distinguished: direct and indirect formulations. The direct formulation relies on the use of the Helmholtz integral equation, given in equation (4.1) here after where the unknown functions are pressure and velocity, while the indirect one is based on an integral formulation assuming that the sound field scattered by a boundary can be represented by a linear combination of a distribution of monopoles (a simple-layer potential) and a distribution of dipoles (a double-layer potential).



The numerical code, MICADO, which we propose to use in this work has been developed at the CSTB by Jean [82] and based on the direct integral equation formulation. Here the acoustic pressure  $p(M)$  at any points  $M$  within  $\Omega$  should satisfy:

$$(\Delta + k^2)p(M) = f(M), \quad \forall M \in \Omega \quad (4.1)$$

where  $f(M)$  represents sources distribution and  $k$  is the wave number. As detailed in Figure 4.1, a volume  $D$  with boundary  $\xi$  is included in a domain  $\Omega$ .

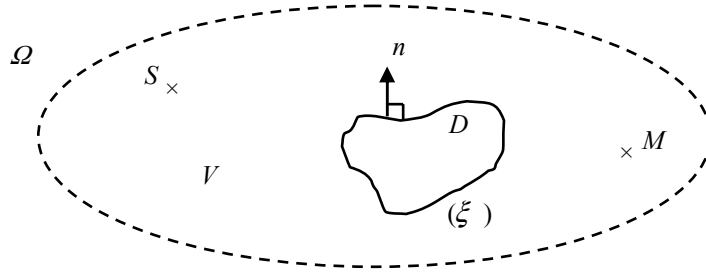


Figure 4.1 Notations for the Boundary Element Method

Using the Green's function  $G$  and the Sommerfeld condition, the following formula is obtained after mathematical simplifications [28]:

$$c(M)p(M) = p_0(M) + \int_{\xi} \left[ p(S) \frac{\partial G}{\partial n_S}(S, M) - G(S, M) \frac{\partial p}{\partial n_S}(M) \right] dS, \quad M \in \Omega \quad (4.2)$$

where  $S$  is a point source;  $M$  is a receiver point in  $\Omega$ ;  $n_s$  is the normal to the surface  $\sigma$  (notations are detailed in Figure 4.1) and  $c$  is a coefficient depending on the position of the receiver:

- $c(M) = 1$  for  $M$  in the propagation domain  $\Omega$  except for its boundaries
- $c(M) = \frac{1}{2}$  for  $M$  on a plane
- $c(M) = 1 - \frac{\theta}{4\pi}$  for an angular point

In MICADO, the BEM is based on a variational approach [82]. The geometry of the problem is bi-dimensional: the source is an infinite coherent line source and all the considered configurations remain unchanged and infinite along the direction perpendicular to the vertical section plane (as shown in Figure 4.2).

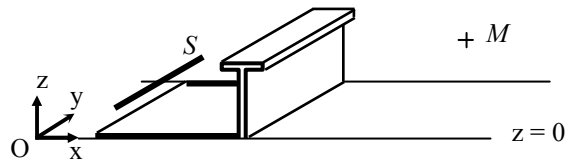


Figure 4.2 Geometrical configuration for 2D-BEM calculations

The ground as well as any obstacle surface are reflective or can be characterized by their own acoustical admittance  $\beta$  and assumed to be locally reacting. The theoretical formalism relies on an integral representation of the pressure field at any point as a function of the pressure on the boundaries, of the admittances as well as of the Green's solution  $G$  (elementary solution for a point source  $S$  and for a receiver  $M$  above an absorbing ground) which can be written as the sum of three different terms [25, 81]:

$$G(S, M) = -\frac{j}{4} H_0^{(1)}(kr) - \frac{j}{4} H_0^{(1)}(kr') + P_\beta(S, M) \quad (4.3)$$

where  $r$  is the distance between the source and the receiver,  $r'$  is the distance between the image-source and the receiver and  $H_0^{(1)}$  is the Hankel function of first kind and zero order. The second term in equation (4.3) represents the contribution of the reflection of the cylindrical wave by a perfectly rigid ground and the last term  $P_\beta$  is a corrective factor taking into account the finite ground admittance [25].

BEM calculations have been carried out in this study with a minimum of five elements per segment and per wavelength. This criterion is considered to be high enough for the convergence of calculations with a precision of 0.05 dB in each third octave band.

Although this method can be time consuming, it has proved to be very accurate for computing sound propagation in a homogeneous atmosphere above complex boundaries. This BEM calculation code is used in this project as a black box which is linked to the optimization subroutine discussed in the following section. Simulations of outdoor acoustical propagation are performed on cases with complex noise barriers and optimization algorithms are used to find the best efficiency of such protections.

### 4.3. Optimization Algorithms

In this section, optimization algorithms used in this study are briefly presented after a short explanation of the choice of those methods.

#### 4.3.1. The choice of an optimization method

It is necessary to use a direct optimization method since the cost function (defined in section 4.4.2) is difficult to differentiate. The Nelder Mead [113] method (described in next section) has been chosen because of its efficiency in local minimum search. It has been coupled with a stochastic optimization method in order to globalize the optimization. One of the main advantages of this approach is the possibility of optimizing several parameters simultaneously (the dimension of the problem  $n$  is the number of parameters to optimize).

The classical method of Nelder Mead is useful and efficient for unbounded search and local minima investigation. Luersen [98] gives a way to globalize the Nelder Mead algorithm based on a probabilistic restart procedure that evaluates the probability of having explored a specified region of the domain. Here the globalization is done by several initialisations of the Nelder Mead algorithm in the interval considered. The

initialisations can be regular, randomised, calculated by a probabilistic restart or induced by a first rough optimization with an evolutionary algorithm [107]. The Nelder Mead algorithm is applied several times with a different simplex for the beginning in order to explore new regions of the study domain and to find the global minimum of the cost function.

The globalization Nelder Mead algorithm is described in Figure 4.3.

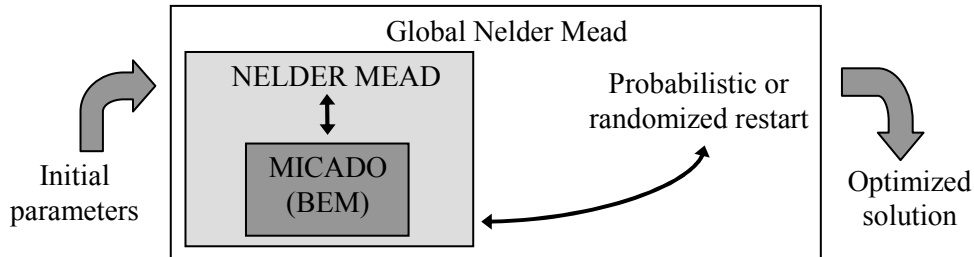


Figure 4.3 Principle of the globalization of the optimization

### 4.3.2. Description of the algorithm of local search: The Nelder Mead Algorithm

The Nelder Mead method attempts to minimize a scalar-valued nonlinear function of  $n$  real variables using only function values, without any derivative information (explicit or implicit).

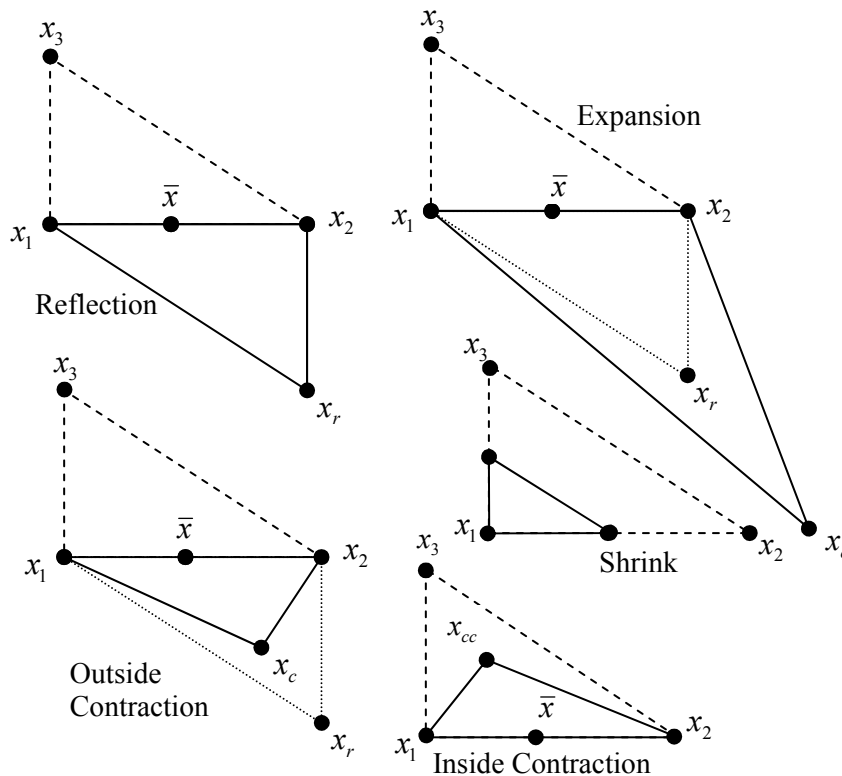


Figure 4.4 Main operators of Nelder Mead algorithm for a bi-dimensional problem

This method has been described for the first time in 1965 [113]. Its starting point is a simplex of dimension  $n + 1$  where  $n$  is the dimension of the problem. A simplex is a Euclidean geometric spatial element having the minimum number of boundary points, such as a line segment in one-dimensional space, a triangle in two-dimensional space, or a tetrahedron in three-dimensional space. The simplex  $x_i$  is organized such as:  $f(x_1) < f(x_2) < \dots < f(x_{n+1})$ . At each step the worst point of the simplex  $x_{n+1}$  is replaced by a new point given by a linear combination between this point itself and the barycentre of the others. The barycentre is the centre of gravity or centre of mass of the object which means the point representing the mean position of the matter in the object. Main operators are presented in Figure 4.4 for a bi-dimensional function. The algorithm stops when the difference between the best point and the worst point of the simplex is smaller than a certain value. Another criterion for the end of the algorithm is the number of function evaluations in order to avoid excessive calculation times.

### 4.3.3. Modifications of the method

The globalization of the algorithm can be achieved with randomized or probabilistic restarts. When the initialisations are randomized, it is a combination of values obtained with the Monte Carlo optimization algorithm [49]. It is not a robust algorithm but it statistically allows exploring the totality of the interval considered. The cost function is evaluated for  $m$  points chosen randomly in the interval and the Nelder Mead algorithm is performed taking the best point as starting point for the simplex. The value of parameter  $m$  depends on the number of parameters to optimize. The higher is the number of parameters to optimize, the higher is  $m$  in order to increase the probability of exploring the entire studied domain.

Other algorithms used to globalize the optimization are evolution strategies [108]. It is chosen to apply a genetic algorithm on a population in order to make a rough optimization and then, the Nelder Mead algorithm (taking as starting point the best point found with the genetic algorithm) ensures a more precise local search. This coupling between a rough global search and a more precise local search is very efficient for optimizing more than two parameters simultaneously. The basic idea for evolutionary algorithms, such as evolution strategies (ES) [124] and genetic algorithms (GA) [68, 73], is to imitate the natural process of biological evolution (Darwinism).

Main characteristics of evolutionary algorithms are:

- a specific representation of candidate solutions of the problem;
- a memorization of results at each stage of the process with the population of elements;
- randomized creation of elements (like mutations defined in Figure 4.5, top diagram) which allows the algorithm to explore new region of the study domain;
- a stop criterion for the algorithm (there is no insurance in finding the global minimum);
- operators (like crossings defined in Figure 4.5, bottom diagram) for evolution of the population (local search).

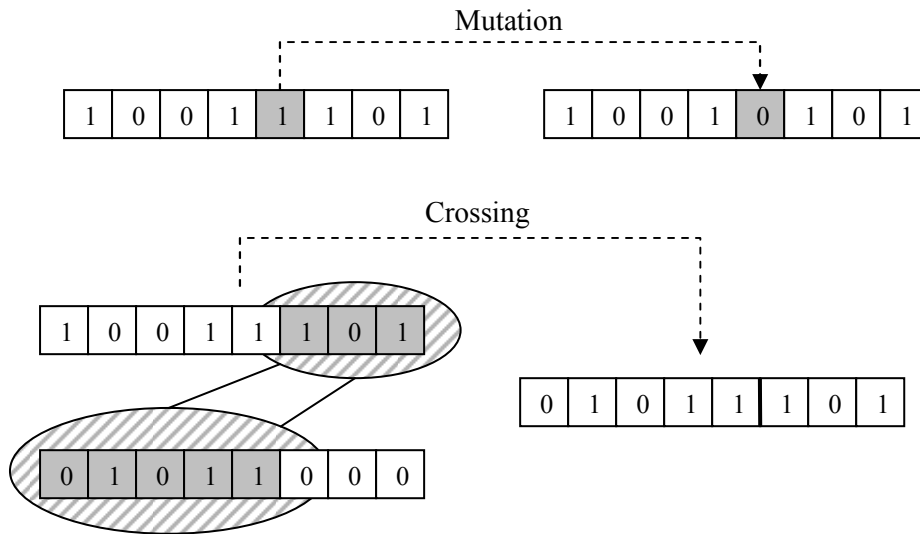


Figure 4.5 Principle of mutations (top diagram) and crossings (bottom diagram) with a binary code of variables

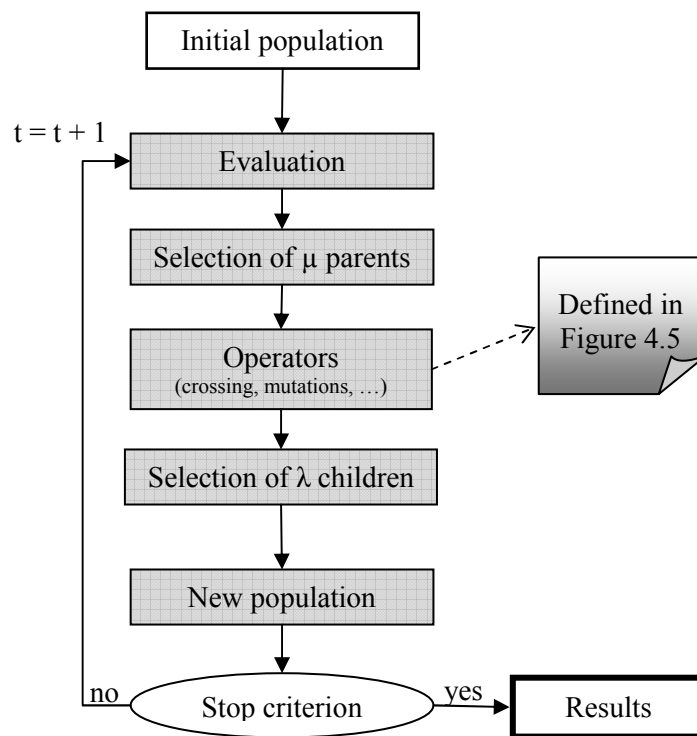


Figure 4.6 Principle of an evolutionary algorithm

One of the simplest and yet powerful evolution strategies is the "one plus one evolution strategy", denoted by  $(1+1)$ -ES. In this algorithm, both the number of parents and the population size (i.e. number of offspring) are set to one: one parent creates one child. This process can be generalized with the  $(\mu + \lambda)$ -ES where  $\mu$  parents create  $\lambda$

children and only the  $\mu$  best survive. In this work an evolutionary algorithm [135] has been used to do the first rough optimization. Figure 4.6 presents the main steps of an evolutionary algorithm.

## 4.4. Problem And Geometry

This modified algorithm for optimization with the Nelder Mead method is used to study a quite realistic problem of outdoor sound propagation. The configuration studied is a road represented by one or several infinite line sources, one or several receivers and a complex noise barrier between sources and receivers. The complex noise barriers studied here are rigid straight barriers and multiple edge crowned barriers, all 3-meter high. In this section, the geometry of the studied barriers and the source-receiver configurations are first detailed; then the cost function (optimized function) is presented.

### 4.4.1. Previous studies

Complex noise barriers have been widely studied; complete reviews and state of the art give an overall view of the topic [45, 129]. In order to preserve an aesthetic aspect, diffracting and/or absorbing elements are placed at the top of the acoustic protection. Those crownings improve the performance of the noise barriers without increasing their overall height which often is an important criterion in the acceptance of the protection. In this paper, the studied complex barriers are rigid, straight barriers with lateral edges added; they are called multiple edge barriers (they are described in Figure 4.7).

This kind of noise protection has already been studied, especially by Crombie et al. in 1994 [33] and Watts in 1995 [130-132] but also by other authors like Morgan [111]. It has been shown with numerical simulations that the addition of lateral diffracting edges could increase the efficiency of a rigid straight barrier by up to 5 dB(A) without increasing its height. Scale model measurement have been carried out by Hothersall [79] for railway noise barrier, including some multiple edged barriers. Otherwise, full scale tests [130, 134] have been carried out and gave measured efficiencies up to 2.5 dB(A), in a relatively good accordance with theoretical simulations. It is important to note that the performance of such added edges is highly dependent on the source-receiver configuration. Moreover the importance of source types on efficiencies of caps has been studied at CSTB by Jean et al. [83]; results have shown that the efficiency depends on the choice of source models. There is a number of different shapes of multiple-edge barriers [33]. Here we consider the noise barrier with one lateral edge on each side of the straight barrier, absorbent material only on the two surfaces of the lateral edges facing the straight barrier as shown in Figure 4.7. Crombie and Watts studied many different shapes of multiple edge profiles but almost always with absorbent surfaces only on the central straight barrier, lateral edges being rigid. Here it is chosen to consider one kind of multiple edge barrier and to try to improve its efficiency by a systematic optimization of some geometrical parameters. Optimization methods have not been widely used to improve the efficiency of road traffic noise

protection yet. However in [127] Thorsson used an optimization method to maximise the efficiency of low height noise barriers with varying surface impedance. He found improvements up to 5 dB(A) but did not consider geometrical parameters in the optimization. Here both shape and surface impedance are optimized.

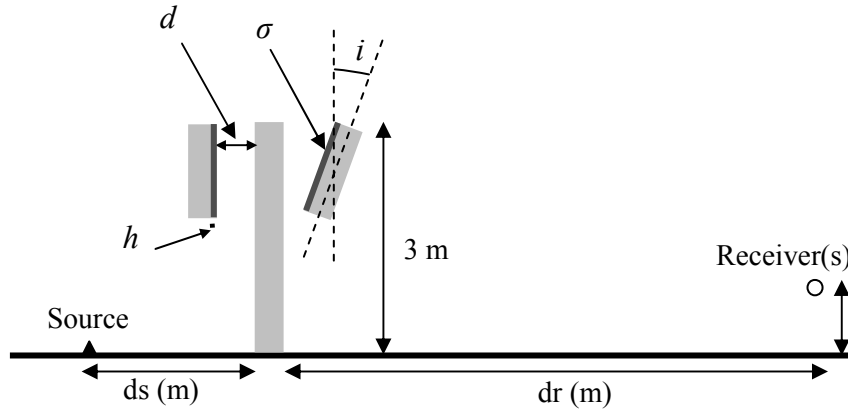


Figure 4.7 The four parameters which can be optimized simultaneously:  $d$ ,  $\sigma$ ,  $h$  and  $i$ .

#### 4.4.2. Geometry and cost function to optimize

In the present work, the optimization parameters are the shape and the acoustical impedance of the covering material used for the crowning. The impedance is determined by the Delany and Bazley's two parameter semi-empirical model [38]. The two parameters are the flow resistivity  $\sigma$  and the thickness  $h$  of the absorbent material. In this work,  $h$  is fixed to 0.05 m in most cases while it is specified in the other cases. The ground is chosen perfectly reflective in order to save calculation time; but the method allows to optimize ground impedance characteristics as well.

All capped and straight barriers considered in this paper are 3-meter high. The shape parameters are the distance  $d$  between the lateral edges and the central rigid straight barrier and the inclination  $i$  of those lateral edges. Added panels are 0.1 m thick including absorbing materials; the central straight barrier is also 0.1 m thick.

One allows parameters to vary in bounded intervals. The four parameters (defined in Figure 4.7) when they are not fixed are optimized in an interval and with a given increment. The values are recapped in Table 4.1.

- The distance  $d$  between the lateral edges and the central straight barrier can vary from 0.2 to 3.0 m or from 0.2 to 2.0 m according to the studied case. The precision of  $d$  is 0.01 m.
- The flow resistivity  $\sigma$  is expressed in  $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ . It can vary from 1  $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  (very absorbent material) to 20000  $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  (rigid material) with a precision of 10  $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ .
- The thickness  $h$  of absorbent materials can vary from 0.01 to 0.1 m and is given with a precision of 0.01 m.

- The inclination  $i$  can vary from  $-90^\circ$  to  $+90^\circ$  (the two configurations for a negative angle or a positive angle are specified in Figure 4.8). Angles are given with a precision of  $1^\circ$ .

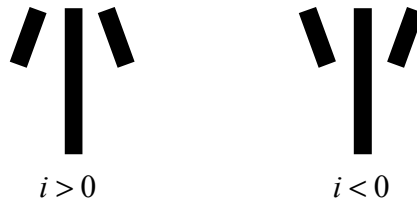


Figure 4.8 Two configurations for a positive angle  $i > 0$  or a negative angle  $i < 0$ .

Parameter	Units	Interval	Increment
$d$	meters	[0.2 ; 3.0]	0.01
$\sigma$	kPa.s.m <sup>-2</sup>	[1 ; 20000]	10
$h$	meters	[0.01 ; 0.10]	0.01
$i$	degrees	[-90 ; 90]	1

Table 4.1 Units and interval of variation for the four parameters

#### 4.4.2.1. Sources

Optimizations have been carried out for frequencies spread over a typical road traffic noise frequency range. It has been chosen to carry out the simulations with five frequencies per third octave band since previous calculations have shown that it would be enough for accuracy and convergence of results with a precision of 0.01 dB(A) (it is true for open non resonant problems only). The global optimization in dB(A) integrates all simulated frequencies from 100 and 2500 Hz third octave bands within the aim of studying realistic cases of transportation noise. Usually in traffic noise studies, calculations are carried out up to 5000 Hz but here preliminary calculations have shown that stopping calculations at 2500 Hz was the best compromise ensuring accurate convergence of results and reasonable calculation time. A typical road traffic noise spectrum given in Table 4.2 and in Figure 4.11 is used for the global calculation of the efficiency. The road traffic noise spectrum used is the A-weighted spectrum calculated with the European standard EN 1793-3:1997 [2]. The influence of the choice of road traffic noise spectrum is shown in section 4.5.2.

It is chosen here to consider only one source in all cases of optimization. The source is placed on the ground since the goal in this paper is to demonstrate the feasibility of this coupling optimization method. It is located 8 or 15 m away from the barrier (which are realistic road configurations), according to the studied case, as shown in Figure 4.9. However several sources could have been considered; in this case, it would have been necessary to sum energetically (incoherent line sources) the contributions of all sources in the calculation of the efficiency.



$\Delta f$ (Hz)	Sound power level of the source: $L_w$ (dB)	Weights from EN 1793-3:1997	$L_{w_A}(\Delta f)$ (dB(A))
100	110	-20	90
125		-20	90
160		-18	92
200		-16	94
250		-15	95
315		-14	96
400		-13	97
500		-12	98
630		-11	99
800		-9	101
1000		-8	102
1250		-9	101
1600		-10	100
2000		-11	99
2500		-13	97

Table 4.2 Road traffic noise sound power spectrum:  $L_w$  from EN 1793-3:1997

#### 4.4.2.2. Receivers

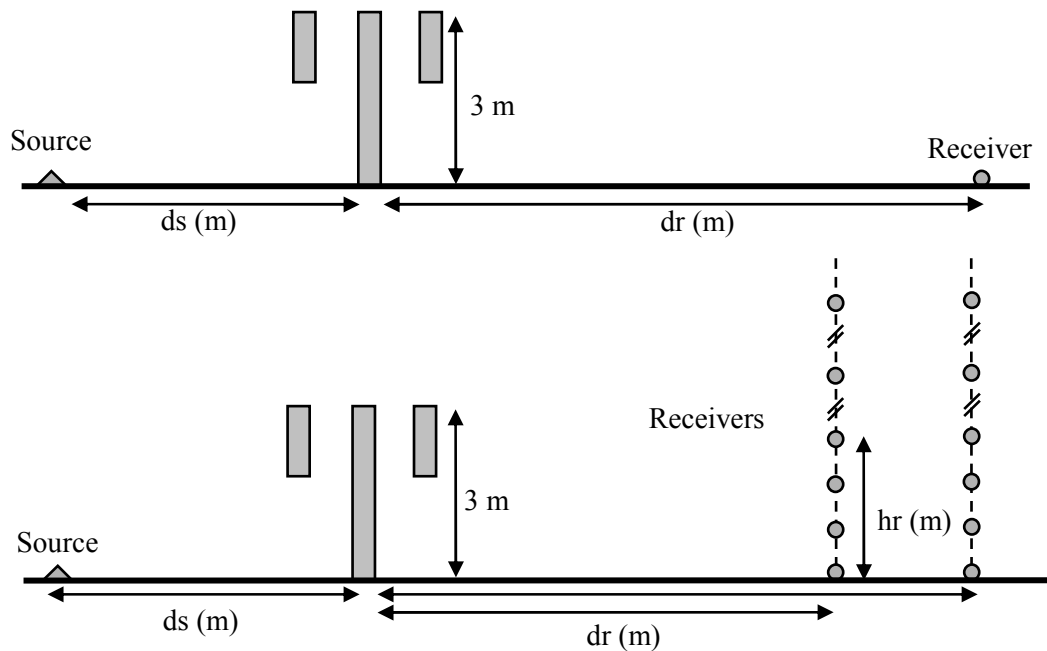


Figure 4.9 Two kinds of source and receivers locations. Top graph:  $d_s = 8$  or  $15$  m;  $d_r = 32$  m. Bottom graph:  $d_s = 8$  m; grid of receivers:  $d_r = 32$  or  $100$  m;  $h_r = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32$  m

Two kinds of receiver configurations have been chosen as shown in Figure 4.9. The first one is with a single receiver located on the ground (in order to eliminate the interference effect between the direct wave and the ground reflection) 32 m after the barrier (top

graph in Figure 4.9). The second one (bottom graph in Figure 4.9) consists in a grid of several receivers located 32 and 100 m away from the barrier at different heights (0, 1, 2, 4, 8, 16 and 32 m above ground). This second configuration allows to consider more realistic transportation noise configurations with receivers at specified altitudes representative of human ears or buildings' floors heights. Here a grid of 14 receivers has been chosen but another receiver configuration could have been selected depending on the area to be protected.

#### 4.4.2.3. Cost function

The cost function is the name for the function which has to be maximized or minimized in the optimization problem. In our case, the objective is to achieve the maximum efficiency of crowning for a given source-receiver configuration. The cost function is a result of BEM calculations of the efficiency of crowning. It is chosen to do only minimization so the cost function is the global insertion loss  $IL_{\text{global}}$  which is the opposite of the efficiency, and writes:

$$IL_{\text{global}}(d, \sigma, h, i) = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{\Delta f} 10^{\frac{Lw_A(\Delta f) + EA_{\Delta f, \text{crowned}}(d, \sigma, h, i)}{10}}}{\sum_{\Delta f} 10^{\frac{Lw_A(\Delta f) + EA_{\Delta f, \text{straight}}}{10}}} \right) \quad (4.4)$$

where  $EA_{\Delta f, \text{crowned}}$  is the excess attenuation for the capped barrier (referred to free field) and  $EA_{\Delta f, \text{straight}}$  is the excess attenuation for the 0.1 m thick straight barrier of the same overall height (3 m), as shown in Figure 4.11.  $Lw_A(\Delta f)$  is the road traffic noise spectrum in third octave bands ( $\Delta f$ ) given in Table 4.2. The lower  $IL_{\text{global}}$ , the more efficient the noise barrier. Therefore, the aim is to find the minimal  $IL_{\text{global}}$ .

The cost function does not have an obvious derivative. This is why it has been chosen to use direct optimization methods presented in section 4.3. The cost function is also highly dependent on the position and the number of sources and receivers. In configurations where there are several receivers the cost function calculates the arithmetic average of all the insertion losses calculated for each receiver.



Figure 4.10 Straight reference barrier (left) and multiple-edge crowned barrier (right)

## 4.5. Results And Discussion

In this section, optimization results of one or more parameter(s) among the four introduced above are presented. Optimizations have been carried out with a criterion for stopping the algorithm when the number of evaluations of the cost function exceeds a certain value.

### 4.5.1. Optimization in dB(A) for multiple edge crowning

Table 4.3 recaps all the results of 1 and 2-parameter optimization when Table 4.4 recaps results of 3 and 4-parameter simultaneous optimization. Eleven different optimization cases are presented in this section; two others are presented in the next section

#### 4.5.1.1. One-parameter optimization

The simplest optimization (case 1) is the one-parameter optimization of  $d$ , the distance between the lateral edges and the central rigid straight barrier, in the configuration with a single source 8 m away from the barrier and a single receiver located 32 m after the barrier. The other parameters are constrained:  $\sigma = 30 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ ,  $h = 0.05 \text{ m}$ ,  $i = 0^\circ$ . The algorithm gives the following result: the best efficiency is 4.5 dB(A) and is reached for  $d$  equal to 0.90 m.

The second case of optimization is the same as case 1 except the value of constrained flow resistivity which is  $100 \text{ kPa.s.m}^{-2}$  instead of  $30 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ . The optimal efficiency is a bit lower (4.3 dB(A)) and the optimal distance  $d$  is nearly the same: 0.94 m instead of 0.90 m.

Case 3 shows the influence of the source location on the optimization results: when the source is located 15 m in front of the barrier instead of 8 m, the maximal efficiency changes from 4.5 dB(A) to 4.2 dB(A) which corresponds to an optimal distance  $d$  of 1.26 m.

Cases 4 and 5 show the influence of considering a grid of receivers instead of a single receiver (details on receivers' locations are given in Figure 4.9). Case 4 is a one-parameter optimization of the distance  $d$  from 0.2 to 3 m and case 5 is the same but from 0.2 to 2.0 m. The results are an optimal distance  $d$  equal to 2.35 m (for an efficiency of 5.0 dB(A)) in the fourth case and an optimal distance  $d$  equal to 1.89 m (for an efficiency of 4.6 dB(A)) in the fifth case.

#### 4.5.1.2. Two-parameter optimization

Cases 6 to 8 are simultaneous optimizations of two parameters among the four considered in this paper.

Case 6 is the optimization of  $d$  and  $\sigma$  simultaneously: the optimal values obtained are a distance  $d$  equal to 0.9 m and a flow resistivity  $\sigma$  equal to  $30 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ ; it corresponds to an efficiency of 4.5 dB(A).

Cases 7 and 8 are the optimization of  $d$  and  $i$  simultaneously.

For case 7,  $d$  can vary from 0.2 and 3 m and  $i$  from  $-90$  to  $+90^\circ$ , the optimal values are a distance  $d$  equal to 3.0 m (one of the accepted limit) and an inclination  $i$  equal to  $-31^\circ$  (details about the sign and the inclination are given in Figure 4.8), it corresponds to an efficiency of 5.3 dB(A).

For case 8,  $d$  can vary from 0.2 to 2 m and  $i$  from  $-90$  to  $+90^\circ$ , the optimal values are a distance  $d$  equal to 0.96 m and an inclination  $i$  equal to  $-23^\circ$ , it corresponds to an efficiency of 5.2 dB(A).

Case Number	ds	dr	Constrained parameters	Variables	Optimized parameter(s)	Efficiency (dB(A))
Units	m	m	$\sigma$ in kPa.s.m <sup>-2</sup> $h$ in m $i$ in °	$d$ in m $\sigma$ in kPa.s.m <sup>-2</sup> $h$ in m $i$ in °		
1	8	32	$\sigma = 30$ $h = 0.05$ $i = 0$	$0.2 < d < 3.0$	$d_{\text{opt}} = 0.90$ m	4.5
2	8	32	$\sigma = 100$ $h = 0.05$ $i = 0$	$0.2 < d < 3.0$	$d_{\text{opt}} = 0.94$ m	4.3
3	15	32	$\sigma = 30$ $h = 0.05$ $i = 0$	$0.2 < d < 3.0$	$d_{\text{opt}} = 1.26$ m	4.2
4	8	32 → 100 (grid)	$\sigma = 30$ $h = 0.05$ $i = 0$	$0.2 < d < 3.0$	$d_{\text{opt}} = 2.35$ m	5.0
5	8	32 → 100 (grid)	$\sigma = 30$ $h = 0.05$ $i = 0$	$0.2 < d < 2.0$	$d_{\text{opt}} = 1.89$ m	4.6
6	8	32	$h = 0.05$ $i = 0$	$0.2 < d < 3.0$ $1 < \sigma < 20000$	$d_{\text{opt}} = 0.90$ m $\sigma_{\text{opt}} = 30$ kPa.s.m <sup>-2</sup>	4.5
7	8	32	$\sigma = 30$ $h = 0.05$	$0.2 < d < 3.0$ $-90 < i < 90$	$d_{\text{opt}} = 3$ m $i_{\text{opt}} = -31^\circ$	5.3
8	8	32	$\sigma = 30$ $h = 0.05$	$0.2 < d < 2.0$ $-90 < i < 90$	$d_{\text{opt}} = 0.96$ m $i_{\text{opt}} = -23^\circ$	5.2

Table 4.3 Results of different cases of optimization with 1 or 2 parameter(s) optimized

### 4.5.1.3. Three-parameter optimization

Cases 9 and 10 are three-parameter optimizations.

Case 9 is the simultaneous optimization of the distance  $d$ , the flow resistivity  $\sigma$  and the inclination of lateral edges  $i$ . The optimal values are  $d$  equal to 0.98 m,  $\sigma$  equal to 30 kPa.s.m<sup>-2</sup> and  $i$  equal to -24°; it corresponds to an efficiency of 5.2 dB(A).

Case 10 is the simultaneous optimization of the distance  $d$ , the flow resistivity  $\sigma$  and the thickness  $h$  of absorbent material. The optimal values are  $d$  equal to 0.9 m,  $\sigma$  equal to 10 kPa.s.m<sup>-2</sup> and  $h$  equal to 0.1 m (one of the accepted limit); it corresponds to an efficiency of 5.2 dB(A).

### 4.5.1.4. Four-parameter optimization

The last case presented in this section, case 11, is a four-parameter optimization. The optimal values resulting are: a distance  $d$  equal to 1.02 m, a flow resistivity  $\sigma$  equal to 10 kPa.s.m<sup>-2</sup>, a thickness  $h$  of absorbent material equal to 0.1 m (one of the accepted limit) and an inclination  $i$  equal to -23°; it corresponds to an efficiency of 5.7 dB(A).

Case Number	ds	dr	Constrained parameters	Variables	Optimized parameter(s)	Efficiency (dB(A))
Units	m	m	$\sigma$ in kPa.s.m <sup>-2</sup> $h$ in m $i$ in °	$d$ in m $\sigma$ in kPa.s.m <sup>-2</sup> $h$ in m $i$ in °		
9	8	32	$h = 0.05$	$0.2 < d < 2.0$ $1 < \sigma < 20000$ $-90 < i < 90$	$d_{\text{opt}} = 0.98$ m $\sigma_{\text{opt}} = 30$ kPa.s.m <sup>-2</sup> $i_{\text{opt}} = -24^\circ$	5.2
10	8	32	$i = 0$	$0.2 < d < 2.0$ $1 < \sigma < 20000$ $0.01 < h < 0.1$	$d_{\text{opt}} = 0.90$ m $\sigma_{\text{opt}} = 10$ kPa.s.m <sup>-2</sup> $h_{\text{opt}} = 0.1$ m	5.0
11	8	32		$0.2 < d < 3.0$ $1 < \sigma < 20000$ $0.01 < h < 0.1$ $-90 < i < 90$	$d_{\text{opt}} = 1.02$ m $\sigma_{\text{opt}} = 10$ kPa.s.m <sup>-2</sup> $h_{\text{opt}} = 0.1$ m $i_{\text{opt}} = -23^\circ$	5.7

Table 4.4 Results of different cases of optimization with 3 or 4 parameters optimized

## 4.5.2. Influence of Sound power spectrum

It is important to note that the choice of the road traffic noise spectrum has a high influence on the results of the optimization of the parameters. This choice has also an influence on the value of the efficiency of the added edges as it is shown with the comparison of a single parameter optimization with two different spectra. The two road traffic noise spectra used for this comparison are: the one used in previous calculations (calculated with the EN 1793-3:1997 standard and given in Table 4.2) and another one calculated with the Nord2000 method [94, 117] given in Table 4.5. They are both plotted in Figure 4.11.

$\Delta f$ (Hz)	Lw (dB) from Nord2000 method	Weights to calculate dB(A)	Lw <sub>A</sub> ( $\Delta f$ ) (dB(A))
100	97.7	-19.1	78.6
125	94.4	-16.1	78.3
160	92.8	-13.4	79.4
200	92.2	-10.9	81.3
250	92.6	-8.6	84.0
315	92.5	-6.6	85.9
400	92.7	-4.8	87.9
500	93.6	-3.3	90.3
630	95.5	-1.9	93.6
800	98.4	-0.8	97.6
1000	101.4	0	101.4
1250	101.7	0.6	102.3
1600	101.3	1	102.3
2000	99.8	1.2	101.0
2500	96.6	1.3	97.9

Table 4.5 Road traffic noise sound power spectrum: LwA from Nord2000 method

Case Number	ds	dr	Constrained parameters	Variables	Optimized parameter(s)	Efficiency (dB(A))
Units	m	m	$\sigma$ in kPa.s.m <sup>-2</sup> h in m i in °	d in m $\sigma$ in kPa.s.m <sup>-2</sup> h in m i in °		
1	8	32	$\sigma = 30$ h = 0.05 i = 0 EN 1793-3 spectrum	0.2 < d < 3.0	d <sub>opt</sub> = 0.90 m	4.5
12	8	32	$\sigma = 30$ h = 0.05 i = 0 Nord2000 spectrum	0.2 < d < 3.0	d <sub>opt</sub> = 2.35 m	8.5
13	8	32	$\sigma = 30$ h = 0.05 i = 0 Nord2000 spectrum	0.2 < d < 1.5	d <sub>opt</sub> = 0.97 m	7.5

Table 4.6 Results of the influence of the road traffic noise spectrum

The results for the single parameter optimization of the distance  $d$  between lateral edges and the central rigid straight barrier are given in Table 4.6. The first line gives the results for the optimization using the road traffic noise spectrum calculated with the EN 1793-3:1997 standard (case 1, presented in previous section). The two following lines (optimization cases 12 and 13) give the results using the Nord2000 road traffic noise

spectrum. Case 12 is the optimization of the distance  $d$  from 0.2 to 3 m, the optimal value found is equal to 2.35 m, it corresponds to an efficiency of 8.5 dB(A). Case 13 is the optimization of the distance  $d$  from 0.2 to 1.5 m, the optimal value found is equal to 0.97 m, it corresponds to an efficiency of 7.5 dB(A). These results show that the choice of the sound power spectrum has an influence on the optimal parameters found and on the best value of the efficiency of the crowning.

Although the resulting efficiency is higher with the second spectrum, the first one had been kept for most of optimization calculations (especially those presented in section 4.5.1) because it is calculated with the European standard EN 1793-3:1997.

### 4.5.3. Global comparison

In this section, vertical noise maps are presented in order to show in a large  $2D$  area the efficiency of multiple-edge noise barriers. The maps comparison allows to show the benefit of the optimization process. Maps have been created taking receivers every 50 cm in both directions  $x$  and  $z$  (defined in Figure 4.2). Previous calculations have shown that it gives accurate maps for those multiple-edge barriers with a precision of 0.05 dB(A). The window considered is 60 m wide (from 10 m before the barrier until 50 m after) and 20 m high (from 0 to 20 m above the ground).

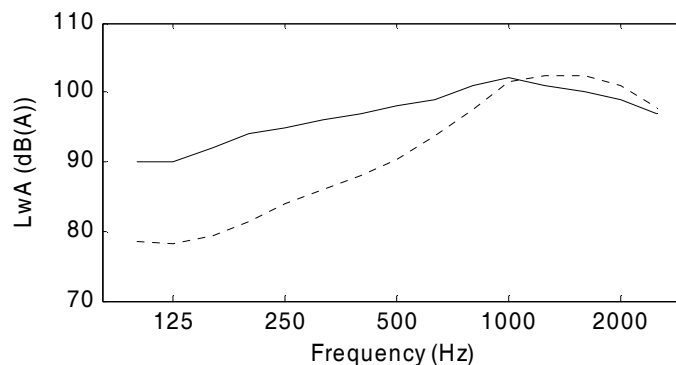


Figure 4.11 Comparison of two different road traffic noise spectra  
Typical road noise spectrum from European standard EN1793-3:1997 (solid line)  
and road noise spectrum of Nord2000 method (dashed line)

Figure 4.12 gives four maps of efficiency resulting of optimization cases 2, 8, 9 and 11 (results and details for each case are given in Table 4.3 and Table 4.4). It shows the impact of optimizing several parameters simultaneously. Those four maps show that the more parameters are optimized the higher is the final optimal efficiency of the protection.

The noise maps, given in Figure 4.13 and Figure 4.14, represent the efficiency (calculated with equation (4.4)) of two different multiple-edge barriers whose shapes are determined by the four parameters considered in this paper (Figure 4.7). Figure 4.13 gives the efficiency of the optimal multiple-edge barrier in the following source-receiver configuration: a single source on the ground, 8 m away from the barrier and a single receiver on the ground and 32 m away behind the barrier. The four optimal

values of parameters are those obtained from the four-parameter optimization (case 11 in Table 4.3) that is to say:  $d=1.02$  m;  $\sigma=10$  kPa.s.m<sup>-2</sup>;  $h=0.1$  m;  $i=-23^\circ$ .

The map in Figure 4.13 shows that the optimal multiple edge crowning induces an efficiency up to 6 dB(A) in some parts of the shadow zone and higher than 4 dB(A) in a large area behind the barrier.

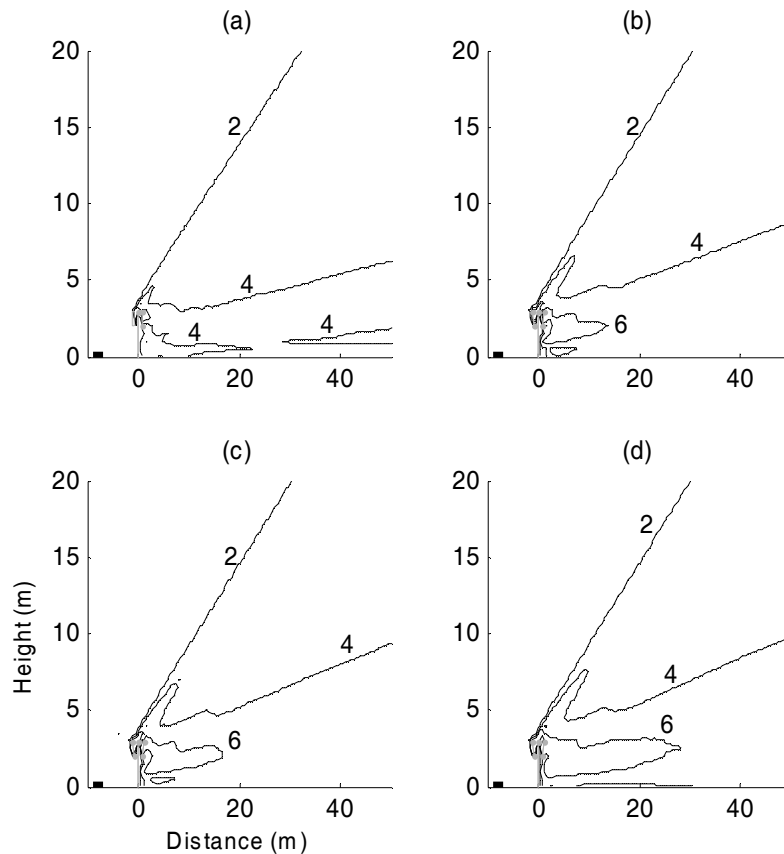


Figure 4.12 Influence of the number of optimized parameter. Efficiency of several optimization cases: (a) 1-parameter optimization (case 2); (b) 2-parameters optimization (case 8); (c) 3-parameters optimization (case 9); (d) 4-parameters optimization (case 11)

Figure 4.14 gives the efficiency of another multiple-edge barrier in the source-receiver configuration chosen in order to show the impact of the optimization process. The four parameter values are:  $d=1.5$  m;  $\sigma=300$  kPa.s.m<sup>-2</sup>;  $h=0.05$  m;  $i=0^\circ$ .

A third global map is given in Figure 4.15 for a calculation with parameters chosen in order to fit in with cases of previous studies presented in [33]. The four parameter values are:  $d=0.5$  m;  $\sigma=20$  kPa.s.m<sup>-2</sup>;  $h=0.1$  m;  $i=0^\circ$ . The absorbing materials cover the central straight barrier and lateral edge are rigid.

The comparison between the three maps clearly shows the effect of using optimization algorithm. It is obvious that the optimal multiple edge crowning (Figure 4.13) is more efficient than others.



