

Une méthodologie pour l'optimisation d'écrans anti-bruit routiers de faible épaisseur et forme géométrique complexe en utilisant des algorithmes évolutionnaires et la méthode des éléments de frontière

R. Toledo, J. Aznarez, O. Maeso et D. Greiner

Universidad Las Palmas de Gran Canaria, Edificio Central Parque Científico y Tecnológico, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas De Gran Canaria, Espagne
rayco.toledo102@alu.ulpgc.es

Ce travail vise à évaluer l'efficacité acoustique de différents modèles d'écrans anti-bruit de faible épaisseur. Ces dessins ont fréquemment des profils complexes et leur implémentation dans des procédures d'optimisation de formes peut ne pas être toujours facile en termes de détermination de leur faisabilité topologique. Une méthodologie utilisée pour mener à bien l'optimisation de la conception de la forme d'écrans anti-bruit de section mince en les considérant comme profils d'épaisseur nulle est ici proposée. Cette simplification de la réalité facilite grandement la définition géométrique des profils d'écrans, n'ayant pas une influence importante sur la performance acoustique. Dans le droit fil d'études antérieures, la procédure présentée dans ce rapport est fondée sur la maximisation de la perte par insertion de profils de candidats proposés par un algorithme évolutionnaire. En tant qu'application, des simulations numériques de la performance de différentes configurations d'écrans, qui présentent un intérêt pratique, sont menées au moyen d'un code 2D basé sur la méthode des éléments de frontière. L'utilisation d'une formulation additionnelle (hyper-singulier) de la méthode des éléments de frontière combinée à la formulation classique (singulier) offre un système d'équations compatible permettant de résoudre le problème. Les résultats obtenus montrent l'utilité, la flexibilité et la polyvalence de la procédure proposée.

1 Introduction

L'installation d'écrans antibruit constitue la stratégie le plus couramment utilisée pour minimiser les effets négatifs du bruit de la circulation dans des zones résidentielles. De nombreux travaux de recherche se concentrent sur la diffraction sonore autour des barrières ont été réalisés dans les deux décennies passées, particulièrement sur la prédiction de la performance et le développement des conceptions les plus efficaces. Entre toutes les diverses méthodes numériques disponibles pour adresser le problème, la méthode des éléments de frontière (ci-après BEM, selon ses sigles en anglais) est une des largement abordées dans la littérature et elle a été amplement appliquée afin d'évaluer la performance acoustique d'écrans antibruit par les auteurs de ce travail [1]. Les algorithmes évolutifs (AE) conjointement avec la BEM ont été largement utilisés ces dernières années dans l'optimisation de formes d'écrans pour résoudre des problèmes d'acoustique en milieu extérieur. Duhamel [2] part d'une structure volumétrique divisée en blocs de dimensions identiques pour arriver à la forme finale optimisée de l'écran antibruit avec blocs et sans vides internes. Baulac et al. [3] étudient le comportement de barrières du type T caractérisées par le fait de disposer, dans sa partie supérieure, de différentes configurations de puits avec des surfaces absorbantes. Greiner et al. [4, 5] mènent une optimisation mono- et multi-objectif d'un écran en Y ; la prise en considération des incertitudes dans la conception optimale a été traitée dans [6]. Grubeša et al. [7] réalisent l'étude d'une optimisation aussi bien du comportement acoustique que de la viabilité économique d'une barrière acoustique 3D construite à partir de différents modules à section variable. Une étude plus récente, réalisée par Deb et al. [8], comprend aussi l'introduction d'une procédure dite d'innovization pour la conception optimale multi-objective d'écrans acoustiques. La procédure proposée dans cet article utilise la formulation duale de la méthode des éléments de frontière dans le domaine fréquentiel combinée avec un algorithme évolutif afin d'optimiser deux conceptions complexes d'écrans de faible épaisseur, en simplifiant et en idéalisant mathématiquement leur géométrie comme profils d'épaisseur nulle. Cette simplification facilite grandement le traitement de configurations complexes, sans avoir aucune influence sur leur réponse acoustique [9]. L'expression de la fonction objectif (FO) qu'on vise à maximiser s'exprime en termes de cette réponse. La nature particulière de ce type de barrière implique que chaque nœud de la discrétisation contient les valeurs de pression

