Imagerie acoustique pour les milieux de travail : développement d'un algorithme performant pour une antenne sphérique de microphones

par

Kévin ROUARD

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTRÉAL, LE 2026-10-03

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Kévin ROUARD, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Olivier Doutres, directeur de thèse
Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure

M. Franck Sgard, codirecteur
Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail

M. Conrad Boton, président du jury
Département de Génie de la Construction, École de Technologie Supérieure

M. Thomas Dupont, membre du jury
Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure

M. Thomas Padois, examinateur externe
Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail

M. Patrice Masson, examinateur externe indépendant
Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 2026-09-08

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à cette aventure scientifique et humaine.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon directeur de thèse, Olivier Doutres, pour son accompagnement tout au long de ce parcours. Ses questions pertinentes, ses suggestions éclairées et ses encouragements constants ont nourri ma réflexion et enrichi mon travail. Son soutien indéfectible a été une source précieuse de motivation.
Je suis également reconnaissant envers mon codirecteur, Franck Sgard, dont l'expertise et les conseils avisés sur le formalisme mathématique ont été d'une aide inestimable.
Je remercie vivement Thomas Padois pour son expertise et ses connaissances dans le domaine, qui ont largement contribué à la réussite de cette thèse.
De même, je remercie Michel Drouin et Alain Grimard pour la conception de l'électronique et le câblage du prototype d'antenne développé à L'ÉTS.
Je remercie également tous les contributeurs du projet, Alain Berry, Nicolas Quaegebeur, Hugues Nélisse, François Grondin, Loïc Boileau, Julien St-Jacques, et Loïc Forma.

Je remercie chaleureusement M. Conrad Boton, président du jury, ainsi que l'ensemble des membres du jury, pour le temps consacré à l'évaluation de mon travail et pour leurs commentaires enrichissants, qui ont permis d'affiner ma réflexion.
Je tiens également à exprimer ma gratitude envers l'ÉTS pour les ressources mises à disposition ainsi que le soutien logistique qui a grandement facilité la réalisation de ce projet de recherche.

Je souhaite aussi remercier mes collègues du laboratoire, Hugo, Kévin, Bastien, Maël, Gauthier, Lucie, Maxime, Solenne, Stanislas, Quentin, Robin et Toumia, pour nos échanges et les nombreux moments de partage qui ont rythmé ces années de thèse.
Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes amis Samuel et Louis-Gabriel, à ma sœur Alexandra, à ma mère Thérèse et surtout à mon épouse Mélanie, pour leur soutien inébranlable, leur patience et leur présence essentielle dans cette aventure.
À vous tous, un immense merci.

Imagerie acoustique pour les milieux de travail : développement d'un algorithme performant pour une antenne sphérique de microphones

Kévin ROUARD

RÉSUMÉ

Le bruit en milieu de travail est un enjeu de santé publique majeur. Il peut causer des troubles auditifs irréversibles, notamment la surdité professionnelle, qui demeure la maladie professionnelle la plus coûteuse au Québec. Identifier les sources de bruit constitue donc une étape essentielle pour mettre en œuvre des mesures correctives efficaces. Dans ce contexte, l'imagerie acoustique à l'aide d'une antenne sphérique de microphones (ASM) constitue une solution prometteuse pour localiser précisément les sources de bruit dans des environnements complexes. La littérature propose une grande variété de configurations d'ASM (ouvertes ou rigides), avec des géométries disposant les microphones de diverses manières. Cependant, les critères objectifs pour choisir une géométrie optimale en fonction des performances acoustiques restent limités. Par ailleurs, les algorithmes classiques de localisation — tels que la formation de faisceaux conventionnelle (CBF) ou la décomposition en harmoniques sphériques (SHB) — souffrent d'une résolution insuffisante en basses fréquences, en raison d'un lobe principal trop large, rendant la localisation des sources peu précise. Cette thèse vise à développer un algorithme performant pour la localisation de sources en basses fréquences, en s'appuyant sur trois critères : le niveau estimé de la source, la taille angulaire du lobe principal à -3 dB (angle solide), et le rapport entre le niveau du lobe principal et celui des lobes secondaires. Quinze géométries de distribution de microphones sont comparées, représentant un total de 318 240 images acoustiques simulées en champ libre. Pour la première fois, les géométries "Maximal Volume", "Efficient *t*-design", "L-design" et "Maximum Determinant" sont évaluées dans ce contexte. Les résultats démontrent que l'utilisation d'une ASM ouverte avec une géométrie "*t*-design" offre les meilleures performances avec le CBF, tandis que les ASM rigides associées au SHB sont plus efficaces (avec la diffraction prise en compte). Un second volet explore un algorithme dit "virtuel", permettant de modifier virtuellement le rayon de l'antenne avec un pseudo-inverse basé sur la fonction de Green (VPIG). Ceci améliore significativement la résolution en basses fréquences. Cette approche est validée expérimentalement à l'aide d'un prototype d'ASM ouverte "*t*-design" à 24 microphones et 5 cm de rayon, démontrant l'efficacité de l'algorithme VPIG combiné avec une régularisation adaptée jusqu'à 160 Hz. Ce travail contribue au développement d'un système d'imagerie acoustique compact, rapide et performant, adapté aux contraintes du milieu de travail, et améliore de façon significative la capacité de localisation des sources de bruit en basses fréquences.