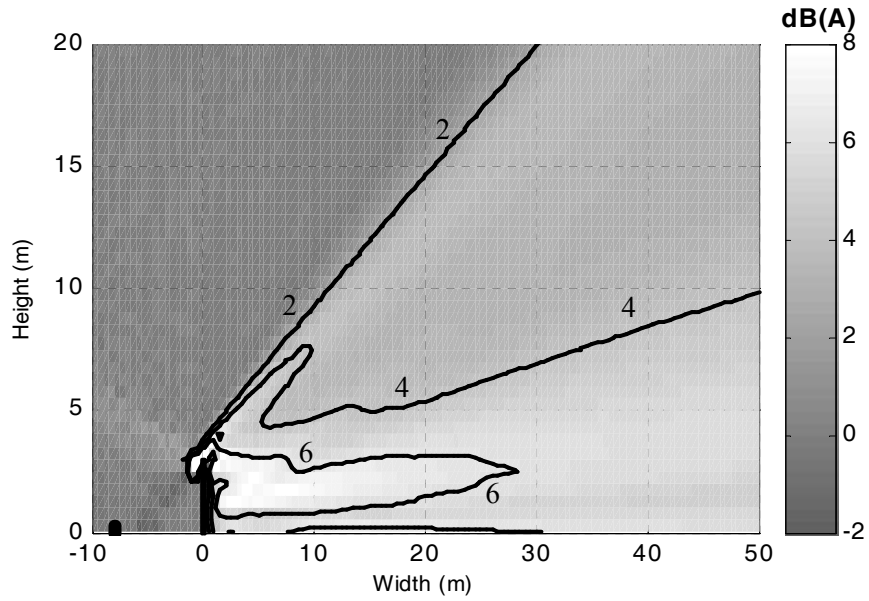


Figure 4.13 Map of the efficiency of the multiple-edge crowned barrier with the four optimal parameters.  $d=1.02$  m;  $\sigma=10$  kPa.s.m<sup>-2</sup>;  $h=0.1$  m;  $i=-23^\circ$

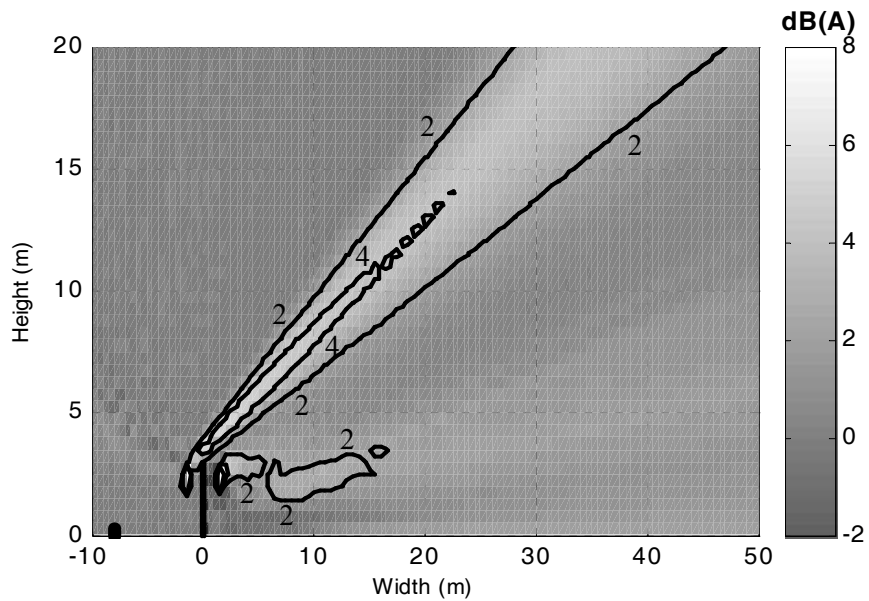


Figure 4.14 Map of the efficiency of the multiple-edge crowned barrier with other parameters.  $d=1.5$  m;  $\sigma=300$  kPa.s.m<sup>-2</sup>;  $h=0.05$  m;  $i=0^\circ$

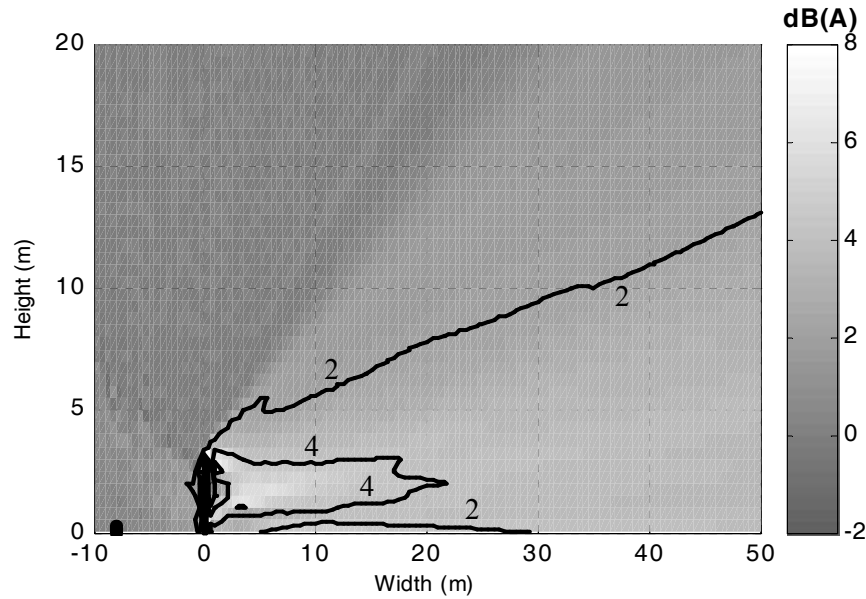


Figure 4.15 Map of the efficiency of a multiple-edge crowned barrier previously studied (absorptive materials on the central barrier and rigid lateral edges).  $d=0.5$  m;  $\sigma=20$  kPa.s.m<sup>-2</sup>;  $h=0.1$  m;  $i=0^\circ$

## 4.6. Conclusion

An original optimization method coupled with a  $2D$  BEM code has been presented with application to the case of multiple edge barriers. The results show that the lateral edges improve significantly the efficiency of the noise barrier without increasing its height. The improvement reaches more than 6 dB(A) in some parts of the shadow zone. The optimization method chosen has allowed us to optimize several parameters simultaneously and consequently to avoid long and fastidious parametric study of such protections.

Here calculations have been achieved in  $2D$ . It has already been shown [37, 83] that in this case tops efficiencies are underestimated in comparison with more realistic  $3D$  simulations: an optimization approach with oblique propagations over the barrier is being developed using a  $2D \frac{1}{2}$  BEM approach [39, 40, 83], the main problem still being a high calculation time.

Another important point here is the use of an impedance model [38] which fails at lowest frequencies: some more sophisticated and accurate approaches are being implemented in our optimization code in order to improve the impedance part of it.

Moreover, work is still in progress on other types of complex protections such as random edged barriers and louvred covers, as well as on the introduction in the optimization of other important parameters such as the local aerodynamic conditions above the barrier edge and global meteorological effects. It is also planned to perform scale model measurement in order to validate the results.

### 4.7. Autres types d'écrans multi-diffracteurs

Dans l'article présenté précédemment, un seul type d'écran multi-diffracteur a été considéré. Dans ce paragraphe, plusieurs autres types d'écrans multi-diffracteurs sont étudiés. On considère la configuration source-récepteur de l'image du haut de la Figure 4.9 : une seule source posée sur le sol et placée à 8 m de la base de l'écran, et un seul récepteur, placé lui aussi sur le sol et à 32 m de la base de l'écran. Le sol est considéré comme parfaitement réfléchissant. Le spectre de bruit routier utilisé pour le calcul de l'efficacité en dB(A) est calculé à l'aide de la norme EN1793-3 [2] (voir Table 4.2 et Figure 4.11). Les matériaux absorbants (de 0.1 m d'épaisseur) sont représentés par le trait épais gris et leur résistivité au flux d'air est fixée à 30 kPa.s.m<sup>-2</sup> pour le calcul de l'impédance par le modèle de Delany et Bazley [38] (ce qui correspond à un matériau absorbant de type laine minérale).

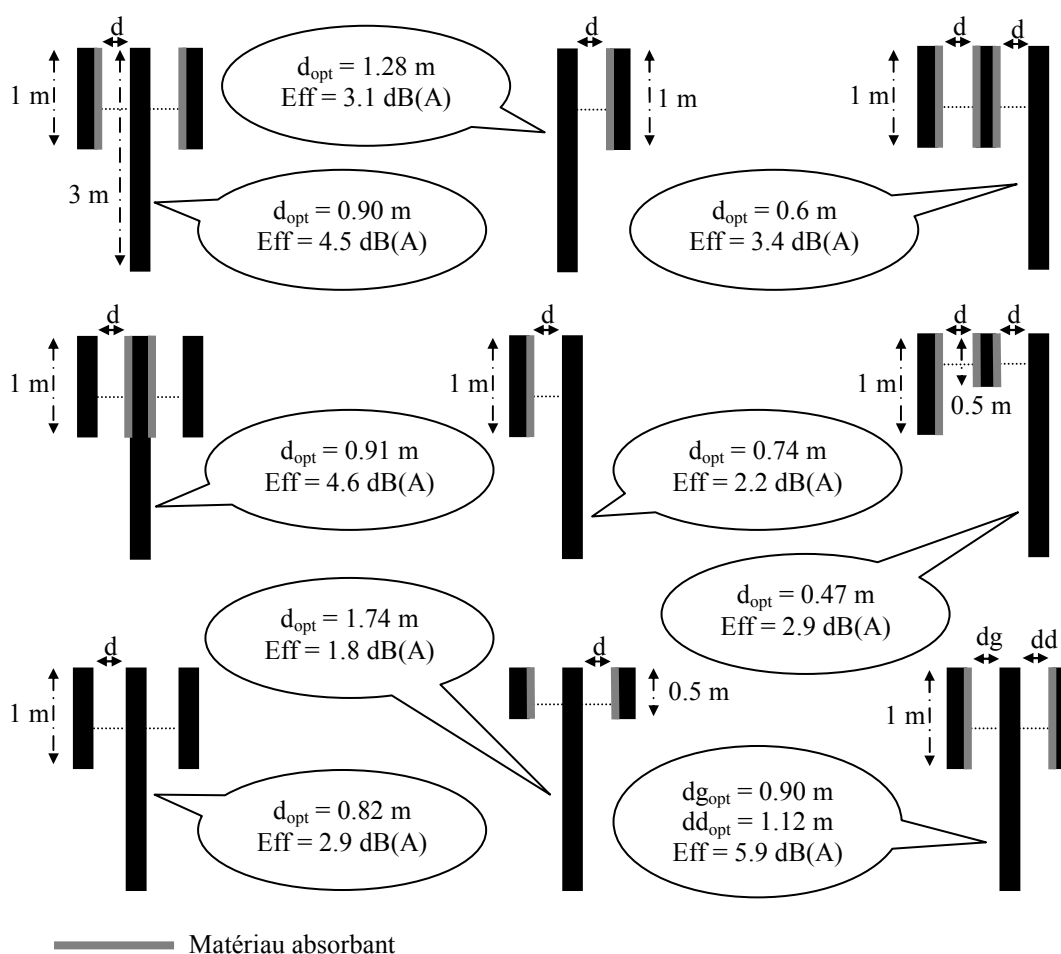


Figure 4.16 Optimisations liées à d'autres types d'écrans multi-diffracteurs

On considère ici neuf écrans multi-diffracteurs, tous d'une hauteur totale de 3 m, mais différents par leur nombre de baffles ainsi que la position et la taille de ceux-ci. Leur géométrie est présentée sur la Figure 4.16. Pour chaque écran, c'est la distance notée  $d$  sur le schéma (et dans le dernier cas, chaque distance  $d_g$  et  $d_d$ ) qui est optimisée à

0.01 m près et dans la limite de l'intervalle [0.1 ; 3.0 m]. Les valeurs de cette distance optimale ainsi que l'efficacité optimale correspondante obtenue (opposée de la perte par insertion qui est calculée avec l'équation (4.4)) sont données dans les bulles sur la Figure 4.16. Les efficacités sont données à 0.1 dB(A) près, cette précision n'est pas représentative en acoustique environnementale mais elle est conservée ici pour montrer la faisabilité d'un tel outil d'optimisation.

Ces résultats montrent que selon le type d'écran multi-diffracteur considéré, les distances optimales, entre les baffles et l'écran droit central, ne sont pas les mêmes. Les distances optimales varient entre 0.47 m et 1.74 m pour des efficacités comprises entre 1.8 dB(A) et 5.9 dB(A). Cela montre l'intérêt de l'utilisation de ces méthodes d'optimisation. En effet, il paraît difficile de prédire a priori de telles différences dans les distances optimales et les efficacités maximales pour les neuf écrans proposés en Figure 4.16. Les algorithmes d'optimisation permettent une recherche systématique qui autorise une diversité des solutions acoustiques et une amélioration des performances.

## 4.8. Validation de l'outil d'optimisation

Dans ce paragraphe il s'agit de valider l'outil d'optimisation développé afin de s'assurer que le résultat obtenu correspond bien à une optimisation. Une validation sur des fonctions peu coûteuses en temps de calcul est présentée en Annexe B, tandis qu'ici, la validation est proposée dans le cas de l'étude d'un écran multi-diffracteur. La configuration considérée est celle présentée en haut de la Figure 4.9 avec une seule source au sol à 8 m de l'écran et un seul récepteur au sol à 32 m de l'écran.

### 4.8.1. Cas de l'optimisation à un paramètre

Considérons dans un premier temps une optimisation à un seul paramètre. Il s'agit de l'optimisation de la distance entre les baffles et l'écran central uniquement ; les baffles sont verticaux et leur surface regardant l'écran central est recouverte d'un matériau dont la résistivité au flux d'air est de  $30 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  et l'épaisseur est de 0.1 m. Il s'agit du cas 1 de la Table 4.3 ou encore du cas en haut à gauche de la Figure 4.16. La distance optimale obtenue par l'outil d'optimisation est de 0.9 m ce qui correspond à une efficacité de 4.5 dB(A). Afin de valider l'outil d'optimisation, l'efficacité d'un tel écran est calculée pour toutes les distances de l'intervalle d'étude c'est-à-dire comprises entre 0.2 m et 3.0 m, avec un pas de 0.01 m. L'opposé de cette efficacité est tracée sur la Figure 4.17 en fonction de la distance.

La courbe de la Figure 4.17 montre que le maximum d'efficacité est bien de 4.5 dB(A) et qu'il correspond bien à une distance de 0.9 m entre les baffles et l'écran central. L'outil d'optimisation permet donc bien d'obtenir la solution optimale dans le cas d'une optimisation à un paramètre.

En outre, l'optimisation systématique permet de réduire le temps de recherche de la solution optimale par rapport à l'étude de la totalité du domaine. En effet, l'utilisation de l'algorithme d'optimisation a nécessité 82 évaluations de la fonction coût tandis que le calcul de l'efficacité dans la totalité du domaine d'étude a nécessité 281 évaluations

de la fonction coût. Le temps de calcul est donc largement réduit (moins du tiers par rapport à l'étude du domaine complet).

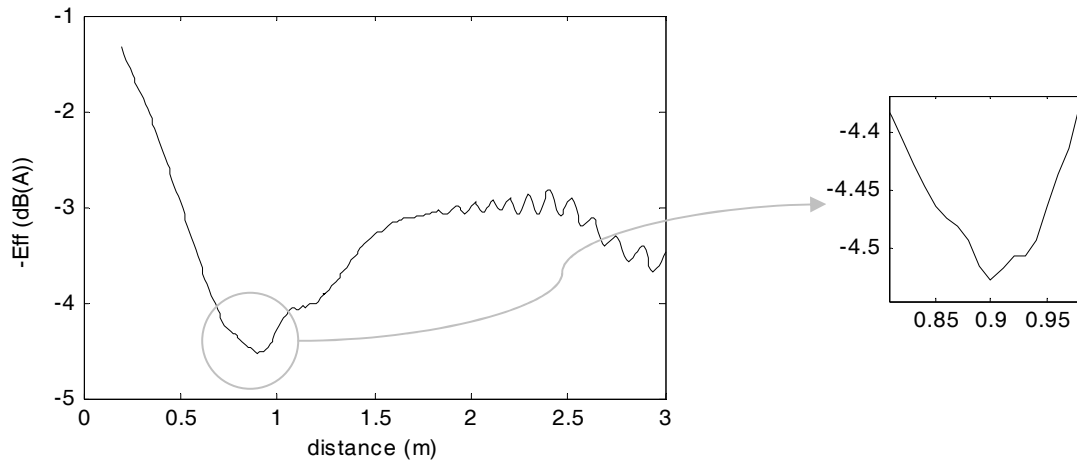


Figure 4.17 Opposé de l'efficacité d'un écran multi-diffracteur en fonction de la distance entre les baffles et l'écran central.

#### 4.8.2. Cas de l'optimisation à deux paramètres

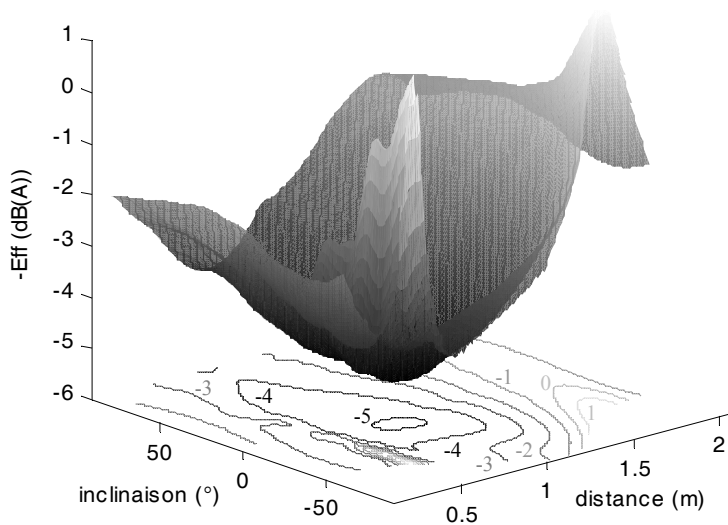


Figure 4.18 Opposé de l'efficacité d'un écran multi-diffracteur en fonction de la distance entre les baffles et l'écran central et en fonction de l'inclinaison des baffles.

Considérons maintenant une optimisation à deux paramètres : la distance entre les baffles et l'écran central ainsi que l'inclinaison des baffles. Il s'agit du cas 8 de la Table 4.3. L'outil d'optimisation donne, après 207 évaluations de la fonction coût, une

efficacité optimale de 5.2 dB(A) pour une distance entre l'écran central et les baffles de 0.97 m et une inclinaison de  $-23^\circ$  (voir Figure 4.8 pour des détails sur l'angle d'inclinaison). L'efficacité est également calculée en chaque point de l'espace d'étude c'est-à-dire entre 0.2 et 2.0 m pour la distance et entre  $-90$  et  $90^\circ$  pour l'inclinaison, ce qui correspond à 32761 évaluations de la fonction coût compte tenu de la précision affectée à chacun des deux paramètres. L'efficacité est tracée en 3D sur la Figure 4.18 en fonction de la distance et de l'inclinaison. Des courbes en fonction de l'inclinaison pour une distance fixée et inversement sont tracées sur la Figure 4.20 pour plus de lisibilité. Le maximum d'efficacité correspond bien à 5.2 dB(A) pour une distance de 0.97 m et une inclinaison de  $-23^\circ$ . L'outil d'optimisation permet donc bien d'obtenir l'efficacité optimale, avec plus de 150 fois moins d'évaluations de la fonction coût que pour une étude de la totalité du domaine d'étude.

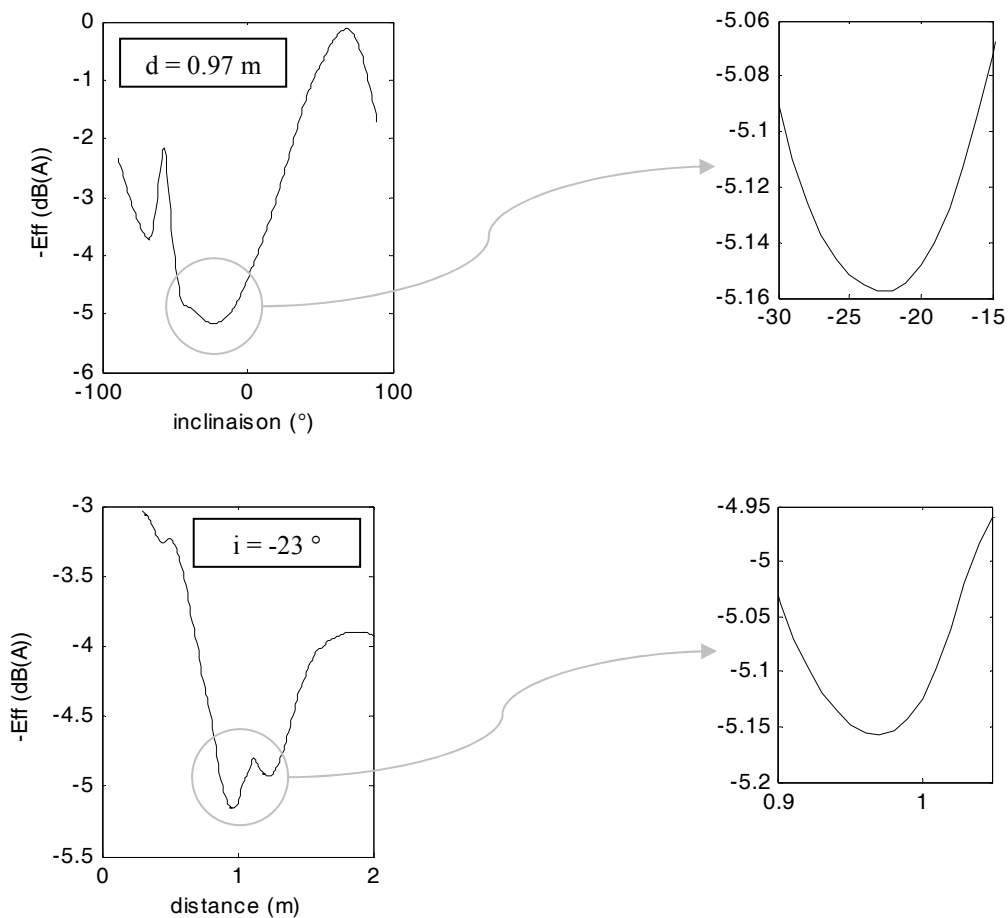


Figure 4.19 Opposé de l'efficacité d'un écran multi-diffracteur en fonction de la distance entre les baffles et l'écran central pour une inclinaison donnée (en haut) et en fonction de l'inclinaison pour une distance donnée (en bas).

Pour conclure, l'outil d'optimisation a été validé avec succès pour un cas d'optimisation à un paramètre et un cas d'optimisation à deux paramètres. Cette section montre également le gain en nombre d'évaluations de la fonction coût, donc le gain en temps de calcul, en utilisant l'outil d'optimisation par rapport à une étude de la totalité du

domaine d'étude. Ce gain est d'autant plus significatif lorsque le nombre de paramètres à optimiser est important.

## 4.9. Optimisation multiobjectif

Dans ce paragraphe, il s'agit de réaliser une optimisation multiobjectif afin d'optimiser non seulement la performance acoustique de la protection mais aussi son prix de revient (coûts cumulés de fourniture et de pose). Bien que l'on parle généralement de "coût" d'un écran, on utilise ici le terme "prix de revient" pour éviter toute confusion avec le terme "fonction coût" utilisé pour l'optimisation. Il s'agit ici d'une optimisation à deux objectifs.

Les paramètres à optimiser dans ce paragraphe sont  $d$  la distance en mètre entre les baffles latéraux et l'écran central,  $\sigma$  la résistivité au flux d'air en  $\text{kPa.s.m}^{-2}$  du matériau absorbant recouvrant la face intérieure des baffles et  $i$  l'inclinaison en degré des baffles. Il s'agit donc d'une optimisation à trois paramètres. On se place dans la même configuration source récepteur qu'au paragraphe 4.5.1.3. On se retrouve alors dans le cas, appelé "case 9", où la distance optimale était de 0.98 m, la résistivité optimale de 30  $\text{kPa.s.m}^{-2}$  et l'inclinaison optimale de  $-24^\circ$ , ce qui correspondait à une efficacité de 5.2 dB(A).

### 4.9.1. Modélisation du prix de revient d'une protection

Un modèle arbitraire très simple de calcul du prix de revient d'un écran est proposé ici, il présente des limites dans son interprétation mais est utilisé comme première approche pour l'optimisation multiobjectif. On considère que le prix de revient de la protection dépend de la nature des matériaux utilisés (fourniture) ainsi que de la facilité ou non de mise en œuvre (pose). La longueur totale et la hauteur totale de l'écran ont une influence importante sur le prix de revient d'un écran. Cependant, ces deux paramètres étant fixes dans les optimisations réalisées dans ce paragraphe, ils n'apparaissent pas dans la modélisation du prix de revient de la protection.

Dans notre cas, lorsque  $d$  augmente ou lorsque la valeur absolue de  $i$  augmente, le prix de revient augmente à cause de la difficulté de mise en œuvre. En ce qui concerne  $\sigma$ , plus sa valeur est faible, plus le matériau absorbe les ondes acoustiques et plus il coûte cher d'un point de vue acoustique d'où l'augmentation du prix de revient avec la diminution de  $\sigma$ . L'épaisseur du matériau est considérée comme fixe et égale à 0.05 m. Le prix de revient de l'écran de type multi-diffracteur est considéré comme proportionnel à la valeur  $cost$  définie par :

$$cost = \alpha_c \frac{d}{d_{\max}} + \beta_c \frac{|i|}{i_{\max}} - \gamma_c \frac{\min(\sigma, 200)}{\sigma_{\max}} \quad (4.5)$$

où  $d_{\max}$  est la distance maximale autorisée dans les simulations,  $i_{\max}$  est l'inclinaison maximale et  $\sigma_{\max}$  la résistivité au flux d'air maximale. Concernant l'inclinaison c'est la valeur absolue qui intervient car quelque soit le sens de l'inclinaison le prix augmente

avec la valeur l'angle. Concernant la résistivité au flux d'air, c'est le minimum entre la valeur de  $\sigma$  et la valeur 200 qui intervient car on considère que pour des résistivités supérieures à 200 kPa.s.m<sup>-2</sup> l'économie par rapport à des matériaux plus absorbants n'est pas significative.

$\alpha_c$ ,  $\beta_c$  et  $\gamma_c$  sont des coefficient permettant de donner plus ou moins d'importance à chaque paramètre dans le calcul du prix de revient. Dans une première approche, ils sont tous les trois pris égaux à 1. Le coefficient multiplicatif *cost* pour le calcul du prix de revient d'un écran devient :

$$cost = \frac{d}{d_{\max}} + \frac{|i|}{i_{\max}} - \frac{\min(\sigma, 200)}{\sigma_{\max}} \quad (4.6)$$

La valeur *cost* varie entre -1 et +2, l'objectif étant de la minimiser.

Il est à noter que, comme rapporté dans l'état de l'art sur les écrans acoustiques de Watts [129], des logiciels ont été développés (et même commercialisés) dans le but de déterminer des écrans acoustiques efficaces à moindre coût. Citons en guise d'exemple le programme CROSECT [128] ou le module ECRAN du logiciel MITHRA [61, 63]. Cependant, ces logiciels ne s'appliquent qu'à des écrans simples et ne permettent pas de considérer des écrans de forme complexe.

#### 4.9.2. Optimisation avec les méthode agrégées

On réalise dans ce paragraphe une optimisation multiobjectif avec la méthode de la moyenne pondérée qui est une des méthodes dites agrégées. Le plus difficile dans l'optimisation multiobjectif avec une méthode agrégée est de définir le poids à attribuer à chaque objectif. L'objectif *cost* varie entre -1 et +2, l'amplitude est de 3 ; d'autre part, l'objectif d'efficacité acoustique *eff* avait une valeur optimale dans le cas d'une optimisation mono-objectif de 5 dB(A) environ. Par conséquent, on choisit d'attribuer dans un premier temps le même poids aux deux objectifs, dans un second temps un poids deux fois plus important à l'objectif de prix dont l'intervalle de variation est plus petit et enfin un poids trois fois plus important à l'efficacité acoustique qui reste la fonction première d'un écran anti-bruit. Le but étant d'avoir une efficacité la plus grande possible pour un prix le plus faible possible, on se ramène à des minimisations mono-objectifs avec les fonctions coût  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  définies par :

$$f_1 = \frac{1}{2} cost - \frac{1}{2} eff \quad (4.7)$$

$$f_2 = \frac{2}{3} cost - \frac{1}{3} eff \quad (4.8)$$

$$f_3 = \frac{1}{4} cost - \frac{3}{4} eff \quad (4.9)$$



Les résultats des trois optimisations sont donnés dans la Table 4.7. La minimisation mono-objectif est réalisée avec la méthode de Nelder Mead avec des réinitialisations déterminées par un algorithme de type Monte Carlo.

En fonction de l'importance que l'on veut donner au prix de revient d'un écran par rapport à son efficacité acoustique, le résultat de l'optimisation multiobjectif est différent. L'efficacité acoustique est toutefois dans tous les cas plus faible que lorsqu'on ne prenait pas le prix en compte car une contrainte supplémentaire est imposée.

Le décideur intervient ici avant l'application de l'algorithme d'optimisation. Le résultat final dépend donc des choix a priori du décideur.

Le temps de calcul de ces optimisations multiobjectifs par méthode agrégée est de quelques heures sur un PC équipé d'un processeur de type pentium IV (2.66 GHz).

Fonction coût	Variables	Paramètres optimisés	Valeur optimale	Efficacité (dB(A))	Prix
unités	d en m $\sigma$ en kPa.s.m <sup>-2</sup> i en °				
$f_1$	$0.2 < d < 2.0$ $1 < \sigma < 20000$ $-90 < i < 90$	$d_{opt} = 0.97$ m $\sigma_{opt} = 200$ kPa.s.m <sup>-2</sup> $i_{opt} = -21^\circ$	-2.54	4.8	-0.28
$f_2$	$0.2 < d < 2.0$ $1 < \sigma < 20000$ $-90 < i < 90$	$d_{opt} = 0.93$ m $\sigma_{opt} = 200$ kPa.s.m <sup>-2</sup> $i_{opt} = -12^\circ$	-1.78	4.5	-0.40
$f_3$	$0.2 < d < 2.0$ $1 < \sigma < 20000$ $-90 < i < 90$	$d_{opt} = 1.01$ m $\sigma_{opt} = 160$ kPa.s.m <sup>-2</sup> $i_{opt} = -27^\circ$	-3.67	4.9	0.01

Table 4.7 Résultats des trois optimisations multiobjectifs avec une méthode agrégée.

### 4.9.3. Optimisation avec les méthodes évolutionnaires Pareto

Dans ce paragraphe, on se propose d'utiliser une méthode dite Pareto pour réaliser l'optimisation multiobjectif en utilisant les méthodes VEGA et PAES (voir paragraphe 3.3). Les résultats sont récapitulés dans la Table 4.8 pour l'optimisation avec la méthode VEGA et dans la Table 4.9 pour l'optimisation avec la méthode PAES.

Durant l'application de l'algorithme VEGA, 1020 évaluations de la fonction ont été réalisées avant d'obtenir les résultats. Dans les résultats obtenus il y a 56 éléments dominants au sens de Pareto (ils appartiennent à ce qu'on appelle la frontière Pareto et on les appelle les éléments Pareto). On donne, dans Table 4.8, 10 de ces 56 éléments Pareto. Le décideur choisit parmi les solutions potentielles celle qui lui convient le mieux.

Durant l'application de l'algorithme PAES, ce sont 1966 évaluations de la fonction qui ont été réalisées avant d'obtenir les résultats. Dans les résultats obtenus il y a 43 éléments Pareto dont 10 sont donnés dans la Table 4.9. Le décideur intervient afin de choisir l'unique valeur optimale retenue à la fin du problème.

Dans notre cas, le décideur intervient en favorisant l'objectif d'efficacité acoustique qui reste le but principal d'un écran anti-bruit, son prix de revient étant un facteur secondaire.

10 des 56 différentes solutions Pareto obtenues à la fin de l'algorithme						Solution retenue par le décideur	
d (m)	1	1	0,65	0,98	0,87	d	0,95
$\sigma$ (kPa.s.m <sup>-2</sup> )	50	410	200	240	240	$\sigma$	720
i (°)	-30	-17	-6	-29	-16	i	-28
eff	5,1	4,5	3,5	4,8	4,4	eff	4,5
prix	0,59	-0,31	-0,61	-0,18	-0,39	prix	-0,21
d (m)	0,82	0,76	0,86	0,95	0,9		
$\sigma$ (kPa.s.m <sup>-2</sup> )	200	200	200	720	200		
i (°)	-6	-6	-6	-28	-6		
eff	4,1	3,9	4,2	4,5	4,3		
prix	-0,52	-0,55	-0,5	-0,21	-0,48		

Table 4.8 Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode VEGA

10 des 43 différentes solutions Pareto obtenues à la fin de l'algorithme						Solution retenue par le décideur	
d (m)	0,98	0,99	0,72	0,84	1	d	0,99
$\sigma$ (kPa.s.m <sup>-2</sup> )	440	240	230	260	110	$\sigma$	240
i (°)	-15	-18	-5	-9	-30	i	-18
eff	4,5	4,7	3,7	4,0	5,0	eff	4,7
prix	-0,34	-0,30	-0,58	-0,48	0,29	prix	-0,30
d (m)	0,22	0,93	0,83	0,93	0,91		
$\sigma$ (kPa.s.m <sup>-2</sup> )	220	50	320	280	110		
i (°)	-1	-20	-8	-10	-12		
eff	1,4	5,1	4,0	4,4	4,8		
prix	-0,88	0,44	-0,5	-0,42	0,04		

Table 4.9 Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode PAES.

On trace sur la Figure 4.20 un graphe 2D représentant les valeurs d'efficacité et de prix correspondant aux évaluations de la fonction lors de l'application de l'algorithme VEGA. Les solutions les plus en bas à droite du graphe correspondent aux meilleures solutions (prix faible pour une efficacité acoustique élevée). Les solutions dites Pareto sont représentées par des croix foncées.

Le temps de calcul de ces optimisations multiobjectifs par méthode Pareto est environ trois fois plus important qu'avec les méthodes agrégées : de quelques heures à une journée sur un PC équipé d'un processeur de type pentium IV (2.66 GHz).

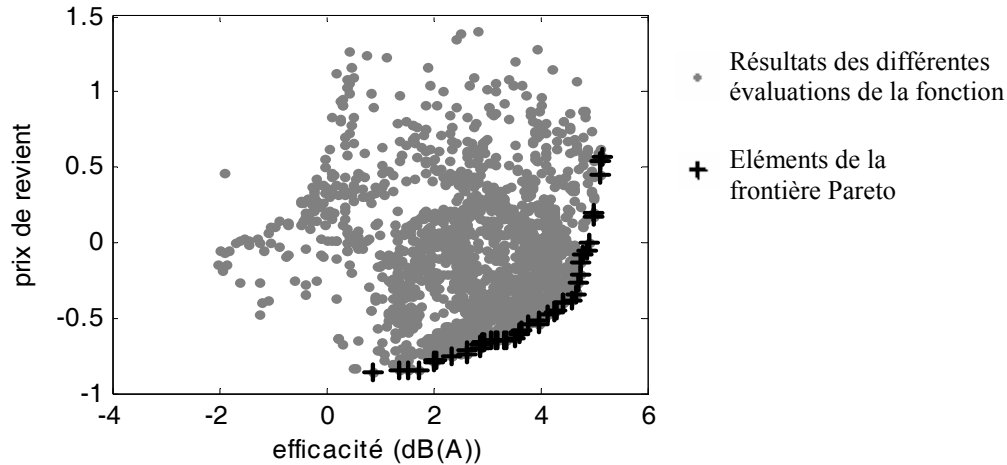


Figure 4.20 Résultats de l'optimisation multiobjectif avec la méthode PAES.

#### 4.9.4. Conclusion

L'optimisation multiobjectif par des méthodes agrégées ainsi que par des méthodes Pareto a permis d'optimiser simultanément la performance acoustique et le prix de revient d'une protection anti-bruit. Une intervention du décideur est nécessaire (avant ou après l'application de l'algorithme d'optimisation selon le type de méthode) et le résultat final de l'optimisation en dépend fortement.

## **4.10. Conclusion du chapitre**

Ce chapitre montre l'intérêt de considérer des écrans avec couronnement pour augmenter l'efficacité acoustique de la protection sans en augmenter la hauteur totale en présentant des résultats sur le cas particulier des écrans dits multi-diffracteurs.

Pour une configuration source-récepteur donnée, et pour un spectre de bruit routier donné, les calculs présentés dans ce chapitre montrent que l'on peut atteindre jusqu'à 6 dB(A) d'efficacité supplémentaire en considérant un couronnement multi-diffracteur par rapport à une configuration avec un écran droit seul de même hauteur totale.

L'outil d'optimisation OPTIMEA a permis d'obtenir des valeurs maximales d'efficacité dans des configurations données. Les solutions optimales obtenues ne sont a priori pas forcément celles auxquelles auraient pensé les acousticiens. C'est l'avantage de l'optimisation : s'affranchir des a priori pour obtenir la solution optimale.

Des méthodes simplifiées d'optimisation multiobjectif ont permis d'optimiser simultanément le prix de revient de la protection anti-bruit ainsi que son efficacité acoustique. Les résultats sont fortement dépendants des choix du décideur.

Le modèle d'impédance de surface de Delany et Bazley a été choisi dans ce travail de thèse pour sa grande simplicité afin de montrer la faisabilité d'un outil d'optimisation mais l'introduction de modèles plus réalistes serait intéressante afin de réaliser une optimisation plus juste des propriétés des matériaux.

D'autres phénomènes non acoustiques, tel que la résistance mécanique ou les effets aérodynamiques, pourraient par la suite être envisagés dans l'optimisation multiobjective afin d'obtenir une solution globale optimisée pour une protection acoustique de forme complexe.



# Chapitre 5.

## Optimisation d'écrans avec couronnement à surface réactive

L'objectif principal des couronnements d'écran (dispositifs placés en faitage de l'écran droit) est d'améliorer la performance acoustique de la protection sans en augmenter la hauteur totale. Dans ce chapitre, il s'agit d'augmenter encore l'efficacité d'un écran avec couronnement en rendant réactives les surfaces de ce dernier.

Cette opération est réalisée en insérant des puits de profondeurs variables sur la partie supérieure du couronnement. L'espace de travail de ce chapitre étant en deux dimensions, les puits sont réalisés dans une coupe de l'écran et sont donc considérés comme infinis dans la troisième direction.

Ces écrans à couronnement dont les surfaces sont réactives ont déjà fait l'objet de recherches, les profondeurs des puits étant généralement obtenues à partir de l'étude du phénomène physique de résonance. Ici, on se propose d'utiliser des algorithmes d'optimisation afin de déterminer les profondeurs optimales des puits à insérer dans un couronnement pour obtenir une protection acoustique dont l'efficacité est maximale.

L'optimisation des écrans réactifs, grâce à l'outil OPTIMEA, a fait l'objet d'une publication, intitulée "Optimization with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface", acceptée pour publication dans le journal international *Applied Acoustics*. Le texte est présenté tel quel ci-dessous. Ce sujet avait déjà fait l'objet d'une première étude qui avait été présentée lors d'un congrès international en 2006 [16].

## 5.1. Introduction

Over the last years, noise barriers have been widely studied in order to reduce transportation noise. Simplest noise barriers are straight and rigid; however they have sometimes an additional device on its top called cap or crowning. The latter allows to improve the barrier performance without increasing its overall height. Many different shapes of crownings have been proposed and studied by acousticians to increase the acoustical efficiency of barriers. Complete reviews on noise barriers and crownings can be found in Watts [129] and Ekici [45].

The performance of non-flat top edge of noise barriers caps has already been studied; here, a systematic research is proposed. The purpose is to use an optimization method to directly determine the optimal depths of a series of wells on the top edge of the barrier; and thus to obtain a noise barrier with a maximum efficiency. The function to be optimized (called the cost function or the fitness function) is the average efficiency of the barrier compared with a reference configuration in a specified zone to be protected. The optimization variables are the well depths on the top surface and when specified the flow resistivity of the absorbing materials considered. The reference configuration is the capped barrier without any well. This study is limited to T-shaped barriers but there are many other applications. The objective [...] is to show that this kind of optimisation allows a noticeable improvement of the performance of the acoustic protection.

## 5.2. Acoustic simulations with a Boundary Element Method

The Boundary Element Method (BEM) which relies on the Integral Equation theory has been developed in the 60s and has been since extensively used [28]. Two families of boundary element methods can be distinguished: direct and indirect formulations. The direct formulation relies on the use of the Helmholtz integral equation where the unknown functions are pressure and velocity, while the indirect one is based on an integral formulation assuming that the sound field scattered by a boundary can be represented by a linear combination of a distribution of monopoles (a simple-layer potential) and a distribution of dipoles (a double-layer potential). References [25, 28, 81, 82, 125] are suggested for more details on the method.

In this work, the numerical simulations of outdoor sound propagation have been carried out with MICADO. It is a BEM numerical code based on the direct formulation. It has been developed with a variational approach by Jean [82] at CSTB. Three versions exist for  $2D$ ,  $2D \frac{1}{2}$  or  $3D$  configurations. In the  $2D$  version used here because of time consuming calculations, the geometry of the problem is bi-dimensional: the source is an infinite linear coherent source and all the obstacles remain unchanged and infinite along a direction perpendicular to the vertical section plane (as shown in Figure 5.1). The BEM is a powerful tool in acoustical predictions for complex topologies and geometries in a homogeneous atmosphere. In this work, for the frequency range studied, it is assumed that meteorological effects can be neglected since the distances considered are shorter than around one hundred metres.

This BEM method can be very time consuming depending on some parameters among which the frequency and on the length of boundaries to mesh. A compromise on the number of frequencies and the number of elements for each segment of the geometry has to be found in order to obtain accurate results with reasonable calculation times. Preliminary calculations are done for each kind of configuration to determine this compromise, depending on the accuracy wanted. For optimisation purpose, many acoustical simulations are required and the calculation times are strongly increased. In the optimisation, the time consuming part is the acoustical simulations, the steps of the optimisation algorithm do not significantly increase calculation times.

The numerical code MICADO has been extensively used for different kinds of noise barriers and validated with measurement campaigns [17, 36, 37]. Since the aim of this paper is the optimisation of noise protections, it is considered that, with preliminary calculations determining values for intrinsic parameters, the numerical code gives accurate results.

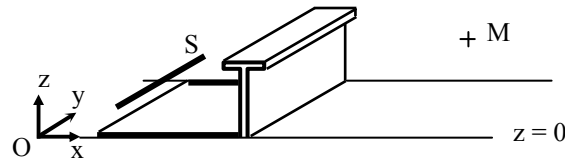


Figure 5.1 Geometrical configuration for 2D-BEM calculations

### 5.3. Optimization method: Genetic Algorithms

It is necessary to use a direct optimization method since the function to optimize (called cost function or fitness and defined in a next section) is difficult to differentiate. The aim of this work is the optimization of a relatively high number of varying parameters simultaneously; therefore the optimization algorithm has to be effective in such conditions. In addition, it is necessary to avoid any local search and to ensure a global optimization. Those three constraints (not easily derivable, simultaneous optimization of several parameters and global search) induced the choice of an evolutionary algorithm to perform the optimization [...]. Although there are many other direct optimisation methods such as the Nelder Mead algorithm [113], the simulated annealing method [3, 88] or the taboo search [66, 70], it has been chosen to use evolutionary algorithms since they are very efficient if there are many parameters to optimise.

The basic idea of evolutionary algorithms is to imitate the natural process of biological evolution (Darwinism). In this work, it has been chosen to use a genetic algorithm [68, 73] which is one of the four kinds of evolutionary algorithms and which is effective in spread study domain. The successive steps for such an algorithm are presented in Figure 5.2. The main characteristics of evolutionary algorithms are:

- A way to remember results with the population of elements,
- An operator insuring evolution of the population (crossovers),
- A randomized creation of elements which allows the algorithm to explore new regions of the study domain (mutations),



- A stop criterion for the algorithm

In this work a genetic algorithm has been applied to the problematic of T-shaped noise protections with wells on the top surface. The algorithm starts with an initial population of 100 elements chosen randomly in the study domain. The elements are called individuals or chromosomes and here it is chosen to keep the real coding. At each generation, the population size is 100 elements. A probabilistic selection is performed based upon the results of the evaluation of the cost function for each element. After the selection, the operator of crossovers is applied with a probability rate of 0.7 and the mutation operator with a rate of 0.1. The algorithm stops when the sum of the deviations among elements is smaller than a specified rate. There is also a stop criterion based on a maximum number of evaluations of the cost function in order to avoid prohibitive calculation times.

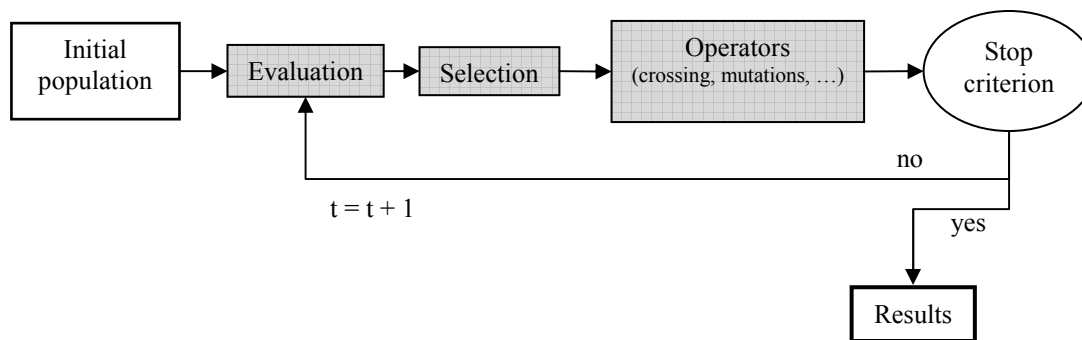


Figure 5.2 Principle of an evolutionary algorithm

## 5.4. Statement of the problem

Crownings are usually added at the top of noise barriers in order to improve their performance; moreover, they also play a part in the aesthetical aspect. This work focuses on T-shaped barriers (one of the simplest case) which have been studied for example by Hothersall in [78] and by Defrance in [37]. The aim is to improve the efficiency of a T-shaped barrier without increasing its height or its width.

### 5.4.1. Existing results on T-shaped and reactive barriers

The “T” is the simplest crowning which can be added at the top of barriers. Many acousticians have studied this kind of cap [37, 45, 71, 72, 77, 78, 80, 103, 104, 129-131]. Gains of the order of 2-3 dB(A) can be obtained depending on the barrier height, the cap width, the surface impedance and the source receiver configuration. Some measurements have also been achieved for this shape of noise barrier [37, 130]. Moreover some non-flat top edge profiles have already been studied in order to increase the acoustical efficiency: noise barriers with quadratic residue diffusers and reactive caps on barriers.

Concerning noise barriers with Quadratic Residue Diffusers (QRD), Monazzam has shown in [110] that a QRD barrier could increase the performance of rigid barrier

within certain frequency domain depending on the frequency design of the QRD on the top. The results show that the best shape of barrier for using QRD among the tested models is the T-shaped profile barrier. The improvement of mean insertion loss with a 400 Hz tuned QRD T-shaped barrier compare to a T-shaped barrier with a flat absorbent top surface was found to be around 1 dB(A).

Concerning reactive barriers, Fujiwara [59, 60] has shown that a uniform series of rigid wells in the upper surface of a T-shaped barrier produces insertion loss values equal to those of a soft surface over a significant range of frequencies. That allows to consider only rigid materials for the barriers reaching efficiencies as high as with absorbing materials which is interesting since the acoustic efficiency of absorbing materials often decrease with time (rain, dust, etc.).

### 5.4.2. Sources

The simplest source configuration has been chosen: one single source. The source considered [...] represents the rolling noise; it is located on the ground. It is 8 m away from the base of the barrier (see Figure 5.3). Since the acoustical simulations are carried out with a 2D BEM numerical code, the source is represented by an infinite line source. However, with aim of representing more realistic configurations, several sources could have been considered. In that case, the contributions of each source would have been energetically summed (incoherent line sources) in the calculation of the acoustical pressure at a specified receiver point.

The ground is chosen perfectly reflective in order to provide from prohibitive calculation times but a ground with a specific surface impedance could have been considered and even optimized.

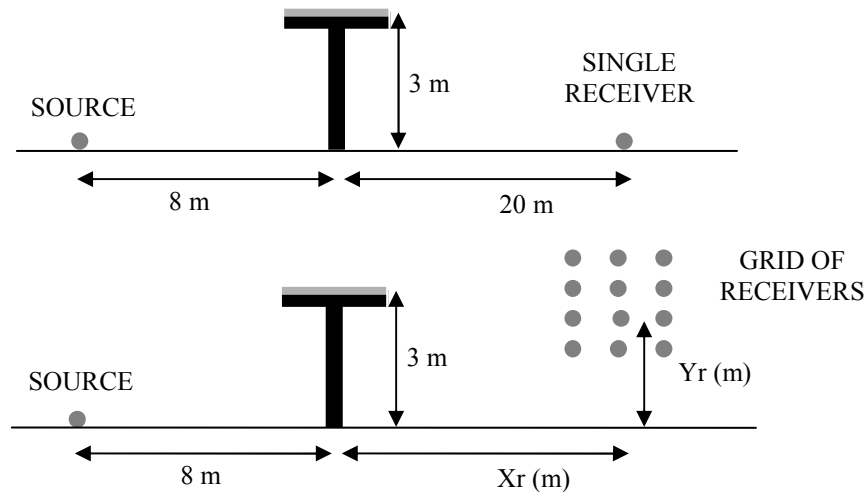


Figure 5.3 Single receiver configuration (top) and configuration with a grid of receivers (bottom)

### 5.4.3. Geometry of the noise barrier

The noise barriers studied [...] are T-shaped barriers with wells at their tops (as shown in Figure 5.4). The number of wells and their depth can vary. Moreover, there are two

kinds of materials covering the noise protection: one is perfectly reflective from an acoustical point of view; the other is absorbent. The impedance model used to describe this absorbent material is the semi empirical Delany and Bazley model [38]. It is a two parameter model:  $\sigma$  is the flow resistivity and is expressed in  $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ; and  $h$  is the thickness of the absorbent material and is expressed in metres.