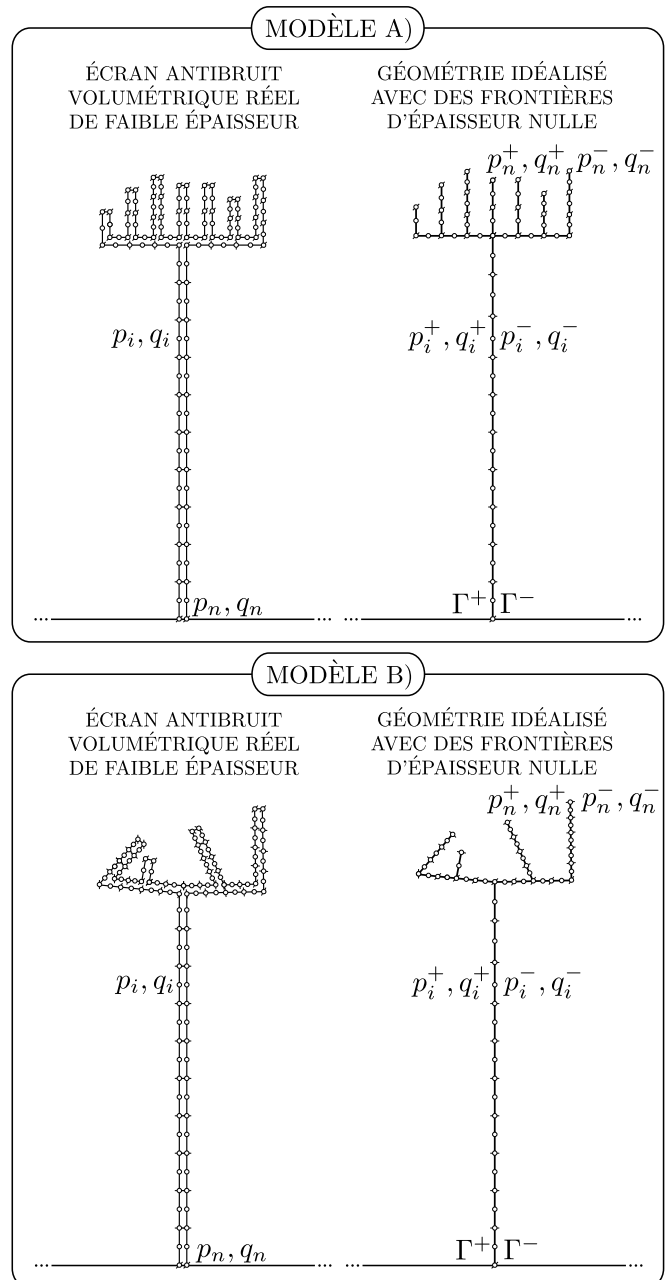


FIGURE 1 – Convenance de la représentation de structures volumétriques réelles comme des géométries idéalisées avec des frontières d'épaisseur nulle. Gauche, un exemple de la discrétisation de la frontière du modèle A). Droite, exemple de la discrétisation de la frontière du modèle B).

et de flux dans les deux côtés de la frontière, c'est-à-dire, $2n$ inconnues pour n nœuds. L'utilisation d'une formulation additionnelle (hypersingulier) de la méthode des éléments de frontière combinée à la formulation classique (singulier) offre un système d'équations compatible permettant de résoudre le problème. L'utilisation conjointe de la BEM Duale et d'un AE permet d'obtenir solutions acoustiques intéressantes en évitant la complexité associée à la génération géométrique d'écrans volumétriques (Figure 1).

2 Description de la procédure proposée

La Figure 2 montre la configuration générale étudiée. Il s'agit d'un problème bidimensionnelle qui présente une source sonore mono-fréquence, cohérente et infinie située parallèlement à une barrière acoustique de faible épaisseur qui se trouve sur un plan (sol) de admittance uniforme. Le sol et la barrière présentent une surface parfaitement réfléchissante dans ce travail ($\beta_s = \beta_b = 0$). La surface de la région faisable où se trouve l'écran antibruit est définie comme une section trapézoïdale, dont les dimensions sont déterminées par la projection horizontale de la barrière sur le sol, qui est constante et $d_p = 1,0$ m, et la hauteur maximale effective qu'elle peut atteindre, qui est $h_{ef} = 3,0$ m sur la médiane du trapèze rectangle. Un seul récepteur est considéré dans le côté d'ombre. La source sonore et le récepteur se situent à une hauteur de $h_f = h_r = 1,5$ m sur le sol et à une distance $d_f = d_r = 2,5$ m de la région faisable, respectivement.

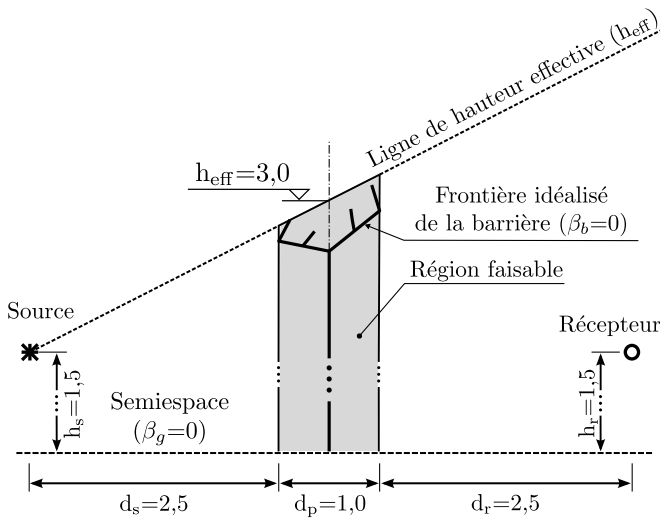


FIGURE 2 – Configuration bidimensionnelle utilisée dans l'optimisation d'écrans antibruit de faible épaisseur. Les distances sont exprimées en mètres [m].

Afin de mener à bien une procédure d'optimisation dans laquelle l'excitation est représentée par une source de bruit émettant à chaque fréquence du spectre, l'efficacité acoustique de l'écran dans la position du récepteur étudié peut être quantifiée comme suit :

$$\overline{IL} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^{NF} 10^{(A_i - IL_i)/10}}{\sum_{i=1}^{NF} 10^{A_i/10}} \right) \text{ [dBA]} \quad (1)$$

NF étant le nombre de fréquences étudiées du spectre considéré, dans ce cas $NF = 18$, A_i est le niveau de bruit pondéré du spectre et IL_i le coefficient de perte par insertion (IL selon ses sigles en anglais), défini, comme il est d'usage, comme la différence de niveaux de pression acoustique dans le récepteur dans la situation avec (P_B) et sans (P_{HS}) barrière :

$$IL = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_B}{P_{HS}} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

Le spectre utilisé dans ce travail est le spectre normalisé du bruit de trafic routier, pondéré A, défini par la ISO 717.2, caractérisé pour fréquences centrales de tiers d'octave dans la plage entre 100 et 5 000 Hz [10].

En ce qui concerne l'estimateur utilisé au cours du processus d'optimisation de formes, il convient de signaler qu'il se base sur la valeur moyenne globale du IL pour le récepteur considéré :

$$FA = \max(\overline{IL}) \quad (3)$$

Cette valeur correspond à ce qu'on appelle *fonction objectif* (FO) à maximiser, conformément à la terminologie propre au domaine des algorithmes évolutionnaires.

L'optimisation de forme s'effectue par le biais du couplage d'un AE et de la formulation duale de la méthode des éléments de frontière. Une description de la méthodologie suivie dans ce travail relative à l'évaluation de la performance acoustique d'écrans de faible épaisseur peut être consultée dans [9, 11]. Le logiciel employé pour le AE dans ce travail utilise le paquet GALib [12], une collection de composants de algorithmes génétiques écrits en langage C++. Dans cette étude, on utilise un AE stationnaire qui rend possible le remplacement des deux pires individus (en termes de leur fonction objectif) dans chaque génération, composée d'un total de 100 individus. On implémente l'opérateur de croisement d'un point, dont la probabilité est de 0,9. La probabilité de mutation est considérée égale à $1/n_{ch}$, n_{ch} étant la longueur totale du chromosome ($n_{ch} = 8xn$ où n est le nombre de variables de conception, chaque une avec une précision de 8 bits). Cinq exécutions du processus d'optimisation sont considérées pour chaque modèle d'écran. La condition d'arrêt du processus est atteint pour 20 000 évaluations de la fonction objectif (FO). Un domaine transformé est considéré afin de faciliter le processus d'optimisation. Ce domaine abrite l'ensemble de variables de conception du modèle à étudier, désigné par (ξ_i, η_i) , et représente la région rectangulaire de l'espace de recherche pour le AE (voir la partie gauche de la Figure 3). Chaque point (ξ_i, η_i) dans le domaine transformé a son image (x_i, y_i) dans le domaine cartésien, qui est l'espace réel où opère l'écran.