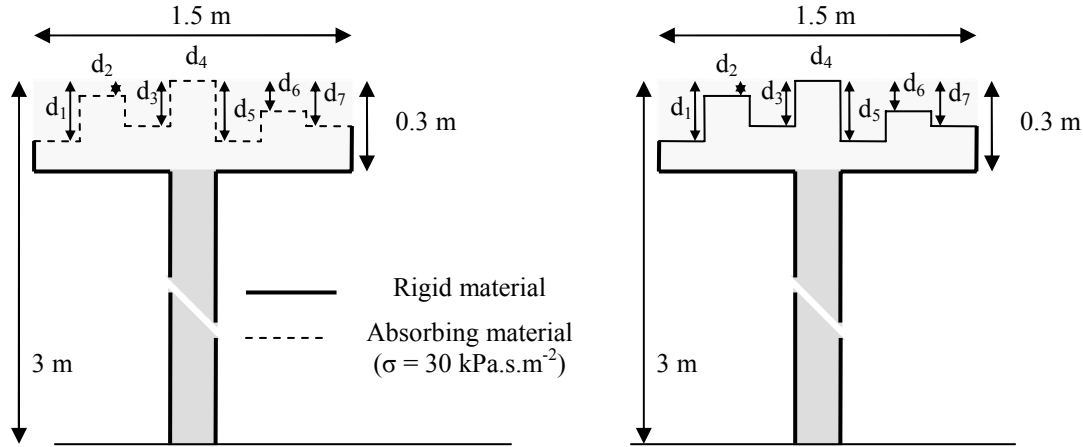


Figure 5.4 Configuration of the barrier to optimize with absorbing materials (on the left) and with only rigid materials (on the right)

The reference configuration used for all calculations is a 3 m high (overall height) and 1.5 m wide T-shaped barrier. The top surface of the crowning is covered with a 0.1 m thick layer of a mineral wool-like material. The crowning thickness is 0.3 m including the absorbent material. This reference configuration is detailed in Figure 5.5.

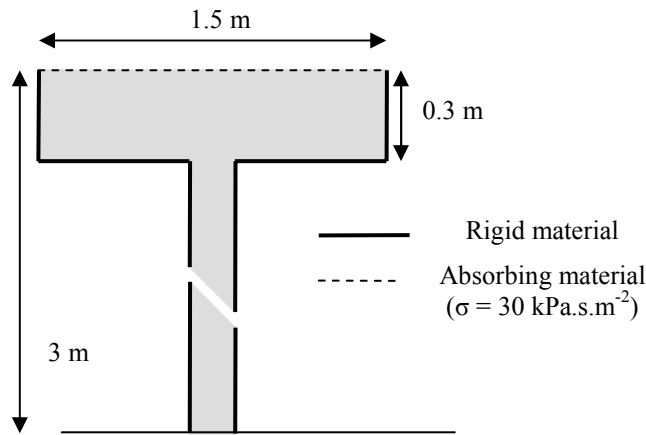


Figure 5.5 Reference T-shaped barrier

The configuration of the barrier to optimize and the varying parameters are given in Figure 5.4. The varying parameters are the depths of the wells represented on the figure by  $d_1 \dots d_7$  and also the flow resistivity  $\sigma$  for some cases. In the following parts, the vector of the depths is named *Depths* and  $Depths = (d_1, \dots, d_n)$  where  $n$  is the number of wells (in Figure 5.4  $n = 7$ ). Because of the geometry of the barriers considered in this work, the depths  $d_i$  are restricted to the interval  $[0.0 \text{ m}; 0.25 \text{ m}]$  and are determined

with a precision of 0.01 m. When the flow resistivity is not a varying parameter, the impedance of the absorbent material considered is defined by the Delany and Bazley model by  $\sigma = 30 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ , which corresponds to mineral wool; and  $h = 0.1 \text{ m}$  which is the default value for the thickness for all calculations.

#### 5.4.4. Cost function and receivers

The cost function is the name for the function which has to be maximized or minimized in the optimization problem, here the genetic algorithm search the global maximum of the cost function. In our case, the objective is to have an efficiency of the crowning as high as possible for a given source-receiver configuration. The cost function is the result of BEM calculations of the efficiency of the crowning. This global efficiency  $Eff_{global}$  is given with a precision of 0.1 dB and writes:

$$Eff_{global}(n, d_i, \sigma, h) = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{\Delta f} 10^{\frac{LwA(\Delta f) + EA_{\Delta f, T-shaped}}{10}}}{\sum_{\Delta f} 10^{\frac{LwA(\Delta f) + EA_{\Delta f, wells}(n, d_i, \sigma, h)}{10}}} \right) \quad (5.1)$$

where  $EA_{\Delta f, wells}$  is the excess attenuation for the T-shaped barrier with varying well depths (referred to free field) in the third octave band  $\Delta f$  and  $EA_{\Delta f, T-shaped}$  is the excess attenuation for the reference T-shaped barrier (with a flat top surface) of the same overall height (3 m) in the third octave band  $\Delta f$ .  $LwA(\Delta f)$  is the road traffic noise spectrum in third octave bands ( $\Delta f$ ). It is calculated with the EN 1793-3:1997 regulation [2] in all cases except in section 5.5.1.6 where the influence of the road traffic noise spectrum is studied. The spectrum calculated with the EN 1793-3:1997 regulation is represented by the solid line in Figure 5.6. As shown in section 5.5.1.6, the choice of the spectrum has a great influence on the global efficiency in dB(A).

The cost function does not have an obvious derivative. This is why it has been chosen to use direct optimization methods presented in section 5.3. The cost function is also highly dependent on the position and the number of sources and receivers.

Two different receivers configuration are studied. The first one is the simplest one; it consists in a single receiver configuration (given by the top diagram in Figure 5.3). The receiver is located on the reflective ground (in order to eliminate the interference effect between the direct wave and the ground reflection), and is 20 m away from the base of the barrier. The second configuration is given by the bottom diagram in Figure 5.3; it consists in a grid of 48 receivers located at different distances from the barrier (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 m) and at different heights (0, 2, 4, 6, 8 and 10 m above

ground). In configurations where there are several receivers the cost function calculates the arithmetic average of all the insertion losses calculated for each receiver.

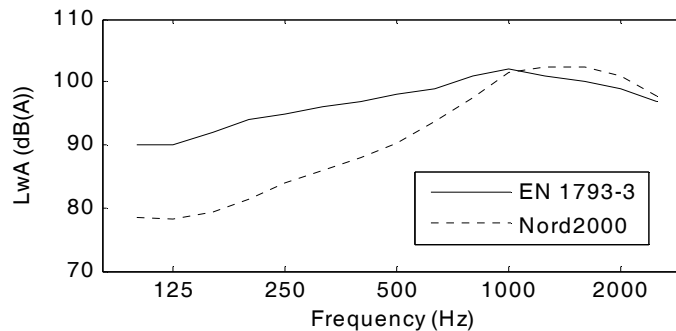


Figure 5.6 Comparison of two different road traffic noise spectrums. Typical road noise spectrum from European standard EN1793-3:1997 (solid line) and road noise spectrum of Nord2000 method (dashed line)

Usually road traffic noise studies consider frequencies up to 5000 Hz. However, the higher the frequency, the longer the calculations. In addition, optimization methods require a high number of evaluations of the acoustic propagation. A compromise has to be found to limit calculation times. It is then chosen to achieve calculations within the frequency range 100-2500 Hz (with 10 frequencies per third octave band). This assumption is acceptable since it corresponds to the frequencies where road traffic noise is the highest in energy (Figure 5.6). An other important point is that the present work is dedicated to the feasibility of the optimization in such a case more than studying exact cases. Preliminary calculations have shown that 10 frequencies per third octave band are enough to ensure convergence with a precision of 0.1 dB.

## 5.5. Results and discussion

Several configurations of optimization are given in this section in order to give some significant results of optimized efficiency of T-shaped barriers with a reactive top surface; the objective is also to show the influence of some parameters not optimized (such as the source location or the road traffic noise spectrum). The surface impedance of the absorbent material considered is defined with the Delany and Bazley model by  $\sigma = 30 \text{ kPa.s.m}^{-2}$  and  $h = 0.1 \text{ m}$  except in sections 5.5.1.4 and 5.5.1.5 where the flow resistivity varies. The last part (5.5.2) concerns the configuration with a grid of receivers where the global efficiency maximised is the mean value of the efficiency calculated at each receiver point of the grid.

### 5.5.1. Configuration with a single receiver

In this section, the receiver configuration considered is the one given by the top diagram in Figure 5.3 with a single receiver located on the ground and 20 m away behind the barrier.

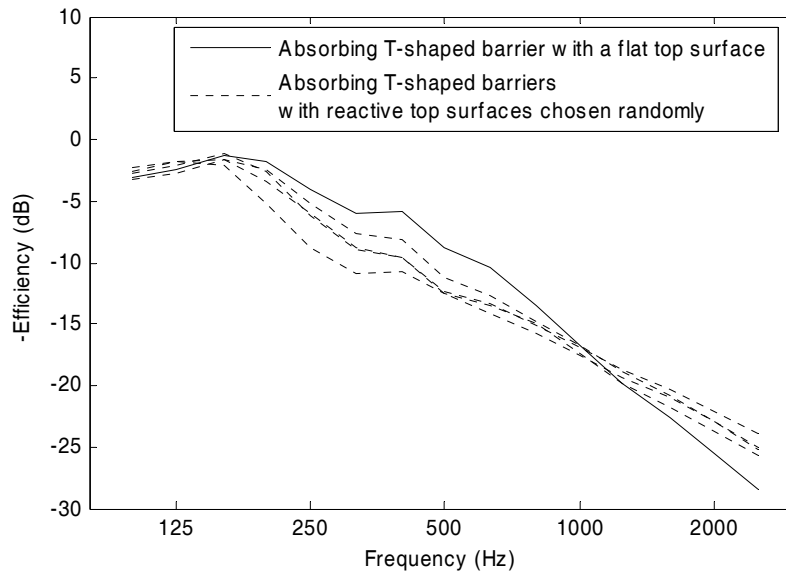


Figure 5.7 Comparison between a T-shaped barrier with a flat top surface (solid line) and four T-shaped barriers with a reactive top surface.

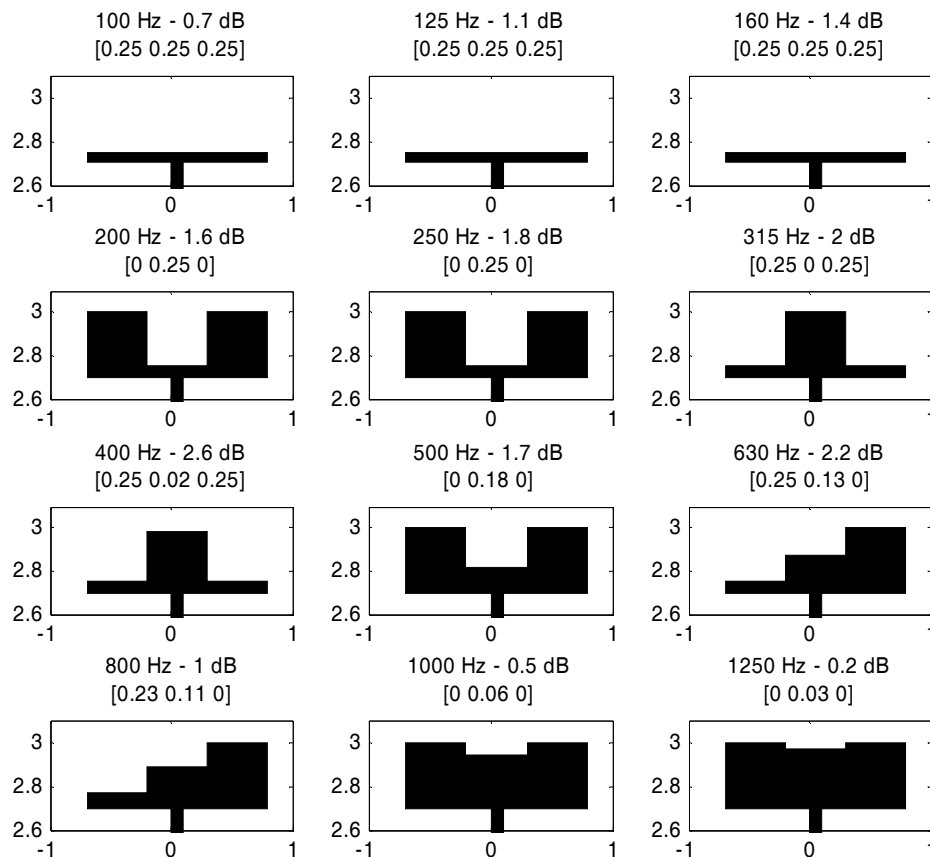


Figure 5.8 Optimal shapes in each third octave band for n=3

### 5.5.1.1. Optimization in each third octave band between 100 and 1250 Hz

Because of time consuming calculations, optimization in separated third octave bands have been carried out only from 100 to 1250 Hz. Moreover, T-shaped barriers with a reactive top surface are more efficient than those with a flat top surface for frequencies lower than 1000 Hz as shown in Figure 5.7. This figure represents the opposite of the efficiency of five T-shaped barriers depending on the frequency. The five T-shaped barriers are one with a flat top surface (conventional T-shaped barrier) and four with a reactive top surface where depths of wells have been chosen randomly. The depths of the wells on top surface of capped barriers have been chosen randomly. Despite of the randomness of the choice of the four reactive T-shaped barriers, it seems that for frequencies higher than 1000 Hz, the T-shaped barrier with a flat top surface is more efficient than the others. The increase of efficiency due to the reactive top surface appears only in the frequency range 100-1000 Hz.

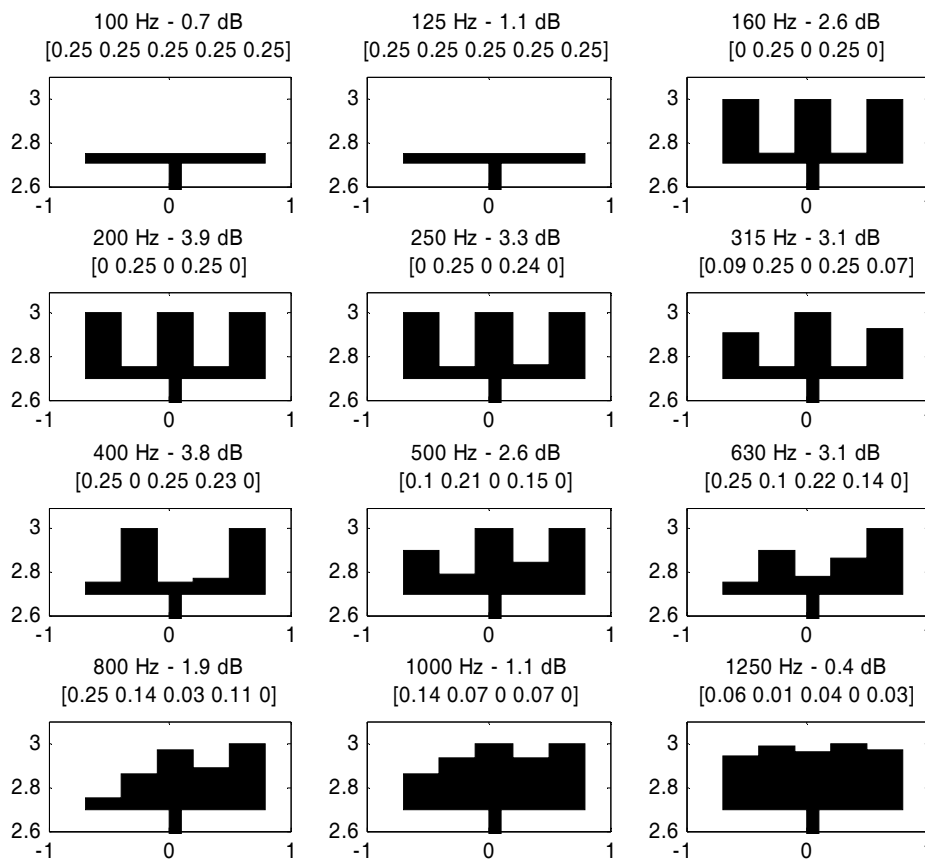


Figure 5.9 Optimal shapes in each third octave band for  $n=5$

The results of optimisation are given in Figure 5.8, Figure 5.9 and Figure 5.10 for  $n = 3$  ( $n$  is the number of wells on the top edge),  $n = 5$  and  $n = 9$  respectively. The optimal shapes are represented for each third octave band. The title of each small graph gives on the first line the third octave band and the optimised efficiency in dB and on the second line the optimum vector  $Depths_{opt}$ .

Firstly, the results show that the optimal depths are highly dependent on the frequency. Secondly, for third octave band frequencies higher than 125 Hz, the larger the number of wells, the higher the efficiency as confirmed in the next section. Lastly, optimal shapes in each third octave bands are rather original and would have been hardly predicted without a systematic research based on optimization algorithms.

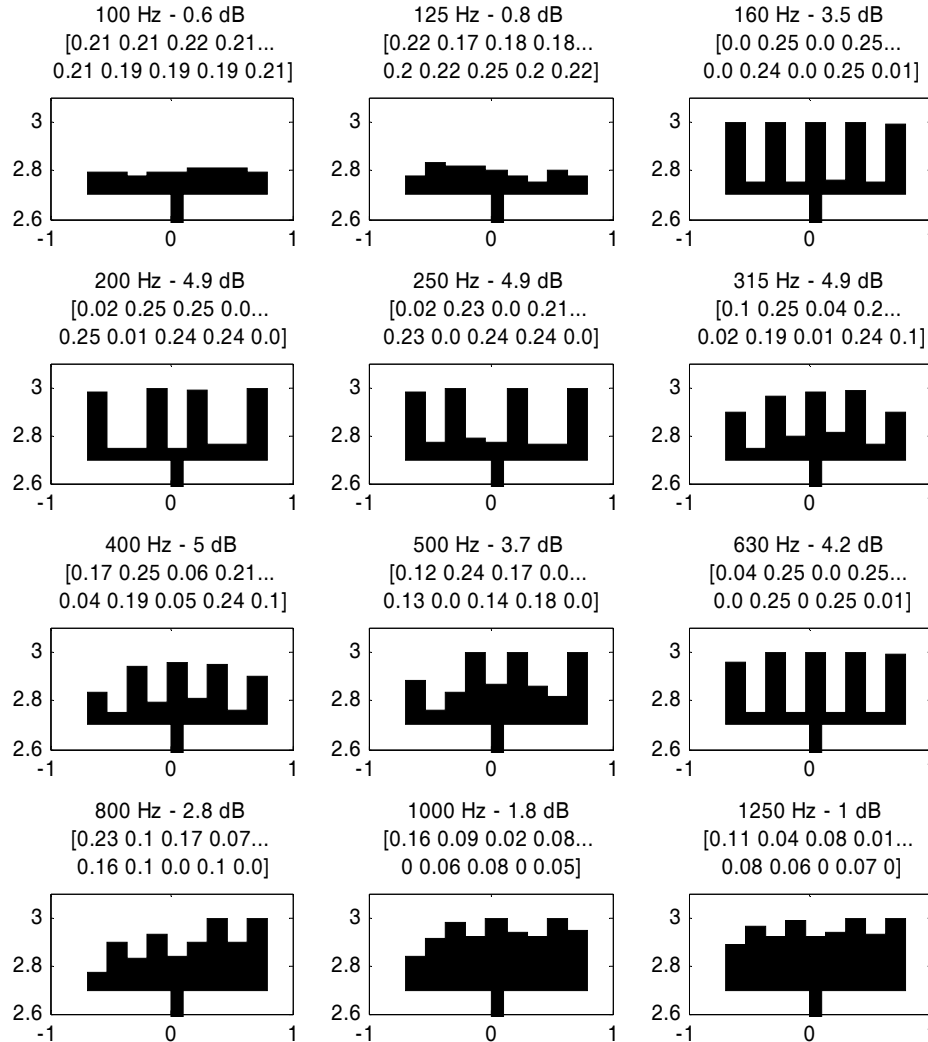


Figure 5.10 Optimal shapes in each third octave band for  $n=9$

### 5.5.1.2. Global optimization with absorptive materials

The barrier optimised is the one described left-hand side in Figure 5.4 (the reactive top surface of the T-shaped barrier is covered with absorptive materials). Figure 5.11 gives the results for the global optimisation where the insertion loss is calculated in the frequency range 100-2500 Hz. The optimal barriers are represented for the three global optimisation of this section ( $n = 3$ ,  $n = 5$  and  $n = 9$ ) and corresponding optimal vector of depths and optimised efficiency are given.



The optimal global efficiency increases with the number of wells on the top edge. It reaches up to 2.7 dB(A) when 9 wells are considered on the top surface. It appears that the best shape is an alternation between deep wells and shallow ones.

Other calculations have confirmed the fact the larger the number of wells on the top surface, the higher the efficiency. However, the optimization for 9 wells needs already several days of calculations (on a Pentium 4-2.66 GHz); as a consequence, optimization with a higher value of number of wells is not achievable with reasonable calculation times (the higher the number of wells, the longer the surface to mesh, the higher the calculation time).

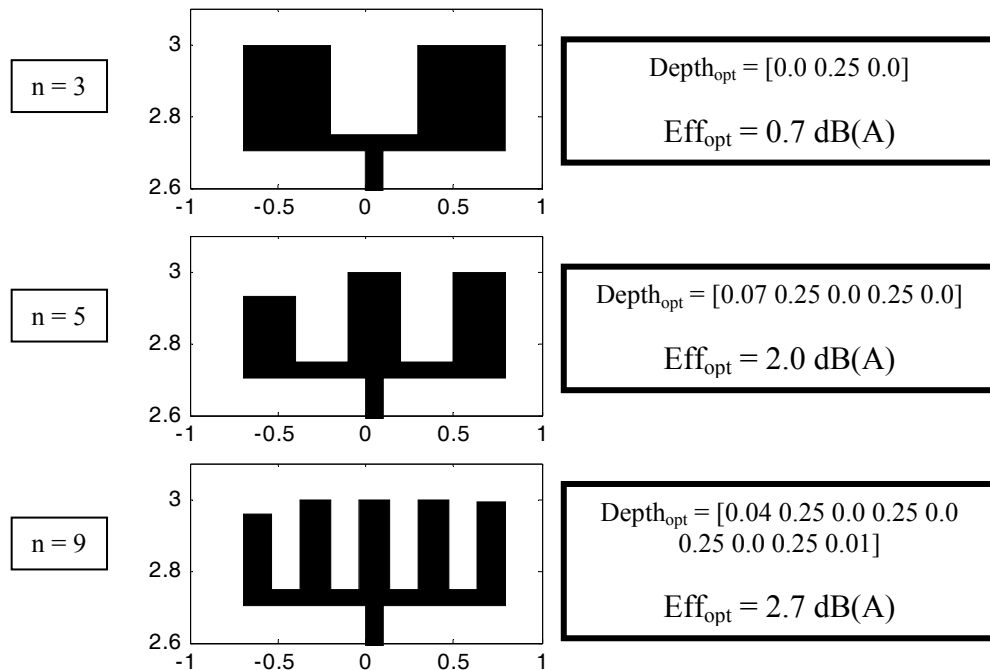


Figure 5.11 Results for global optimization in the frequency range 100-2500 Hz

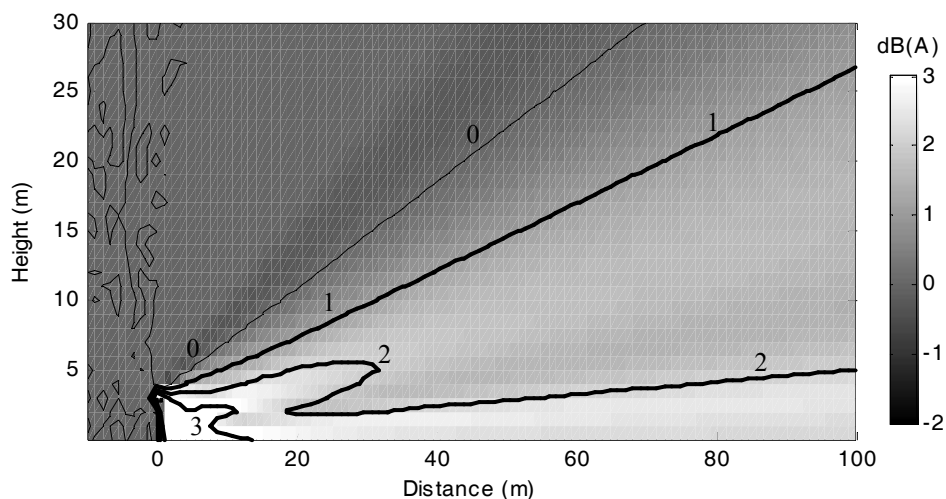


Figure 5.12 Global efficiency of the reactive barrier with n=5 compared with a flat top T-shaped barrier

The efficiency of the optimal T-shaped barrier with 9 wells on the top compared with the reference T-shaped is presented in Figure 5.12. The map is 110 m wide and 30 m high. The barrier is located at 0 on the x-axis and the source is located on the ground at -8 m on the x-axis. The lighter the area, the higher the efficiency (the colour bar on the right of the map gives details for grey levels and values of efficiency).

There is a zone of very slight degradation (darkest part) but the loss of efficiency is smaller than 1 dB(A) and the area of degradation is very restricted. On the whole, one can see an improvement of the efficiency in the shadow zone. The increase is up to 3 dB(A) but is around 1 to 2 dB(A) in the major part. The improvement is significant for heights lower than around 5 m behind the barrier.

### 5.5.1.3. Global optimization with only rigid materials

In this section, the entire barrier is considered as rigid. Indeed, the acoustical efficiency of absorbing materials often decrease with time because of environmental factors such as rain, dust etc. Moreover, absorbing materials are more expensive than rigid ones. As a consequence, it could be interesting to find a solution to reach the same efficiency as absorbing T-shaped barriers but without using absorbing materials. This is the aim of this section. The configuration of the barrier to optimize is the one given on the right in Figure 5.4.

The optimization algorithm is applied three times, for  $n = 3, 5$  and  $9$ . Figure 5.13 gives the results for the global optimisation where the insertion loss is calculated in the frequency range 100-2500 Hz. The optimal barriers are represented for the three global optimisation of this paragraph and corresponding optimal vector of depths and optimised efficiency are given.

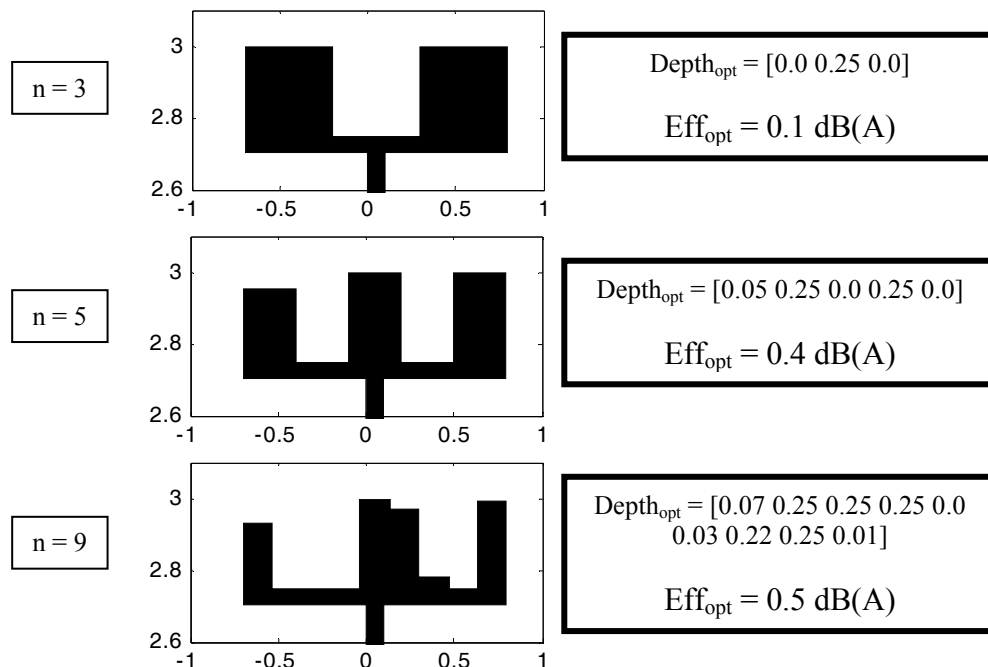


Figure 5.13 Results for global optimization with only rigid materials in the frequency range 100-2500 Hz

Here again the efficiency increases with the number of wells. The efficiency is only of the order of 0.5 dB(A) but the interest of those calculations is the fact that no absorbent materials are used. The reactive top surface allows to reach the efficiency of an absorptive T-shaped barrier with only rigid materials. For  $n=3$  and  $n=5$  the best shape is still an alternation of deep wells and shallow ones. However, for  $n=9$ , the optimal shape is rather original and it would have been difficult to propose it without optimization methods.

#### 5.5.1.4. Influence of the impedance

In this section, only the case with  $n=5$  is considered. The aim is to show the influence of the choice of the absorbing material on the optimization results. The results are given in Table 5.1. Only the flow resistivity of the absorbing material placed on the barrier to optimize is varying; the flow resistivity of the absorbing material on the top of the reference barrier remains equal to  $30 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ . Calculations have been carried out for four different values of the flow resistivity characterizing the surface impedance of the top surface of the barrier to optimize.

The optimal vector of depths is nearly the same in all those four cases; it appears that the optimal shape does not depend on the surface impedance of materials covering the barrier cap. As expected, the optimal global efficiency depends on the flow resistivity; the smaller the flow resistivity, the higher the optimal global efficiency. However, the global efficiency is positive in the four cases; as concluded in the previous section, one can reach, with only rigid materials and a reactive top surface, at least the same efficiency as in the case with a conventional T-shaped barrier with a flat top surface covered with absorbing material.

	$Depths_{opt}$ (m)	$Eff_{opt}$ (dB(A))
$\sigma = 10 \text{ kPa.s.m}^{-2}$	0.09 0.25 0.0 0.25 0.0	2.6
$\sigma = 30 \text{ kPa.s.m}^{-2}$	0.07 0.25 0.0 0.25 0.0	2.0
$\sigma = 300 \text{ kPa.s.m}^{-2}$	0.09 0.25 0.0 0.25 0.0	0.6
$\sigma = 3000 \text{ kPa.s.m}^{-2}$	0.11 0.25 0.0 0.25 0.0	0.5

Table 5.1 Results for global optimization: influence of the impedance (n=5)

#### 5.5.1.5. Optimization of both depths and impedance

The thickness of the absorbent material is still fixed to  $h=0.1$  m. It is the flow resistivity  $\sigma$  which becomes a parameter to optimize as the vector  $Depths$ . The results are given in Table 5.2.

	$Depths_{opt}$ (m)	$\sigma_{opt}$ (kPa.s.m <sup>-2</sup> )	$Eff_{opt}$ (dB(A))
$n=5$	0.11 0.25 0.0 0.25 0.0	4	2.7

Table 5.2 Results for global optimization of both depths and flow resistivity (n=5)

The optimal vector *Depths* is close to the one obtained when  $\sigma$  was fixed equal to 30 kPa.s.m<sup>-2</sup> (or other values); the optimal flow resistivity is 4 kPa.s.m<sup>-2</sup>. According to the results of the previous paragraph, the main parameters optimize here is the flow resistivity since the optimal vector *Depths* is quite the same for all values of  $\sigma$ .

### 5.5.1.6. Influence of the road traffic noise spectrum

In this section, the aim is to show the influence of the road traffic noise spectrum on the results of the optimization even if it is not a varying parameter to optimize. The optimization algorithm is applied in the configuration with a single receiver, with absorbing materials on the reactive top surface, with a single source located 8 m away from the barrier and with  $n = 5$ . The results are given in Table 5.3. The first line concerns the calculation done previously with a road traffic noise spectrum calculated with the weights of the European Standard EN1793-3:1997 [2]. The second line gives the results for optimization calculations with a road traffic noise spectrum calculated with a specific method named Nord2000 [85, 94, 114]. The two spectrum considered for calculations are plotted in Figure 5.6.

	<i>Depths<sub>opt</sub></i> (m)	<i>Eff<sub>opt</sub></i> (dB(A))
EN1793-3	0.07 0.25 0.0 0.25 0.0	2.0
Nord2000	0.25 0.15 0.04 0.25 0.0	1.1

Table 5.3 Results for global optimization: influence of the road traffic noise spectrum (n=5)

As expected, the results show that the maximal efficiency depends on the spectrum used for the optimisation calculations. However, an unexpected result is that the optimal vector of depths strongly depends on the road traffic noise spectrum chosen. The optimisation has enabled an optimal shape to be found for each case which would have been extremely difficult to achieve by traditional acoustic studies.

### 5.5.2. Configuration with a grid of receivers: Global optimization

This last section concerns the configuration with a grid of receivers where the global efficiency maximised is the mean value of the efficiency calculated at each receiver point of the grid. The 48 receivers of the grid have been determined in section 5.4.4. The results are given in Figure 5.14. The optimal barriers are represented for the three global optimisation of this section and corresponding optimal vector of depths and optimised efficiency are given.

As expected, the optimal efficiency increases with the number of wells as in previous cases of optimization. For  $n = 3$  and  $n = 5$ , the optimal shape is nearly the same as in the case with a single receiver: an alternation of deep and shallow wells. However, for  $n = 9$ , the optimal shape is different and it is rather original and hardly predictable without optimization algorithms.

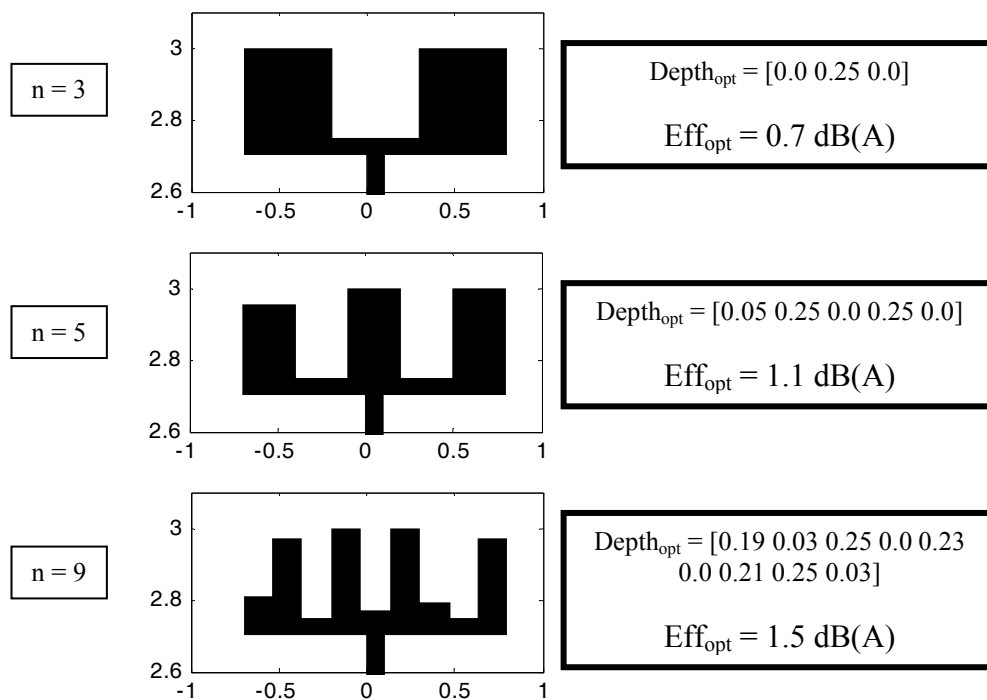


Figure 5.14 Results for global optimization with a grid of receivers and with absorptive materials in the frequency range 100-2500 Hz

## 5.6. Conclusion

An evolutionary optimization method coupled with a  $2D$  BEM code has been presented with application to T-shaped barriers with reactive top surfaces. The results show that the efficiency of such barriers is highly frequency dependent; and the global efficiency of such barriers increases with the number of wells considered on the top surface. The improvement in global efficiency compared with a flat top surface T-shaped barrier can be up to 2-3 dB(A) for 5 to 9 wells (for a given source-receiver configuration and for a given noise spectrum).

Only  $2D$  calculations have been performed because of prohibitive calculation time for  $3D$  calculations. A compromise could have been the use of  $2D\frac{1}{2}$  BEM method proposed by Duhamel [39] but optimization algorithms induces many acoustical simulations therefore it would have been too time consuming over again.

[...]

## **5.7. Conclusion du chapitre**

Ce chapitre montre la possibilité d'appliquer l'outil d'optimisation OPTIMEA à des écrans acoustiques avec couronnements dont certaines surfaces sont rendues réactives par l'insertion de puits. Bien que l'efficacité de tels écrans ait déjà fait l'objet de recherches, l'utilisation d'algorithmes d'optimisation permet de déterminer les profondeurs optimales qui ne sont pas prévisibles a priori.

Le fait de rendre les surfaces réactives permet par exemple de n'utiliser que des matériaux rigides acoustiquement (moins chers et souvent plus résistants aux intempéries) tout en observant une efficacité au moins égale à celle d'un écran en Té classique dont la surface supérieure est plane et recouverte d'un matériau absorbant.

Si, en outre, les surfaces réactives sont réalisées avec des matériaux absorbants, on gagne alors jusqu'à 2-3 dB(A) supplémentaires pour un couronnement en Té.

Pour suite de ce travail, d'autres types de couronnements pourraient voir leurs surfaces rendues réactives par ces puits dont les profondeurs seraient optimisées afin d'obtenir une protection optimale.



# Chapitre 6.

## Optimisation de protections acoustiques de faible hauteur en milieu urbain

La politique urbaine de ces dernières années est de réduire les nuisances sonores en ville pour améliorer la qualité de vie des citoyens. En outre, la récente directive européenne 2002/49/CE impose aux agglomérations de plus de 250 000 habitants de réaliser des cartes de bruits indiquant la population exposée à des niveaux sonores importants et demande également de déterminer des plans d'action pour solutionner les points noirs bruit qui auront ainsi été révélés. Il s'agit donc bien de réduire l'impact des bruits routiers, ferroviaires et industriels sur les habitants des grandes villes. Cependant, en milieu urbain, l'utilisation d'écrans anti-bruit conventionnels pour réduire le bruit routier est impossible, pour des raisons techniques, de sécurité et de coût. C'est pourquoi, des protections de faible hauteur sont envisagées ici. Une première étude a été présentée lors du congrès Forum Acusticum en 2005 [15] et a été poursuivie notamment par des mesures sur maquettes.

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'efficacité de protections anti-bruit dont la hauteur ne dépasse pas un mètre et de forme complexe, dans un contexte urbain. Elles ont pour objectif de réduire l'impact du bruit des véhicules sur les piétons et les usagers des pistes cyclables.

Des simulations numériques (avec le logiciel MICADO [82], développé au CSTB) ont permis de déterminer qu'une protection acoustique, absorbante et de faible hauteur, présente une efficacité d'environ 6 dB(A) pour un calcul effectué à hauteur d'oreille humaine, et à 2 m derrière cette protection. Les résultats obtenus par cette méthode



théorique ont été comparés à des mesures sur maquettes à l'échelle un dixième réalisées au CSTB Grenoble. Les résultats expérimentaux sont en très bon accord avec les résultats théoriques.

L'étude des protections acoustiques de faible hauteur en milieu urbain a fait l'objet d'une publication, intitulée "Efficiency of low height noise protections in urban areas : Predictions and scale model measurements", acceptée pour publication dans le journal international *Acta Acustica united with Acustica*. Cet article, présenté dans son intégralité ci-après, fait l'objet de la première partie de ce chapitre (sections 6.1 à 6.5).

Il n'est pas question d'optimisation dans cette publication mais seulement d'évaluation de l'efficacité de telles protections. L'application à cette problématique de l'outil d'optimisation OPTIMEA développé dans le cadre de ce travail de thèse est présentée dans la suite du chapitre (section 6.6). Il s'agit de réaliser une recherche systématique de la protection de forme optimale en considérant une configuration source-récepteur donnée.

## 6.1. Introduction

Noise is an important issue in the minds of most Europeans. Cities try to have more and more quiet areas in order to offer a better way of life to their residents. However, it is usually difficult to protect pedestrians on pavements without using devices that are either too imposing or too expensive. Here, low height noise systems are proposed to reduce the impact of road traffic noise on pedestrians. This kind of protection could improve the environmental quality of life in urban areas.

The main body of this paper is divided in three parts. First, an over-view of the problem is given. Then, a description of the numerical simulations as well as theoretical results are detailed. In the third part, the measurements are presented with a short description of the experimental set up; measurement results and comparisons with theoretical simulations are then discussed. The paper concludes with a summing-up of the results of the effectiveness of these noise protection devices.

## 6.2. Statement of the problem

The overall concept is shown in Figure 6.1. The objective is to protect urban areas from the pedestrian point of view without using devices that are too imposing.

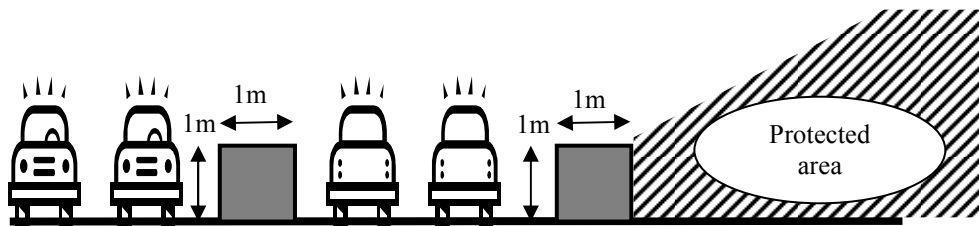


Figure 6.1 Global idea for low height absorbers

Since conventional noise barriers cannot be considered in urban areas because of aesthetic and safety reasons, the height and width of the devices analysed in this study were both limited to one meter. The protected area is represented by the hatched zone. The top surfaces of the protection devices were considered to be covered with vegetation, mainly for aesthetic reasons.

Conventional acoustic protection devices for motorways and railways have been widely studied. For example, Watts [129] or Ishizuka [80] both present the state of the art on this topic. However, these noise barriers are not suitable for urban areas near town centres because of their height (3m high barriers are not appropriate inside cities). Low height noise protectors have not been studied as much as higher ones partly because they do not comply with standards. Indeed, European standards are based on the GTD (Geometrical Theory of Diffraction) method [87] and therefore fail to predict the performance of barriers less than about 2 m. As a consequence, it is necessary to use complex methods (here, the Boundary Element Method) to evaluate the performance of 1m high noise barriers.

Nevertheless, a few studies have been carried out on low height noise protectors. Generally, the insertion of a low height acoustic protection device (smaller than 1m) can reduce the noise level by around 5 dB(A), as described by Anai and Fujimoto in [6]. Horochentkov et al [76] studied the performance of low height noise barriers in a city street exhibiting the canyon effect by carrying out measurements on a scale model. The authors considered many noise abatement schemes, including low height noise barriers. For barriers of 1.5 m height they found insertion losses ranging from 4 to 10 dB(A), depending on the configuration and the vehicle type (light or heavy). Moreover, Thorsson found a way to increase the efficiency of low height protections in [127], using the equivalent source method to optimize their performance. He considered 1m high noise barriers and found an optimum impedance boundary condition at the barrier surface.

The results showed an improvement of 5 dB(A) for low height receivers in a configuration with an absorptive 1m high barrier compared with a rigid barrier. Finally, Martin and Hothersall [102] studied the behaviour of 1m high central reservation barriers. They found an improvement of 1 to 2 dB(A) by the addition of such protection devices. Concerning barriers in urban areas, Li and Trang have proposed and validated in [97] a ray model for a 4 m high barrier located close to buildings near urban areas. However, the aim of the present study is to consider areas nearer to town centres where 4 m high barriers would not be suitable.

To sum up, 1m high protection devices appear to be effective and the aim of this study is to evaluate this effectiveness using both BEM calculations and scale model measurements.

### **6.2.1. Geometry**

The reference configuration is given in Figure 6.2. It consists of pavements on both sides without any protection. Eight sources are considered: four located on the ground (S1-S4, representing vehicle rolling noise) and four located 0.5 m above the road (S5-S8, representing vehicle engine noise) [85]; this configuration represents a four-lane road. Contributions from all the sources are summed to calculate the global insertion loss, taking the weighting of each sources into account: 50% for rolling noise and 50% for engine noise. The global source strength is obtained by summing the individual source energies (sources are considered incoherent with each other). The ground is considered to be perfectly reflective. It could have been given a specific impedance appropriate for asphalt but the calculation time would have been significantly increased, and the best compromise between being as realistic as possible and having a reasonable computing time had to be found.

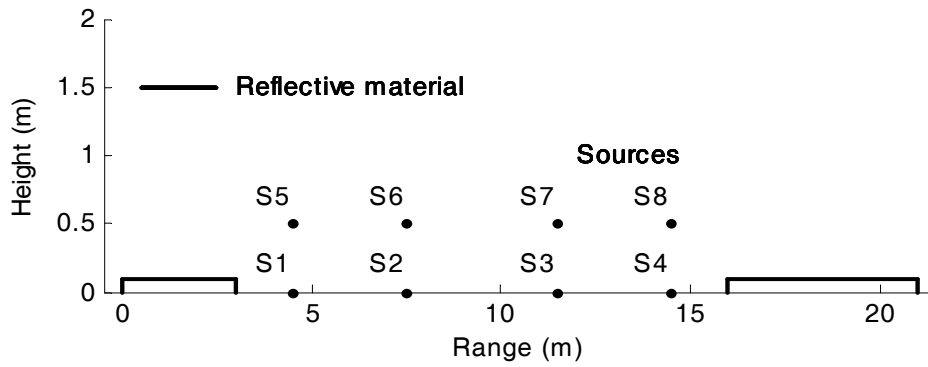


Figure 6.2 Geometrical configuration of the reference case and details of source locations

### 6.2.2. Cost function

The aim of this work is to determine the efficiency of the protections devices by calculating their Insertion Loss  $IL$ . The insertion loss  $IL_{\Delta f}$  for each third octave band  $\Delta f$  is given by:

$$IL_{\Delta f} = 10 \log_{10} \left( \left| \frac{p_{low\ absorbers}(\Delta f)}{p_{reference}(\Delta f)} \right|^2 \right) \quad (6.1)$$

where  $p_{low\ absorbers}(\Delta f)$  is the acoustic pressure for the configuration with the low height protection in the third octave band  $\Delta f$  and  $p_{reference}(\Delta f)$  is the acoustic pressure for the reference configuration without the low height protections in the third octave band  $\Delta f$ .

The global insertion loss  $IL_A$  in dB(A) is determined by the following equation:

$$IL_A = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{\Delta f} 10^{\frac{LwA_{\Delta f} + EA_{low\ absorbers, \Delta f}}{10}}}{\sum_{\Delta f} 10^{\frac{LwA_{\Delta f} + EA_{reference, \Delta f}}{10}}} \right) \quad (6.2)$$

where  $EA_{low\ absorbers, \Delta f}$  is the excess attenuation (referred to free field without the ground) calculated in the configuration with the low absorbers and for the third octave band  $\Delta f$ , and  $EA_{reference, \Delta f}$  is the excess attenuation calculated for the reference configuration without the low absorbers and for the third octave band  $\Delta f$ .  $LwA_{\Delta f}$  is the road traffic noise sound power level in third octave bands ( $\Delta f$ ) given in Figure 6.3. It is important

to notice that the choice of the road traffic noise spectrum has a significant influence on the results.

When the insertion loss is negative, the insertion of a protection device in the geometrical configuration improves the acoustical situation i.e. the noise level is reduced. Therefore, the objective is to obtain an insertion loss as low as possible.

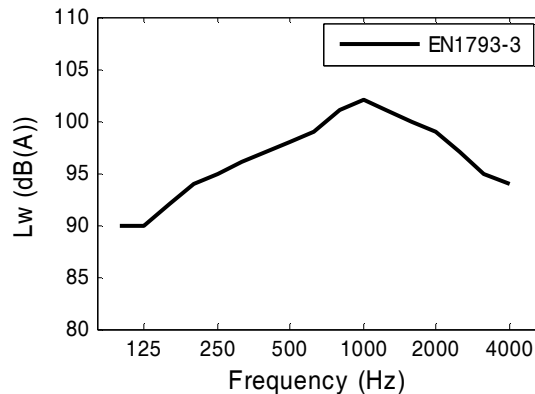


Figure 6.3 Road traffic noise spectrum according to EN1793-3:1997 standard [2]

In numerical simulations, the surface impedance of the absorbent material is determined by the Delany and Bazley's semi-empirical model [38]. The parameter of this model is the effective flow resistivity  $\sigma$  expressed in  $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ . Absorbent materials in numerical simulations are always considered to be 0.1 m thick and to have a rigid-backing. As a consequence, when comparing the results from the scale model experiments with numerical simulations, for various absorbent materials, the values of the effective flow resistivity used in the numerical simulations was always taken as that corresponding to a material thickness  $h = 0.1 \text{ m}$ .