La transformation de la Figure 3 peut être exprimée comme suit :

$$\begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} = \varphi_1 \begin{Bmatrix} x_1^m \\ y_1^m \end{Bmatrix} + \varphi_2 \begin{Bmatrix} x_2^m \\ y_2^m \end{Bmatrix} + \varphi_3 \begin{Bmatrix} x_3^m \\ y_3^m \end{Bmatrix} + \varphi_4 \begin{Bmatrix} x_4^m \\ y_4^m \end{Bmatrix} \quad (4)$$

étant :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \left(\frac{1}{2} - \xi\right)(1 - \eta) ; \varphi_2 = \left(\frac{1}{2} + \xi\right)(1 - \eta) \\ \varphi_3 &= \eta \left(\frac{1}{2} + \xi\right) ; \varphi_4 = \eta \left(\frac{1}{2} - \xi\right) \end{aligned} \quad (5)$$

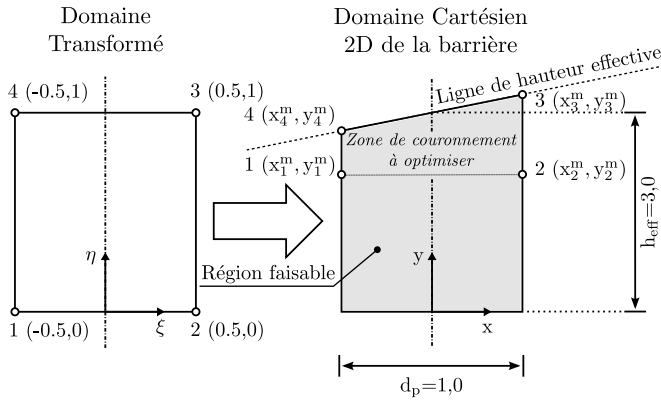


FIGURE 3 – Systèmes bidimensionnelles. Les distances sont exprimées en mètres [m].

où se démontre facilement que :

$$\begin{aligned}
 x_1^m &= x_4^m = -\frac{d_p}{2} ; x_2^m = x_3^m = \frac{d_p}{2} ; y_1^m = y_2^m = \frac{5}{6} h_{\text{eff}} \\
 y_3^m &= \left(\frac{d_s}{d_s + (d_p/2)} \right) (h_{\text{eff}} - h_s) + h_s \\
 y_4^m &= \left(\frac{d_s + d_p}{d_s + (d_p/2)} \right) (h_{\text{eff}} - h_s) + h_s
 \end{aligned} \quad (6)$$

Dans ce travail on étudie deux modèles d'écrans acoustiques (Figure 4). Le point gisant sur le sol (0) est fixe et la géométrie de couronnement des deux modèles repose sur le pied de la barrière, une barre fixe verticale de 2,5 m de hauteur. La projection horizontale (d_p) et la hauteur effective (h_{eff}) sont les mêmes dans les deux modèles. Le modèle A) s'agit d'une configuration avec sept branches verticales qui se situent sur un plateau horizontal. La distance entre branches reste constante ($d_p/6$) tandis que leur longueur se modifie au cours du processus d'optimisation. Le modèle B) est une évolution du largement étudié écran en Y, en incorporant deux bras additionnels dans chaque bras de cette configuration. Les bras centraux sont situés sur le milieu des bras principaux de la barrière, tandis que les bras latéraux sont placés sur les extrémités de ces bras. Les variables de conception qui définissent l'inclinaison des bras principaux ont une mobilité limitée qui permet seulement des déplacements verticaux (η_1 y η_6) tout au long des limites latéraux de la région faisable. La validité topologique de ce modèle exige qu'il n'ait pas des intersections entre les frontières de la barrière et que les contours des points du 2 au 5 se trouvent dans la zone de la région faisable comprise entre les bras principaux et la ligne que délimite la hauteur maximale effective à atteindre par la barrière.

3 Résultats et discussion

Les résultats inclus dans cette section montrent les configurations du meilleur profil optimisé pour chaque modèle proposé, ainsi que un analyse en fréquence des valeurs de IL comparées aux valeurs correspondant à l'écran simple de $h_{\text{eff}} = 3,0$ m de hauteur pour la même configuration source-récepteur (Figure 5). Afin de faciliter l'interprétation des stratégies de blindage les plus performantes dans les deux modèles, la Figure 6 montre en

forme de cartes de couleurs les valeurs de IL pour la région étudiée et pour la zone de couronnement des meilleurs individus des deux modèles. Intuitivement, les zones où les niveaux sonores sont plus élevés sont représentées par des couleurs chaudes. Ainsi, les couleurs froides caractérisent les zones où la réduction de bruit est plus importante grâce à la présence de l'écran.

À la lumière des résultats, l'analyse suivante est effectuée :

- Dans la ligne d'autres auteurs ([13, 14, 15, 16, 17]), agir sur la partie supérieure de la barrière s'est avérée une stratégie appropriée pour minimiser l'impact acoustique. Cela ressort clairement du fait que les plus hauts niveaux d'énergie acoustique sont retenus entre les frontières supérieures des modèles étudiés dans ce travail (voir les cartes dans la partie droite de la Figure 6).
- Les conceptions de barrières proposées semblent être une alternative valable et réussie à l'écran antibruit simple, battant nettement son efficace acoustique (au dessus de 15 dBA) pour la hauteur efficace maximale permise ($h_{\text{eff}} = 3,0$) m et la configuration source-récepteur considérée.

4 Conclusions

Dans cet article on a présenté un protocole d'optimisation de conceptions qui rend possible l'idéalisation d'écrans antibruit de faible épaisseur comme des géométries d'épaisseur nulle. Cette procédure a été appliqué pour optimiser la zone de couronnement de deux modèles concrets de barrières, bien qu'elle ait un large domaine d'application permettant la considération des solutions topologiques diverses et complexes, des écrans caractérisés par contours droits jusqu'aux conceptions basées sur des géométries courbes [18].

La polyvalence et flexibilité du algorithme de génération de géométries rendent possible la création de conceptions complexes de barrières de manière simple. C'est un considérable avantage face à la génération de géométries d'écrans réels, dont le processus qui détermine la validité topologique des individus proposés par un AE est complexe et exige souvent la considération de diverses situations spécifiques (l'intersection entre les frontières liées à l'épaisseur des bras et la ligne qui définit la hauteur effective, des restrictions liées aux connectivités entre des frontières qui partent d'un point commun de l'écran, etc.).

La procédure proposée se présente comme une méthode utile pour l'analyse de la performance acoustique de conceptions complexes d'écrans de faible épaisseur, permettant de tirer des conclusions qui résulteraient difficiles à atteindre sans son implémentation.

Remerciements

Ce travail a été financé par la Subdirección General de Proyectos de Investigación du Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) de l'Espagne et FEDER par le biais du projet de recherche BIA2010-21399-C02-01 et aussi par la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y