## 6.3. The Numerical Simulations

### 6.3.1. The Boundary Element Method

This method, which relies on the Integral Equation theory, was developed in the 1960s and has and has subsequently been used extensively [28]. Two families of boundary element methods can be distinguished: direct and indirect formulations. The direct formulation relies on the use of the Helmholtz integral equation where the unknown functions are pressure and velocity, while the indirect one is based on an integral formulation assuming that the sound field scattered by a boundary can be represented by a linear combination of a distribution of monopoles (a simple-layer potential) and a distribution of dipoles (a double-layer potential). For more details of this method see references [25, 28, 81, 82, 125].

In this work, the numerical simulations of outdoor sound propagation have been carried out using MICADO software. It is a  $2D$ ,  $2D^{1/2}$  and  $3D$  BEM numerical code based on the direct formulation. It has been developed with a variational approach by Jean [82] at

CSTB. In the  $2D$  version used here, the geometry of the problem is bi-dimensional: the source is an infinite linear coherent source and all the obstacles remain unchanged and infinite along a direction perpendicular to the vertical section plane. BEM is a powerful tool in acoustical predictions for complex topologies and geometries in a homogeneous atmosphere. In this work, the meteorological effects can be neglected since the distances considered are shorter than around one hundred meters. However, this method can be very time consuming depending on some parameters, such as the frequency and the length of meshed boundaries. A compromise has to be found between accurate results and reasonable calculation times.

BEM calculations have been carried out averaging the narrow band spectra data in each third octave band between 50 and 4000 Hz. This is a typical frequency range used for road traffic noise studies. Preliminary calculations have been carried out to find the necessary BEM parameters for the convergence of the results. Averaging the narrow band spectra data into third octave bands allows the performance spectra of each protection device to be clearly compared.

The numerical simulations were carried out in two dimensions ( $2D$ ): obstacles are considered as infinite in the third dimension and sources are coherent lines. In practise, the hypothesis of infinite obstacles in the third dimension is acceptable because lateral diffraction effects are negligible in most ground transportation noise configurations. However, the hypothesis of coherent line sources is not very realistic for road traffic noise since vehicles are independent from each other. As detailed by Duhamel in [39], coherent line sources are nearly equivalent to point sources, whereas incoherent line sources give significantly different results. Calculations could have been carried out using a  $2D\frac{1}{2}$  BEM approach [39, 40, 83] which still considers obstacles as infinite in the third dimension but which allows the incorporation of incoherent source lines or point sources. This differs from  $2D$  BEM calculations which only allow the use of coherent line sources. However, the main problem is still a high calculation time, especially when some segments of the geometry are not reflective, as is the case with the low height protectors in this study. Despite all this, it was decided to carry out the calculations with a  $2D$  model. The incoherence of the sources is approximately taken into account in the summation of the 8 line sources considered. Even if the modelling of traffic noise is not very realistic with coherent line sources, this hypothesis enables the calculations to be compared with the measurements on scale models which use point sources in  $3D$ ; it also makes the calculation times for the simulations acceptable.

### **6.3.2. The Numerical Results**

Two kinds of results are presented here. Firstly, the effectiveness of several low height noise protectors of different shapes is given as a function of frequency. Secondly, vertical noise maps giving the global effectiveness in dB(A) of some low height noise protectors are detailed.

#### **6.3.2.1. Effectiveness of low height protectors as a function of frequency**

In this section, different shapes of noise protectors are considered and compared by means of their third octave band insertion loss spectra.

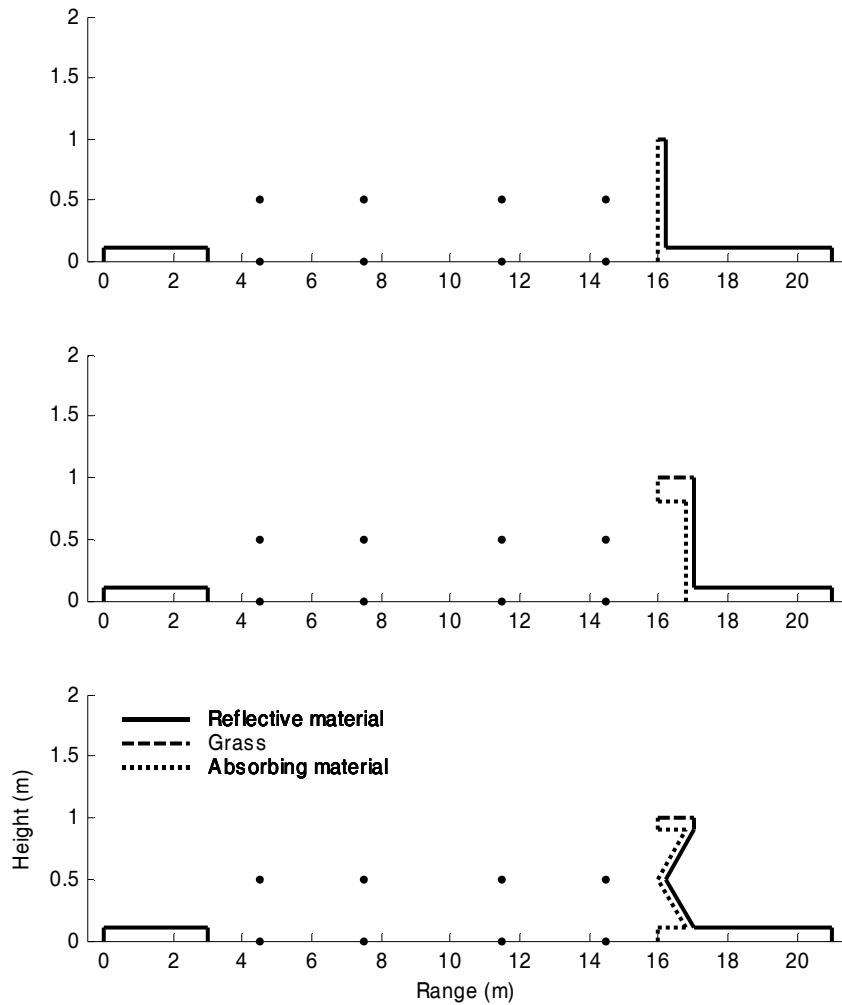


Figure 6.4 Geometrical configurations considered for a single protector. Three kinds of material are considered: reflective material (solid line), grass-like material (dashed line) and absorbing material (mineral wool-like material, dotted line)

Calculations were carried out taking 20 frequencies per third octave band and then averaging this narrow band spectra data in each third octave band. Previous calculations had shown that this is adequate to ensure convergence of calculations when considering a single protector. When two protectors are considered, the phenomenon of multi-reflection occurs and it is advisable to include more frequencies to ensure convergence. However, preliminary calculations have shown that, in this case, taking 20 frequencies per third octave band is enough for configurations with multiple reflections for obtaining results with a precision of 0.2 dB. Because of the increase in calculation time when the number of frequencies per third octave band increases, it was decided to limit this number to 20. Thus, the results presented are with a precision of 0.2 dB.

The reference configuration used for the calculation of the insertion loss (equation (6.1)) and the location of the 8 sources are given in Figure 6.2. The absorbing material considered here is a mineral wool-like material defined with the Delany and Bazley model by a flow resistivity of  $30 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  and a thickness of  $0.1 \text{ m}$ . The top part of the protector is covered with vegetation whose impedance is defined by a flow resistivity of  $300 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  and a thickness of  $0.1 \text{ m}$ .

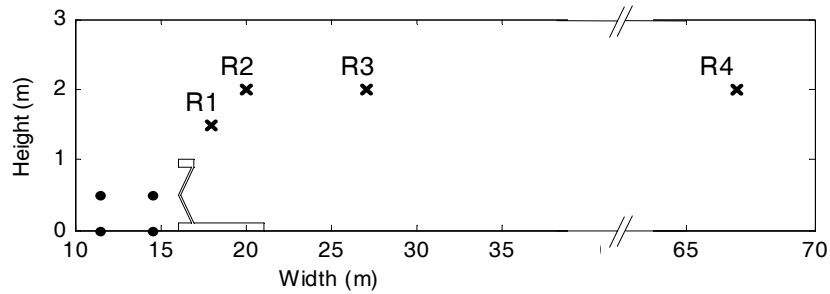


Figure 6.5 Position of receivers R1, R2, R3 and R4

Firstly, only one noise protector on the right side of the road is considered. The different shapes studied are shown in Figure 6.4: a straight, a T-shaped and a Sigma-shaped device. Four receivers R1, R2, R3 and R4 are considered: R1 is located 1 m behind the protection and at a height of 1.5 m, R2 is located 3 m behind the protection and at a height of 2 m, R3 is located 10 m behind the protection and at a height of 2 m, R4 is located 50 m behind the protection and at a height of 2 m. The positions of the receivers are shown in Figure 6.5. The results for the three studied shapes and the four receivers are given in Figure 6.6.

It is noticeable that the T-shaped and the Sigma shaped protectors are more effective than the straight one at low frequencies. This is especially true of the Sigma-shaped protector, whose insertion loss reaches  $-12 \text{ dB}$  in the  $63 \text{ Hz}$  third octave band for receiver R1; the shape appears to be the reason of this improved performance.

For frequencies higher than  $1000 \text{ Hz}$ , the three protectors are all equally effective: it seems that diffraction by the top edge of the protector is the dominating factor. Although the effectiveness of the straight protection is poor at low frequencies, it is slightly more effective than the others for some third octave bands in the high frequencies ranges. This factor means that overall the straight protector is best, since the low frequencies have a low weight in the calculation of the global effectiveness (due to the road traffic noise power level spectrum).



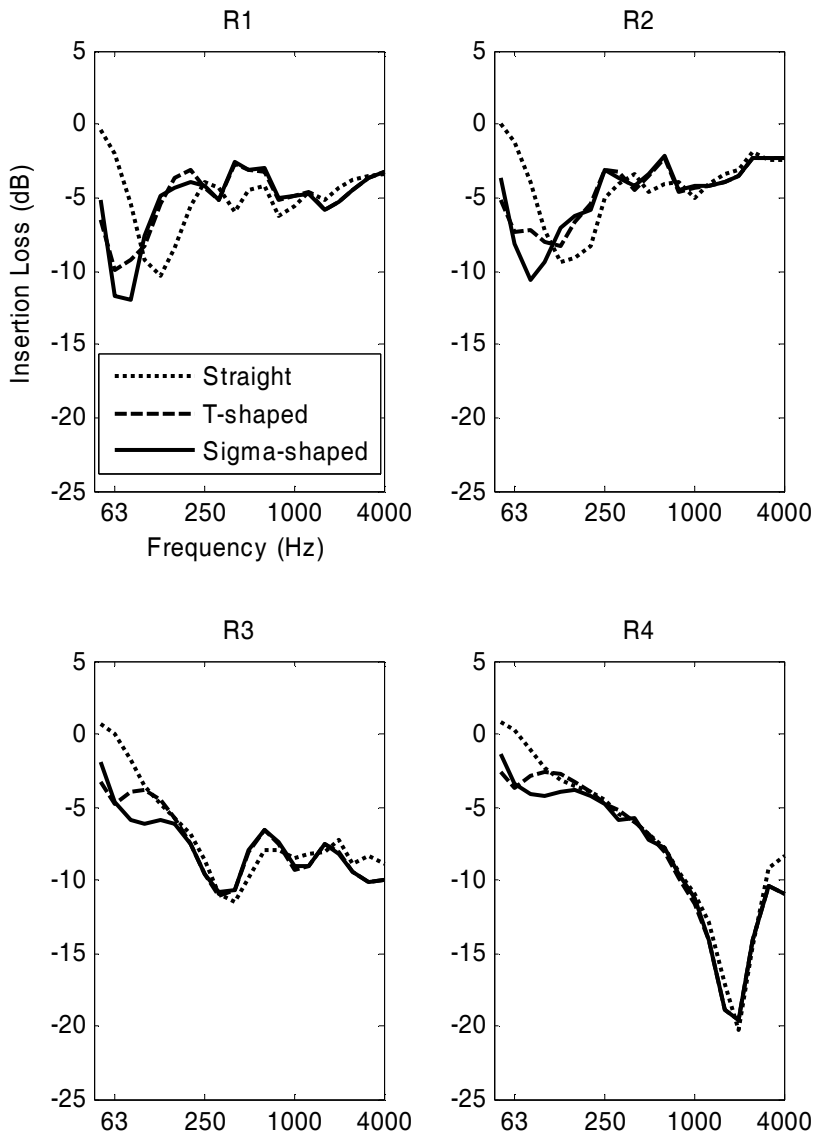


Figure 6.6 Efficiency of low height noise protections depending on the frequency for 4 receiver positions, and for a single protection configuration: straight protection (dotted line), T-shaped protection (dashed line) and Sigma-shaped protection (solid line). The four receiver positions are: R1 at  $d = 1$  m and  $h = 1.5$  m (top left graph), R2 at  $d = 3$  m and  $h = 2$  m (top right graph), R3 at  $d = 10$  m and  $h = 2$  m (bottom left graph) and R4 at  $d = 50$  m and  $h = 2$  m (bottom right graph).

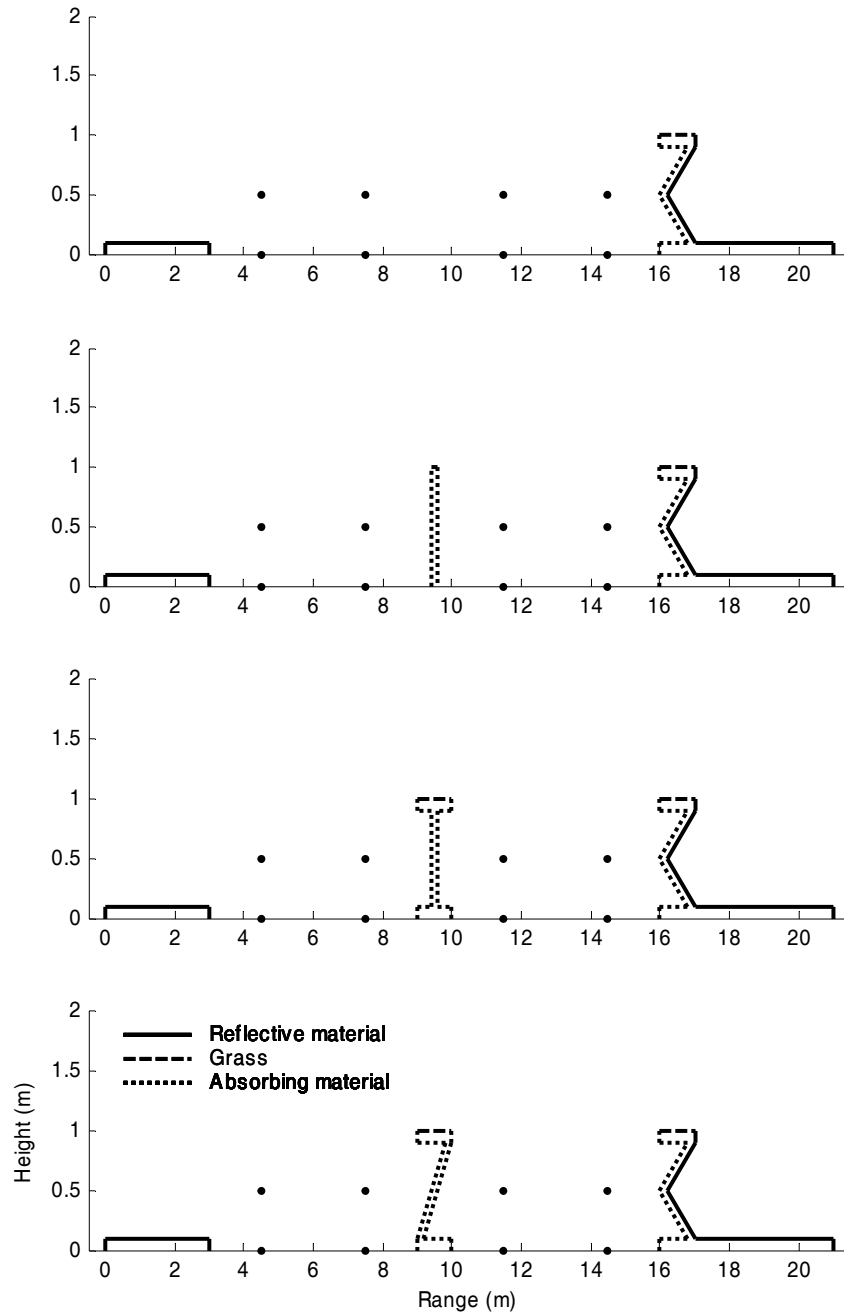


Figure 6.7 Geometrical configurations considered for two protections.

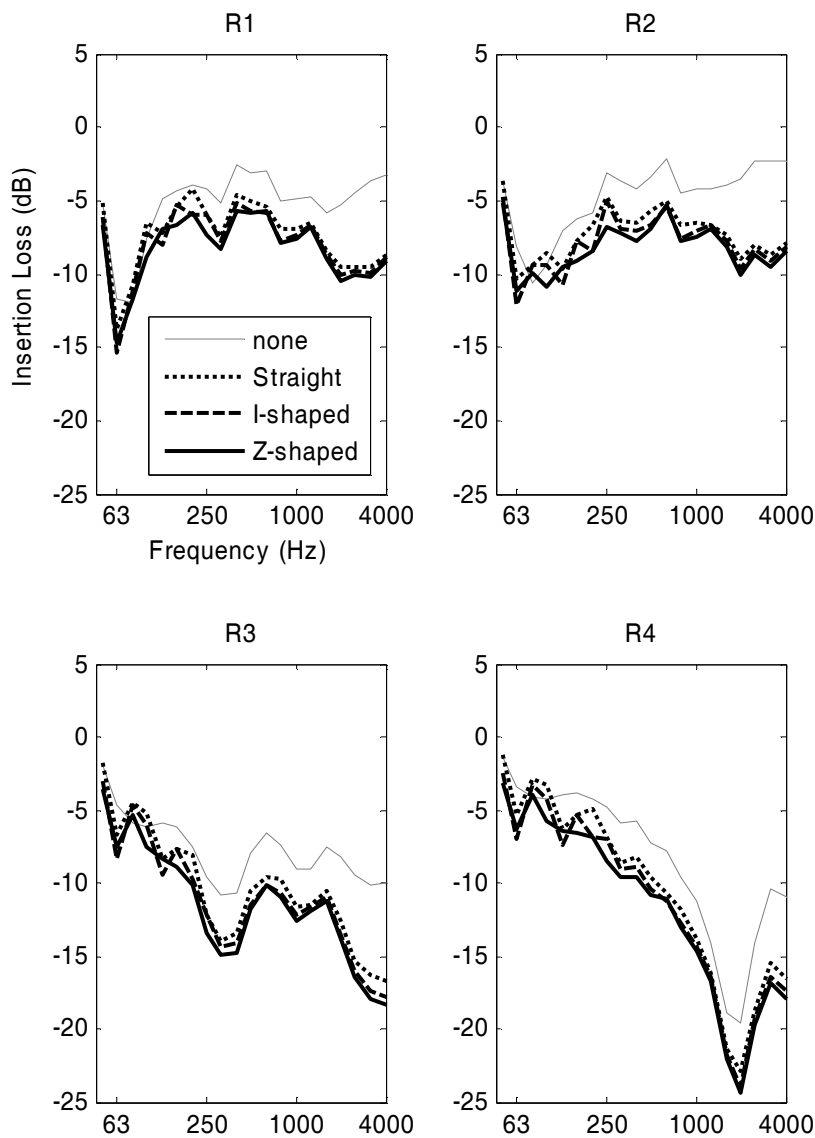


Figure 6.8 Efficiency of low height noise protections depending on the frequency for 4 receiver positions, and for a two protections configuration. For the four configurations, a Sigma-shaped protection is located on the right side pavement. The four central reservation configurations are: no protection (thin solid line), a straight protection (dotted line), an I-shaped protection (dashed line) and a the Z-shaped protection (thick solid line). The four receiver positions are: R1 at  $d = 1$  m and  $h = 1.5$  m (top left graph), R2 at  $d = 3$  m and  $h = 2$  m (top right graph), R3 at  $d = 10$  m and  $h = 2$  m (bottom left graph) and R4 at  $d = 50$  m and  $h = 2$  m (bottom right graph).

In a second set of simulations, the Sigma-shaped protector is considered on the right side of the road and another device is added on the central reservation, in order to reduce the noise from sources S1/S5 and S2/S6 on the left part of the road. The different

shapes of the studied protectors located on the central reservation are shown in Figure 6.7: a straight, a I-shaped and a Z-shaped device. The four receivers considered are the same as those presented in Figure 6.5. The results are given in Figure 6.8.

These Figures show that the addition of a second protector on the central reservation increases the acoustical attenuation at the four considered receiver points. Traffic noise emission represented by sources S1/S5 and S2/S6 is now shielded by the central reservation protector in comparison with the first set of simulations. Moreover, some receivers in these first simulations were in a direct line of sight of some left sources, but they are now more protected.

Although the difference in effectiveness between the three shapes is not large, the best central protector is the Z-shaped one: the performance of this configuration is a couple of dB higher than the others for some third octave bands.

Many other shape configurations were also analysed. Some calculations which have not been presented in this paragraph are used in section 6.4.2 for comparisons with scale model measurements.

### 6.3.2.2. Global effectiveness in dB(A) of low height noise protectors

Noise maps are given in order to show the global effectiveness of the protectors in the area of interest: up to 50m behind the protectors and up to a height of 5 m. They are created with a precision of four receivers per meter in both x and y directions within the area of interest. More precise calculations have been carried out but it is considered that the results presented here are sufficiently precise (differences between both sets of calculations being less than 0.1 dB in the area of interest); and, in addition, the best compromise between accuracy of results and acceptable computing time had to be found.

A typical road traffic noise spectrum is necessary to calculate the global insertion loss in dB(A) using equation (6.2). In this study, it was decided to use the A-weighted road traffic noise spectrum calculated with weights according to the European standard EN 1793-3:1997 [2]. This spectrum is shown in Figure 6.3. The reference configuration used for the calculation of the global insertion loss remains the one shown in Figure 6.2.

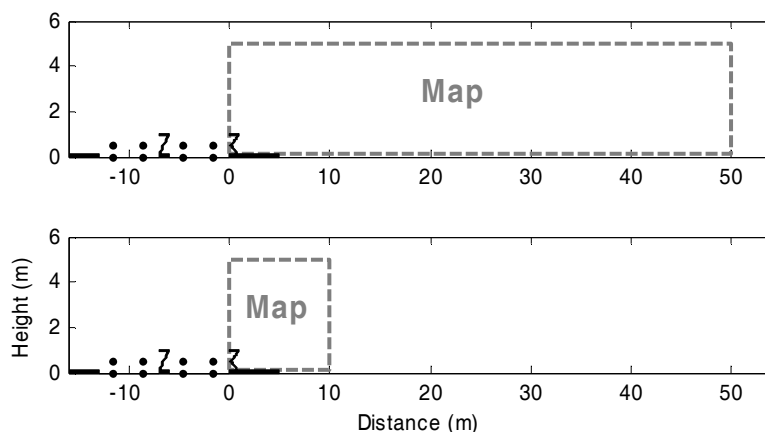


Figure 6.9 Details of the area studied for the noise maps

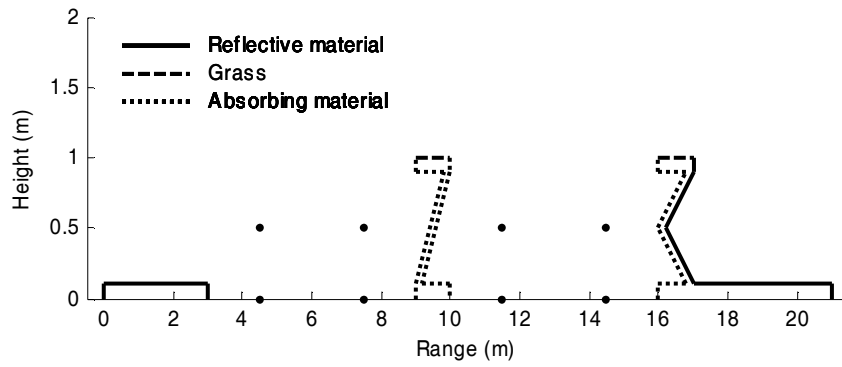


Figure 6.10 Configuration studied for the creation of noise maps

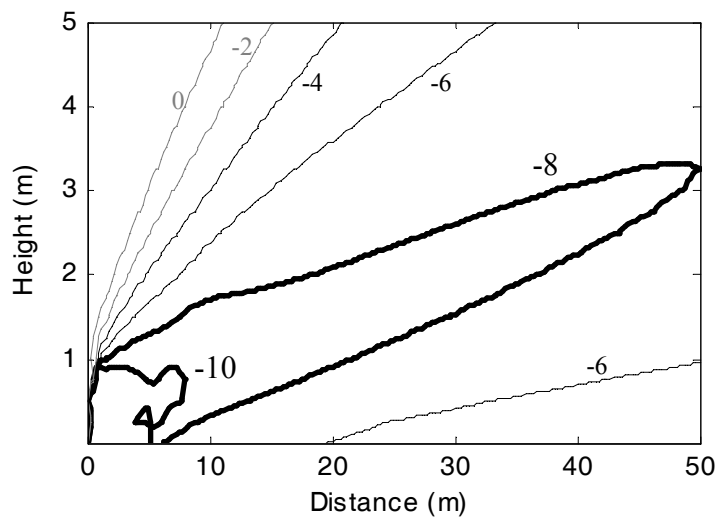


Figure 6.11 Insertion loss in dB(A) for a large area

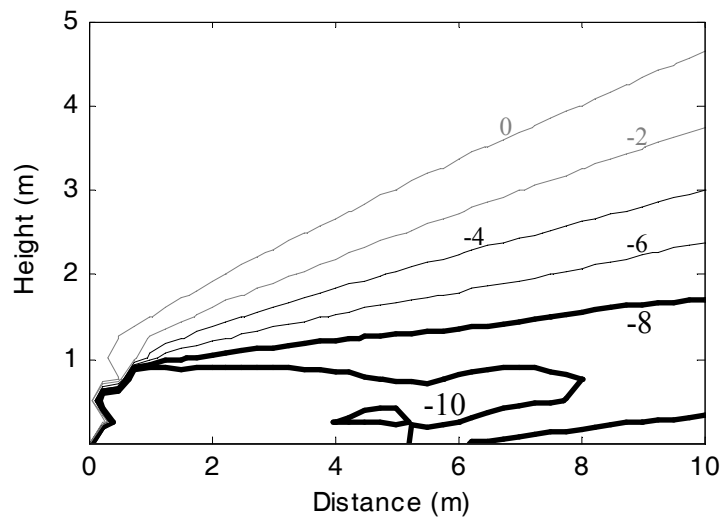


Figure 6.12 Insertion loss in dB(A) for a zoomed area

The configuration studied in this section is shown in Figure 6.10: two protectors, a Sigma-shaped one on the right side pavement and a Z-shaped one on the central reservation, were considered. The top graph of Figure 6.9 presents the area studied for the noise maps presented in Figure 6.11: it is a 50 m wide and 5 m high vertical zone; the bottom graph of Figure 6.9 presents the zoomed 10 m × 5 m area studied for the noise maps presented in Figure 6.12: The results in dB(A) calculated with equation (6.2) are given in Figure 6.11. Figure 6.12 is a zoomed version of Figure 6.11 in order to show the impact of low height noise protectors in their own vicinity.

As shown on the Figure 6.11, the Z-Sigma-shaped protectors achieves noise reduction approaching 8 to 10 dB(A) in the area of interest (up to 50 meters behind the protectors and at a height between 1 and 2 meters, which represent typical location of human ears). Those protectors are suitable to protect parks or squares in cities.

The zoomed map presented in Figure 6.12 shows that it is necessary to be at least 2 m away from the protector in order to experience a noise reduction of 2 to 5 dB(A) at typical locations of human ears. It shows that these protectors also provide a significant reduction of road traffic noise for pedestrians on wide pavements along avenues.

## **6.4. The Experimental Simulations**

Measurements on a one to ten scale model were carried out in order to confirm the results of the theoretical simulations presented above. The experimental set up is first briefly described. The experimental results are then given and these are compared with the theoretical results.

### **6.4.1. Experimental set up**

Measurements were carried out in a quasi-anechoic room (CSTB, Scale Model Centre, Grenoble, France) in an attempt to approximately simulate free-field conditions. An impulsive method was used for these measurements where the source is a Grozier electrostatic spark [89], which is considered to be omni-directional. The acquisition was achieved with a Pulse system developed by Brüel&Kjær. The two sensors used here were quarter-inch microphones. One microphone was dedicated to the measurement of the acoustic pressure level at a studied receiver point while the second one was used to adjust the levels to a single reference. The photo presented in Figure 6.13 shows a configuration with two noise protectors covered with felt, the two microphones and the source.

Figure 6.14 and Figure 6.15 are also photos of the experimental set up for the I-shaped protector and the T-shaped protector. The spark source can be used in the frequency range 500-16000 Hz; consequently, these results are equivalent to a full scale frequency range of 50-1600 Hz. Preliminary measurements were carried out to check the validity of this measurement set up. The results showed an excellent agreement between measurements and numerical calculations for basic cases, such as free field measurements free of ground reflection or reflection from a rigid surface. One of these

preliminary calculations is presented in Figure 6.16. The configuration is a rigid ground with a source at a height of 0.3 m and with a receiver at a height of 0.6 m. The source-receiver distance was 2 m (distances are given in the model scale one to ten). The Excess Attenuation (referred to free field) as a function of frequency is given for both measurements and BEM calculations. A comparison shows that the reductions in noise due to the protectors occur at the same frequencies, so the agreement is quite satisfactory.

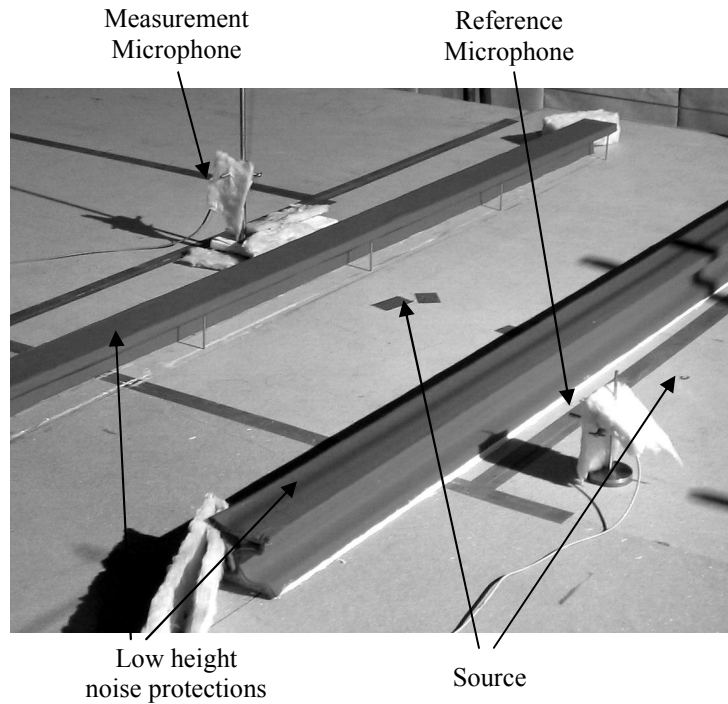


Figure 6.13 Experimental set up of the scale model measurements

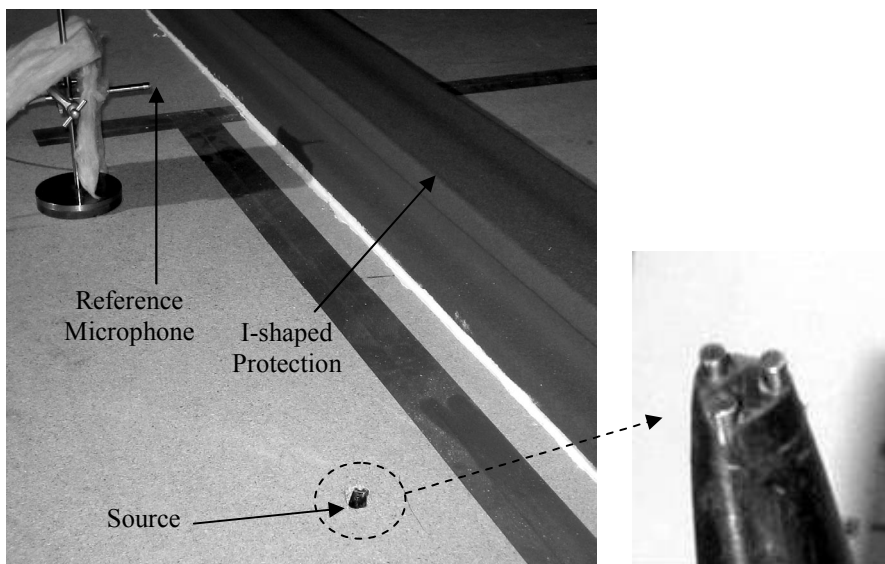


Figure 6.14 The I-shaped protection, the reference microphone and the Grozier spark

Equivalent absorptive materials for the scale models are obtained by use of layers of Ardennes felt. One layer of Ardennes felt in the scale modelling experiments is approximately 0.001 m thick. Preliminary calculations compared with measurements made it possible to determine the corresponding best-fit effective flow resistivity of a number of layers of felt (keeping the thickness equal to 0.1 m in numerical simulations). With only one layer of felt, the corresponding best-fit effective flow resistivity is about  $600 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  for real scale (and for a thickness of absorbent material set to 0.1 m in the BEM numerical code). With four layers of felt, the corresponding best-fit flow resistivity is about  $40 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  for real scale (and for a thickness of absorbent material set to 0.1 m in the BEM numerical code). Those values were used for the numerical simulations for comparison with scale model measurements.

Many configurations were tested but only results from the most significant ones are presented here. Configurations with one or two (one on the pavement and one on the central reservation) acoustic protectors were measured. For each configuration, several shapes were experimentally investigated with two source locations and ten receiver positions.

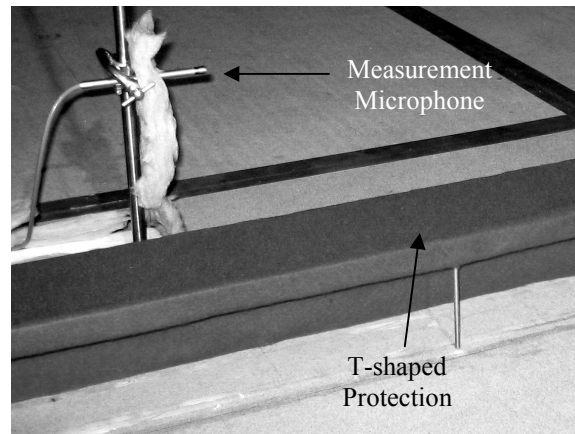


Figure 6.15 The T-shaped protection and the measurement microphone

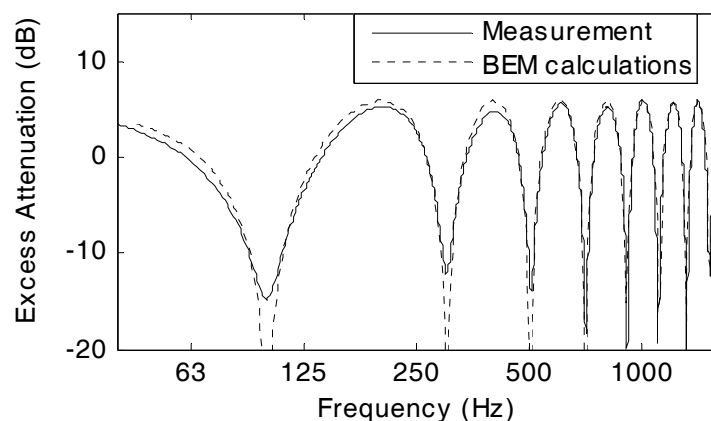


Figure 6.16 Preliminary calculation on a rigid ground for validation



### 6.4.2. Experimental Results

In this section the results of the scale model measurements are presented. The comparison with theoretical results is carried out for each tested configuration. The acoustic performance is determined through the calculation of the insertion loss using equation (6.1). All distances given throughout the text or in figures in this section are specified at a scale of one to ten. Therefore, they have to be multiplied by 10 for comparison with full scale.

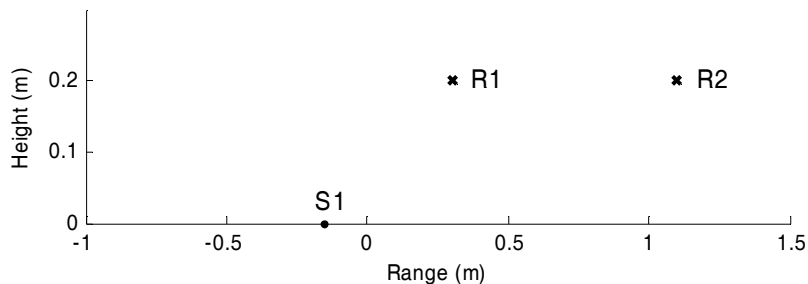


Figure 6.17 Reference configuration for scale measurements (axes are at a scale 1:10)

Here, only one source position was considered: the source, named S1, was on the ground and 0.15 m away from the left side of the protector placed on the pavement. The origin was located on the left side of this protector. The protectors were 0.1 m wide except for the straight protector. The reference configuration is shown in Figure 6.17. The ground is considered to be perfectly reflective (for comparisons with theoretical simulations). Two receivers, R1 and R2, were considered. They were both located 0.2 m high and R1 was positioned at 0.3 m and R2 at 1.1 m on the x-axis.

The results of insertion losses as a function of frequency are presented in Figure 6.19, Figure 6.21, Figure 6.22, Figure 6.24 and Figure 6.25. They are compared with numerical simulations carried out using the BEM code MICADO. In all cases the results are given in narrow bands (top graphs) and in third octave bands (bottom graphs).

Three cases are considered in this paragraph:

Case 1: a single straight protector is located on the right side of the road (on the pavement) with a reflective right surface and an absorptive left side (four layers of felt). The top surface is covered with one layer of felt (a grass-like impedance surface). The configuration is given in Figure 6.18. The results are shown in Figure 6.19 for receiver R1.

Case 2: a single T-shaped protector is located on the right side of the road (on the pavement) with a reflective right surface. The top surface is covered with one layer of felt (a grass-like impedance surface). All other surfaces are absorptive (four layers of felt). The configuration is given in Figure 6.20. The results are shown in Figure 6.21 and Figure 6.22 for receivers R1 and R2 respectively.

Case 3: a set of two protectors consisting of a T-shaped device located on the right side of the road (on the pavement) and an I-shaped one located at the left of the source (on

the central reservation). The T-shaped protector has a reflective right surface. The top surface is covered with one layer of felt (a grass-like impedance surface). All other surfaces are absorptive (four layers of felt). The I-shaped protector has a top surface covered with one layer of felt (a grass-like impedance surface). All other surfaces are absorptive (four layers of felt). The configuration is given in Figure 6.23. The results are shown in Figure 6.24 and Figure 6.25 for receivers R1 and R2 respectively.

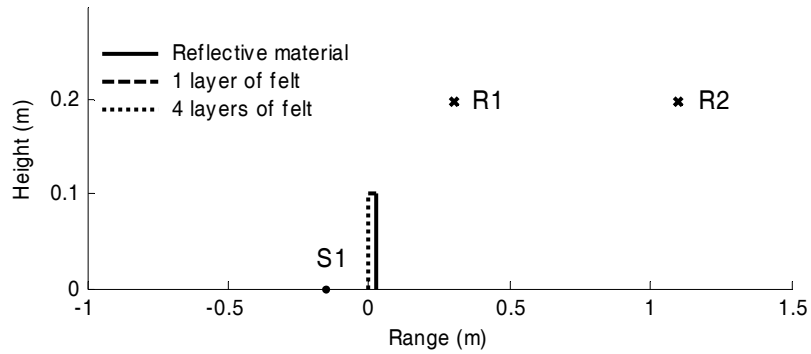


Figure 6.18 Scale measurement configuration for case 1: only a straight protection

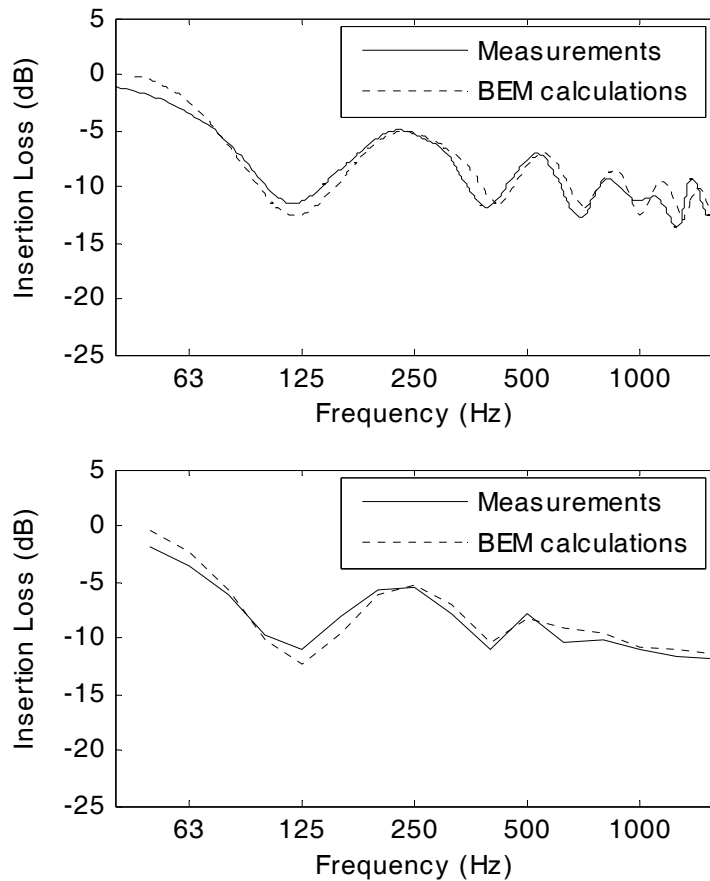


Figure 6.19 Results for R1 of scale model measurements for configuration “case 1”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations.

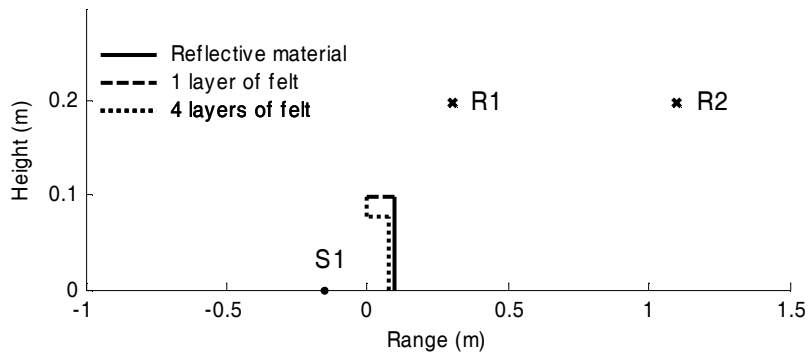


Figure 6.20 Scale measurement configuration for case 2: only a T-shaped protection

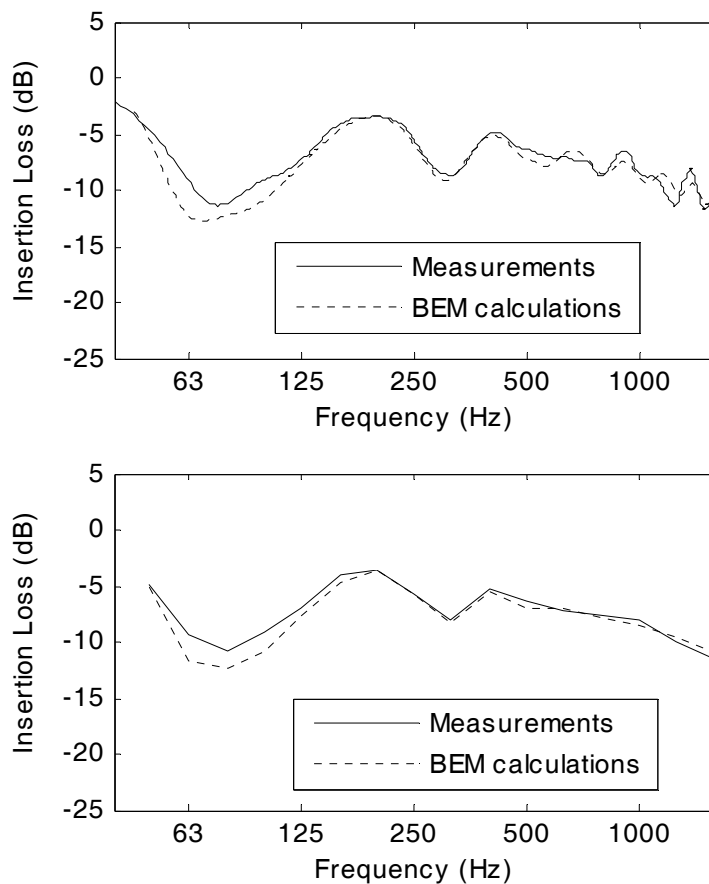


Figure 6.21 Results for R1 of scale model measurements for configuration “case 2”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations.

On the whole, there is good agreement between measurements and numerical simulations. Especially for narrow band representations, the noise reductions occur at the same frequencies. The comparison between case 1 (Figure 6.19) and case 2 (Figure 6.21 and Figure 6.22) shows that the T-shaped protector is more efficient than the straight one at low frequencies. In the configuration with the T-shaped barrier, the

insertion loss reaches 10-12 dB around 80 Hz. At high frequencies, the straight protector is slightly more effective than the others - this is consistent with the numerical simulation results. The results for case 3 (Figure 6.24 and Figure 6.25) show many insertion loss peaks in the narrow band representation. That is because of the multi-reflections between the two protectors considered. This multi-reflection effect is decreased by the absorptive surfaces but it is still present. The second protector on the central reservation does not really increase the insertion loss relative to source S1 but, as shown in previous numerical calculations, this second protector reduces the impact of sources on the left side of the road (not considered in this measurement part).

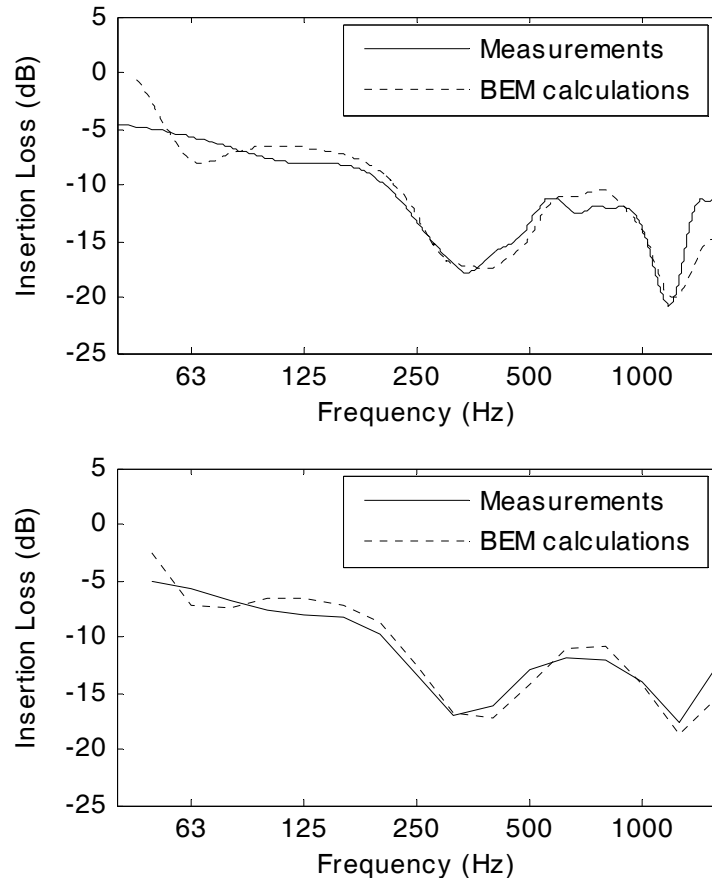


Figure 6.22 Results for R2 of scale model measurements for configuration “case 2”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations.