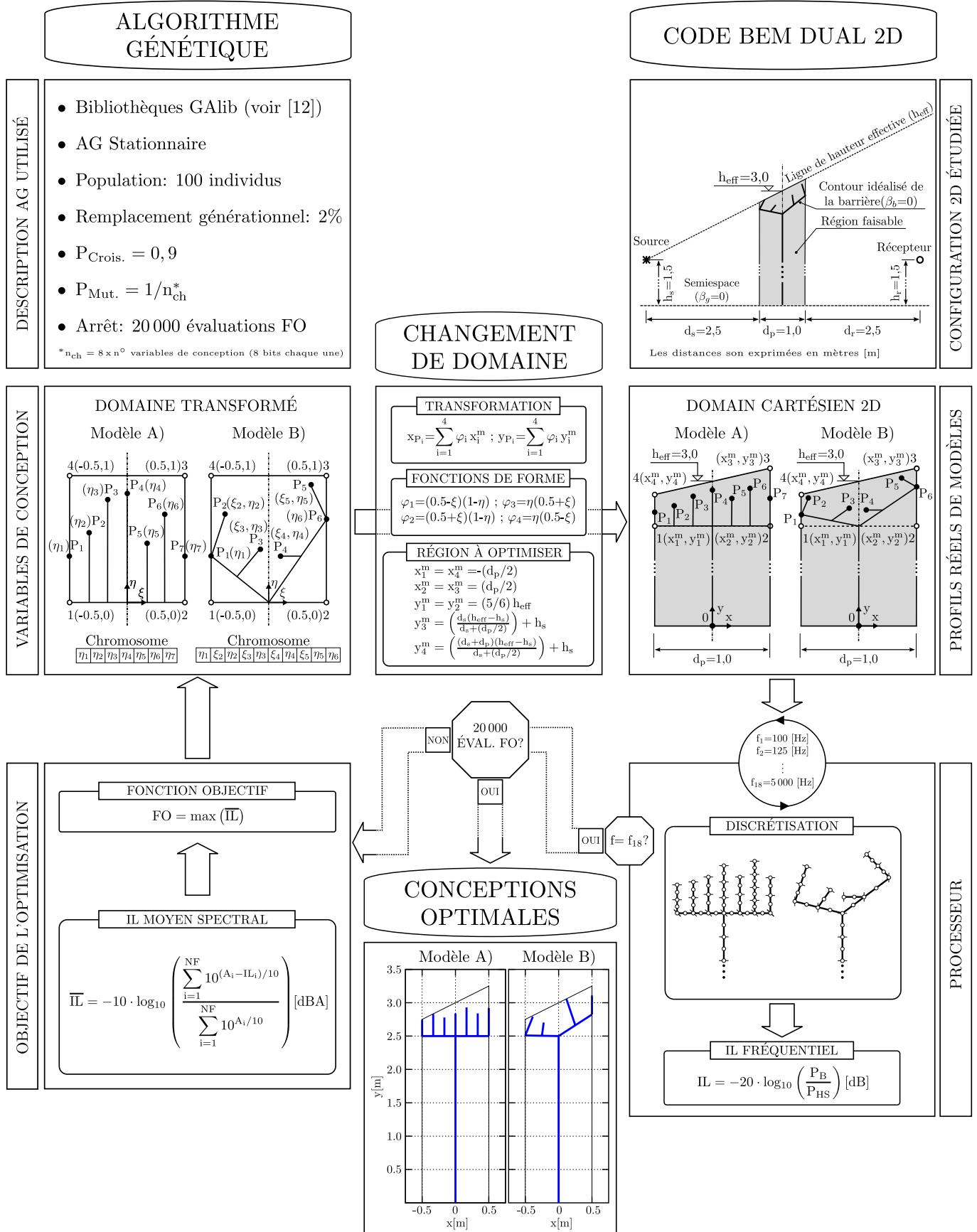


FIGURE 4 – Caractéristiques du algorithme génétique utilisé, description du problème étudié et diagramme de flux de l'optimisation.

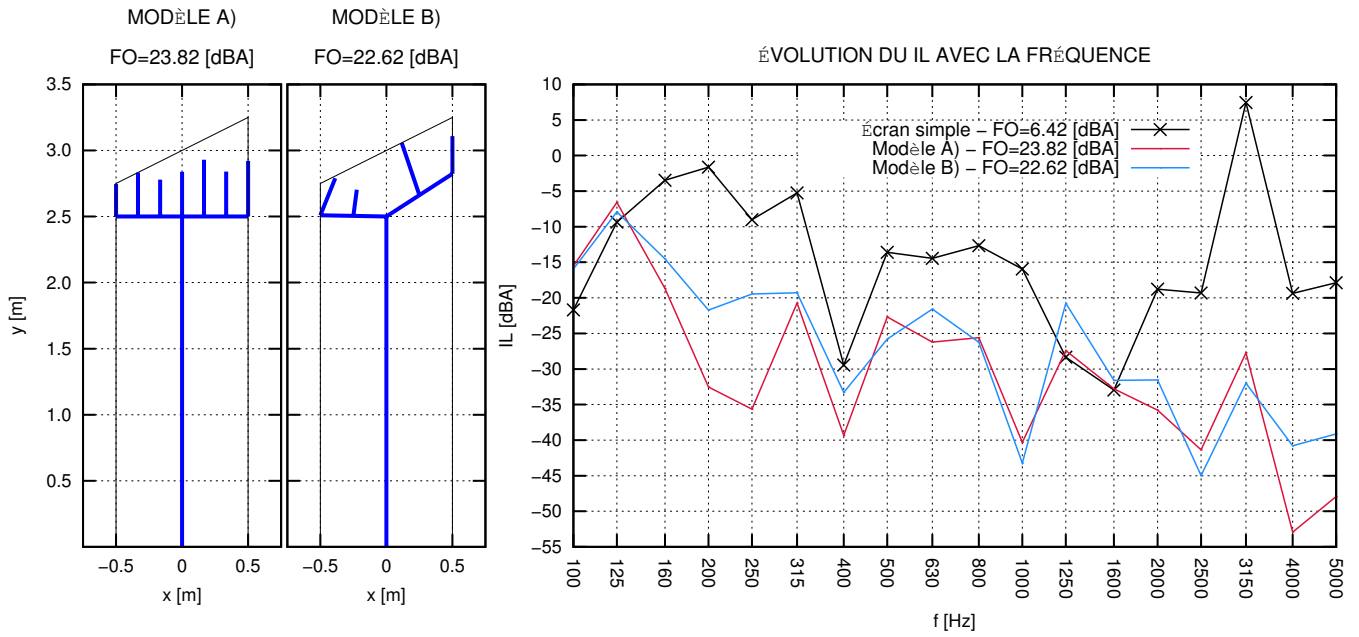


FIGURE 5 – Conceptions optimisées et évolution du IL fréquentiel.