Values of the global insertion loss in dB(A) calculated using equation (6.2) are summarised in Table 6.1. Experimental and theoretical results are compared for receivers R1 and R2. The agreement is acceptable: differences between BEM calculations and scale model measurements are mostly less than 1 dB(A). The A-weighted road traffic noise spectrum predominant in the 630–1600 Hz frequency range. However, low height noise protectors with a specific shape are also effective at low frequencies, unlike the straight protector. The results integrated over the complete frequency range and given in dB(A) do not reflect this effectiveness at low frequencies.

As a consequence, results in dB(A) are better for a straight noise protector than for other shapes. The global effectiveness in dB(A) reaches 7 to 10 dB(A) at receiver point R1 and 11 to 14 dB(A) at receiver point R2. Those results confirm the numerical results in dB(A) presented with vertical noise maps in section 6.4.2.2.

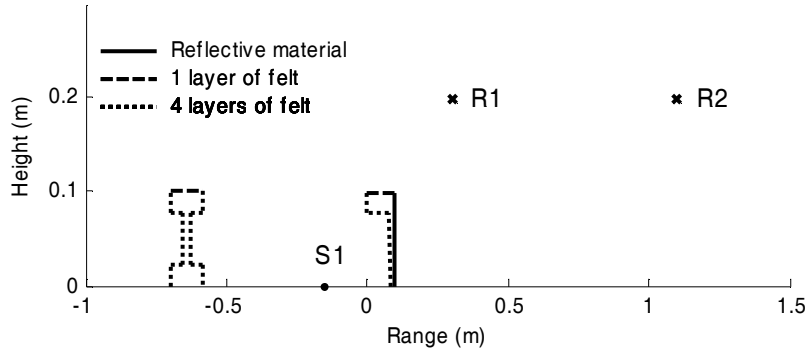


Figure 6.23 Scale measurement configuration for case 3: two protections, a T-shaped protection on the pavement and a I-shaped protection on the central reservation

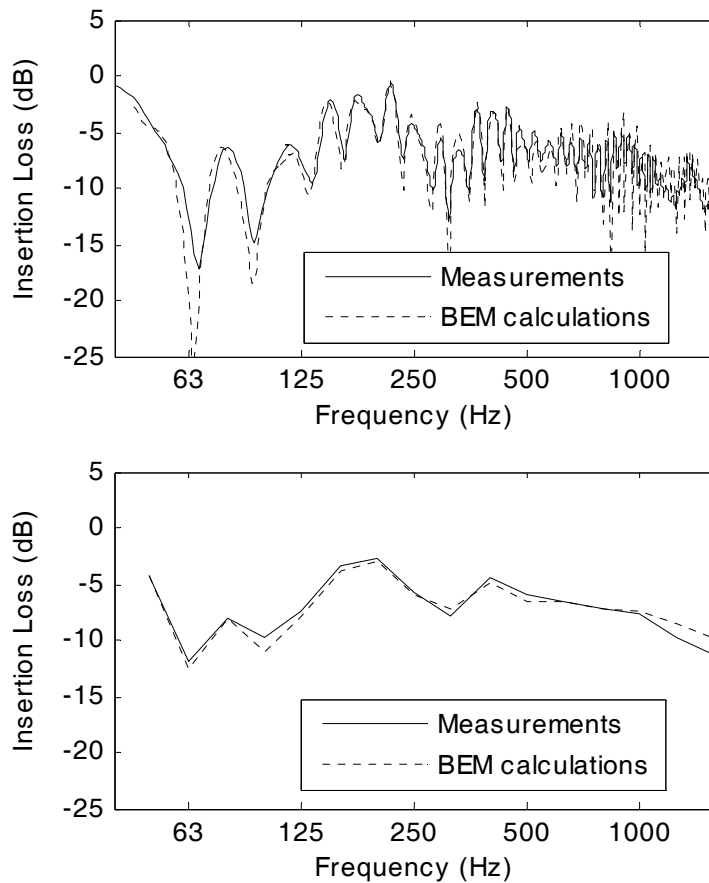


Figure 6.24 Results for R1 of scale model measurements for configuration “case 3”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations.

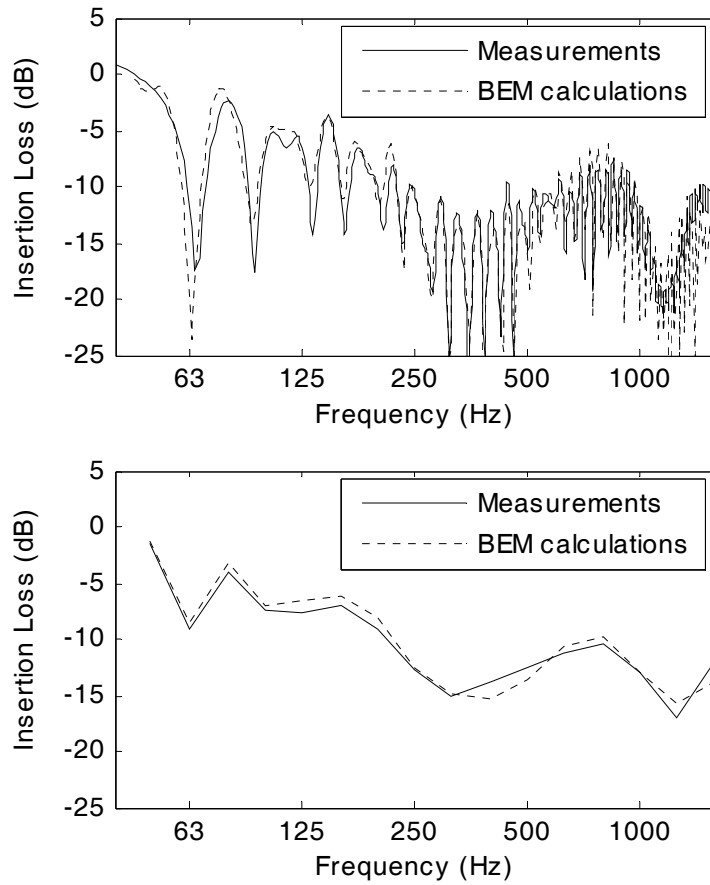


Figure 6.25 Results for R2 of scale model measurements for configuration “case 3”. Top graph: narrow bands. Bottom graph: third octave bands. The solid line is for measurements, the dashed line is for BEM simulations.

	IL <sub>A</sub> for R1 (dB(A))		IL <sub>A</sub> for R2 (dB(A))	
	Scale model measurements	Theoretical BEM simulations	Scale model measurements	Theoretical BEM simulations
Case 1	-10.2	-9.3	-14.1	-12.4
Case 2	-8.0	-7.5	-13.6	-12.6
Case 3	-7.6	-6.8	-12.4	-11.6

Table 6.1 Results of the influence of the road traffic noise spectrum

Finally, the scale model measurements enable the 3D effectiveness of low height noise protectors with a point source to be studied. This contrasts with the numerical simulations, which can only consider a coherent line source. However, as Duhamel found in [39], there is a satisfactory agreement between 2D theoretical results with coherent line sources and 3D scale model measurements with point sources.

## **6.5. Conclusion**

This new concept of low height protectors integrated as a piece of street furniture with the aim of reducing noise experienced by pedestrians in urban areas has demonstrated some interesting results. Numerical simulations carried out with the numerical code MICADO have shown a significant effectiveness of one meter high noise protectors at low frequencies. The fact that the protector is one meter high is an essential point for aesthetic and safety aspects. It is the shape of the protector which increases its effectiveness, trapping the low frequencies inside itself. Some scale model measurements have been carried out at a scale of one to ten in order to compare the results with BEM simulations. The results show very good agreement. The global effectiveness of such low height protectors reaches 6 to 10 dB(A) behind the protection and at a typical height of the ears of human beings.

Work is still in progress to complete this study with full scale tests on prototypes in order to use real road traffic noise sources (cars, motorbikes). In that case, the influence of the typical road traffic noise spectrum would be more realistic. It is also planned to use advanced optimization algorithms in order to optimize the shapes together with the acoustical impedances (especially of the interior) of such protectors.

## 6.6. Application de l’outil d’optimisation à la problématique des protections de faible hauteur

Il s’agit maintenant d’utiliser l’outil d’optimisation OPTIMEA dans le but d’optimiser les formes 2D des protections de faible hauteur pour obtenir une efficacité maximale. Afin de simplifier le problème, les caractéristiques acoustiques des matériaux sont, dans cette partie, fixés : l’ensemble de la protection est considéré comme étant recouvert d’un absorbant ayant une résistivité au flux d’air  $\sigma$  égale à 30 kPa.s.m<sup>-2</sup> (ce qui correspond à de la laine de minérale) sur une épaisseur  $h$  de 0.1 m.

### 6.6.1. Position du problème

Afin de représenter au mieux une configuration routière urbaine, on choisit de prendre en compte les contributions des 8 sources proposées précédemment (voir Figure 6.26). Par contre, dans cette section, on ne considère qu’un seul récepteur ; ses coordonnées sont : (20 m ; 2 m), c’est-à-dire qu’il est situé à 2 m de hauteur et 3 m derrière le bord droit de la protection (détails sur la Figure 6.26).

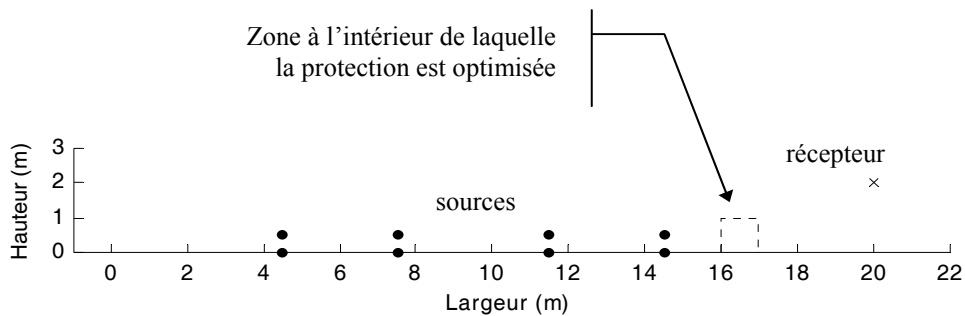


Figure 6.26 Configuration source récepteur pour les optimisations dans le cas des protections de faible hauteur. (• : sources, × : récepteurs)

L’optimisation requiert un grand nombre d’évaluations de la fonction coût. Aussi, pour limiter les temps de calculs, on choisit de ne considérer qu’une seule protection en bordure de chaussée (pas de protection sur le terre-plein central, ce qui entraîne une réduction du maillage pour les calculs numériques avec MICADO).

L’espace à l’intérieur duquel la protection est optimisée est représenté sur la Figure 6.26 par des pointillés. La protection ne dépasse pas 1 m de hauteur et 1 m de largeur.

On choisit d’optimiser l’efficacité acoustique d’une protection de faible hauteur par rapport à une configuration de référence comportant une protection de type écran droit absorbant ( $\sigma = 30$  kPa.s.m<sup>-2</sup> et  $h = 0.1$  m) de 1 m de hauteur et 0.1 m d’épaisseur. La configuration de référence est présentée sur la Figure 6.27.



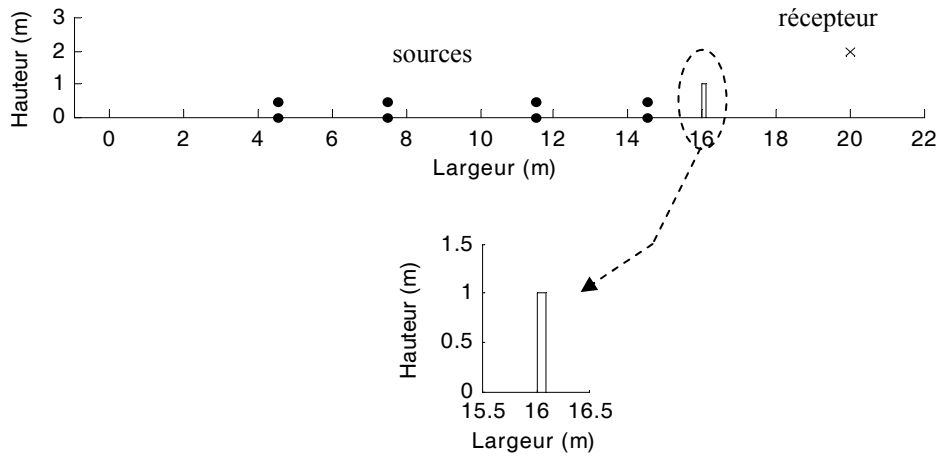


Figure 6.27 Configuration de référence pour les optimisations dans le cas des protections de faible hauteur. (• : sources, × : récepteurs)

D'après les précédents calculs (voir 6.3.2.1), c'est autour de la bande de tiers d'octave 63 Hz que les protections de forme complexe sont le plus efficaces par rapport à une protection de type écran droit de 1 m de hauteur totale. D'autre part, pour des fréquences supérieures à environ 300 Hz, les efficacités deviennent sensiblement les mêmes quelque soit la forme de la protection. Aussi, l'optimisation porte dans cette section sur une étude des protections de faible hauteur pour les bandes de tiers d'octave comprises entre 50 Hz et 315 Hz (basses fréquences), en considérant 10 fréquences pures par tiers d'octave pour la convergence des calculs numériques. Une des contraintes de l'optimisation est toutefois de garder une efficacité en dB(A) sur l'ensemble des fréquences du bruit routier (dans les bandes de tiers d'octave de 50 à 5000 Hz) du même ordre de grandeur que pour une protection de type écran droit absorbant de 1 m de hauteur ; on se fixe une dégradation maximale tolérée de 0.25 dB.

La problématique est ainsi d'augmenter l'efficacité aux basses fréquences  $Eff_{BF}$  sans dégrader l'efficacité globale en dB(A)  $Eff_A$ . On définit ci-dessous  $Eff_{BF}$  et  $Eff_A$  :

$$Eff_{BF} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{\Delta f=50}^{315} |p_{ref, \Delta f}|^2}{\sum_{\Delta f=50}^{315} |p_{prot \text{ faible hauteur}, \Delta f}|^2} \right) \quad (6.3)$$

où  $p_{ref, \Delta f}$  est la pression acoustique au point récepteur considéré dans la bande de tiers d'octave  $\Delta f$  et dans la configuration de référence ; et  $p_{prot \text{ faible hauteur}, \Delta f}$  est la

pression acoustique au point récepteur considéré dans la bande de tiers d'octave  $\Delta f$  et dans la configuration avec une protection de faible hauteur d'une certaine forme.

$$Eff_A = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{\Delta f=50}^{5000} \left( 10^{\frac{LwA(\Delta f) + EA_{\Delta f, ref}}{10}} \right)}{\sum_{\Delta f=50}^{5000} \left( 10^{\frac{LwA(\Delta f) + EA_{\Delta f, prot\ faible\ hauteur}}{10}} \right)} \right) \quad (6.4)$$

où  $EA_{\Delta f, ref}$  est l'atténuation excédentaire (Excess Attenuation) dans le cas de la configuration de référence calculée par rapport au champ libre et dans la bande de tiers d'octave  $\Delta f$  ;  $EA_{\Delta f, prot\ faible\ hauteur}$  est l'atténuation excédentaire dans le cas d'une protection de faible hauteur d'une certaine forme ;  $LwA(\Delta f)$  est la valeur du spectre de bruit routier pour la bande de tiers d'octave  $\Delta f$  calculée à partir de la pondération de la norme EN 1793-3 [2].

Le problème d'optimisation devient donc :

$$\text{Maximiser } Eff_{BF} \text{ avec } Eff_A \geq -0.25 \text{ dB}(A) \quad (6.5)$$

## 6.6.2. Méthodes utilisées

### 6.6.2.1. Méthode de création de forme

Concernant la détermination des formes de la protection, une méthode création de forme est proposée en s'appuyant sur un découpage de la zone à optimiser en quadrillage et en considérant un chemin allant d'un nœud à un autre sans repasser par un point déjà visité (afin d'éviter les recoupements et de ne plus avoir une surface convenable pour le calcul BEM). L'objet de ce travail de recherche n'étant pas d'étudier la création de forme, on se limite à ce cas simple de génération de forme pour l'optimisation. Quelques détails de cette méthode sont décrits ci-dessous.

La zone à optimiser (qui dans notre cas est un carré de  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ) est découpée en un quadrillage dont chaque nœud porte un numéro comme indiqué sur la Figure 6.28. A chaque nœud est associé un groupe de quatre voisins (ou moins pour les nœuds qui sont sur les bords de la zone). La création de forme se fait en définissant une liste de voisins (liste d'entiers compris entre 1 et 4) puis en transformant cette liste de voisins en une liste de nœuds à relier. Trois contraintes existent : ne pas repasser par un nœud déjà visité, ne pas sortir de la zone à l'intérieur de laquelle la forme est créée, et créer des formes dont la normale des éléments est sortante (nécessaire pour le calcul acoustique avec le code numérique MICADO).

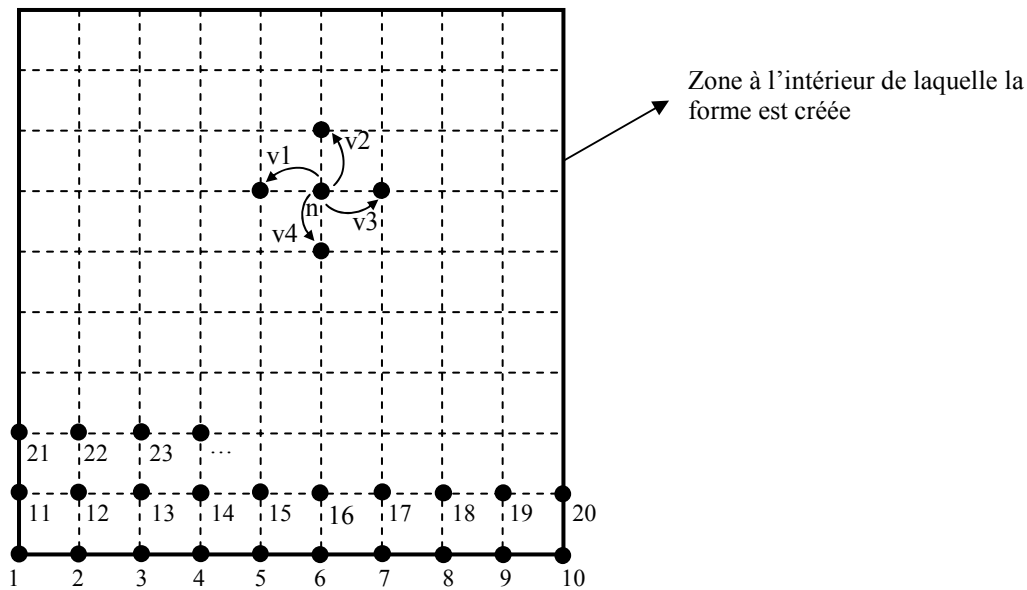


Figure 6.28 Exemple de quadrillage 10 x 10 et numérotation des nœuds. Définitions de la notion de voisins dans la création de forme.

Sur la Figure 6.29, des exemples de suite de voisins avec les formes associées sont proposés. Pour ces exemples, on choisit un quadrillage de  $6 \times 6$  nœuds. On associe à la liste des voisins la liste des numéros de nœuds qu'il faut relier. Arbitrairement, on choisit de démarrer la liste de nœuds avec le numéro 4. Pour ces deux exemples, les listes des voisins sont choisies de telle manière que tous les voisins soient accessibles.

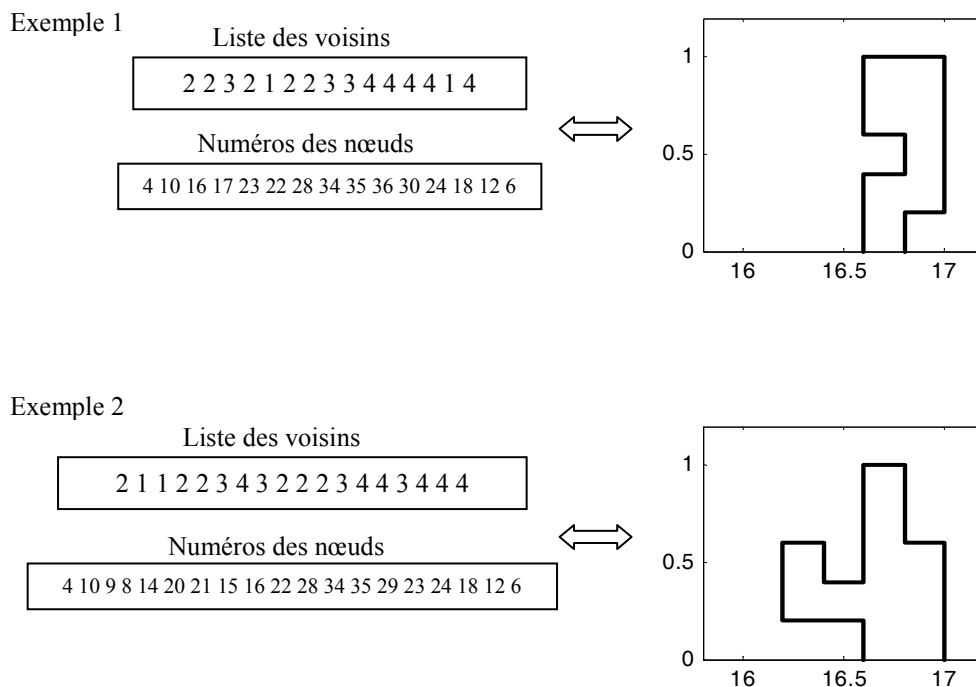


Figure 6.29 Deux exemples de listes de voisins et des formes associées avec un quadrillage 6 x 6.

Lorsqu'on ne peut pas atteindre le voisin espéré (par exemple pour ne pas revenir sur un nœud déjà visité), on passe au suivant dans la liste globale des voisins et une nouvelle liste des voisins réellement considérés dans la création de la forme est constituée. Cette dernière particularité de l'algorithme est illustrée sur la Figure 6.30. On donne une forme créée avec un quadrillage de  $11 \times 11$  nœuds en prenant une liste des voisins globale de 100 éléments choisis aléatoirement. Comme attendu, il n'est pas possible d'atteindre certains des voisins de la liste dans l'ordre proposé. Ceux-ci sont alors ignorés dans la création de la forme. On obtient ainsi une liste des voisins réellement considérés. C'est cette liste qui représente la forme donnée. A une liste des voisins réellement considérés peut correspondre plusieurs listes globales des voisins mais une seule forme finale.

L'optimisation consiste en la détermination de la liste des voisins réellement considérés qui permet d'obtenir une forme dont l'efficacité acoustique est la meilleure. Les paramètres à optimiser sont chaque élément de la liste des voisins.

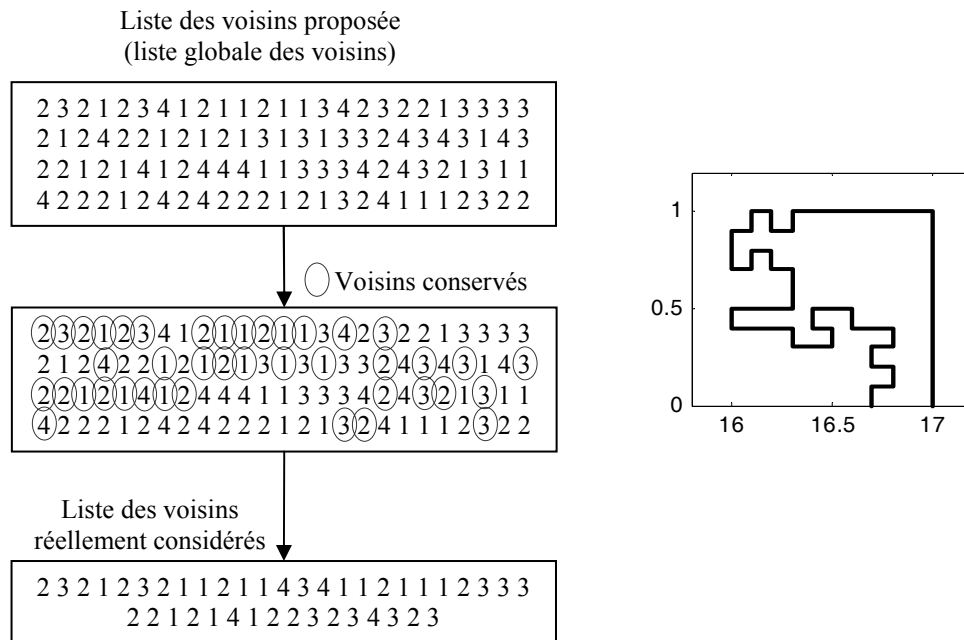


Figure 6.30 Liste des voisins et liste des voisins réellement considérés.

Il est à noter que d'autres types de codage sont envisageables pour la création de forme, citons par exemple celui utilisé par Duhamel [41] également pour l'optimisation de la forme d'écrans anti-bruit. Dans ce travail de thèse, le choix s'est porté sur un codage ne donnant que des formes connexes et ne permettant donc pas d'obtenir des formes de protections acoustiques en plusieurs blocs qui pourraient être intéressantes d'un point de vue acoustique. Cependant, l'objectif de la thèse étant de montrer la faisabilité d'un outil d'optimisation adapté aux protections de forme complexe, on choisit de conserver cette méthode de création de forme malgré ces inconvénients.

### 6.6.2.2. Méthode d'optimisation

La méthode d'optimisation utilisée est une méthode évolutionnaire. En effet, le nombre important de paramètres à optimiser empêche une bonne convergence de la méthode de Nelder Mead. On choisit ainsi d'utiliser un algorithme génétique afin de trouver une forme optimale pour une efficacité acoustique maximale.

La méthode de création de forme proposée présente l'inconvénient de permettre la création de formes dont la hauteur totale est inférieure à 1 m et de formes non fermées. Ces deux types de formes ne sont pas évalués, le premier parce qu'on choisit, dans ce travail, de ne considérer que des protections de 1 m de hauteur, et le second parce que la BEM ne permet pas le calcul pour une configuration avec une surface non fermée.

Compte tenu de ces deux catégories de formes qu'il faut exclure des générations, on peut considérer que seuls 4 % environ des individus de la population initiale déterminée aléatoirement sont évalués (cette probabilité a été estimée par des calculs préalables). On choisit donc des tailles de population variant de 5000 à 10000 individus selon les réalisations de l'algorithme afin d'avoir un nombre significatif de formes dont l'efficacité est évaluée. On appelle individu une forme et on appelle gène un voisin de la liste de voisin.

Le critère d'arrêt de l'algorithme dépend du nombre de générations qu'il lui est autorisé d'atteindre (200 dans notre cas, pour que ce ne soit pas ce facteur qui soit prépondérant dans l'arrêt de l'algorithme) ainsi que du nombre de générations passées sans qu'il n'y ait eu d'amélioration. Ici, ce dernier nombre est généralement fixé à 5.

### 6.6.3. Résultats préliminaires

Avant de réaliser l'optimisation, quatre cas (pris au hasard) sont présentés à titre d'exemple. Les résultats sont récapitulés dans la Table 6.2 et dans la Table 6.3. On donne pour chaque cas la forme considérée, la valeur de  $Eff_{BF}$ , la valeur de  $Eff_A$  et un commentaire. Il est important de préciser que ces résultats dépendent fortement de la configuration source-récepteur choisie, du spectre de bruit routier considéré et des matériaux constituant la protection. On donne les valeurs des efficacités avec une précision de 0.01 dB ou dB(A). Cette précision n'est pas représentative en acoustique environnementale ; cependant, l'objectif étant ici de montrer la faisabilité de la méthode, on préfère garder une précision assez grande.

On remarque que l'efficacité aux basses fréquences ainsi que l'efficacité globale varient en fonction de la forme et qu'il n'est a priori pas possible de déterminer quelle est la forme optimale, ce qui justifie l'emploi d'un algorithme d'optimisation.

Les deux premières formes (Table 6.2) ne seraient pas gardées dans le cadre de l'optimisation sous contraintes car leur efficacité globale correspond à une dégradation de plus de 0.25 dB. Par contre, les deux formes de la Table 6.3 seraient conservées pour l'optimisation puisque l'efficacité globale est supérieure à -0.25 dB(A).

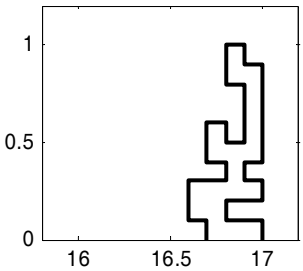
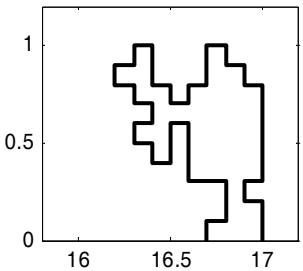
Forme	Valeurs des efficacités	Commentaire				
	<table border="1"> <tr> <td><math>Eff_A</math></td> <td>-1.62 dB(A)</td> </tr> <tr> <td><math>Eff_{BF}</math></td> <td>0.74 dB(lin)</td> </tr> </table>	$Eff_A$	-1.62 dB(A)	$Eff_{BF}$	0.74 dB(lin)	La protection a une efficacité aux basses fréquences de 0.74 dB(lin) de plus que la configuration de référence cependant elle a une efficacité globale de 1.62 dB(A) de moins (dégradation).
$Eff_A$	-1.62 dB(A)					
$Eff_{BF}$	0.74 dB(lin)					
	<table border="1"> <tr> <td><math>Eff_A</math></td> <td>-0.38 dB(A)</td> </tr> <tr> <td><math>Eff_{BF}</math></td> <td>2.43 dB(lin)</td> </tr> </table>	$Eff_A$	-0.38 dB(A)	$Eff_{BF}$	2.43 dB(lin)	La protection a une efficacité aux basses fréquences de 2.43 dB(lin) de plus que la configuration de référence cependant elle a une efficacité globale de 0.38 dB(A) de moins (dégradation).
$Eff_A$	-0.38 dB(A)					
$Eff_{BF}$	2.43 dB(lin)					

Table 6.2 Exemples de résultats obtenus par création de forme ; cas non conservés pour l'optimisation ( $Eff_A$  est inférieur à -0.25 dB(A))

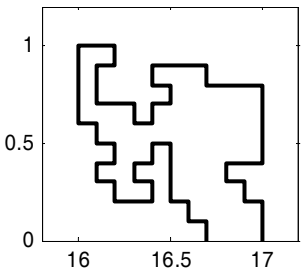
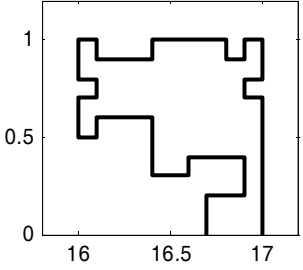
Forme	Valeurs des efficacités	Commentaire				
	<table border="1"> <tr> <td><math>Eff_A</math></td> <td>0.09 dB(A)</td> </tr> <tr> <td><math>Eff_{BF}</math></td> <td>2.91 dB(lin)</td> </tr> </table>	$Eff_A$	0.09 dB(A)	$Eff_{BF}$	2.91 dB(lin)	La protection a une efficacité aux basses fréquences de 2.91 dB(lin) de plus que la configuration de référence et en outre elle a une efficacité globale de 0.09 dB(A) de plus (amélioration).
$Eff_A$	0.09 dB(A)					
$Eff_{BF}$	2.91 dB(lin)					
	<table border="1"> <tr> <td><math>Eff_A</math></td> <td>0.26 dB(A)</td> </tr> <tr> <td><math>Eff_{BF}</math></td> <td>3.60 dB(lin)</td> </tr> </table>	$Eff_A$	0.26 dB(A)	$Eff_{BF}$	3.60 dB(lin)	La protection a une efficacité aux basses fréquences de 3.60 dB(lin) de plus que la configuration de référence et en outre elle a une efficacité globale de 0.26 dB(A) de plus (amélioration).
$Eff_A$	0.26 dB(A)					
$Eff_{BF}$	3.60 dB(lin)					

Table 6.3 Exemples de résultats obtenus par création de forme ; cas conservés pour l'optimisation ( $Eff_A$  est supérieur à -0.25 dB(A))

### 6.6.4. Résultats de l'optimisation

Cette section est divisée en deux parties, l'une donnant des explications sur l'évolution d'un algorithme génétique et sur les deux opérateurs (croisement et mutation), l'autre portant sur les résultats de l'application d'un algorithme génétique au problème de protection de faible hauteur en milieu urbain.

#### 6.6.4.1. Algorithme génétique et opérateurs

Afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un algorithme génétique, des étapes intermédiaires sont présentées dans une réalisation de l'optimisation. Sur la Figure 6.31, on représente les formes qui correspondent à la meilleure efficacité à certaines générations. Sur chaque forme on ne donne que l'efficacité aux basses fréquences (résultat de la fonction coût), la contrainte sur l'efficacité globale étant à chaque fois respectée.

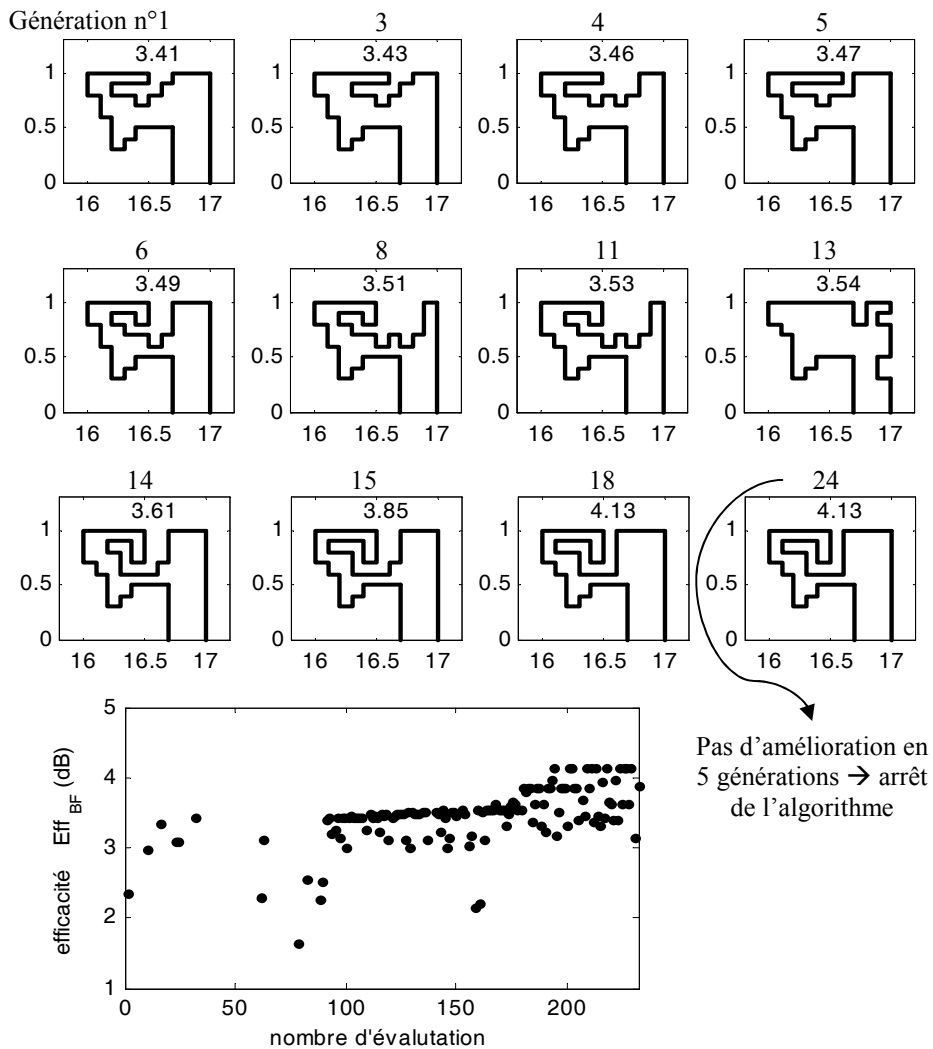


Figure 6.31 Illustration de l'évolution d'un algorithme génétique.

On remarque bien l'évolution de l'efficacité : elle augmente avec le numéro de la génération. L'algorithme s'arrête à la 24<sup>e</sup> génération car il n'y a plus eu d'amélioration depuis 5 générations. On trace également, en bas de la Figure 6.31, l'efficacité aux basses fréquences de la protection en fonction du nombre d'évaluations. Les valeurs du nombre d'évaluations pour lesquelles l'efficacité aux basses fréquences n'apparaît pas sur le graphe correspondent aux cas où la contrainte d'une efficacité globale supérieure à  $-0.25$  dB(A) n'est pas satisfaite. On remarque bien la recherche progressive du maximum.

D'autre part, des illustrations d'un croisement entre deux individus sont représentées sur la Figure 6.32, la Figure 6.33 et la Figure 6.34. Les deux chiffres inscrits en haut à gauche de la forme correspondent à l'efficacité globale (chiffre supérieur) et à l'efficacité aux basses fréquences (chiffre inférieur). La Figure 6.32 et la Figure 6.33 correspondent à des croisements en un point. On garde soit le début de l'individu A et la fin de l'individu B, soit le début de l'individu B et la fin de l'individu A. La position à laquelle s'effectue le croisement est indiquée dans chaque cas. On remarque qu'une partie de chacun des deux individus a été gardée pour former un nouvel individu. Selon les cas, le nouvel individu peut être plus efficace ou moins efficace que les individus servant au croisement.

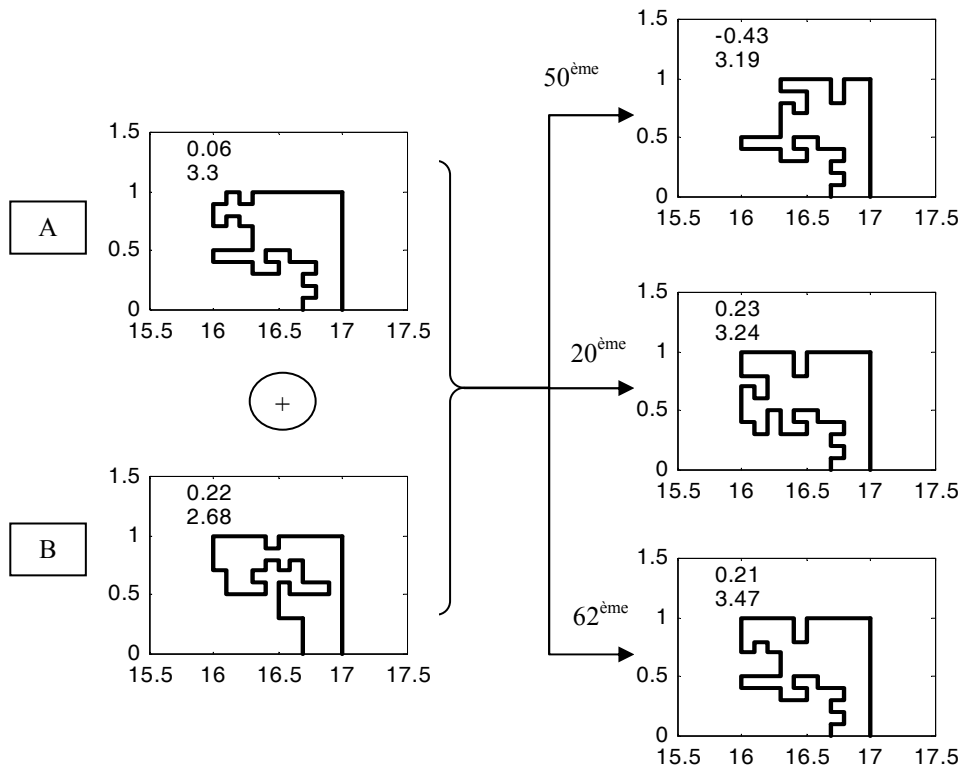


Figure 6.32 Illustration d'un croisement entre deux individus : on garde le début de l'individu A et la fin de l'individu B.



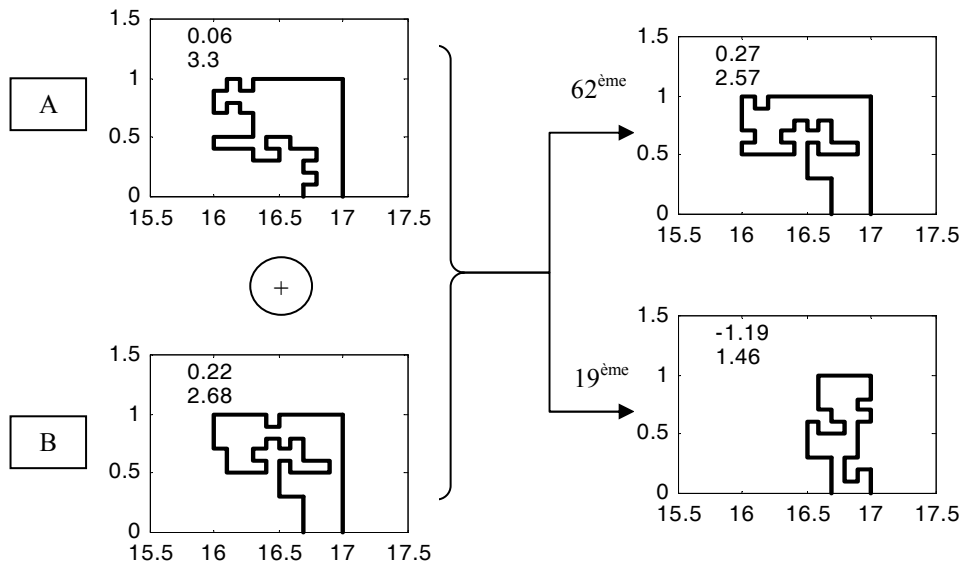


Figure 6.33 Illustration d'un croisement entre deux individus : on garde le début de l'individu B et la fin de l'individu A.

Sur la Figure 6.34 ce sont deux croisements à deux points qui sont représentés. On garde alors le début et la fin de l'individu A et en remplace le milieu par un morceau de l'individu B. Les deux points auxquels se font ces croisements sont précisés. Les positions correspondent à la liste des voisins globale et non à celle des voisins réellement considérés.

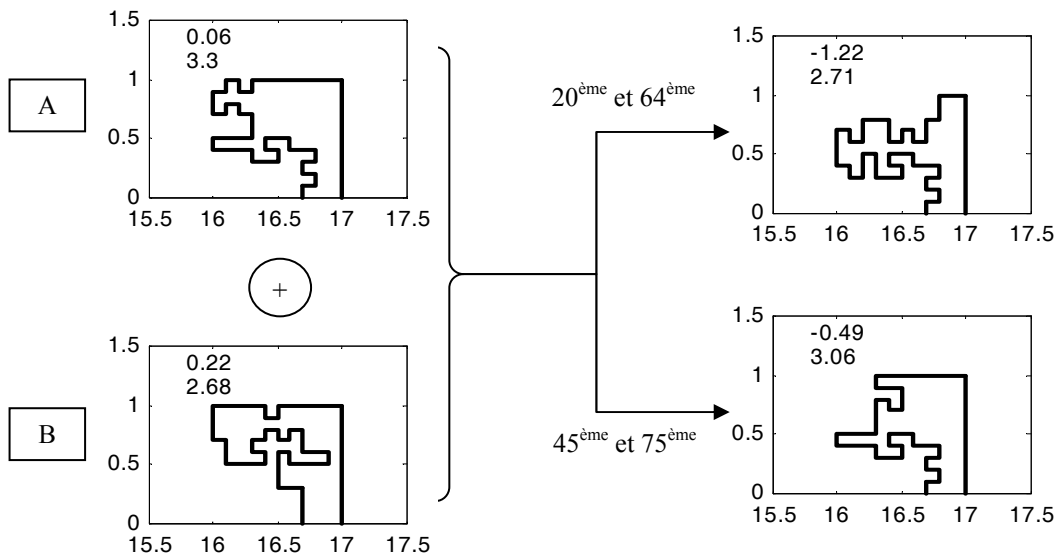


Figure 6.34 Illustration d'un croisement entre deux individus : on garde le début et la fin de l'individu A et le milieu de l'individu B.

Enfin, une illustration d'une mutation d'un gène d'un individu est présentée sur la Figure 6.35. La mutation, qui permet une diversification des individus, est opérée sur la liste globale des voisins. On donne la position du gène qui a été muté ainsi que sa nouvelle valeur. La liste des voisins de la figure initiale proposée est celle donnée sur la Figure 6.30. Quatre exemples de mutation sont exposés. Les trois premiers provoquent de très légères modifications de la forme initiale tandis que la dernière est sensiblement différente. En effet, une mutation du voisin numéro 5 a provoqué un changement important dans la liste des voisins réellement considérés.

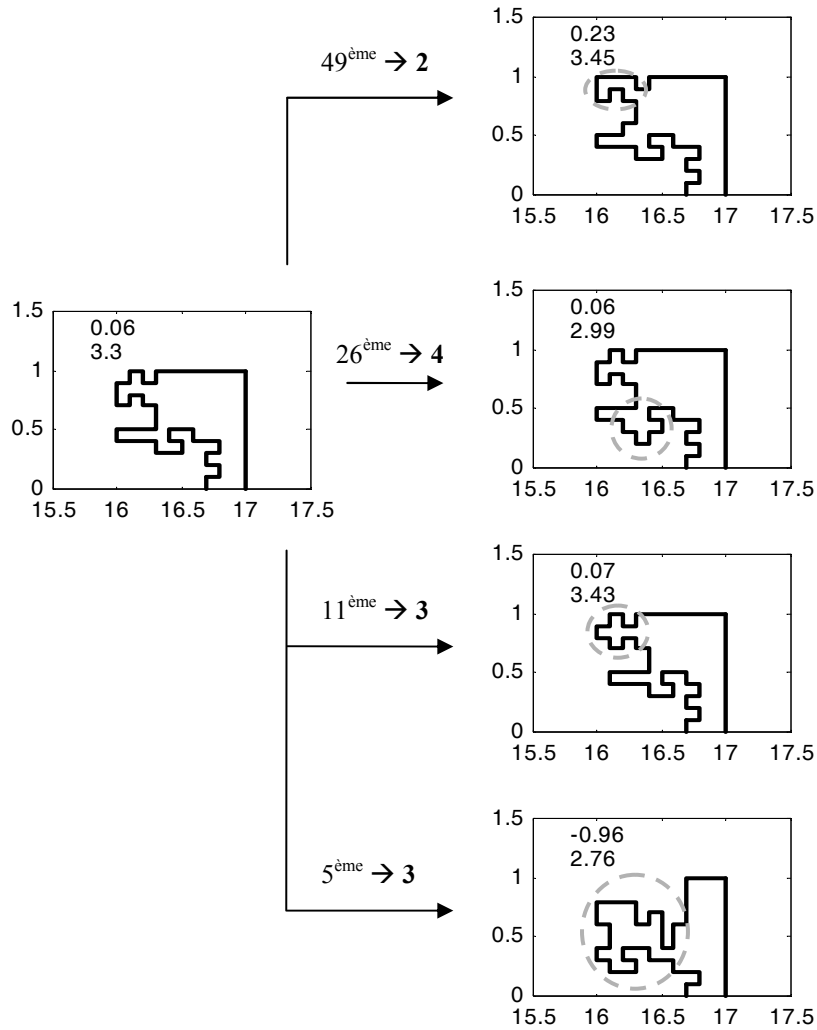


Figure 6.35 Illustration de la mutation d'un gène d'un individu.

L'application des opérateurs de croisement et de mutation peuvent amener à des formes qui ne sont pas évaluées mais ces cas ont été volontairement évités pour les illustrations.

### 6.6.4.2. Application de l'algorithme génétique au cas des protection de faible hauteur en milieu urbain

Un algorithme génétique est appliqué six fois au problème (casopt1 à casopt6) en prenant des populations de taille 10000 (excepté pour casopt1 où la population comporte 5000 individus uniquement pour comparaison avec les autres cas). Les populations initiales sont générées de manière aléatoire dans l'espace de recherche. Les critères d'arrêt sont un nombre maximal de génération à ne pas dépasser de 200 (critère jamais atteint) et un nombre maximal de générations successives sans amélioration de 5. C'est ce dernier critère qui assure l'arrêt de l'algorithme dans les six cas présentés.

On n'obtient pas le même résultat dans chacun des six cas en raison du non déterminisme de l'algorithme génétique et de l'évolution très chahutée des valeurs d'efficacité. Les résultats obtenus ne sont en réalité que des minima locaux ; pour l'obtention du minimum global, il aurait fallu autoriser une très grand précision pour la détermination de la valeur d'efficacité maximale.

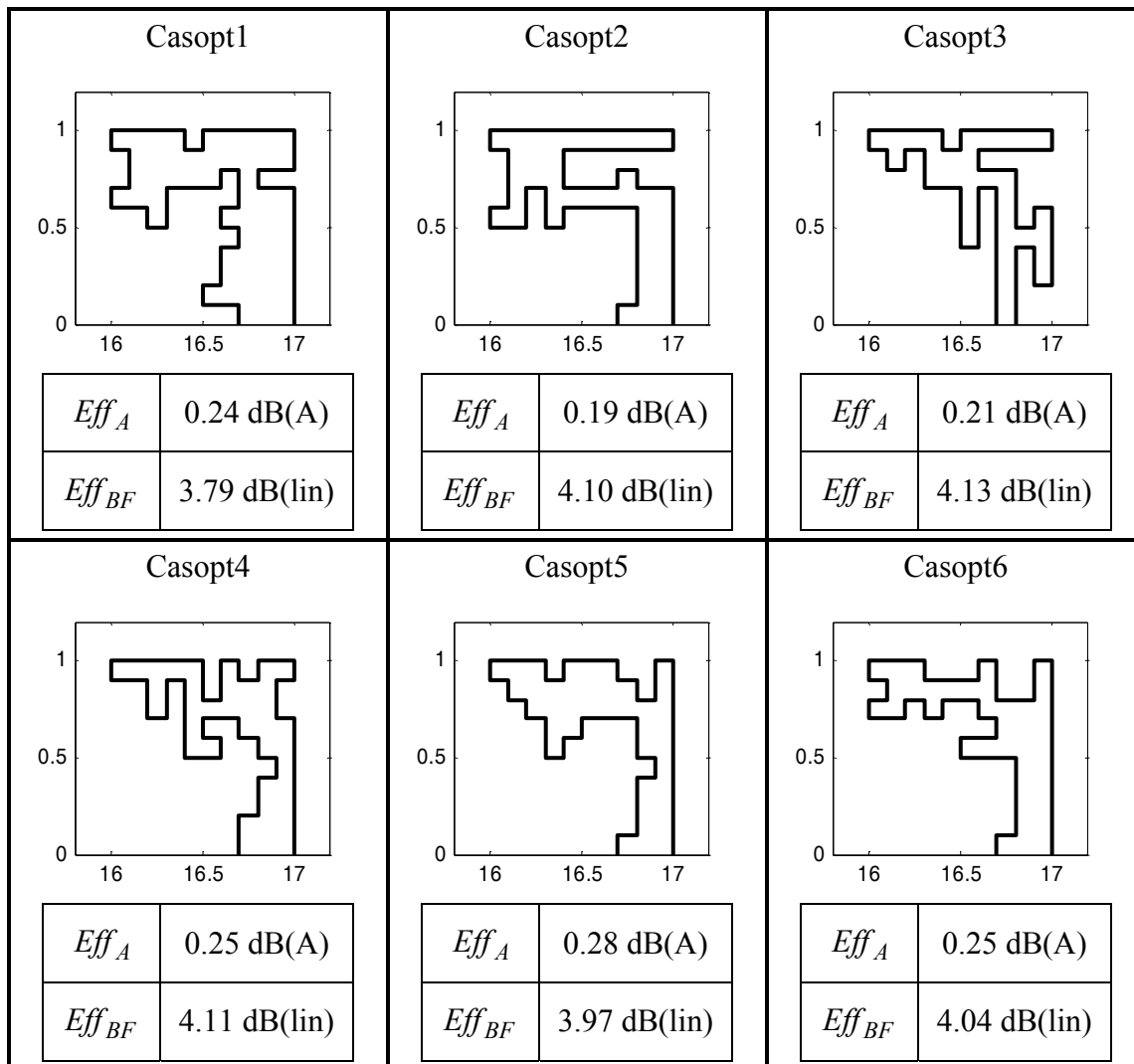


Table 6.4 Formes optimales et efficacités optimales dans les six cas d'optimisation.

Les résultats, c'est-à-dire la forme optimale ainsi que les valeurs des efficacités, sont récapitulés dans la Table 6.4. On remarque que même si les résultats sont parfois différents, les valeurs de l'efficacité maximale obtenue aux basses fréquences sont du même ordre de grandeur pour chaque cas : environ 4 dB(lin) (excepté pour le premier cas du fait de la taille de la population qui est moins importante).

Les efficacités en fonction de la fréquence sont tracées pour chacun des six cas sur la Figure 6.36. Les efficacités globales et les efficacités aux basses fréquences sont rappelées en légende. On remarque que les formes optimales obtenues dégradent en fait l'efficacité acoustique à certaines fréquences (notamment entre 100 et 250 Hz) mais l'amélioration aux autres fréquences (notamment aux environs de 63 Hz) compense largement cette dégradation en ce qui concerne l'efficacité moyennée pour les bandes de tiers d'octave entre 50 Hz et 315 Hz. En intégrant sur la totalité des bandes de tiers d'octaves considérées (de 50 Hz à 5000 Hz) on remarque que globalement les dégradations sont compensées par les améliorations puisque les efficacités globales sont positives.

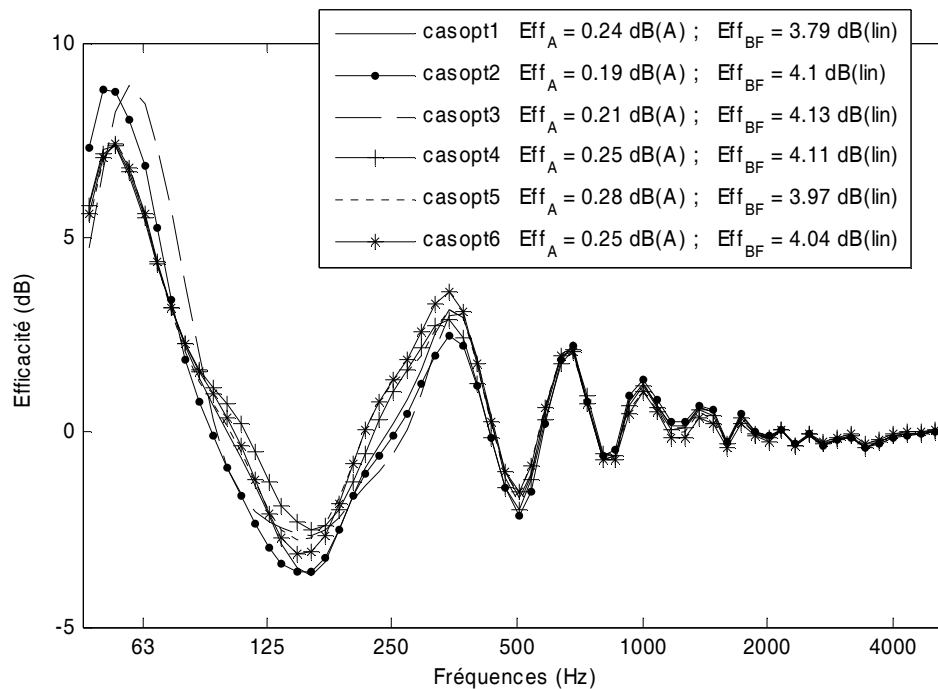


Figure 6.36 Courbes de l'efficacité en fonction de la fréquence dans les 6 cas d'optimisation réalisés. L'efficacité globale et l'efficacité aux basses fréquences sont données dans la légende.

On trace enfin sur un même graphe les courbes d'efficacité d'un des cas optimisés (on choisit le cas 3 qui donne la meilleure efficacité aux basses fréquences) ainsi que des efficacités pour des écrans de forme plus conventionnelle (protections de type écran droit). Les différentes formes considérées pour cette comparaison sont représentées sur la Figure 6.37, la forme en haut à gauche est celle de référence par rapport à laquelle sont calculées les efficacités.

Les efficacités sont tracées sur la Figure 6.38. On remarque que l'efficacité globale de la forme optimisée n'est que très légèrement supérieure à celle obtenue pour une forme carrée pleine mais l'efficacité aux basses fréquences passe, elle, de 1.5 dB pour une forme conventionnelle carrée à plus de 4 dB pour la forme optimisée. L'amélioration est donc significative.

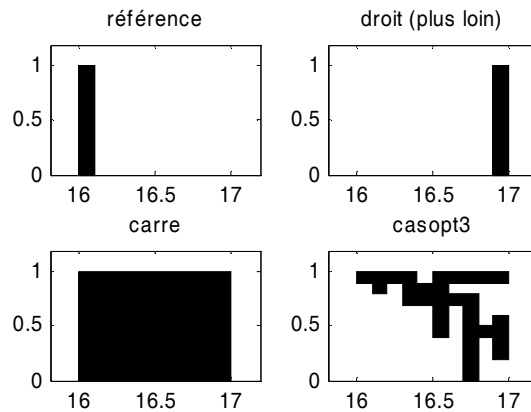


Figure 6.37 Formes considérées pour la comparaison entre forme générées et formes conventionnelles.

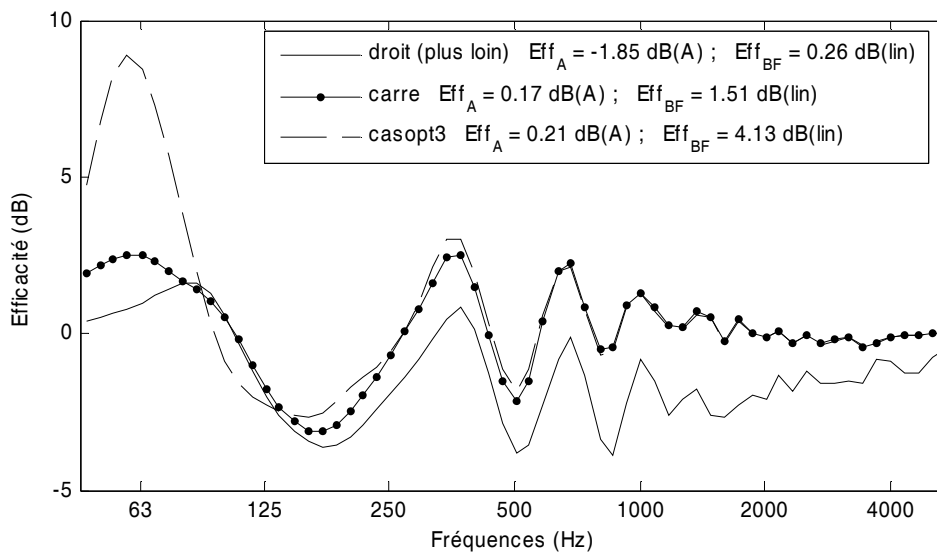


Figure 6.38 Comparaison des efficacités du cas optimisé casopt3 et de cas plus conventionnels.

### 6.6.5. Conclusion sur l'optimisation

L'optimisation avec un algorithme génétique (grâce à l'outil OPTIMEA) de la forme de la protection a permis d'obtenir un dispositif anti-bruit dont l'efficacité globale n'est que très légèrement supérieure à une protection de type écran droit mais dont l'efficacité pour les fréquences situées dans les bandes de tiers d'octave entre 50 Hz et 315 Hz est améliorée de 4 dB environ.

Cette optimisation ne prend pas en compte la faisabilité, le coût et la pérennité des protections ; il faudrait pour cela faire une optimisation multiobjectif et avoir des modèles pour évaluer le coût et la faisabilité ce qui n'était pas l'objet premier de ce travail. D'autres innovations en terme de création de forme pourraient également être considérées dans la poursuite de ce travail.

## **6.7. Conclusion du chapitre**

Des simulations numériques ont permis de déterminer un nouveau type de protection acoustique absorbante, dont la hauteur n'excède pas 1 m, et cependant performant aux basses fréquences. A 2 m derrière ce dispositif, l'efficacité globale est de 6 dB(A) par rapport à une configuration sans protection. Une très bonne corrélation entre ces calculs numériques et des mesures sur modèles réduits a été obtenue. Enfin, l'outil d'optimisation OPTIMEA a été appliqué au problème et a permis d'obtenir une forme optimale de la protection afin que son efficacité aux basses fréquences soit maximale (environ 4 dB(lin)) tout en gardant une efficacité globale du même ordre de grandeur ou meilleure qu'une protection de type écran droit.

De telles protections de faible hauteur sont donc envisageables en milieu urbain afin de créer des espaces calmes (larges trottoirs, espaces verts, places). Ces dispositifs ne sont pas applicables à toutes les situations mais pourraient déjà permettre une amélioration sensible, pour les citoyens, de la qualité de l'ambiance sonore dans des espaces publics où les nuisances acoustiques sont importantes.

D'autre part, ces protections acoustiques de faible hauteur pourraient être appliquées aux transports ferroviaires qui sont des moyens de transports dits guidés et donc qui permettent de placer les protections plus proches de la source, ce qui augmente leur efficacité.

Enfin, il serait intéressant d'associer ce nouveau type de protection acoustique en milieu urbain à des revêtements de chaussée "silencieux", de type enrobé drainant par exemple. Les caractéristiques du matériaux pourraient en outre être optimisées en même temps que la forme de la protection.



# Chapitre 7.

## Optimisation de trajectoires

Ce chapitre est à la limite du sujet de la thèse ; il ne concerne plus les protections acoustiques de forme complexe mais il est présenté afin de montrer que l'outil d'optimisation développé s'applique également à d'autres sujets de l'acoustique environnementale et qu'il peut être utilisé avec des méthodes de simulation de la propagation acoustique en milieu extérieur autres que la BEM utilisée dans les précédents chapitres. On s'attache ici non pas à étudier le champ proche autour de la protection acoustique mais plutôt le champ lointain. Par rapport aux précédents chapitres, on se place à une échelle plus générale, plus macroscopique de l'acoustique environnementale. Les distances étant plus importantes, certains phénomènes précédemment négligeables, comme les effets météorologiques, devront ici être pris en compte.

Il s'agit d'optimiser, avec l'outil OPTIMEA, des trajectoires de sources mobiles dans des scènes comportant des récepteurs pour lesquels on voudrait que le niveau sonore reçu soit minimal. Pour les simulations acoustiques, on utilise différents codes de calculs existant au CSTB. Il est notamment possible de prendre en compte les effets météorologiques grâce au logiciel ATMOS [5] basé sur la méthode de l'équation parabolique.

Ces optimisations de trajectoires pourraient être appliquées notamment au domaine militaire en ce qui concerne la furtivité mais aussi à l'aide à la décision dans les choix d'emplacement des infrastructures.

On présente tout d'abord les détails des scènes considérées et les définitions des trajectoires ainsi que de la fonction coût que l'on voudra optimiser. On donne également les différentes méthodes utilisées en ce qui concerne l'optimisation et la simulation de la propagation en milieu extérieur. Enfin, différents résultats sont exposés ; ils montrent la faisabilité de l'optimisation de trajectoire. Ils montrent aussi que les trajectoires



optimales dépendent fortement des conditions météorologiques, des discontinuités d'impédance et de la présence d'un écran droit longeant la trajectoire.

## 7.1. Définitions et méthodes utilisées

### 7.1.1. Définition d'une scène et nomenclature des figures de résultats

On appelle scène une configuration dans laquelle on fait une optimisation de trajectoire. On se place dans un espace en trois dimensions mais toutes les représentations sont faites dans un plan en deux dimensions.

Il s'agit d'optimiser la trajectoire d'une source mobile dans une scène où il existe des récepteurs pour lesquels on souhaite que le niveau d'exposition au bruit soit le plus faible possible. Le problème aurait aussi pu être appréhendé réciproquement, en terme de furtivité acoustique, c'est-à-dire en considérant un récepteur mobile dans une scène comportant une ou plusieurs sources, l'objectif étant pour le récepteur mobile de choisir le chemin le moins bruyant.

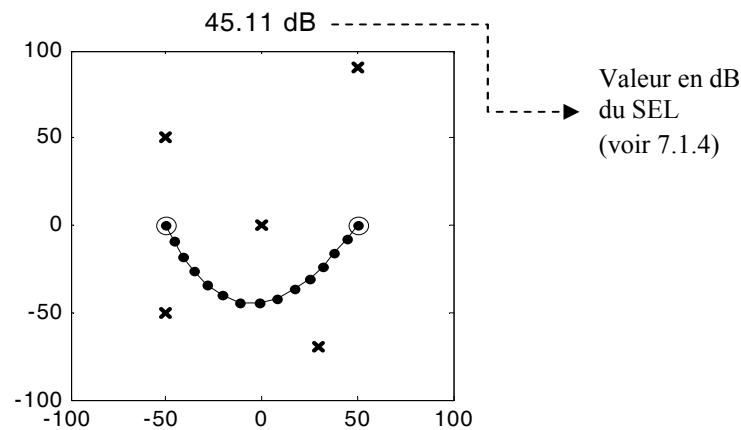


Figure 7.1 Détails des sources, récepteurs et points particuliers d'une scène en milieu homogène

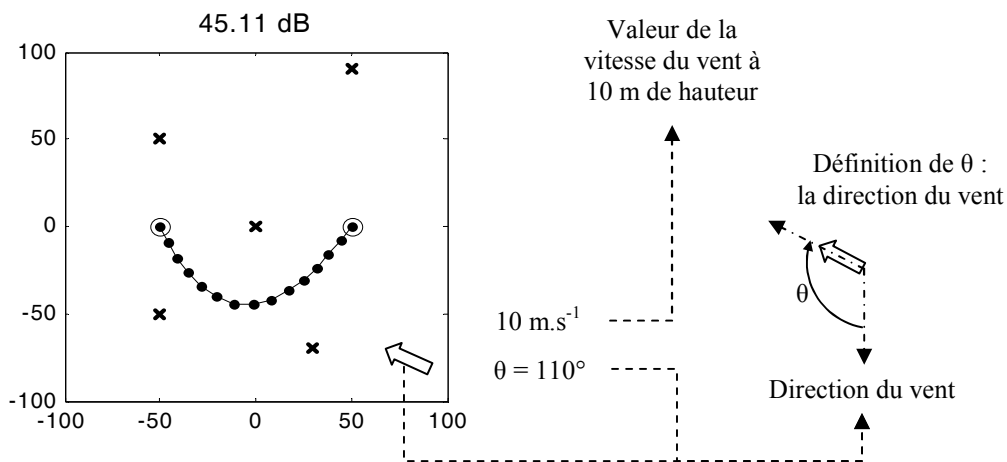


Figure 7.2 Détails des sources, récepteurs et points particuliers d'une scène en milieu inhomogène

On considère donc une source mobile qui est représentée, sur les figures de ce chapitre, par un ensemble de points, la trajectoire étant définie par une ligne en trait plein. Les récepteurs sont quant à eux représentés par des croix et les points extrêmes de la trajectoire par des ronds vides. Toutes les figures étant représentées en 2D, la hauteur des récepteurs n'est pas indiquée mais celle-ci peut prendre n'importe quelle valeur.

Deux exemples de scènes comportant cinq récepteurs sont illustrés sur la Figure 7.1 et la Figure 7.2. Le nombre en haut de la figure correspond à la valeur en dB du *SEL* (Sound Exposure Level, équivalent en français au niveau acoustique d'exposition *LEA*, voir définition au paragraphe 7.1.4).

Lorsque l'on est en milieu inhomogène dû à la présence d'un vent, une large flèche indique la direction d'où vient le vent (appelée par abus de langage direction du vent) et la valeur de sa vitesse, à 10 m de hauteur, est précisée. On appelle direction du vent l'angle  $\theta$  défini sur la partie droite de la Figure 7.2.

### 7.1.2. Hypothèses de calcul

Compte tenu des temps de calculs importants, on choisit de réaliser les calculs à une fréquence pure afin de se focaliser sur la faisabilité de la méthode. Pour une étude de cas plus réaliste, il faudrait considérer un spectre plus large, représentatif du bruit routier par exemple. Ici les calculs sont ainsi effectués à la fréquence 500 Hz qui se situe dans la partie la plus énergétique du spectre d'émission du bruit routier, et est bien représentative de ce dernier.

Sauf précision contraire, les calculs sont réalisés en considérant le sol comme absorbant. Son impédance de surface est définie par le modèle de Delany et Bazley [38] en prenant une résistivité au flux d'air  $\sigma$  égale à 200 kPa.s.m<sup>-2</sup> (et une épaisseur infinie), ce qui correspond à un sol de type herbeux.

### 7.1.3. Définition de la trajectoire

Les trajectoires proposées ici sont loin d'être exhaustives mais permettent déjà une première approche de l'optimisation de trajectoires. On choisit de générer des trajectoires en considérant des courbes paramétrées. On considère deux types de création de trajectoire ; et on utilise l'un ou l'autre suivant les cas.

#### 7.1.3.1. Trajectoire à deux paramètres

Dans un premier temps, on se limite à des courbes paramétrées polynomiales à l'ordre 2, c'est-à-dire de la forme :

$$\begin{cases} x(t) = \alpha_{traj,1} t^2 + \beta_{traj,1} t + \gamma_{traj,1} \\ y(t) = \alpha'_{traj,1} t^2 + \beta'_{traj,1} t + \gamma'_{traj,1} \end{cases} \quad \text{avec } t \in [0,10] \quad (7.1)$$

où  $x$  et  $y$  sont l'abscisse et l'ordonnée de la trajectoire dans le plan  $2D$  horizontal ;  $\alpha_{traj,1}$ ,  $\beta_{traj,1}$ ,  $\gamma_{traj,1}$ ,  $\alpha'_{traj,1}$ ,  $\beta'_{traj,1}$ , et  $\gamma'_{traj,1}$  sont des coefficients à déterminer ou à optimiser et  $t$  est le temps.

On a deux équations et six inconnues mais on connaît deux points appartenant à la trajectoire (le point de départ et le point d'arrivée) ; cela fait deux équations supplémentaires. Reste alors à déterminer deux paramètres afin de résoudre le système.

### 7.1.3.2. Trajectoire à quatre paramètres

Dans un second temps, on considère des courbes paramétrées polynomiales à l'ordre 2 avec des termes en cosinus et sinus, c'est-à-dire de la forme :

$$\begin{cases} x(t) = \alpha_{traj,2}t^2 + \beta_{traj,2}t + \gamma_{traj,2} \cos t + \delta_{traj,2} \\ y(t) = \alpha'_{traj,2}t^2 + \beta'_{traj,2}t + \gamma'_{traj,2} \sin t + \delta'_{traj,2} \end{cases} \quad \text{avec } t \in [0, \pi] \quad (7.2)$$

où  $x$  et  $y$  sont l'abscisse et l'ordonnée de la trajectoire dans le plan  $2D$  horizontal ;  $\alpha_{traj,2}$ ,  $\beta_{traj,2}$ ,  $\gamma_{traj,2}$ ,  $\delta_{traj,2}$ ,  $\alpha'_{traj,2}$ ,  $\beta'_{traj,2}$ ,  $\gamma'_{traj,2}$  et  $\delta'_{traj,2}$  sont des coefficients à déterminer ou à optimiser et  $t$  est le temps.

On a dans ce cas deux équations et huit inconnues. La connaissance des points de départ et d'arrivée donne deux équations supplémentaire. Il faut donc déterminer quatre paramètres pour résoudre le système. Les trajectoires à quatre paramètres ne sont considérées que dans le paragraphe 7.2.1 afin de comparer les résultats avec le cas des trajectoires à deux paramètres.

### 7.1.4. Définition de la fonction coût

On cherche à optimiser le niveau d'exposition au bruit en dB, intégrant la durée, appelé  $SEL$  pour Sound Exposure Level. Il s'agit du niveau de bruit équivalent  $L_{eq}$  rapporté à une durée d'une seconde. Les niveaux  $SEL$  et  $L_{eq}$  sont définis par :

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{Lp(t)}{10}} dt \right) \quad (7.3)$$

$$SEL = 10 \log_{10} \left( \int_0^T 10^{\frac{Lp(t)}{10}} dt \right) \quad (7.4)$$

où  $Lp(t)$  est le niveau sonore reçu au point récepteur à l'instant  $t$  ; et  $T$  est la durée d'exposition au bruit, dans notre cas, la durée de parcours de la trajectoire.

On choisit  $N$  points sur la trajectoire (avec un espacement régulier) auxquels on calcule le niveau de bruit reçu. En considérant que la trajectoire est parcourue à une vitesse constante et en transformant l'intégrale en une somme discrète, le niveau  $SEL$  devient :

$$SEL = 10 \log_{10} \left( \Delta t \sum_{n=1}^N 10^{\frac{Lp_n}{10}} \right) \quad (7.5)$$

avec  $Lp_n$  le niveau sonore calculé au point  $n$  de la trajectoire et à la fréquence  $m$  :

$$Lp_n = Lw_m + EA_{n,m} - 10 \log_{10} (4\pi r_n^2) \quad (7.6)$$

où  $Lw_m$  est la valeur du spectre de la source considérée, en dB, à la fréquence  $m$ , on choisit arbitrairement  $Lw_{500Hz} = 70$  dB ;  $r_n$  est la distance entre la source et le récepteur considéré au point  $n$  de la trajectoire ; et  $EA_{n,m}$  est l'atténuation calculée par rapport au champ libre au point  $n$  de la trajectoire et à la fréquence  $m$ .

On choisit arbitrairement  $\Delta t = 1$  s. En effet, les valeurs du pas d'espacement  $e$  entre deux points de la trajectoire et de la vitesse de parcours  $v_p$  déterminent le pas de temps  $\Delta t$  mais cela n'influe pas sur les résultats de l'optimisation puisqu'on considère que le  $\Delta t$  est le même dans chaque cas. On a donc pour finir :

$$SEL = 10 \log_{10} \left( \sum_{n=1}^N 10^{\frac{Lp_n}{10}} \right) \quad (7.7)$$

Dans la suite du chapitre, les valeurs du  $SEL$  données sont comparables entre elles mais ne correspondent pas aux niveaux sonores réels puisqu'on prend des valeurs arbitraires de vitesse, de temps et de niveau de puissance de la source. L'objectif étant uniquement de montrer la faisabilité de l'optimisation des trajectoires, ces hypothèses sont considérées comme acceptables. On donne les valeurs des  $SEL$  à 0.01 dB près.

### 7.1.5. Méthodes utilisées

En ce qui concerne l'optimisation, on utilise deux méthodes différentes selon les cas. La première est l'algorithme de Nelder Mead (3.2.6) globalisé par des réinitialisations déterminées par une recherche aléatoire par l'algorithme de Monte Carlo (3.2.1) ; la seconde est un Algorithme Génétique (3.2.5.1). Compte tenu du nombre de paramètres à optimiser (généralement deux et parfois quatre selon le type de définition de la trajectoire), c'est la méthode de Nelder Mead globalisée qui est la mieux adaptée au problème. On ne réalise des optimisations avec un Algorithme Génétique que dans le paragraphe 7.2.1 afin de comparer les deux méthodes d'optimisation.

En ce qui concerne la simulation de la propagation acoustique, on utilise trois méthodes différentes selon les cas : une méthode de tir de rayon sur sol impédant (2.3.1), le code numérique MICADO basé sur la BEM (2.3.2.1) et le code numérique ATMOS basé sur la GFPE (2.3.2.2).

## 7.2. Etude dans le cas homogène

On se place ici dans le cas d'une propagation acoustique en milieu extérieur dans une atmosphère considérée comme homogène. Les effets météorologiques ne sont pas pris en compte malgré les distances de propagation importantes. Il s'agit de calculs préliminaires, l'inhomogénéité de l'atmosphère étant prise en compte par la suite.

### 7.2.1. Cas simple

Ce premier cas consiste en une scène comportant cinq récepteurs pour lesquels on veut minimiser le niveau sonore reçu, la simulation de la propagation étant calculée avec la méthode du tir de rayons. Comme dans la totalité des calculs présentés dans ce chapitre, les calculs sont effectués à la fréquence 500 Hz. Les hauteurs des récepteurs sont toutes choisies égales à 2 m.

On optimise dans un premier temps avec l'algorithme de Nelder Mead globalisé. Les trajectoires optimales obtenues sont celles tracées sur la Figure 7.3 pour le cas d'une trajectoire à deux paramètres et sur la Figure 7.4 pour le cas d'une trajectoire à quatre paramètres. On donne également sur la droite des figures les équations des courbes paramétrées définissant la trajectoire.

Les trajectoires optimales obtenues sont sensiblement les mêmes dans les deux cas de définition de trajectoire, le *SEL* minimum obtenu étant toutefois légèrement meilleur dans le cas de la trajectoire à quatre paramètres. La différence n'est que de 0.03 dB, ce qui est négligeable en acoustique environnementale. Cependant, l'objectif ici est de montrer une faisabilité et non de donner des résultats réalistes. Dans certains cas les différences entre les deux types de trajectoires peuvent être plus importants. Toutefois, on choisit dans les paragraphes suivant de ne considérer que des trajectoires à deux paramètres en raison du gain en temps de calcul que cela entraîne.

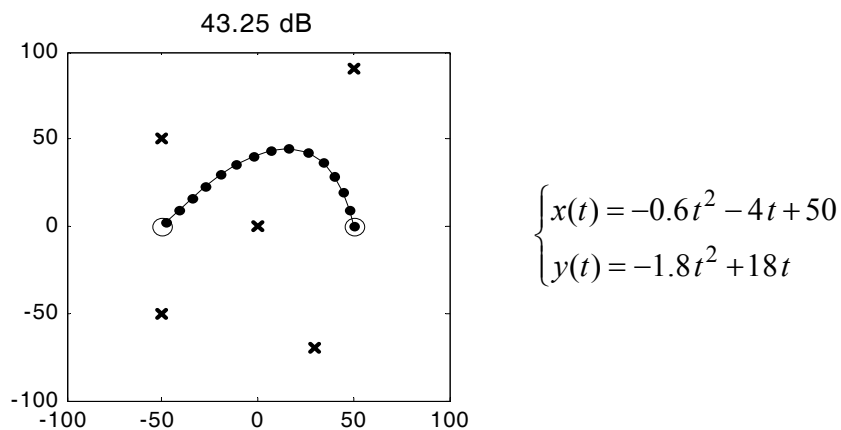


Figure 7.3 Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Nelder Mead globalisé, trajectoire à 2 paramètres

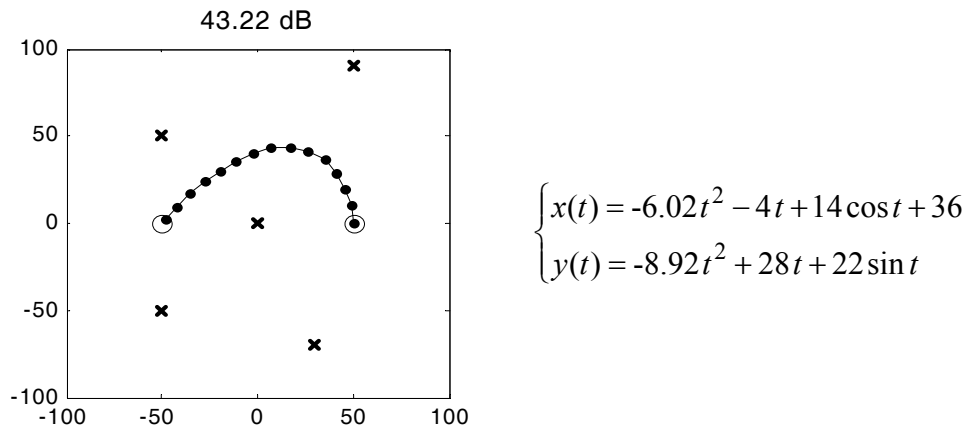


Figure 7.4 Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Nelder Mead globalisé, trajectoire à 4 paramètres

On réalise, dans un second temps, l'optimisation des trajectoires avec un algorithme génétique. Les résultats obtenus sont tracés sur la Figure 7.5 pour le cas d'une trajectoire à deux paramètres et sur la Figure 7.6 pour le cas d'une trajectoire à quatre paramètres.

Les trajectoires optimales obtenues sont sensiblement les mêmes que celles issues de l'optimisation avec l'algorithme de Nelder Mead globalisé. On remarque toutefois que dans le cas d'une trajectoire définie par quatre paramètres et optimisée par un algorithme génétique, la forme optimale de celle-ci est très légèrement différente et on n'obtient pas exactement le même *SEL* minimum. On choisit toutefois, dans la suite, de ne réaliser les optimisations qu'avec la méthode basée sur l'algorithme de Nelder Mead globalisé car celle-ci est plus rapide et est en outre plus adaptée au nombre de paramètres à optimiser.

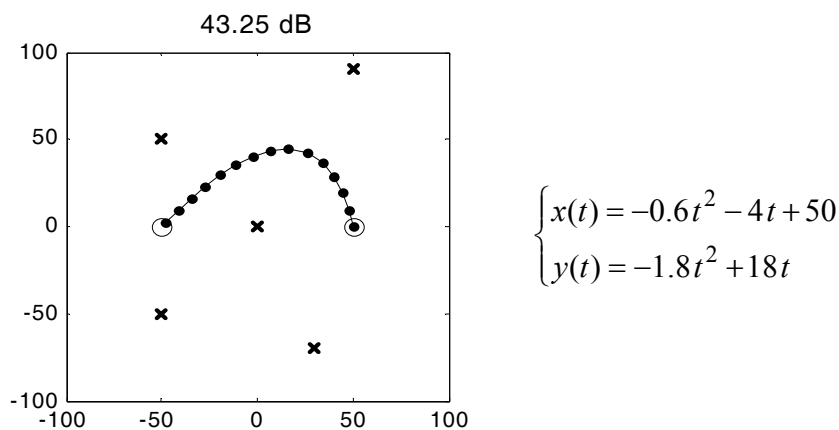


Figure 7.5 Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Algorithme Génétique, trajectoire à 2 paramètres

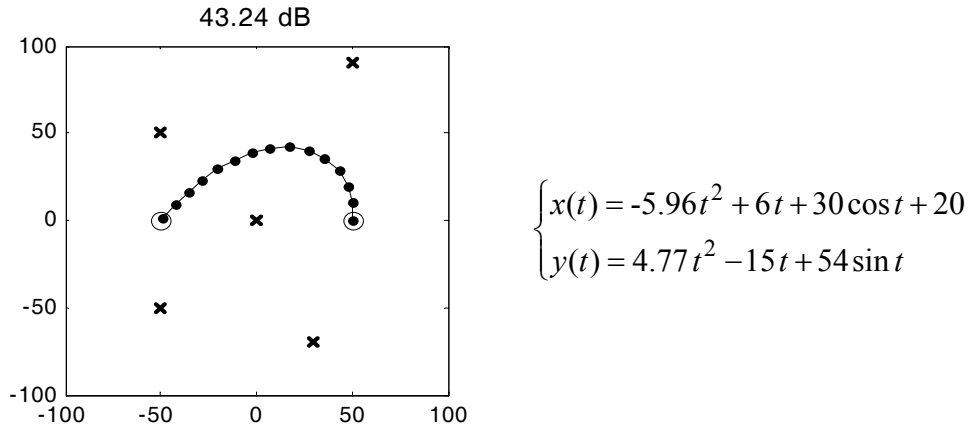


Figure 7.6 Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Algorithme Génétique, trajectoire à 4 paramètres

### 7.2.2. Intérêt de l'optimisation

Dans ce paragraphe, on se propose de montrer l'intérêt de l'optimisation, dans le cas de la problématique des trajectoires mobiles, en comparant des trajectoires non optimisées avec des trajectoires optimisées.

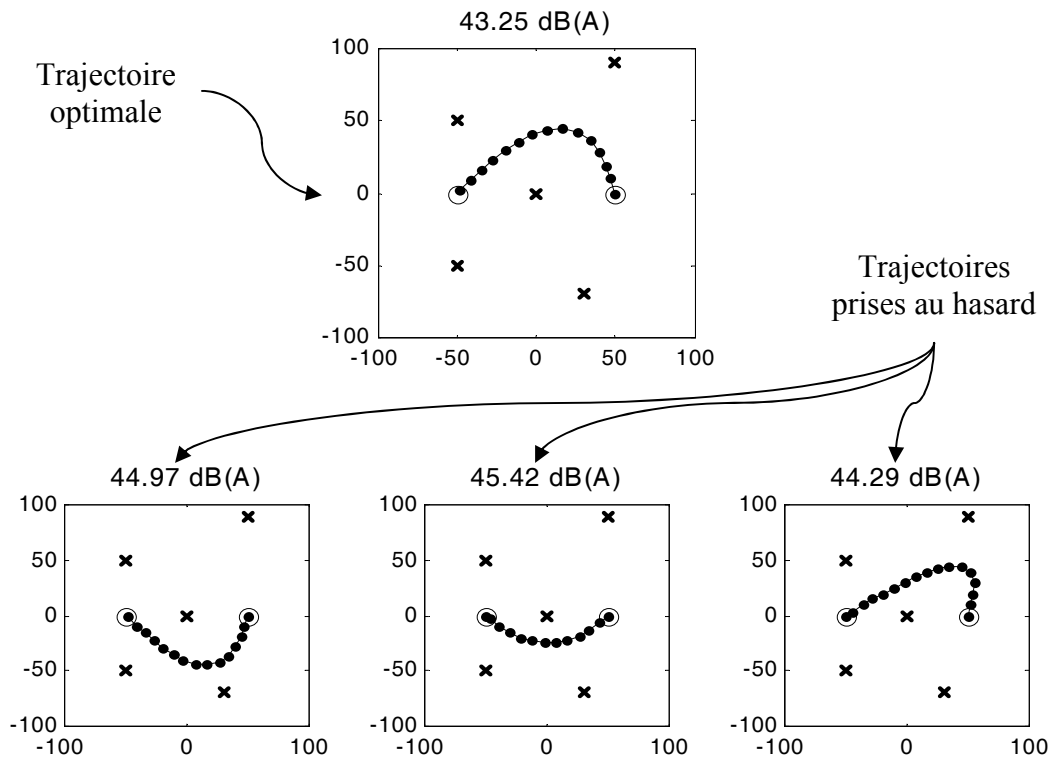


Figure 7.7 Résultat en milieu homogène pour un cas simple, optimisation avec Algorithme Génétique, trajectoire à 4 paramètres

On donne sur la Figure 7.7 d'une part la trajectoire à deux paramètres optimisées avec l'algorithme de Nelder Mead (même trajectoire que sur la Figure 7.3) et d'autre part, trois autres trajectoires non optimisées avec les valeurs de *SEL* correspondantes.

Les différences vont jusqu'à 2 dB(A) ce qui est significatif pour ce travail de thèse dont l'objectif est de montrer la faisabilité d'un outil d'optimisation.

### 7.2.3. Comparaison entre les 3 méthodes de simulations de la propagation acoustique

On considère ici une autre scène comprenant six récepteurs et on réalise l'optimisation en utilisant les trois méthodes de simulation différentes : le tir de rayons, la BEM (MICADO) et la GFPE (ATMOS). L'optimisation est réalisée par l'algorithme de Nelder Mead globalisé, les trajectoires sont définies par deux paramètres et les simulations acoustiques sont effectuées à la fréquence 500 Hz uniquement avec la méthode du tir de rayons pour la Figure 7.8, MICADO pour la Figure 7.9 et ATMOS pour la Figure 7.10.

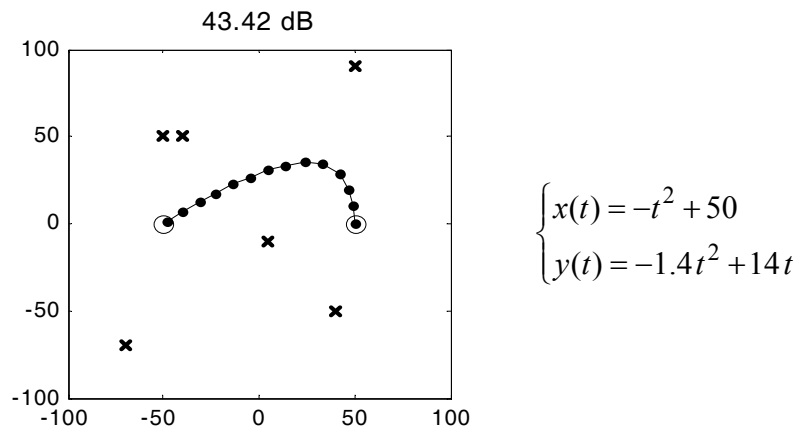


Figure 7.8 Résultat en milieu homogène avec le tir de rayon

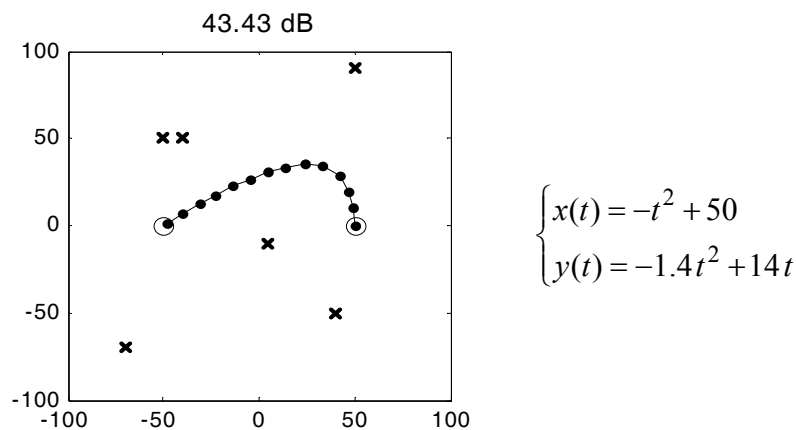


Figure 7.9 Résultat en milieu homogène avec MICADO (BEM)



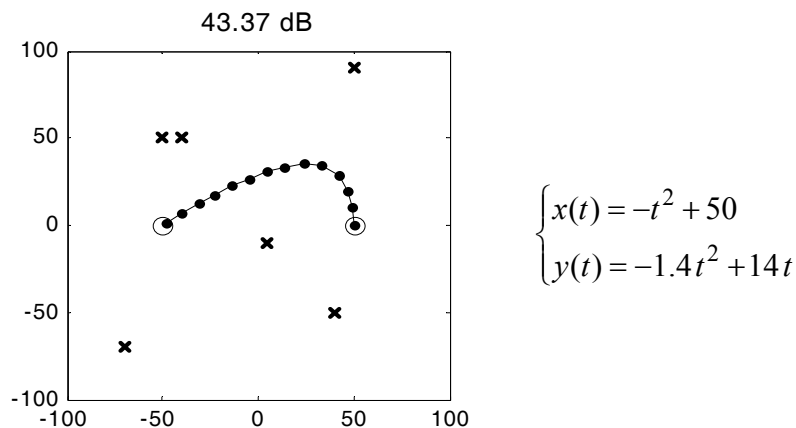


Figure 7.10 Résultat en milieu homogène avec ATMOS (GFPE)

Les trois trajectoires optimales sont exactement les mêmes (mêmes équations paramétrées les définissant). Le *SEL* minimal, lui, diffère très légèrement du fait des différences inhérentes à la résolutions des algorithmes propres à chaque méthode numérique. La trajectoire optimale ne dépend pas de la méthode choisie pour la simulation acoustique. Cependant, la valeur du *SEL* minimal étant légèrement dépendante de la méthode, on choisit, pour la suite, de comparer des trajectoires obtenues avec une même méthode de simulation.

Une fois encore, il est à noter que les différences dans le *SEL* sont négligeables dans le cadre de l'acoustique environnementale mais l'objectif étant ici de montrer une faisabilité, on choisit de garder cette précision à 0.01 dB.

### 7.3. Etude dans le cas d'un vent

On se place maintenant dans le cas de la propagation en milieu inhomogène. Les distances étant de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres, les effets météorologiques ne sont pas négligeables. La simulation acoustique s'effectue avec une méthode permettant de prendre en compte les effets météorologiques, par exemple la méthode de l'équation parabolique. Afin de pouvoir comparer des résultats en milieu homogène et en milieu inhomogène, l'intégralité des calculs de ce paragraphe sont réalisés avec le logiciel ATMOS, développé au CSTB, et basé sur la GFPE. Tous les récepteurs sont placés à 2 m de hauteur, les trajectoires sont définies par deux paramètres et les optimisations sont réalisées avec l'algorithme de Nelder Mead globalisé.

#### 7.3.1. Cas simple et comparaison avec les résultats en milieu homogène

Il s'agit dans ce paragraphe de montrer l'importance de la prise en compte des effets météorologiques en comparant des optimisations en milieu homogène et inhomogène. La trajectoire optimale en milieu homogène est représentée sur la Figure 7.11.

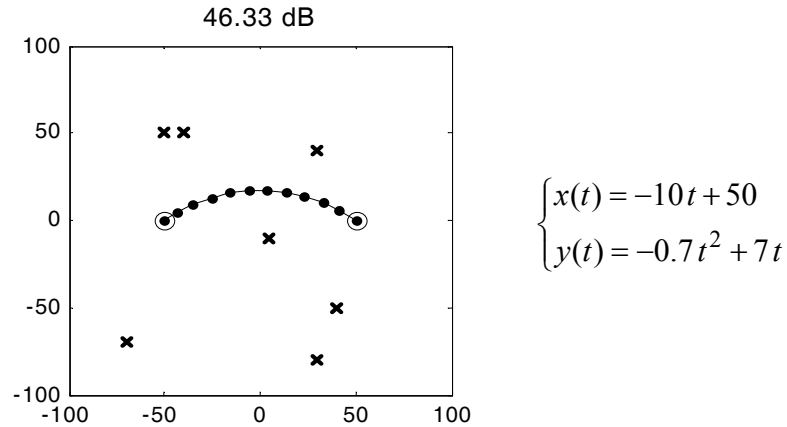


Figure 7.11 Trajectoire à deux paramètres optimale en milieu homogène. Méthodes utilisées : GFPE et Nelder Mead globalisé

On donne dans la Table 7.1 la valeur du *SEL* pour la trajectoire optimale en milieu homogène mais dans deux cas inhomogènes (ainsi que dans le cas homogène pour pouvoir comparer). On remarque que les valeurs du *SEL* dépendent fortement des effets météorologiques. Les cas inhomogènes sont modélisés par un profil de vent linéaire dont la vitesse  $u_{10}$  du vent à 10 m de hauteur est déterminée, avec un vent nul au sol. On donne aussi la direction du vent  $\theta$  pour chaque cas.

Vitesse $u_{10}$ du vent à 10 m de hauteur ( $\text{m.s}^{-1}$ )	0	10	10
Direction du vent $\theta$ ( $^\circ$ )	--	270	45
<i>SEL</i> (dB)	46.33	50.60	49.72

Table 7.1 Valeurs du *SEL* calculé dans différentes configurations inhomogènes pour la trajectoire optimale en milieu homogène

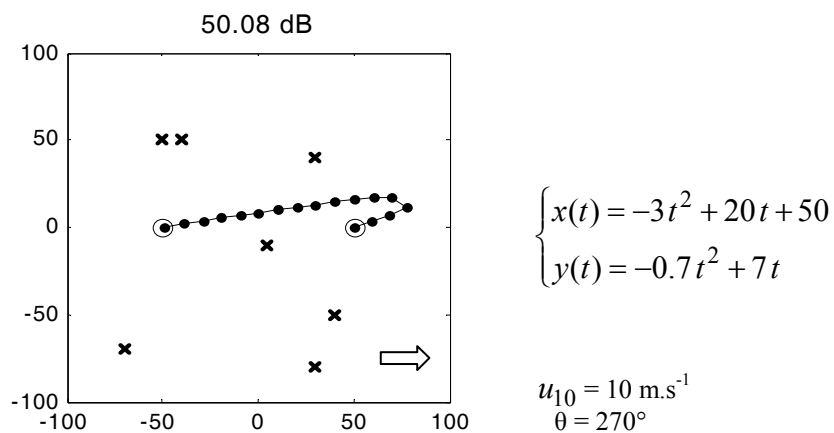


Figure 7.12 Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de  $10 \text{ m.s}^{-1}$  à  $270^\circ$

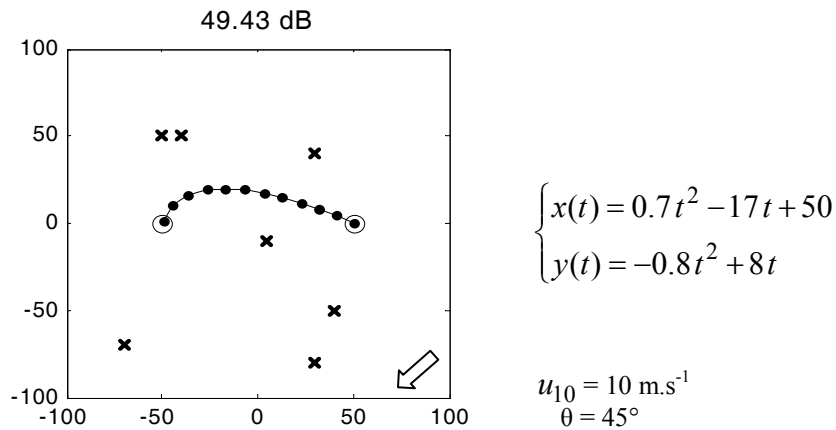


Figure 7.13 Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de  $10 \text{ m.s}^{-1}$  à  $45^\circ$

On applique ensuite l’outil d’optimisation aux cas inhomogènes. Les trajectoires optimales obtenues sont présentés sur la Figure 7.12 et la Figure 7.13. Elles diffèrent de façon significative selon les conditions météorologiques considérées.