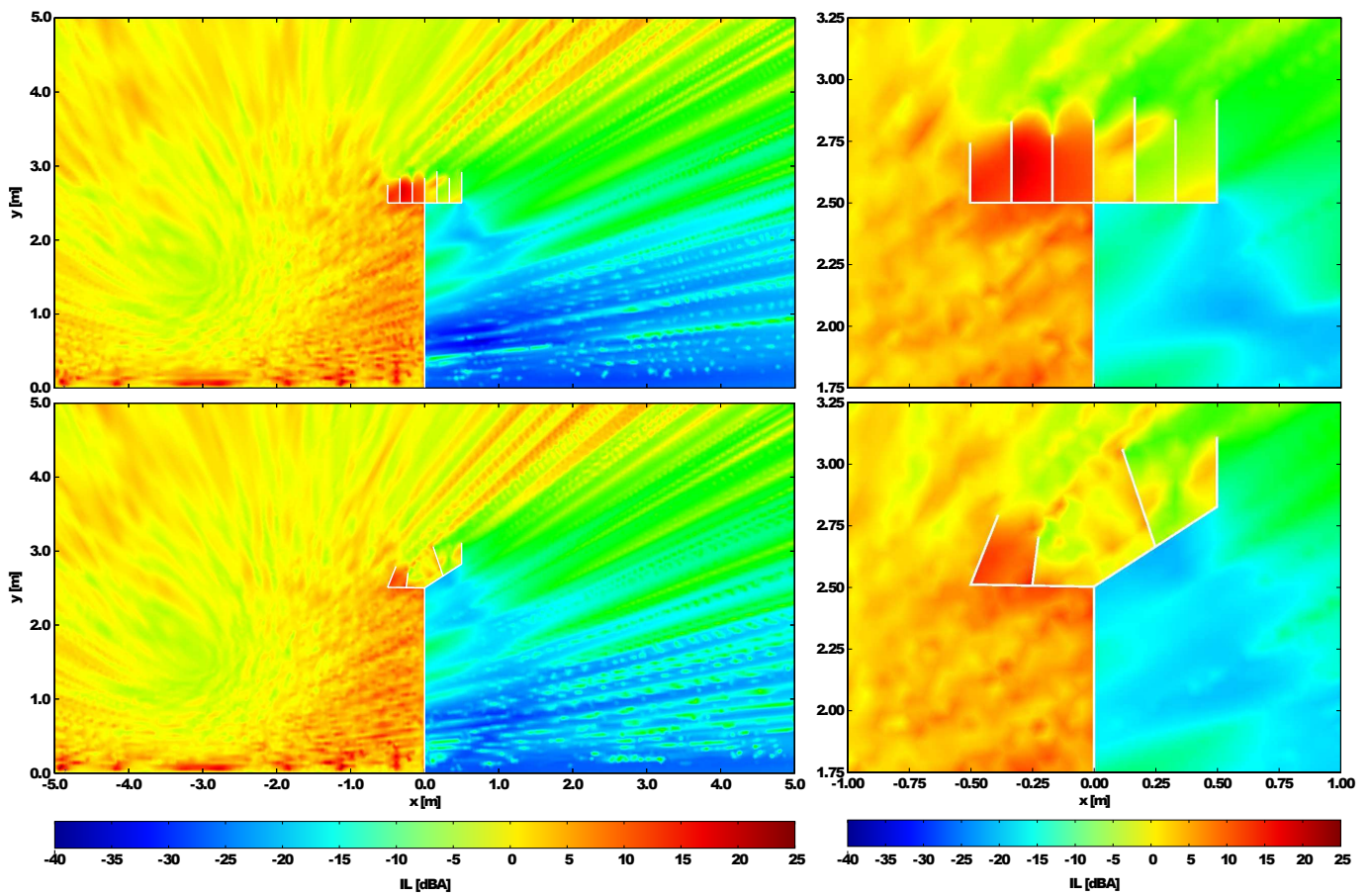


FIGURE 6 – Carte de couleurs de \overline{IL} (de l'équation (1)) des modèles étudiés.