L’outil d’optimisation permet donc, en l’associant avec une méthode adaptée (ici la GFPE) d’optimiser la trajectoire d’une source en prenant en compte les conditions météorologiques présentes dans la scène considérée.

### 7.3.2. Autres résultats

Dans cette partie on se propose de considérer une autre scène et de donner deux autres résultats significatifs d’optimisation de trajectoire en milieu inhomogène. Les trajectoires optimales ainsi que les conditions météorologiques correspondantes sont représentées sur la Figure 7.14 et la Figure 7.15. Les résultats montrent encore que l’influence des conditions météorologiques sur la trajectoire optimale est significative.

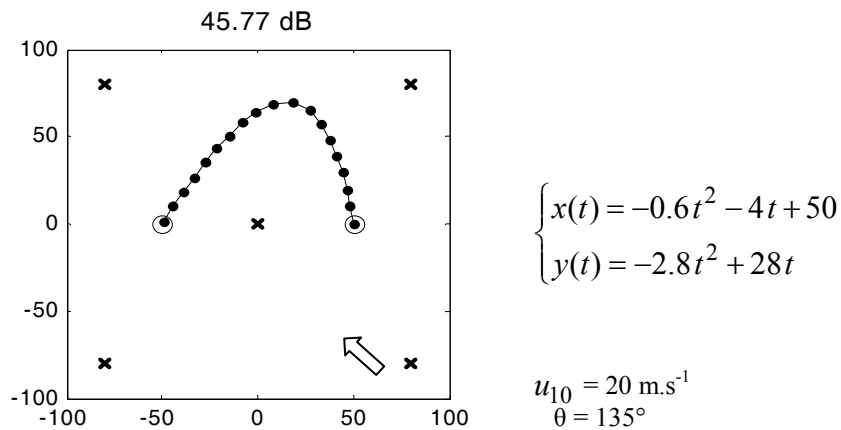


Figure 7.14 Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de  $20 \text{ m.s}^{-1}$  à  $135^\circ$ .

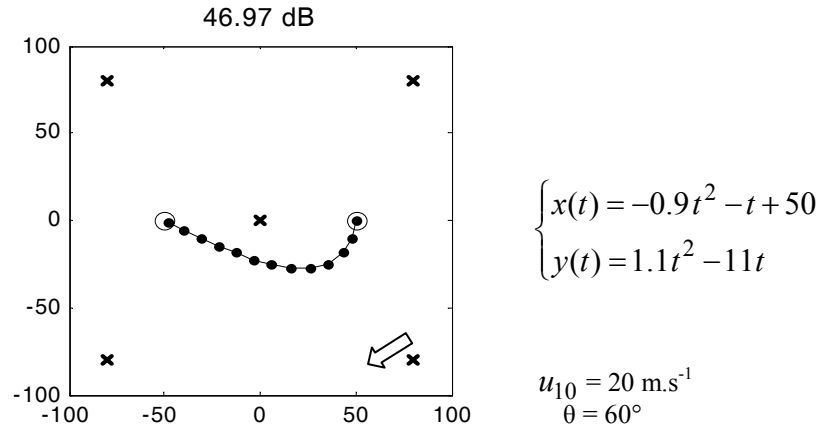


Figure 7.15 Trajectoire optimale en milieu inhomogène avec un vent de 20 m.s<sup>-1</sup> à 60°

### 7.4. Etude dans le cas d'une discontinuité d'impédance

Depuis le début du chapitre, les sols des scènes sont considérés comme uniformes et de type herbeux. Ici, on se place dans le cas d'une scène comportant une discontinuité d'impédance, c'est-à-dire dont le sol est herbeux sur toute sa surface sauf sur une zone polygonale où il est acoustiquement rigide. L'atmosphère est considérée comme homogène. Dans cette partie, les trajectoires sont définies par deux paramètres et les optimisations sont réalisées avec l'algorithme de Nelder Mead globalisé. Les simulations théoriques sont réalisées avec le code numérique MICADO.

On choisit une scène comportant six récepteurs ; il s'agit de celle étudiée dans la section 7.2.2. La trajectoire optimale dans le cas sans discontinuité d'impédance est donnée sur la Figure 7.16.

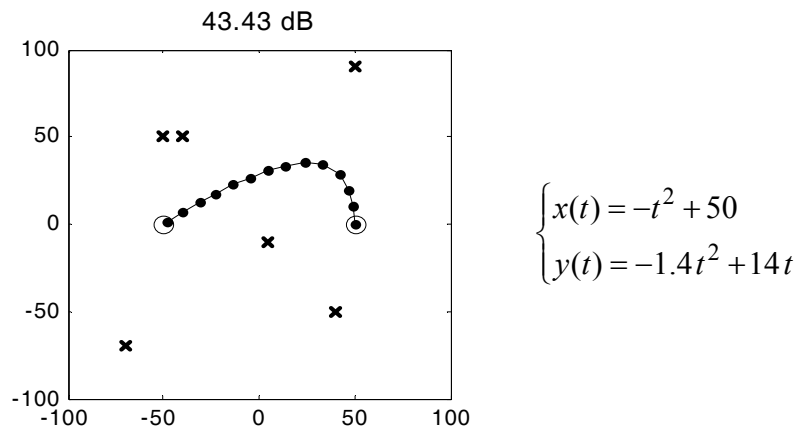


Figure 7.16 Trajectoire optimale sans discontinuité d'impédance

On choisit ensuite de considérer deux configurations différentes d'emplacement de la surface rigide (en gardant les mêmes récepteurs). Elles sont décrites sur la Figure 7.17.

La trajectoire tracée sur les deux scènes de la Figure 7.17 est la trajectoire optimale du cas sans discontinuité d'impédance.

Dans la Table 7.2, on donne la valeur du *SEL* calculée pour une même trajectoire (trajectoire optimale obtenue dans le cas sans discontinuité d'impédance), et ce pour trois scènes : sans discontinuité d'impédance et les deux cas (cas1 et cas2) de discontinuité d'impédance. On remarque que la présence d'une discontinuité d'impédance a une influence sensible sur la valeur du *SEL*.

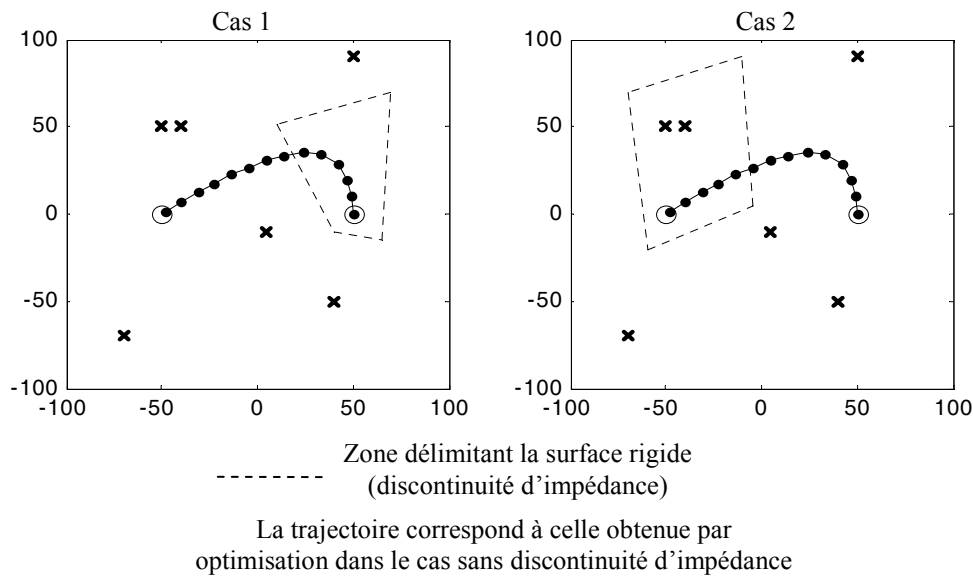


Figure 7.17 Description des deux cas de discontinuité d'impédance.

Cas de discontinuité d'impédance	Sans discontinuité	Cas 1	Cas 2
<i>SEL</i> (dB)	43.43	46.97	53.35

Table 7.2 Valeurs du *SEL* calculé dans différentes configurations avec discontinuité d'impédance pour la trajectoire optimale calculée sans discontinuité d'impédance

On optimise maintenant la trajectoire dans chacun des deux cas avec discontinuité d'impédance. Les résultats sont donnés sur la Figure 7.18 et la Figure 7.19. On remarque alors que les trajectoires optimales dépendent fortement des caractéristiques de la discontinuité d'impédance.

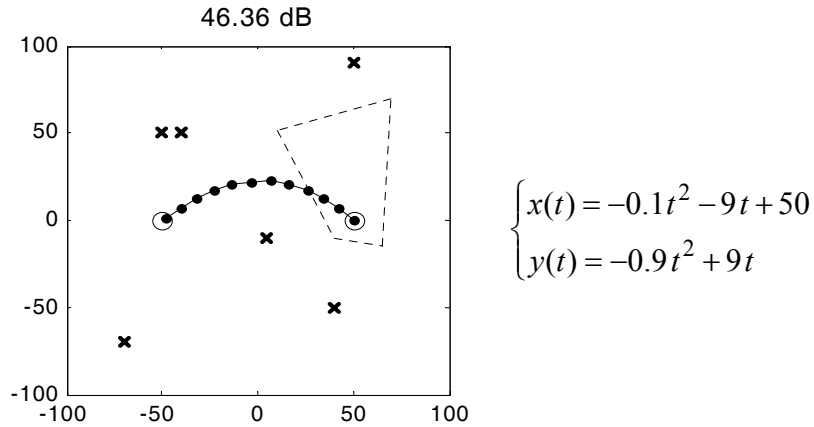


Figure 7.18 Trajectoire optimale dans le cas 1 de discontinuité d'impédance

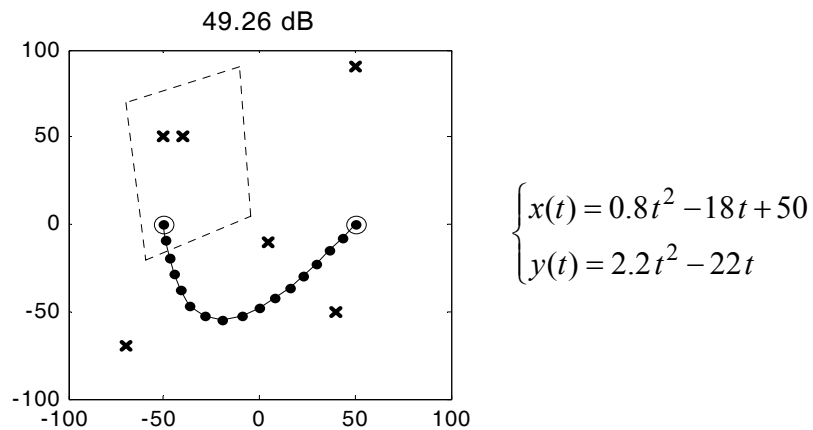


Figure 7.19 Trajectoire optimale dans le cas 2 de discontinuité d'impédance

Ces résultats montrent la possibilité d'optimiser une trajectoire en présence d'une discontinuité d'impédance du sol, situation récurrente en acoustique environnementale.

### 7.5. Etude dans le cas d'un écran longeant la trajectoire

On considère à nouveau la totalité du sol comme étant de type herbeux avec, cette fois, comme hypothèse, que la trajectoire est bordée par un écran droit réfléchissant de 3 m de hauteur. L'écran est placé en chaque point de calcul à 5 m de la source et il est toujours situé sur la droite de la trajectoire (le côté droit étant défini par le sens de parcours du point de départ vers le point d'arrivée). Un exemple de scène avec écran est donné sur la Figure 7.20.

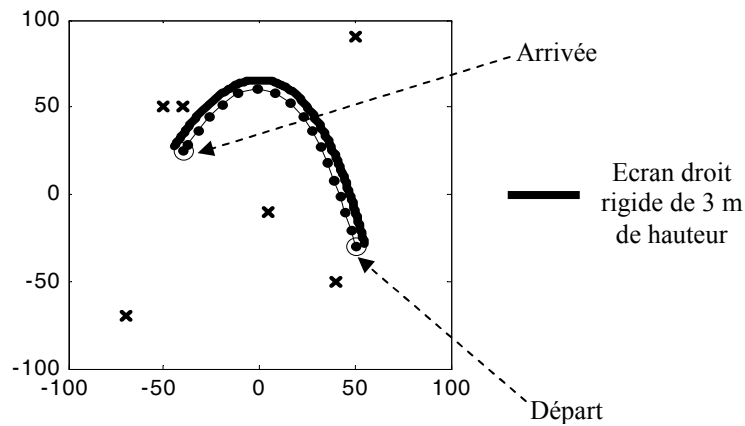


Figure 7.20 Exemple de scène avec écran situé à 5 m sur la droite de la trajectoire de la source

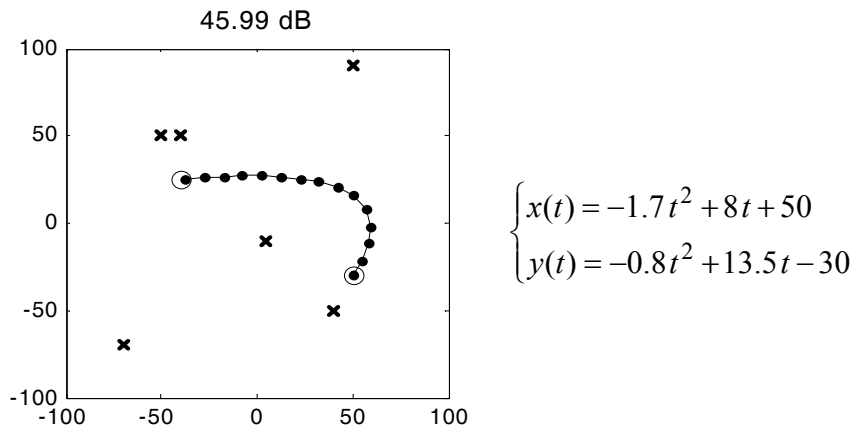


Figure 7.21 Trajectoire optimale dans le cas sans écran

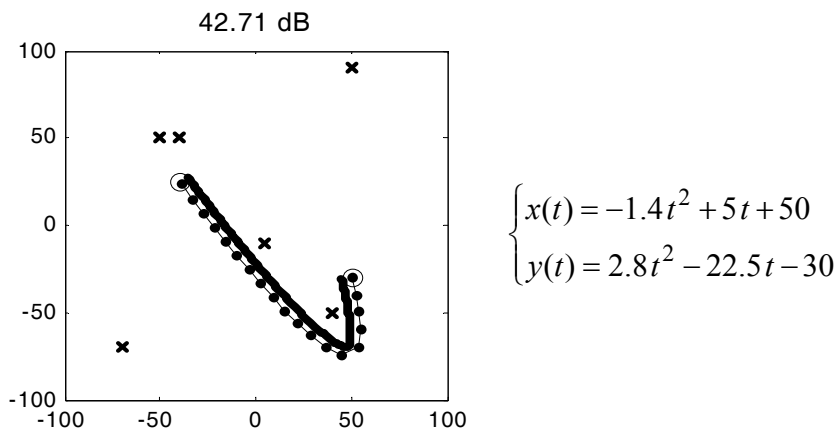


Figure 7.22 Trajectoire optimale dans le cas avec écran

On considère la scène de la Figure 7.20 et on optimise la trajectoire dans le cas sans écran (Figure 7.21) et dans le cas avec écran (Figure 7.22). Pour les calculs, on

considère que l'épaisseur de l'écran est invariablement de 0.1 m bien que l'épaisseur projetée soit parfois plus grande. D'autre part, les effets de bords d'écran, c'est-à-dire la diffraction par les arrêtes verticales, ne sont pas pris en compte.

La comparaison entre les résultats de la Figure 7.21 et ceux de la Figure 7.22 montre l'intérêt de la prise en compte des obstacles dans l'optimisation de trajectoire. En effet, la présence ou non de l'écran a une grande influence sur l'allure de la trajectoire optimale.

L'optimisation de trajectoire proposée dans ce chapitre permet donc de considérer des obstacles de type écran droit qui ont une influence significative sur la propagation acoustique et donc sur la trajectoire optimale obtenue.

## 7.6. Conclusion du chapitre

Les résultats de ce chapitre montrent qu'il est possible d'appliquer l'outil d'optimisation OPTIMEA, développé dans ce travail de thèse, à la détermination de trajectoires optimales, ceci dans des cas simples, mais aussi en prenant en compte des éléments importants de la propagation acoustique en milieu extérieurs tels que les effets météorologiques, les discontinuités d'impédance ou les écrans droits. Les trajectoires optimales obtenues sont caractéristiques des scènes considérées et dépendent largement des effets météorologiques et des discontinuités ou obstacles présents.

Ces optimisations ont été rendues possibles par l'utilisation de codes numériques développés au CSTB et dédiés à des phénomènes bien particuliers de l'acoustique environnementale.

Des perspectives prometteuses existent sur cette problématique. En ce qui concerne les effets météorologiques, différents profils de vitesse de vent et de température ainsi que la prise en compte de la turbulence ont été implémentés dans ATMOS. Ces phénomènes pourraient donc être pris en compte dans l'optimisation de trajectoire. Pour ce qui est des obstacles, seul le cas d'un écran longeant la source a été traité mais la puissance du code MICADO permettrait de prendre en compte n'importe quel obstacle de forme complexe présent dans la scène. Enfin, des scènes plus complètes et plus réalistes pourraient être considérées en utilisant des logiciels de tir de rayon 3D tels que MITHRA.





# Chapitre 8.

## Conclusions générales et perspectives

### 8.1. Conclusions générales

L'objectif de ce travail de thèse était double : réaliser un outil d'optimisation permettant de déterminer des protections acoustiques optimales dans une configuration donnée et l'appliquer à des problématiques du bruit des transports terrestres. Les résultats obtenus tout au long de ce travail ont bien montré que l'optimisation permet de faire une recherche systématique et de s'affranchir des a priori.

Une étude bibliographique des méthodes d'optimisation existantes a tout d'abord été réalisée et, compte tenu des contraintes liées au problème des protections anti-bruit de forme complexe, deux méthodes dites directes ont été retenues : l'algorithme de Nelder Mead et les Algorithmes Génétiques. Concernant la simulation acoustique, plusieurs codes, développés au CSTB, et dédiés à des phénomènes particuliers de la propagation acoustique en milieu extérieur, ont été utilisés dans ce travail en leur état actuel d'avancement. On retiendra en particulier la version *2D* du code numérique de calcul MICADO basé sur la méthode des éléments finis de frontière qui permet de considérer n'importe quelle géométrie de protection acoustique avec des caractéristiques spécifiques d'impédance de surface. L'outil d'optimisation OPTIMEA réalisé dans ce travail de thèse effectue des allers-retours entre les algorithmes d'optimisation et les codes de simulation acoustique.

L'outil OPTIMEA a été appliqué avec succès à plusieurs situations de l'acoustique environnementale et notamment à la problématique des protections acoustiques de forme complexe. Citons en premier lieu les écrans multi-diffracteurs pour lesquels l'optimisation a permis d'obtenir un gain d'environ 6 dB(A) par rapport à un écran droit de même hauteur totale. La recherche "manuelle" (sans outil d'optimisation) n'aurait a priori pas mené vers les paramètres optimaux qui induisent une telle efficacité. D'autre part, des algorithmes d'optimisation multiobjectif ont permis d'optimiser, pour un écran

de type multi-diffracteur, la performance acoustique ainsi que le prix de revient de la protection simultanément, en fonction des choix du décideur.

L'outil d'optimisation a ensuite été appliqué au cas d'un écran en Té dont la surface supérieure est rendue réactive par l'insertion de puits de différentes profondeurs. L'optimisation de ces profondeurs a permis d'obtenir un gain de 2 à 3 dB(A) par rapport à l'écran en Té classique dont la surface supérieure est plane et absorbante.

Dans un troisième temps et dans une démarche de développement durable urbain, des protections acoustiques de faible hauteur ont fait l'objet de simulations numériques et de mesures sur modèles réduits. Les résultats ont montré, pour les deux approches, une efficacité d'environ 5-6 dB(A) pour un piéton situé 2 m derrière la protection. La forme de ces protection a ensuite été optimisée avec l'outil d'optimisation développé.

Enfin, dans le but de montrer que l'outil d'optimisation peut être utilisé avec d'autres codes de simulation acoustique et qu'il est adaptable à des situations de l'acoustique environnementale autres que les protections acoustiques de forme complexe, un travail a été mené sur l'optimisation de trajectoire pour une source mobile. Ces trajectoires ont été optimisées en prenant en compte différents effets : impédance de sol, discontinuité d'impédance, écran droit et conditions météorologiques. Les résultats des simulations montrent l'importance de la prise en compte de ces effets dans l'optimisation.

Afin de regrouper les différents éléments développés, un outil final OPTIMEA a été créé et complété par une interface graphique permettant son utilisation par un tiers. Le développement du code OPTIMEA représente l'aboutissement de cette recherche et les objectifs ont bien été atteints.

## **8.2. Perspectives**

De nombreuses perspectives pourraient être envisageables à la suite de ce travail de thèse concernant l'étude d'autres problématiques environnementales et urbaines ainsi que l'introduction de phénomènes prévisibles non acoustiques. Pour ce qui est de l'optimisation proprement dite, une étude approfondie sur les paramètres intrinsèques des algorithmes d'optimisation (coefficients dans l'algorithme de Nelder Mead, taille des population ou probabilité de réalisation des opérateurs dans les algorithmes génétiques, etc.) pourrait améliorer la convergence des algorithmes et donc les temps de calculs qui restent un obstacle pour de nombreux cas.





## Références

- [1] ISO 9613-1. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.* (1993)
- [2] EN 1793-3. *Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 3: Normalized traffic noise spectrum.* (1997)
- [3] AARTS E.H.L., KORST J., *Simulated Annealing and Boltzmann Machines - A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*, John Wiley and sons, New York. (1989)
- [4] ABALLEA F., *Propagation acoustique en milieu extérieur: Application de l'équation parabolique rapide au couplage d'effets météorologiques et de topographies complexes.*, PhD Thesis, Université du Maine. (2004)
- [5] ABALLEA F., DEFRANCE J., *Sound propagation over an irregular terrain with complex meteorological effects using the parabolic equation model.* in *Internoise*. Praha, Czech Republic. (2004)
- [6] ANAI K., FUJIMOTO K., *Application of a Genetic Algorithm as the Selection Technique for Optimal Measures against Road Traffic Noise in City Areas.* in *Internoise*. Praha, Czech Republic. (2004)
- [7] ATTENBOROUGH K., *Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces.* Journal of Sound and Vibration. 99(4) p. 521-544. (1985)
- [8] ATTENBOROUGH K., *Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources.* Applied acoustics. 24(4) p. 289-319. (1988)
- [9] ATTENBOROUGH K., *Ground parameter information for propagation modelling.* The Journal of the Acoustical Society of America. 92(1) p. 418-427. (1992)
- [10] BACK T., *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford United Press, (1996)
- [11] BACK T., HAMMEL U., SCHWEFEL H.P., *Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State.* IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1(1) p. 3-17. (1997)
- [12] BACK T.H., FOGEL D.B., MICHALEWICZ Z., *Handbook of Evolutionary Computation*, Oxford University Press, (1997)
- [13] BARRIERE N., GABILLET Y., *Sound propagation over a barrier with realistic wind gradients. Comparison on wind tunnel experiment with GFPE computation.* Acta Acustica. 85 p. 325-334. (1999)
- [14] BAULAC M., DEFRANCE J., *Multi Criteria Optimization of Complex Noise Barriers.* in *Internoise*. Praha, Czech Republic. (2004)
- [15] BAULAC M., DEFRANCE J., JEAN P., *Optimization of low height noise protections in urban areas.* in *Forum Acusticum*. Budapest, Hungary. (2005)
- [16] BAULAC M., DEFRANCE J., JEAN P., *Optimization of performance of T-shaped barriers with reactive top surfaces.* in *ICSV13*. Vienna, Austria. (2006)

- [17] BAULAC M., DEFRANCE J., JEAN P., MINARD F., *Efficiency of Noise Protections in Urban Areas: Predictions and Scale Model Measurements*. Acta Acustica. 92(4) p. 530-539. (2006)
- [18] BERENGIER M.C., STINSON M.R., DAIGLE G.A., HAMET J.F., *Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects*. The Journal of the Acoustical Society of America. 101(1) p. 155-162. (1997)
- [19] BERRO A., *Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique*, PhD Thesis, Université des Sciences Sociales de Toulouse 1. (2001)
- [20] BLUMRICH R., HEIMANN D., *A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects*. The Journal of the Acoustical Society of America. 112(2) p. 446-455. (2002)
- [21] BLUMRICH R., HEIMANN D., *Numerical estimation of atmospheric approximation effects in outdoor sound propagation modelling*. Acta Acustica. 90(1) p. 24-37. (2004)
- [22] CERNY V., *Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm*. Journal of Optimization Theory and Applications. 45 p. 41-51. (1985)
- [23] CERVENY V., POPOV M.M., PSENCIK I., *Computation of wave fields in homogeneous media. Gaussian beam approach*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 70 p. 109-128. (1982)
- [24] CHANDLER-WILDE S.N., HOTHERSALL D.C., *Sound propagation above an inhomogeneous impedance plane*. Journal of Sound and Vibration. 98(4) p. 475-491. (1985)
- [25] CHANDLER-WILDE S.N., HOTHERSALL D.C., *Efficient calculation of the green function for acoustic propagation above a homogeneous impedance plane*. Journal of Sound and Vibration. 180(5) p. 705-724. (1995)
- [26] CHEN Y.L., LIU C.C., *Multiobjective VAR planning using the goal-attainment method*. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings. 141(3) p. 227-232. (1994)
- [27] CHIEN C.F., SOROKA W.W., *Sound propagation along an impedance plane*. Journal of Sound and Vibration. 43(1) p. 9-20. (1975)
- [28] CISKOWSKI R.D., BREBBIA C.A., *Boundary Element Methods in Acoustics*, Elsevier Applied Science, London. (1991)
- [29] COELLO C.A.C., CHRISTIANSEN A.D., HERNANDEZ AGUIRRE A., *Multiobjective Design Optimization of Counterweight Balancing of a Robot Arm using Genetic Algorithms*. in *Seventh International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. Herndon, Virginia, U.S.A. (1995)
- [30] COELLO C.A.C., *An Updated Survey of Evolutionary Multiobjective Optimization Techniques: State of the Art and Future Trends*. in *Congress on Evolutionary Computation*. Washington, U.S.A. (1999)
- [31] COELLO C.A.C., *A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization*. in *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Zurich, Switzerland. (2001)

- [32] CORNE D.W., KNOWLES J.D., OATES M.J., *The Pareto Envelope-based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization*. in *Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*. Paris, France. (2000)
- [33] CROMBIE D.H., HOTHERSALL D.C., CHANDLER-WILDE S.N., *Multiple-edge noise barriers*. *Applied Acoustics*. 44(4) p. 353-367. (1995)
- [34] DEFRANCE J., *Méthode analytique pour le calcul de propagation de bruit extérieur*, PhD Thesis, Université du Maine. (1996)
- [35] DEFRANCE J., *Améliorer l'efficacité en diffraction des écrans antibruit: du couronnement à l'écran double*. *Acoustique & Technique*. 23 p. 26-32. (2000)
- [36] DEFRANCE J., BOUILLOUD L., PREMAT E., JEAN P., *Etude théorique et expérimentale de l'efficacité de couronnements d'écrans routiers*. in *Congrès Français d'Acoustique*. Lille, France. (2002)
- [37] DEFRANCE J., JEAN P., *Integration of the efficiency of noise barrier caps in a 3D ray tracing method. Case of a T-shaped diffracting device*. *Applied Acoustics*. 64(8) p. 765-780. (2003)
- [38] DELANY M.E., BAZLEY E.N., *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. *Applied Acoustics*. 3 p. 105-116. (1970)
- [39] DUHAMEL D., *Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier*. *Journal of Sound and Vibration*. 197(5) p. 547-571. (1996)
- [40] DUHAMEL D., SERGENT P., *Sound propagation over noise barriers with absorbing ground*. *Journal of Sound and Vibration*. 218(5) p. 799-823. (1998)
- [41] DUHAMEL D., *Shape optimization of noise barriers using genetic algorithms*. *Journal of Sound and Vibration*. 297(1-2) p. 432-443. (2006)
- [42] DURAND N., ALLIOT J.M., *A Combined Nelder-Mead Simplex and Genetic Algorithm*. in *Evolution Artificielle 94*. Toulouse, France. (1999)
- [43] DUTILLEUX G., *Mesure in situ de l'absorption acoustique des matériaux dans le bâtiment*, PhD Thesis, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. (1999)
- [44] DUTILLEUX G., SGARD F., KRISTIANSEN U., *Assessment of the in situ acoustic absorption of materials at arbitrarily low frequencies in rooms: a global approach using evolution strategy*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 53(9) p. 2143-2161. (2002)
- [45] EKICI I., BOUGDAH H., *A Review of Research on Environmental Noise Barriers*. *Building Acoustics*. 10(4) p. 289-323. (2003)
- [46] FILIPPI P.J.T., *Layer potentials and acoustic diffraction*. *Journal of Sound and Vibration*. 54(4) p. 473-500. (1977)
- [47] FILIPPI P.J.T., *Theoretical acoustics and numerical techniques*, Springer Verlag (Wien), (1983)
- [48] FILIPPI P.J.T., LEFEBVRE J.P., HABAUT D., BERGASSOLI A., GUYADER J.L., LESUEUR C., *Acoustique Générale*, SFA, Les éditions de Physiques, (1994)
- [49] FISHMAN G.S., *Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications*, Springer-Verlag, (1997)



- [50] FLETCHER C.M., POWELL J.D., *A rapidly convergent descent method for minimization*. Computer Journal. 6(2) p. 163-168. (1963)
- [51] FLETCHER R., REEVES C.M., *Function minimisation by conjugate gradients*. Computer Journal. 7 p. 149-154. (1964)
- [52] FOGEL D.B., *An introduction to simulated evolutionary optimisation*. IEEE Transactions on Neural Networks. 5(1) p. 3-14. (1994)
- [53] FOGEL D.B., *Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, 2nd ed. IEEE Press, (1999)
- [54] FOGEL L.J., *Autonomous automata*. Industrial Research. 4 p. 14-19. (1962)
- [55] FOGEL L.J., OWENS A.J., WALSH M.J., *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A. (1966)
- [56] FONSECA C.M., FLEMING P.J., *Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*. in *Fifth International Conference on Genetic Algorithm*. San Mateo, California, U.S.A. (1993)
- [57] FRASER A.S., *Simulation of genetic systems by automatic digital computers*. Australian Journal of Biological Sciences. 10 p. 484-499. (1957)
- [58] FUJIWARA K., FURUTA N., *Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge*. Noise control engineering journal. 37(1) p. 5-11. (1991)
- [59] FUJIWARA K., MIYAJIMA T., *Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic-residue type*. Applied Acoustics. 35(2) p. 149-152. (1992)
- [60] FUJIWARA K., HOTHERSALL D.C., KIM C., *Noise barriers with reactive surfaces*. Applied Acoustics. 53(4) p. 255-272. (1998)
- [61] GABILLET Y., *Une méthode inverse de recherche de rayons: le logiciel MITHRA*, Cahiers du CSTB n°2444. (1990)
- [62] GABILLET Y., SCHROEDER H., DAIGLE G.A., L'ESPÉRANCE A., *Application of the gaussian beam approach to sound propagation in the atmosphere: theory and experiments*. The Journal of the Acoustical Society of America. 93(6) p. 3105-3116. (1993)
- [63] GABILLET Y., VAN MAERCKE D., *Outdoor noise propagation in urban areas: principles and use of the Mithra software*. in *Euronoise*. Lyon, France. (1995)
- [64] GILBERT K.E., WHITE M.J., *Application of the parabolic equation to sound propagation in refracting atmosphere*. The Journal of the Acoustical Society of America. 85(2) p. 630-637. (1989)
- [65] GILBERT K.E., DI X., *A fast Green's function method for one-way sound propagation in the atmosphere*. The Journal of the Acoustical Society of America. 94(4) p. 2343-2352. (1993)
- [66] GLOVER F., *Tabu search -- Part I*. ORSA Journal on Computing. 1(3) p. 190-206. (1989)
- [67] GLOVER F., LAGUNA M., *Tabu search*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. (1997)

- [68] GOLDBERG D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, Massachusetts, U.S.A. (1989)
- [69] HAMET J.F., BERENGIER M.C., *Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model*. in *Internoise*. Leuven, Belgium. (1993)
- [70] HANSEN P., *The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming*. in *Congress on Numerical Methods in Combinatorial Programming*. Capri, Italy. (1986)
- [71] HASEBE M., *A study on the sound reduction by T-profile noise barrier*. The Journal of the Acoustical Society of Japan. 14(5) p. 113-115. (1993)
- [72] HASEBE M., *Sound reduction by T-profile noise barrier*. The Journal of the Acoustical Society of Japan. 16(3) p. 173-179. (1995)
- [73] HOLLAND J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, (1975)
- [74] HORN J., NAFPLIOTIS N., *Multiobjective Optimization using the Niche Pareto Genetic Algorithm*, IlliGAI Report 93005. (1993)
- [75] HORN J., NAFPLIOTIS N., GOLDBERG D.E., *A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*. in *First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*. Piscataway, New Jersey, U.S.A. (1994)
- [76] HOROSHENKOV V.K., HOTHERSALL D.C., MERCY E.S., *Scale Modelling of Sound Propagation in a City Street Canyon*. Journal of Sound and Vibration. 223(5) p. 795-819. (1999)
- [77] HOTHERSALL D.C., CHANDLER-WILDE S.N., HAJMIRZAE M.N., *Efficiency of Single Noise Barriers*. Journal of Sound and Vibration. 146(2) p. 303-322. (1991)
- [78] HOTHERSALL D.C., CROMBIE D.H., CHANDLER-WILDE S.N., *The Performance of T-Profile and Associated Noise Barriers*. Applied Acoustics. 32(4) p. 269-287. (1991)
- [79] HOTHERSALL D.C., HOROSHENKOV K.V., MORGAN P.A., SWIFT M.J., *Scale modelling of railway noise barriers*. Journal of Sound and Vibration. 234(2) p. 207-223. (2000)
- [80] ISHIZUKA T., FUJIWARA K., *Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions*. Applied Acoustics. 65(2) p. 125-141. (2004)
- [81] JEAN P., GABILLET Y., *A boundary element method program to study 2D noise barriers with ground effects*. in *Eurnoise*. Lyon, France. (1995)
- [82] JEAN P., *A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise*. Journal of Sound and Vibration. 212(2) p. 275-294. (1998)
- [83] JEAN P., DEFRANCE J., GABILLET Y., *The importance of source type on the assessment of noise barriers*. Journal of Sound and Vibration. 226(2) p. 201-216. (1999)
- [84] JIN B.J., KIM H.S., KANG H.J., KIM J.S., *Sound diffraction by a partially inclined noise barrier*. Applied Acoustics. 62(9) p. 1107-1121. (2001)

- [85] JONASSON H.G., WATTS G.R., SANDBERG U., EJSMONT J., VAN BLOKLAND G., LUMINARI M., VAN DER TOORN J.D., *The Harmonoise source model for road vehicles*. in *Internoise*. Praha, Czech Republic. (2004)
- [86] KALYANMOY D., *Solving goal programming problems using multi-objective genetic algorithms*. in *Congress on Evolutionary Computation*. Washington, U.S.A. (1999)
- [87] KELLER J.B., *Geometrical Theory of Diffraction*. The Journal of the Optical Society of America. 52(2) p. 116-130. (1962)
- [88] KIRKPATRICK S., GELLAT C.D., VECCHI M.P., *Optimization by simulated annealing*. Science. 220 p. 671-680. (1983)
- [89] KLINKOWSTEIN R.E., *A study of acoustic radiation from an electrical spark discharge in air*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology. (1974)
- [90] KNOWLES J.D., CORNE D.W., *The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimisation*. in *Congress on Evolutionary Computation*. Washington, U.S.A. (1999)
- [91] KNOWLES J.D., CORNE D.W., *Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy*. Evolutionary Computation. 8(2) p. 149-172. (2000)
- [92] KOUYOUJIAN R.G., PATHAK P.H., *A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface*. proc. IEEE. 62(11) p. 1448-1461. (1974)
- [93] KOZA J.R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge. (1992)
- [94] KRAGH J., PLOVSING B., *Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000 - Summary report. General Nordic Sound Propagation Model and Applications in Source-Related Prediction Methods*, Report AV 1719/01. (2001)
- [95] LAGARIAS J.C., REEDS J.A., WRIGHT M.H., WRIGHT P.E., *Convergence properties of the Nelder Mead simplex method in low dimensions*. Siam Journal Optimisation. 9(1) p. 112-147. (1998)
- [96] LI K.M., ATTENBOROUGH K., HEAP N.W., *Source height determination by ground effect inversion in the presence of a sound velocity gradient*. Journal of Sound and Vibration. 145(1) p. 111-128. (1991)
- [97] LI K.M., TANG S.H., *The predicted barrier effects in the proximity of tall buildings*. The Journal of the Acoustical Society of America. 114(2) p. 821-832. (2003)
- [98] LUERSEN M.A., LE RICHE R., *Globalized Nelder-Mead Method for Engineering Optimization*. in *Third international conference on Engineering computational technology*. Praha, Czech Republic. (2002)
- [99] LUERSEN M.A., LE RICHE R., GUYON F., *A constrained globalized and bounded Nelder Mead method for engineering optimization*. Structural and Multidisciplinary Optimization. 25(4) p. (2003)
- [100] LUERSEN M.A., *GBNM: Un Algorithme d'Optimisation par Recherche Directe - Application à la Conception de Monopalmes de Nage*, PhD Thesis, Institut National des Sciences Appliquées. (2004)
- [101] MARICHAL J.L., *On Sugeno integral as an aggregation function*. Fuzzy Sets and Systems. 114(3) p. 347-365. (2000)

- [102] MARTIN S.J., HOTHERSALL D.C., *Numerical modelling of median road traffic noise barriers*. Journal of Sound and Vibration. 251(4) p. 671-681. (2002)
- [103] MAY D.N., OSMAN M.M., *Highway noise barriers: new shapes*. Journal of Sound and Vibration. 71(1) p. 73-101. (1980)
- [104] MAY D.N., OSMAN M.M., *The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in Toronto*. Journal of Sound and Vibration. 71(1) p. 65-71. (1980)
- [105] McKINNON K.I.M., *Convergence of the Nelder Mead simplex method to a non-stationary point*. Siam Journal Optimisation. 9(1) p. 148-158. (1996)
- [106] MECHEL F.P., *Ausweitung der Absorberformel von Delany und Bazley zu tiefen Frequenzen*. Acustica. 35 p. 210-213. (1976)
- [107] MICHALEWICZ Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer Verlag, (1992)
- [108] MICHALEWICZ Z., SCHOENAUER M., *Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems*, (1996)
- [109] MINOUX M., *Programmation mathématique: théories et algorithmes*, Dunod, Paris. (1983)
- [110] MONAZZAM M.R., LAM Y.W., *Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers*. Applied Acoustics. 66(6) p. 709-730. (2005)
- [111] MORGAN P.A., HOTHERSALL D.C., CHANDLER-WILDE S.N., *Influence of Shape and Absorbing Surface - A Numerical Study of Railway Noise Barriers*. Journal of Sound and Vibration. 217(3) p. 405-417. (1998)
- [112] NAZ P., PARMENTIER G., *Some results of sound propagation experiments*. in *7th International Symposium on Long Range Sound Propagation*. Lyon, France. (1996)
- [113] NELDER J., MEAD R., *A simplex method for function minimization*. Computer journal. 7(4) p. 308-313. (1965)
- [114] NOTA R., VAN LEEUWEN J.J.A., BARELDS R., BEUVING M., CREMEZI C., DEFANCE J., JONASSON H.G., VAN MAERCKE D., TALOTTE C., TARALDSEN G., WATTS G.R., WITTE J., *Harmonoise: simplification of comprehensive source and propagation models into an accurate and practicable engineering method*. in *Internoise*. Praha, Czech Republic. (2004)
- [115] PARETO V., *Cours d'économie politique*, F. Rouge, Lausanne, Switzerland. (1896)
- [116] PIERCE A.D., *Acoustics - An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, McGraw-Hill Edition, New York, U.S.A. (1981)
- [117] PLOVSING B., KRAGH J., *Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction. Part 2: Propagation in an Atmosphere with Refraction*, Report AV 1849/00 and AV 1851/00. (2000)
- [118] RASPET R., LEE S.W., KUESTER E., CHANG D.C., RICHARDS W.F., GILBERT R., BONG N., *A fast-field program for sound propagation in a layered atmosphere above an impedance ground*. The Journal of the Acoustical Society of America. 77(2) p. 345-352. (1985)

- [119] RASPET R., BAIRD G., WU W., *The relationship between upward refraction above a complex impedance plane and the spherical wave evaluation for a homogeneous atmosphere*. The Journal of the Acoustical Society of America. 89(1) p. 107-114. (1991)
- [120] RASPET R., BAIRD G., WU W., *Normal mode solution for low-frequency sound propagation in a downward refracting atmosphere above a complex impedance plane*. The Journal of the Acoustical Society of America. 91(3) p. 1341-1352. (1992)
- [121] RECHENBERG I., *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Stuttgart, Germany. (1973)
- [122] SCHAFFER J.D., *Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*, PhD Thesis, Vanderbilt University. (1984)
- [123] SCHAFFER J.D., *Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms*. in *First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, U.S.A. (1985)
- [124] SCHWEFEL H.P., *Numerical Optimization of Computer Models*, John Wiley & Sons, Chichester, UK. (1981)
- [125] SEZNEC R., *Diffraction of sound around barriers: Use of the boundary elements technique*. Journal of Sound and Vibration. 73(2) p. 195-209. (1980)
- [126] SRINIVAS N., DEB K., *Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms*. Evolutionary Computation. 2(3) p. 221-248. (1994)
- [127] THORSSON P.J., *Optimisation of Low-Height Noise Barriers using the Equivalent Sources Method*. Acustica - Acta acustica. 86 p. 811-820. (2000)
- [128] TOBUTT D.C., NELSON P.M., *A model to calculate traffic noise levels from complex highway cross-sections*, Report RR 245. (1990)
- [129] WATTS G.R., *Acoustic Performance of Traffic Noise Barriers A State-Of-The-Art Review*. in *Eurosymposium on the Mitigation of Traffic Noise in Urban Areas*. Nantes, France. (1992)
- [130] WATTS G.R., CROMBIE D.H., HOTHERSALL D.C., *Acoustic Performance of New Designs of Traffic Noise Barriers: Full Scale Tests*. Journal of Sound and Vibration. 177(3) p. 289-305. (1994)
- [131] WATTS G.R., *Traffic Noise Barriers*, TRL annual review. (1995)
- [132] WATTS G.R., *Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites*. Applied Acoustics. 47(1) p. 47-66. (1996)
- [133] WATTS G.R., HOTHERSALL D.C., HOROSHENKOV K.V., *Measured and predicted acoustic performance of vertically louvred noise barriers*. Applied Acoustics. 62(11) p. 1287-1311. (2001)
- [134] WATTS G.R., MORGAN P.A., SURGAND M., *Assessment of the diffraction efficiency of novel barrier profiles using an MLS-based approach*. Journal of Sound and Vibration. 274(3-5) p. 669-683. (2004)
- [135] WHITLEY D., *A Genetic Algorithm Tutorial*, Technical Report CS-93-103. (1993)

- [136] WHITTAKER E.T., ROBINSON G., *The Newton-Raphson Method*, in *The Calculus of Observations: A Treatise on Numerical Mathematics*, 84-87, Dover, New York, U.S.A. (1967)
- [137] ZITZLER E., THIELE L., *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms - A Comparative Case Study*. in *Parallel Problem Solving from Nature 5*. Berlin, Germany. (1998)
- [138] ZITZLER E., THIELE L., *Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach*. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 3(4) p. 257-271. (1999)



## Références personnelles

### Congrès internationaux

- M. Baulac, J. Defrance, P. Jean. “*Optimization of performance of T-shaped barriers with reactive top surfaces*”. ICSV13, Vienne (Autriche). 2-6 Juillet 2006.
- M. Baulac, J. Defrance, P. Jean. “*Optimization of low height protections in urban areas*”. Forum Acusticum, Budapest (Hongrie). 29 Août-2 Sept 2005.
- M. Baulac, J. Defrance. “*Multi Criteria Optimization of Complex Noise Barriers*”. InterNoise, Prague (République Tchèque). 22-25 Août 2004.
- F. Aballéa, J. Defrance, M. Baulac. “*Outdoor sound propagation: Comparisons between calculations performed with ATMOS and wind tunnel experiments*”. Euronoise, Tempere (Finlande). 30 Mai-1<sup>er</sup> Juin 2006.
- F. Aballéa, J. Defrance, M. Baulac, M. Fournier. “*Accuracy of outdoor sound propagation prediction in a complex environment using some reference numerical models*”. Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction (Symposium Uncertainties), Le Mans (France). 27-29 Juin 2005.
- M. Priour, F. Aballéa, M. Baulac, J. Defrance. “*Wind tunnel experiments for the validation of numerical models for outdoor sound propagation*”. InterNoise, Prague (République Tchèque). 22-25 août 2004.
- J. Defrance, J. Roland, M. Perraudeau, M. Baulac. “*Characterisation, performance and conception of vented and absorptive road covers*”. InterNoise, Prague (République Tchèque). 22-25 août 2004.

### Journaux scientifiques internationaux à comité de relecture

- M. Baulac, J. Defrance, P. Jean, F. Minard. “*Efficiency of low height noise protections in urban areas*”. Acta Acustica. 92(4) p. 530-539. (2006)
- M. Baulac, J. Defrance, P. Jean. “*Optimization of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a Nelder Mead local search*”. Accepté pour publication dans Journal of Sound and Vibration.
- M. Baulac, J. Defrance, P. Jean. “*Optimization with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface*”. Accepté pour publication dans Applied Acoustics.
- F. Aballéa, J. Defrance, M. Baulac, M. Fournier. “*Accuracy of outdoor sound propagation prediction in a complex environment using some reference numerical models*”. Soumis à Noise Control Engineering Journal.
- J. Defrance, E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plovsing, G. Watts, H. Jonasson, X. Zhang, E. Premat, I. Schmich, F. Aballéa, M. Baulac, F. de Roo. “*Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project*”. Soumis à Acta Acustica





## **Annexes**

<b>Annexe A.</b>	<b>Outil final d'optimisation.....</b>	<b>161</b>
<b>Annexe B.</b>	<b>Validation de l'outil d'optimisation .....</b>	<b>171</b>
<i>B.1.</i>	<i>Fonction simple à un paramètre .....</i>	<i>172</i>
<i>B.2.</i>	<i>Fonction simple à deux paramètres .....</i>	<i>173</i>
<i>B.3.</i>	<i>Fonction simple à quatre paramètres .....</i>	<i>174</i>



## Annexe A. Outil final d'optimisation

L'outil final d'optimisation, OPTOOL (pour Optimization Tool), a été développé sous l'environnement Matlab. Une interface graphique, OPTIMEA (pour Optimization in Environmental Acoustics) a également été mise au point afin de synthétiser le travail réalisé et de permettre son utilisation par un tiers.

Différentes captures d'écrans relatives à l'outil d'optimisation développé sont présentées. Chacune expose des exemples de résultats puisqu'elles correspondent à des calculs effectivement réalisés avec l'outil. Le schéma général de l'organisation de l'outil est décrit sur la Figure A.1.

Les différentes captures d'écrans correspondent à :

- Figure A.2 : Capture d'écran de la fenêtre d'accueil de l'outil OPTIMEA. Cette fenêtre permet de choisir entre le module Ecran Acoustique, le module Trajectoires ou l'accès direct à l'outil d'optimisation OPTOOL.
- Figures A.3 à A.6 : Captures d'écrans du module Ecran Acoustique. Ce module permet d'une part d'étudier certains types d'écrans anti-bruit et d'autre part de décrire des configurations avec certains paramètres à optimiser puis de réaliser l'optimisation avec OPTOOL (création automatisée de la fonction coût).
- Figures A.7 à A.9 : Captures d'écrans du module Trajectoires. Ce module permet d'une part d'étudier la problématique de trajectoires de sources acoustiques et d'autre part de décrire des configurations avec certains paramètres à optimiser puis de réaliser l'optimisation avec OPTOOL (création automatisée de la fonction coût).
- Figure A.10 : Capture d'écran de l'outil d'optimisation OPTOOL. Cette fenêtre permet de choisir la méthode d'optimisation, de déterminer des paramètres associés à chaque algorithme, de déterminer les contraintes liées au problème d'optimisation puis de lancer l'optimisation proprement dite.

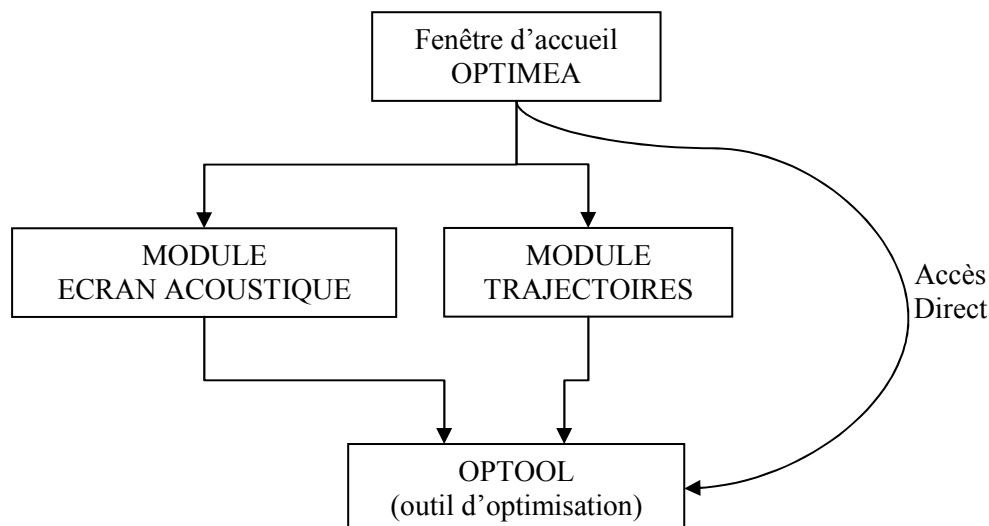


Figure A.1 Schéma de principe de l'outil d'optimisation développé

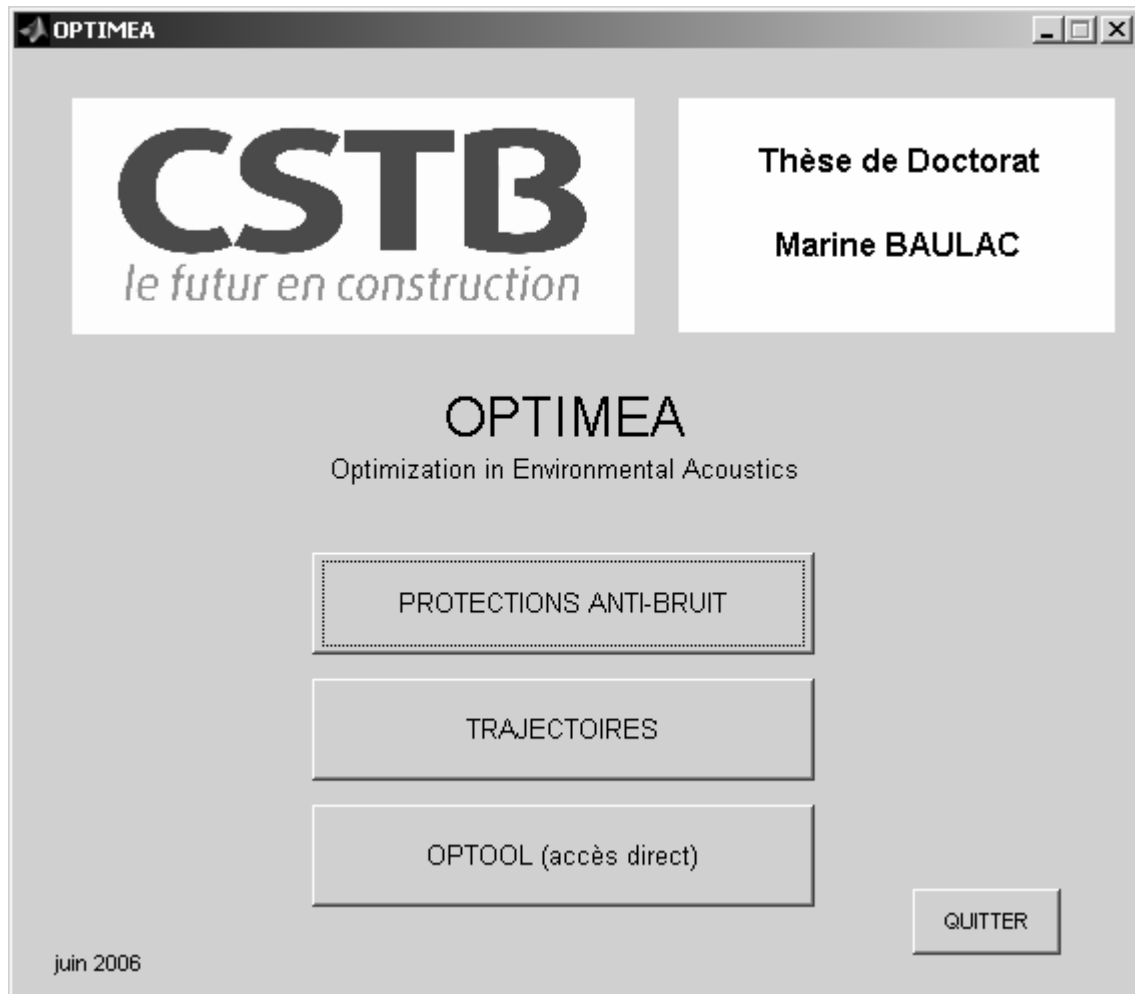


Figure A.2 Capture de la fenêtre d'accueil de l'outil OPTIMEA

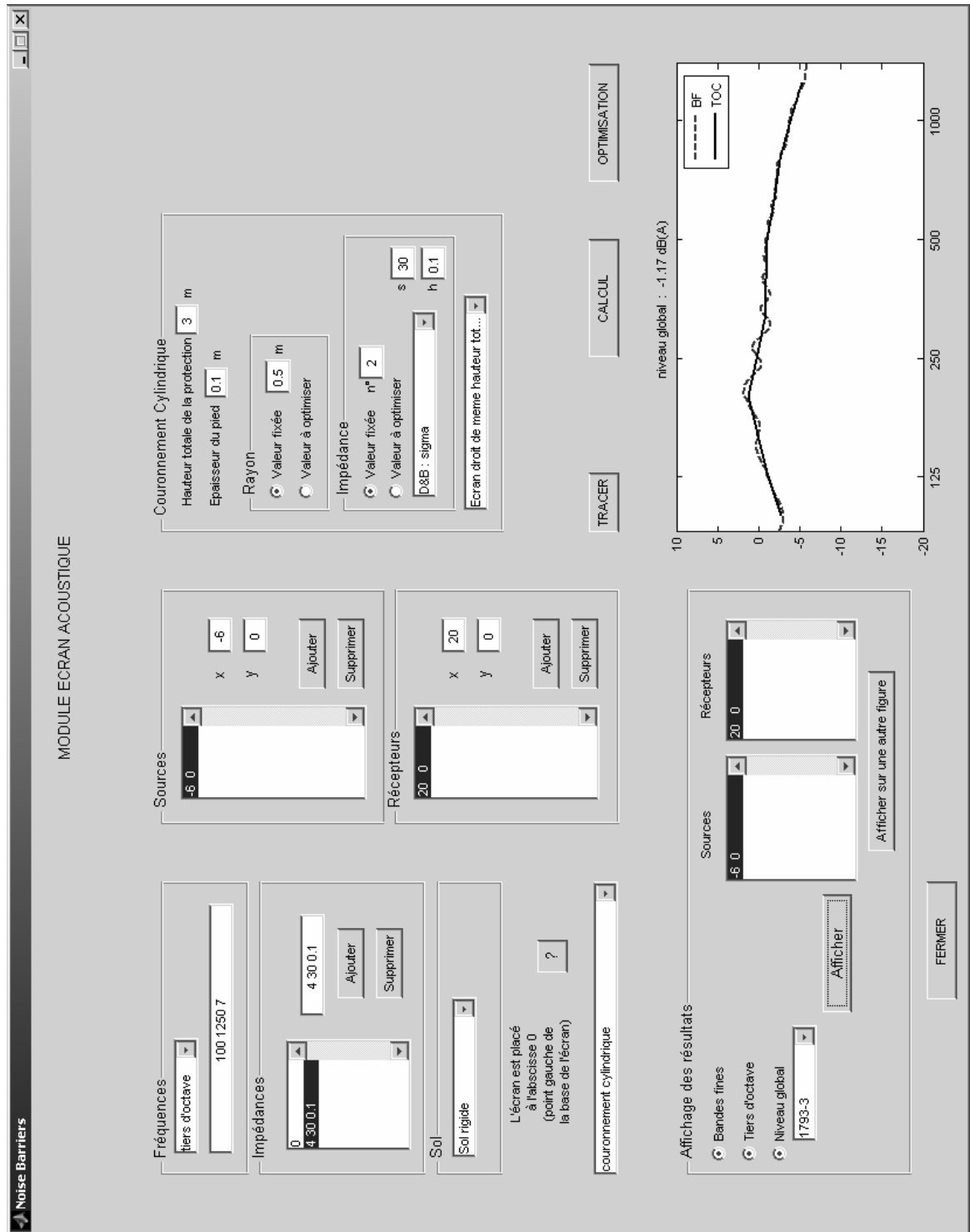


Figure A.3 Capture d'écran du module Ecran Acoustique de l'outil OPTIMEA. Cas du couronnement cylindrique

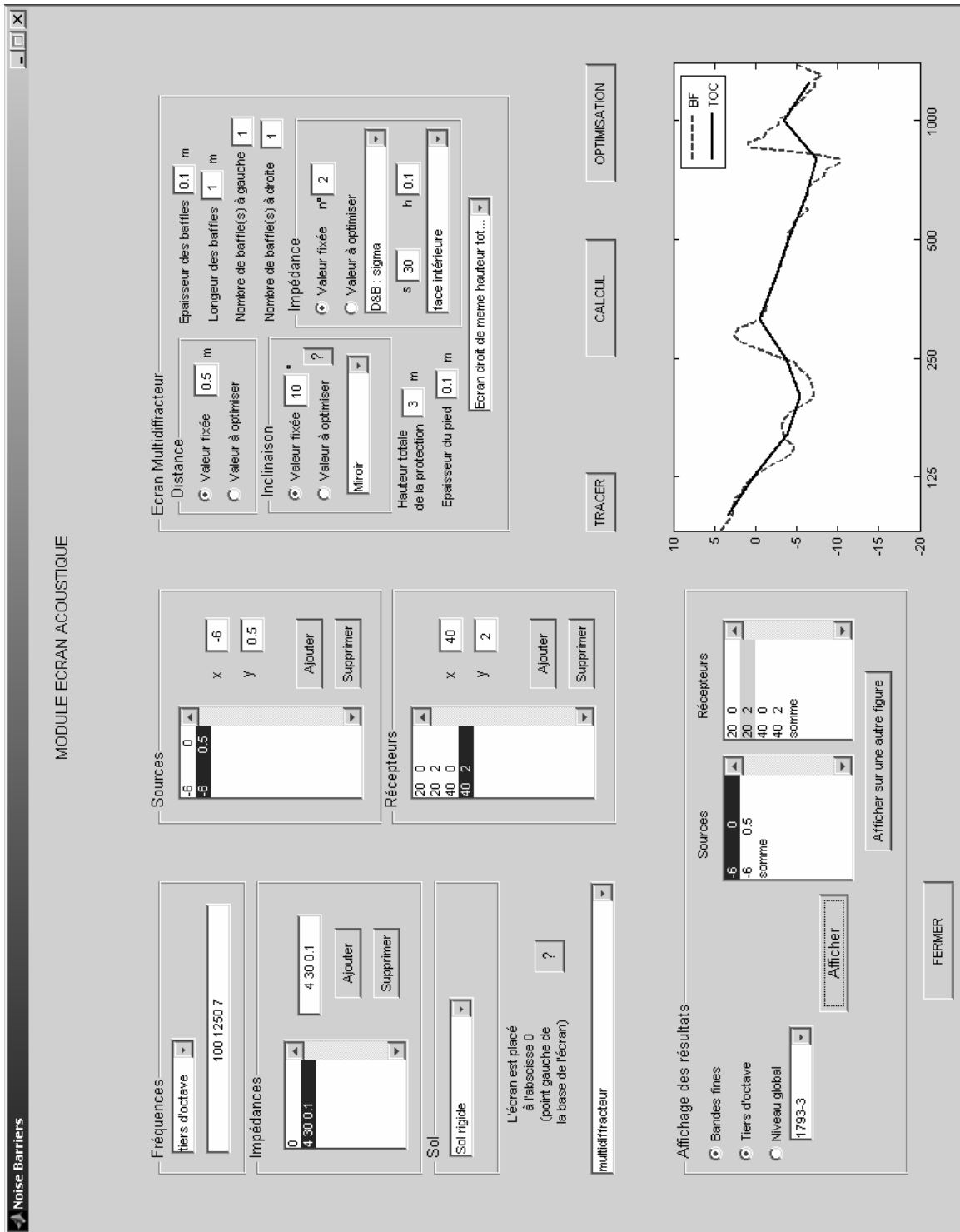


Figure A.4 Capture d'écran du module Ecran Acoustique de l'outil OPTIMEA. Cas de l'écran multi-diffracteur

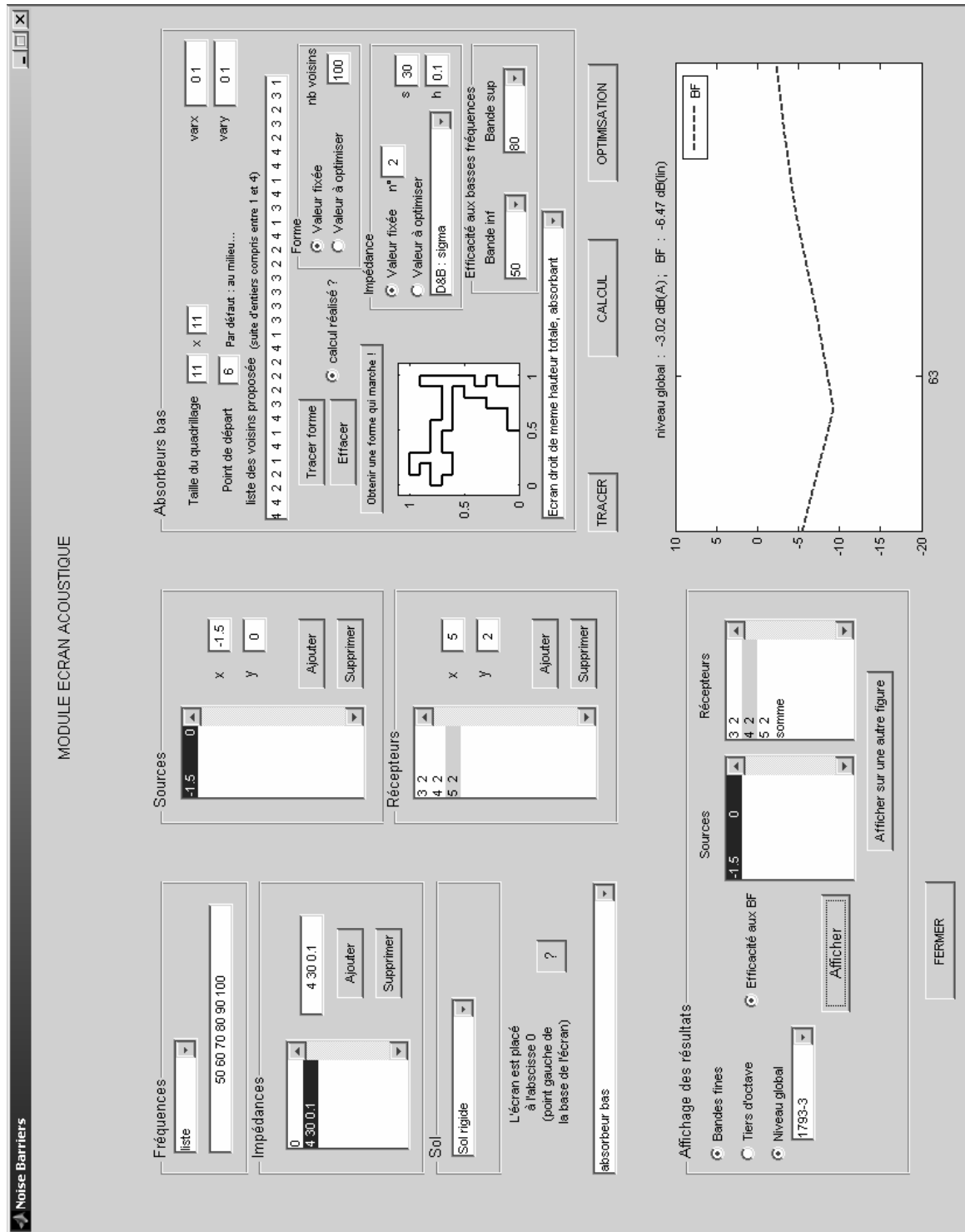


Figure A.5 Capture d'écran du module Ecran Acoustique de l'outil OPTIMEA. Cas de protections de faible hauteur



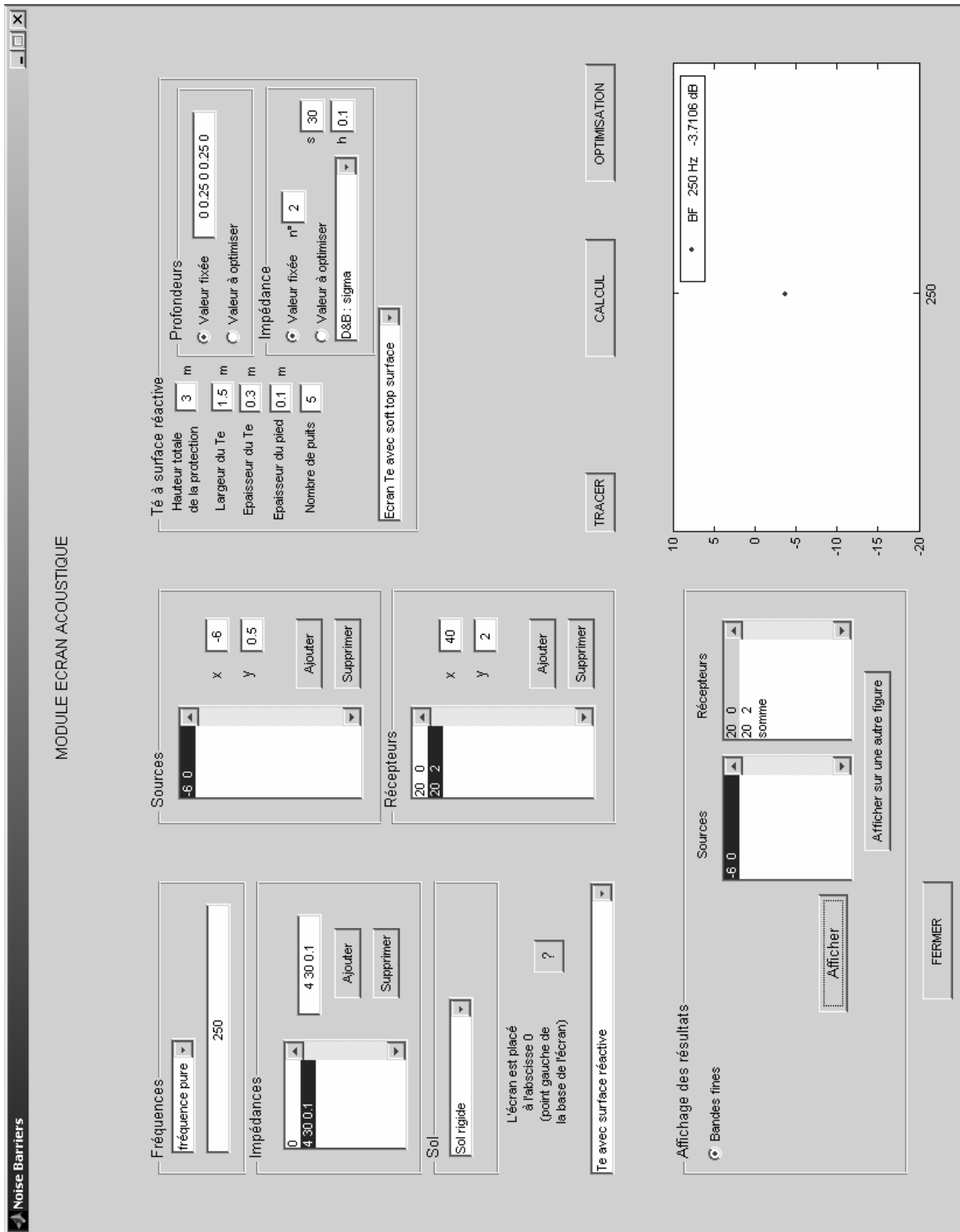


Figure A.6 Capture d'écran du module Ecran Acoustique de l'outil OPTIMEA. Cas de l'écran Té à surface réactive

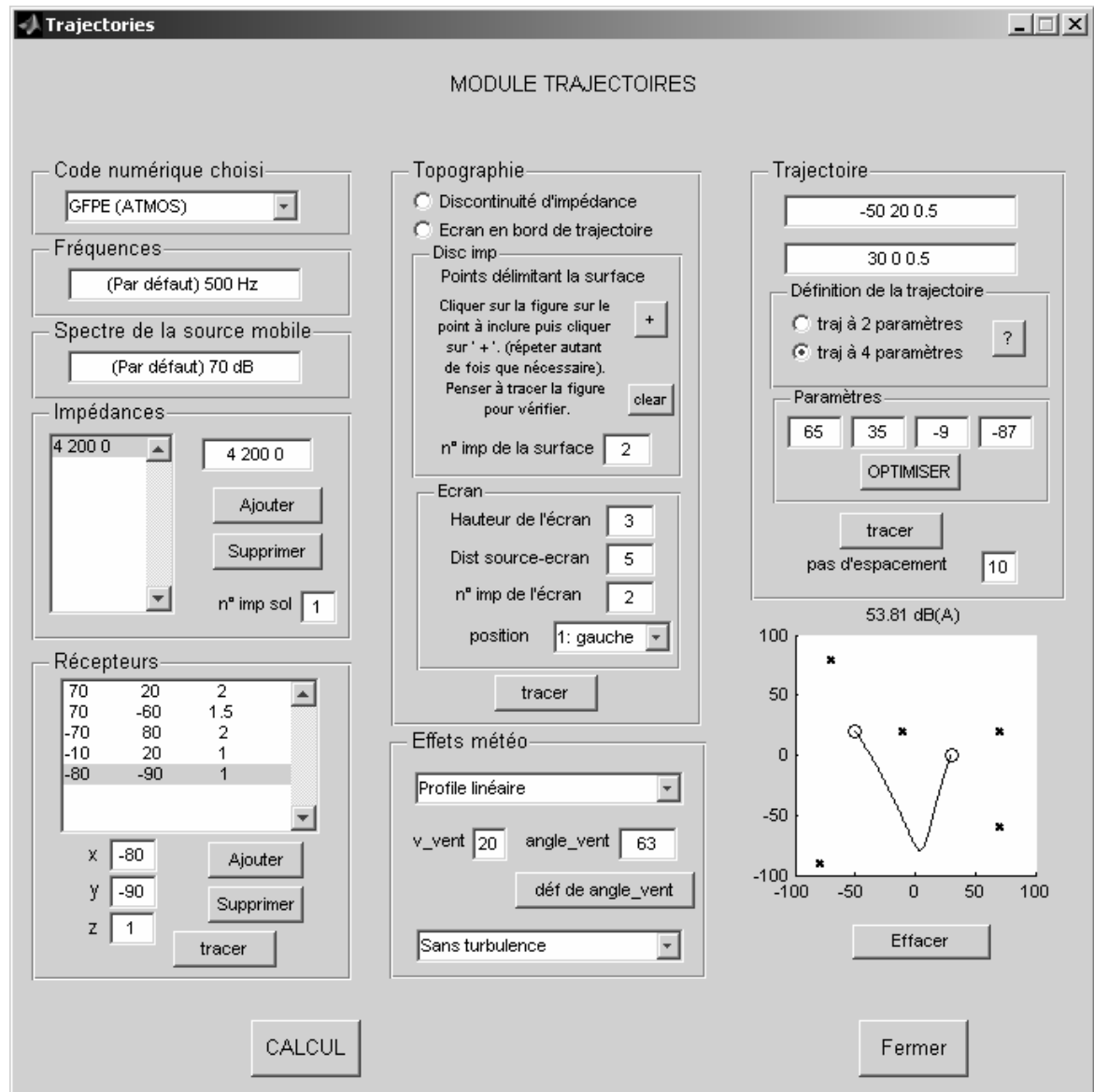


Figure A.7 Capture d'écran du module Trajectoires de l'outil OPTIMEA. Cas d'une étude en milieu inhomogène

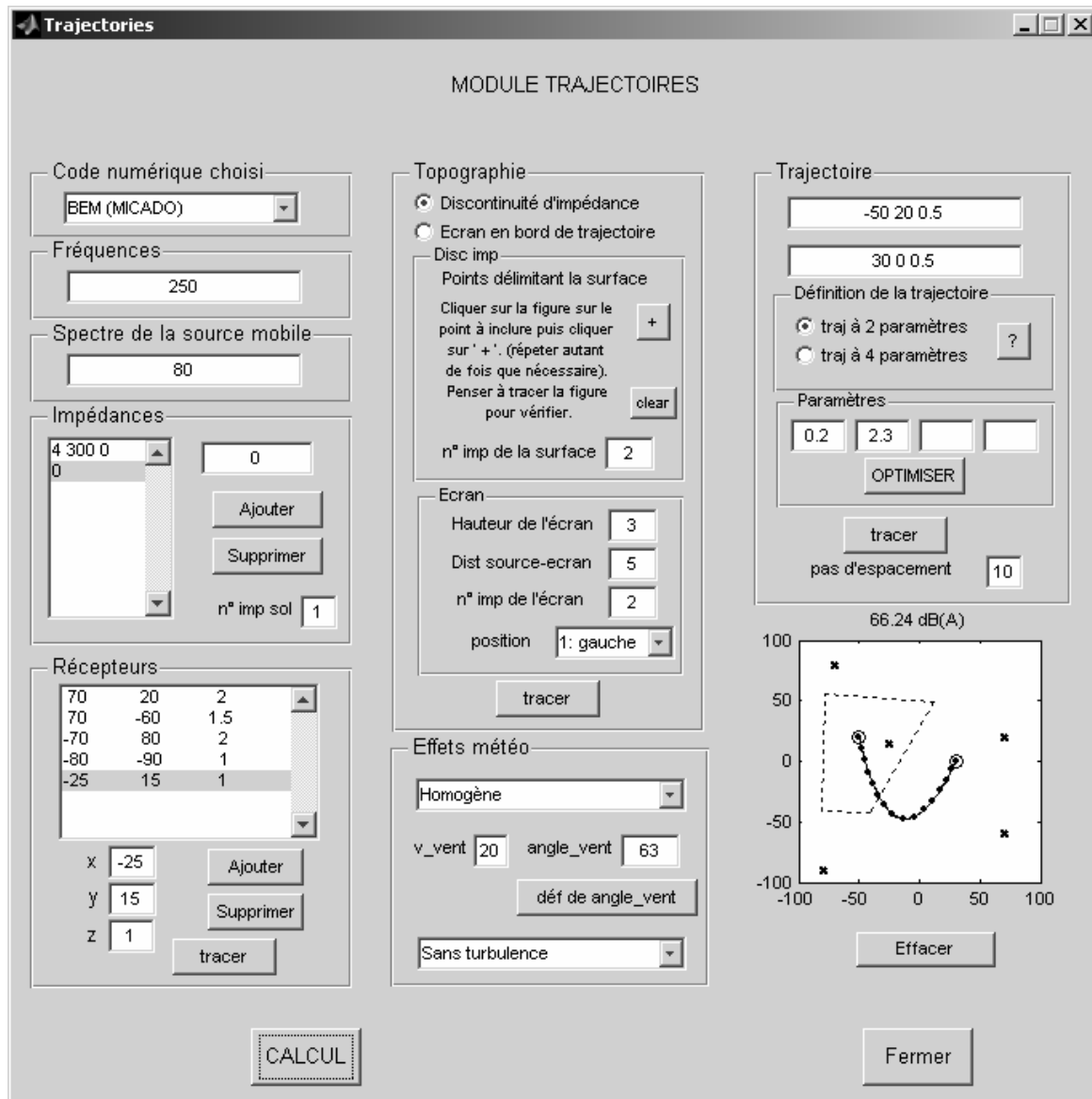


Figure A.8 Capture d'écran du module Trajectoires de l'outil OPTIMEA. Cas d'une étude en milieu homogène en présence d'une discontinuité d'impédance

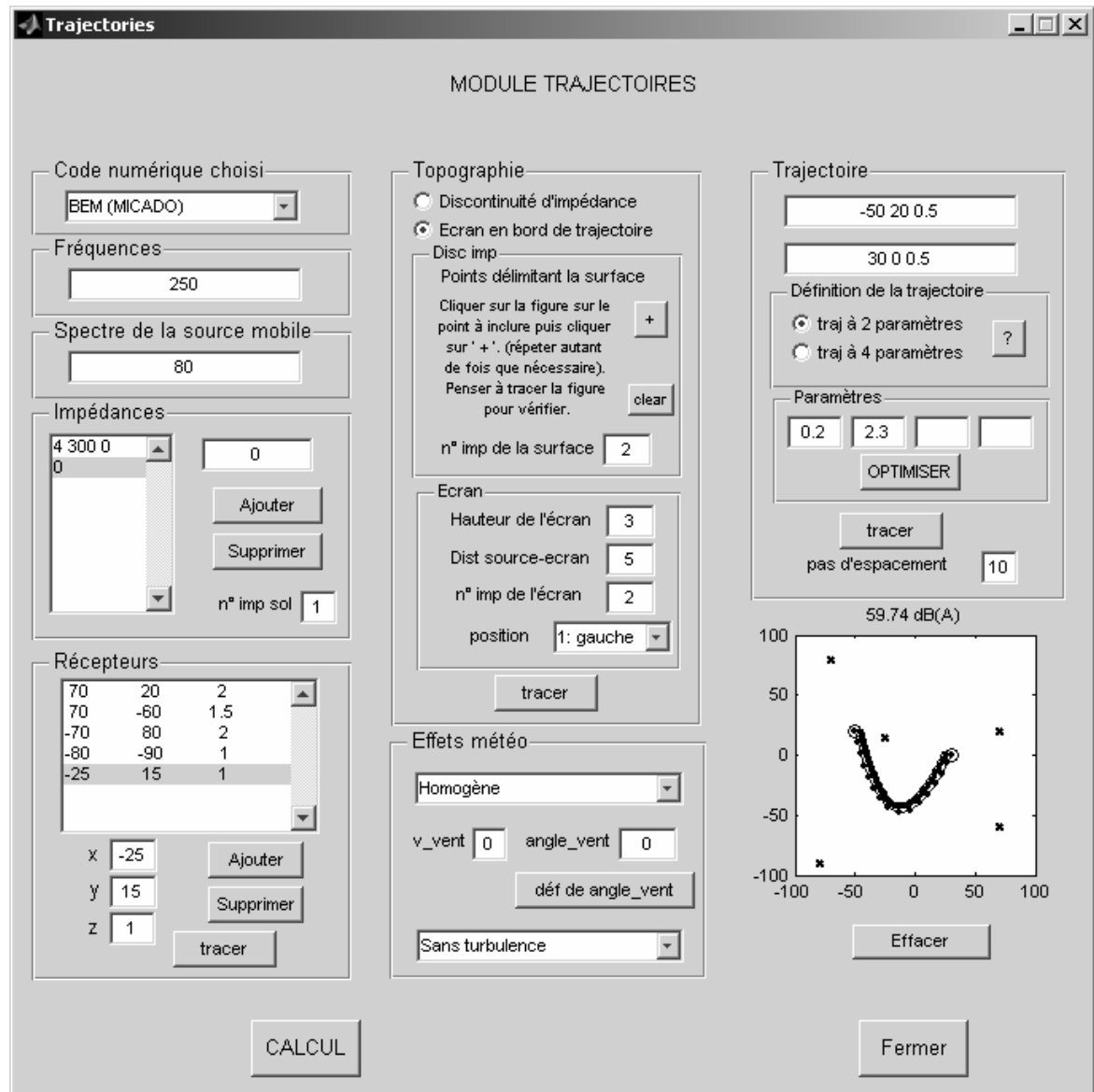


Figure A.9 Capture d'écran du module Trajectoires de l'outil OPTIMEA. Cas d'une étude en milieu homogène en présence d'un écran en bordure de trajectoire

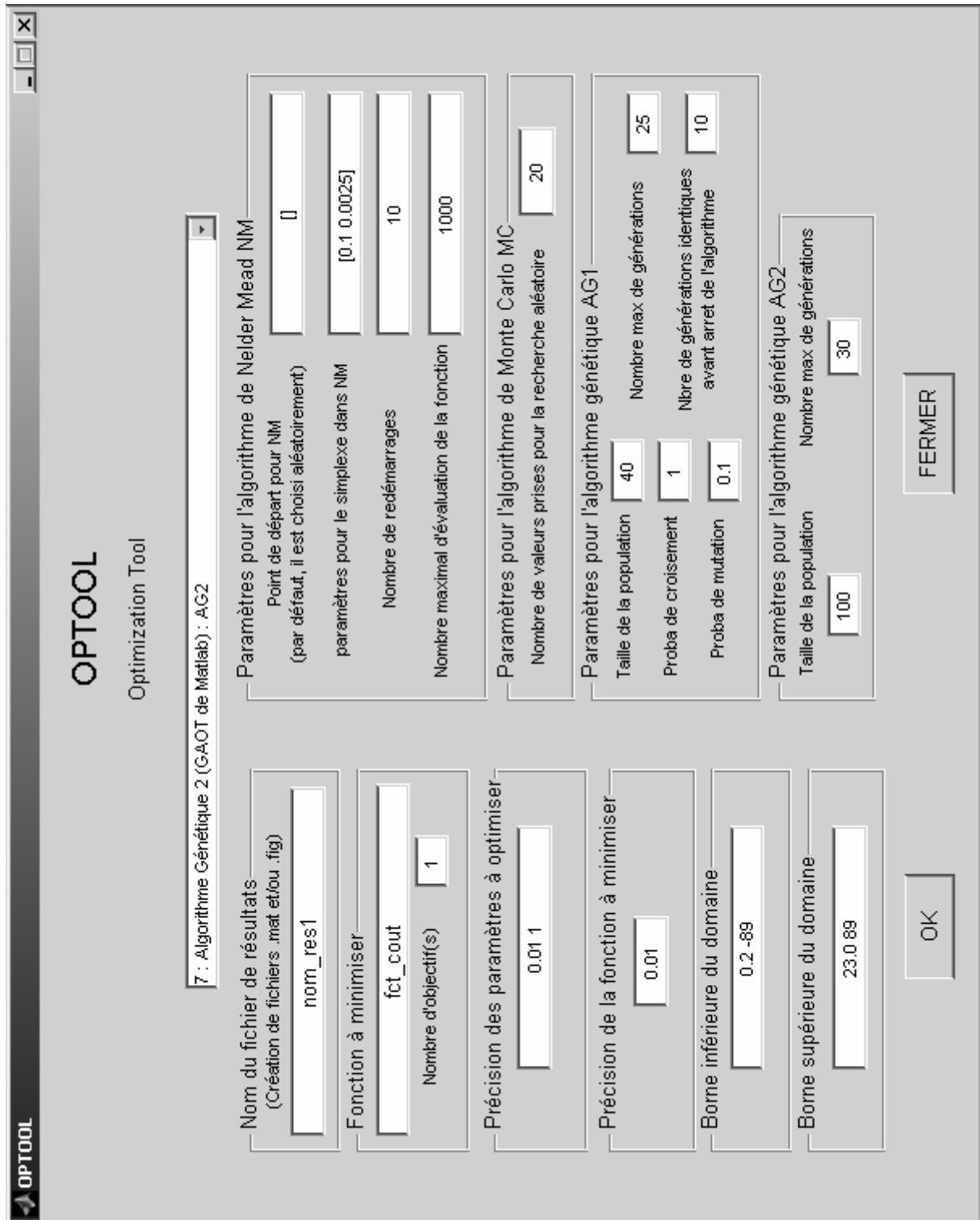


Figure A.10 Capture d'écran de l'outil OPTOOL

## **Annexe B. Validation de l'outil d'optimisation**

Dans cette partie, différentes fonctions numériques dont les temps de calculs sont très faibles, sont étudiées d'une part en calculant le résultat en chaque point du domaine d'étude puis en utilisant l'outil d'optimisation pour plusieurs cas. On effectue à chaque fois une minimisation de la fonction considérée (une maximisation correspondrait à la minimisation de l'opposé). Les résultats sont récapitulés dans des tableaux (un pour chaque fonction) et permettent de valider l'outil d'optimisation.

La comparaison des nombres d'évaluation de la fonction, donnés dans la dernière colonne des tableaux, montre l'intérêt de l'optimisation par rapport à une étude totale du domaine. Pour des fonctions dont l'évaluation est quasi instantanée le gain en temps de calcul est insignifiant. Mais pour le cas des protections acoustiques, l'évaluation de la fonction coût pouvant durer jusqu'à plusieurs minutes, le gain en temps de calcul est très conséquent. Il est d'environ un facteur 10 pour l'optimisation à un paramètre, d'un facteur 900 pour deux paramètres et d'un facteur 70000 pour quatre paramètres.

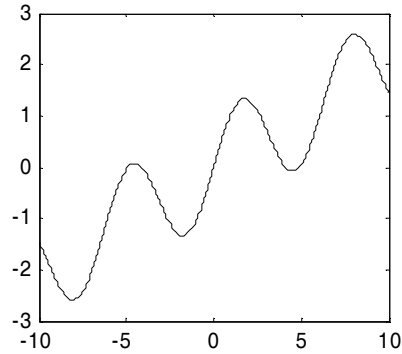
Les fonctions étant déterminées à 0.01 près, il y a parfois plusieurs minima possibles ; la validation est donc acceptée dès lors que le minimum de la fonction coût (3<sup>e</sup> colonne) est le même. Par exemple, dans le cas d'une fonction à un paramètre, le minimum global est atteint dans tous les cas proposés même si les paramètres optimaux ne sont pas toujours les mêmes.

Une représentation de la fonction est proposée dans les deux premiers cas (dans le troisième, une représentation en 5D n'est pas envisagée...).

Les résultats consignés dans les tableaux montrent que l'outil d'optimisation développé permet une bonne recherche de l'optimum global avec un gain de temps considérable dès que plusieurs paramètres sont pris en compte. En outre, ces calculs montrent que la méthode basée sur l'algorithme de Nelder Mead perd de son efficacité lorsque le nombre de paramètres variables augmente, les Algorithmes Génétiques devenant alors les plus appropriés.

## B.1. Fonction simple à un paramètre

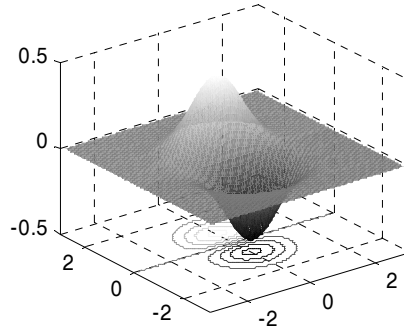
$$f1(x) = \sin(x) + \frac{x}{5}, \quad x \in [-10;10] \quad \Delta x = 0.01 \quad \Delta f1 = 0.01 \quad (\text{B.1})$$



Méthode	Paramètres optimaux $x$	Valeur minimum de la fonction coût	Nombre d'évaluations de la fonction
Recherche exacte de la totalité du domaine	-8.06	-2.59	2001
Algorithme de Nelder Mead modifié (10 redémarrages calculés par Monte Carlo)	-7.96	-2.59	190
Algorithme de Nelder Mead modifié (10 redémarrages calculés par Monte Carlo)	-8.09	-2.59	260
Algorithme génétique (100 éléments par population et 30 générations max)	-7.97	-2.59	230
Algorithme génétique (40 éléments par population et 30 générations max)	-7.98	-2.59	204
Algorithme génétique (40 éléments par population et 30 générations max)	-7.96	-2.59	191

## B.2. Fonction simple à deux paramètres

$$f_2(x, y) = x.e^{-x^2-y^2}, \quad \begin{cases} x \in [-3;3] \\ y \in [-3;3] \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta x = 0.01 \\ \Delta y = 0.01 \end{cases} \quad \Delta f_2 = 0.01 \quad (\text{B.2})$$



Méthode	Paramètres optimaux $x$ $y$	Valeur minimum de la fonction coût	Nombre d'évaluations de la fonction
Recherche exacte de la totalité du domaine	-0.71 0	-0.43	361201
Algorithme de Nelder Mead modifié (10 redémarrages calculés par Monte Carlo)	-0.73 0.01	-0.43	430
Algorithme de Nelder Mead modifié (10 redémarrages calculés par Monte Carlo)	-0.77 -0.01	-0.43	372
Algorithme génétique (100 éléments par population et 30 générations max)	-0.75 0.07	-0.43	407
Algorithme génétique (40 éléments par population et 30 générations max)	-0.74 0.04	-0.43	274
Algorithme génétique (40 éléments par population et 30 générations max)	-0.74 -0.01	-0.43	421



## B.3. Fonction simple à quatre paramètres

$$f4(a,b,c,d) = (a - b + 3d)e^{\frac{-a^2 - b^2 - c^2 - d^2}{53}} \quad (\text{B.3})$$

$$\text{avec } \begin{cases} a \in [-2;2] \\ b \in [-2;2] \\ c \in [-10;10] \\ d \in [-10;10] \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta a = 0.01 \\ \Delta b = 0.01 \\ \Delta c = 1 \\ \Delta d = 1 \end{cases} \quad \Delta f4 = 0.01$$

Méthode	Paramètres optimaux $a$ $b$ $c$ $d$	Valeur minimum de la fonction coût	Nombre d'évaluations de la fonction
Recherche exacte de la totalité du domaine	-1.48 1.48 0 -5	-10.32	70913241
Algorithme de Nelder Mead modifié (10 redémarrages calculés par Monte Carlo)	-1.67 1.59 0 -4	-10.21	1273
Algorithme de Nelder Mead modifié (10 redémarrages calculés par Monte Carlo)	-2 1.29 0 -5	-10.26	1388
Algorithme génétique (100 éléments par population et 30 générations max)	-1.55 1.51 0 -5	-10.32	414
Algorithme génétique (100 éléments par population et 30 générations max)	-1.4 1.51 0 -5	-10.32	392
Algorithme génétique (100 éléments par population et 30 générations max)	-1.47 1.52 0 -5	-10.32	515





## **Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe**

**Résumé** - En ce début de 21<sup>e</sup> siècle, le bruit des transports est l'une des principales nuisances. Un important travail est réalisé par les acousticiens afin d'améliorer l'efficacité des écrans acoustiques.

Actuellement, le choix des protections anti-bruit se porte souvent sur des solutions triviales ou issues d'études paramétriques. Or le CSTB possède des codes de calculs numériques avancés dédiés à la simulation de la propagation acoustique en milieu extérieur. Le but de cette thèse est de coupler ces codes prévisionnels avec un outil mathématique à développer permettant une recherche systématique des solutions optimales.

Une étude bibliographique a permis de dégager des algorithmes applicables au cas de l'optimisation de paramètres caractérisant un écran acoustique. Ils ont été appliqués avec succès aux écrans multi-diffracteurs. Des méthodes d'optimisation multiobjectif ont en outre permis d'optimiser simultanément le prix de revient de la protection et son efficacité acoustique. Dans une optique de développement durable, un travail a été réalisé sur l'efficacité de protections acoustiques de faible hauteur en milieu urbain dans le but de créer des espaces calmes. Des mesures sur modèles réduits ont été confrontées aux simulations acoustiques et l'optimisation de la forme de ces protections a permis de dégager des solutions optimales. Enfin, les méthodes d'optimisation ont été appliquées au cas de l'optimisation de trajectoires.

Les principaux objectifs de la thèse ont été atteints, notamment par la création d'un outil utilisant des algorithmes d'optimisation (Nelder Mead et Algorithmes Génétiques) ainsi que les codes de calculs de simulation acoustique en milieu extérieur.

**Mots clefs** : Acoustique environnementale, Propagation acoustique en milieu extérieur, Ecran anti-bruit, Méthode des éléments finis de frontière, Algorithme d'optimisation, Algorithme Nelder Mead, Algorithme Génétique

## **Optimization of complex noise barriers**

**Abstract** - Nowadays, transportation noise is one of the main bother in people's mind. Acousticians have worked a lot to increase the acoustical efficiency of noise barriers without worsening the landscape.

Currently, noise barriers proposed are mainly classical ones or can be anticipated from parametric studies. However, CSTB developed advanced numerical codes which allow to simulate the outdoor sound propagation. The aim of this thesis is to combine the simulating codes with optimization algorithms in order to carry out a true systematic research and to find optimal solutions.

Optimization methods have been studied and a couple of them chosen to be applied to the optimization of parameters determining noise barriers. First, they have been successfully applied to multiple edge noise barriers. Moreover, some multiobjective optimization methods have been implemented in order to optimize both the acoustical efficiency and the cost of the protection. A sustainable development approach concerning urban areas has lead to consider low height noise protections in order to create quiet areas. Scale measurements have been performed and compared with simulations. Finally, optimization methods have been applied to low height noise protection to optimize their shape; optimal solutions have been found. Lastly, the optimization tool has been used to optimize trajectories in homogeneous and inhomogeneous mediums.

Main objectives of this PhD thesis have been reached, especially by developing an original tool using optimisation methods (Nelder Mead algorithm and Genetic Algorithms) and numerical codes simulating outdoor sound propagation.

**Keywords** : Environmental acoustics, Outdoor sound propagation, Noise barrier, Boundary element method Optimization algorithm, Nelder Mead algorithm, Genetic algorithm

Thèse préparée au sein du Département  
Acoustique et Eclairage du Centre Scientifique et  
Technique du Bâtiment  
(24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint Martin  
d'Hères, France)