Sociedad de la Información (ACIISI) du Gouvernement des Îles Canaries et FEDER par la biais du projet de recherche ProID20100224. R. Toledo est bénéficiaire d'une bourse du Sous programme de Bourses Prédoctorales de Personnel de Recherche en Formation (FPI-MICINN), accordées par le Ministerio de Ciencia e Innovación de l'Espagne. Les auteurs sont reconnaissants pour ce soutien. Les auteurs tiennent à remercier Cristina Medina pour la traduction de l'article en français.

Références

- [1] O. Maeso and J. J. Aznárez. Estrategias para la reducción del impacto acústico en el entorno de carreteras. Una aplicación del Método de los Elementos de Contorno. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*. ISBN : 84-689- 0340-X, <http://hdl.handle.net/10553/1500>, doi :846890340X, 2005.
- [2] D. Duhamel. Shape optimization of noise barriers using genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **297**, 432–443, 2006.
- [3] M. Baulac, J. Defrance and P. Jean. Optimization of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a Nelder-Mead local search. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **300**, 71–87, 2007.
- [4] D. Greiner, J. J. Aznárez, O. Maeso and G. Winter. Shape design of noise barriers using Evolutionary optimization and Boundary Elements. *The Fifth International Conference on Engineering Computational Technology, Civil-Comp-Press, Stirlingshire, UK : Civil-Comp Press*, Vol. **43**, 2006.
- [5] D. Greiner, J. J. Aznárez, O. Maeso and G. Winter. Single- and multi-objective shape design of Y-noise barriers using Evolutionary computation and Boundary Elements. *Advances in Engineering Software, Elsevier*, Vol. **41**, 368–378, 2010.
- [6] D. Greiner, B. Galván, J. J. Aznárez, O. Maeso and G. Winter. Robust design of noise attenuation barriers with Evolutionary multiobjective algorithms and the Boundary Element Method. *Lecture Notes in Computer Science, Evolutionary Multi-Criterion optimization, Eds : M. Ehrgott et al., Springer*, Vol. **5467**, 261–274, 2009.
- [7] S. Grubeša, K. Jambrošić and H. Domitrović. Noise barriers with varying cross-section optimized by genetic algorithms. *Applied Acoustics*, Vol. **73**, 1129–1137, 2012.
- [8] K. Deb, S. Bandaru, D. Greiner, A. Gaspar-Cunha and C. Celal Tutum. An integrated approach to automated innovization for discovering useful design principles : Case studies from engineering. *Applied Soft Computing*, Vol. **15**, 42–56, 2014.
- [9] L. de Lacerda, L. Wrobel and W. Mansur. A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **202(2)**, 235–247, 1997.
- [10] ISO 717.2 - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2 : Impact sound insulation, 1997.
- [11] A. Tadeu, J. António, L. Godinho and P. A. Mendes. Simulation of sound absorption in 2D thin elements using a coupled BEM/TBEM formulation in the presence of fixed and moving 3D source. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **331**, 2386–2403, 2012.
- [12] M. Wall (Ed.). GALib : A C++ Library of Genetic Algorithm Components (<http://lancet.it.edu/ga/>). *Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology*, 1996.
- [13] M. Baulac, J. Defrance and P. Jean. Optimisation with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface. *Applied Acoustics*, Vol. **69**, 332–342, 2008.
- [14] G. Watts and P. Morgan. Acoustic performance of an interference type noise- barrier profile. *Applied Acoustics*, Vol. **49(1)**, 1–16, 1996.
- [15] M. Monazzam and Y. Lam. Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers. *Applied Acoustics*, Vol. **66**, 709–730, 2005.
- [16] Ishizuka and K. Fujiwara. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. *Applied Acoustics*, Vol. **65**, 125–141, 2004.
- [17] Okubo and K. Fujiwara. Efficiency of a noise barrier on the ground with an acoustically soft cylindrical edge. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **216(5)**, 771-790, 1998.
- [18] R. Toledo, J. J. Aznárez, O. Maeso and D. Greiner. A comparative study on design optimization of polygonal and Bézier curve-shaped thin noise barriers using dual BEM formulation. *International Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems (EUROGEN)*, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2013.