Mots-clés: imagerie acoustique, antenne sphérique de microphones, *beamforming*, localisation de sources, algorithme virtuel, milieu de travail

Acoustic Imaging for Work Environments : Development of a High-Performance Algorithm for a Spherical Microphone Array

Kévin ROUARD

ABSTRACT

Noise in the workplace is a major public health issue. It can cause irreversible hearing damage, including occupational deafness, which remains the most costly occupational disease in Québec. Identifying noise sources is therefore a critical step in implementing effective corrective measures. In this context, acoustic imaging using spherical microphone arrays (SMA) offers a promising solution for accurately locating sound sources in complex environments. The literature presents a wide range of SMA configurations (open or rigid), with various microphone geometries. However, objective criteria for selecting an optimal geometry based on acoustic performance are still limited. In addition, classical localization algorithms — such as Conventional Beamforming (CBF) or Spherical Harmonic Beamforming (SHB) — suffer from insufficient resolution at low frequencies due to a wide main lobe, which reduces localization accuracy. This thesis aims to develop a high-performance algorithm for low-frequency source localization based on three criteria : the estimated source level, the angular width of the main lobe at -3 dB (solid angle), and the ratio between the main lobe level and secondary lobe levels. Fifteen microphone distribution geometries are compared, leading to a total of 318,240 simulated acoustic images in free field conditions. For the first time, the geometries "Maximal Volume", "Efficient *t*-design", "L-design", and "Maximum Determinant" are evaluated in the field of acoustic imaging. The results show that using an open SMA with a "*t*-design" geometry leads to optimal performance when using the CBF algorithm. In contrast, rigid SMAs combined with SHB yield superior results when diffraction is properly modelled. A second part explores a so-called virtual algorithm, which allows the virtual modification of the antenna radius : using a Green's function-based pseudo-inverse (VPIG), significantly improves low-frequency resolution. This approach is experimentally validated using a 24 microphone, 5 cm-radius open *t*-design SMA prototype, demonstrating the effectiveness of the VPIG algorithm combined with appropriate regularization down to 160 Hz. This work contributes to the development of a compact, fast, and high-performance acoustic imaging system tailored to the constraints of work environments, significantly enhancing the localization of sound sources in low-frequency ranges.

Keywords: acoustic imaging, spherical microphone array, beamforming, source localization, virtual algorithms, workstations

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1
0.1 Contexte 1
0.1.1 L'exposition au bruit en milieu de travail 1
0.1.2 Mesures correctives pour réduire l'exposition au bruit 2
0.1.3 Les instruments de mesure pour le diagnostic acoustique 3
0.1.4 L'imagerie acoustique 4
0.2 Problématique de recherche 5
0.2.1 Une très grande variété d'antennes sphériques de microphones (ASM) 6
0.2.2 Des images acoustiques de qualité insuffisante en basses fréquences 6
0.2.3 Bilan 7

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 9
1.1 Les antennes sphériques de microphones 9
1.1.1 Caractéristiques des ASM 9
1.1.2 Comparaison des ASM 11
1.2 Formulation des algorithmes pour l'imagerie acoustique 12
1.3 Les algorithmes classiques 13
1.3.1 *Beamforming* conventionnel en fréquence (CBF) 13
1.3.2 *Beamforming* par harmoniques sphériques (SHB) 15
1.3.3 Comparaison des algorithmes classiques 18
1.4 Les algorithmes virtuels 19
1.4.1 Algorithme virtuel basé sur la fonction de Green 19
1.4.2 Algorithme virtuel avec l'holographie 20
1.4.3 Algorithme virtuel par méthode inverse et régularisation 20
1.4.4 Algorithme virtuel avec l'holographie et le krigeage 22
1.5 Les critères d'évaluation de performance des images acoustiques 23
1.5.1 Niveau de la source estimé dans l'image acoustique 23
1.5.2 Taille du lobe principal dans l'image acoustique 24
1.5.3 Différence de niveau entre le lobe principal et le lobe secondaire 25
1.6 Synthèse critique 25

CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET STRUCTURE DE LA THÈSE 29
2.1 Objectifs de la thèse 29
2.2 Structure de la thèse 30
2.2.1 Chapitre 3 : Méthodologie 30
2.2.2 Chapitre 4 : Résultats 30

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 33
3.1 Ensemble de géométries pour les ASM 33
3.2 Critères d'évaluation 39

3.2.1 Différence de niveau du lobe principal (DNLP) 39
3.2.2 Angle solide normalisé (ASN) 39
3.2.3 Niveau du lobe principal par rapport au lobe secondaire (MSR) 40
3.3 Simulations pour évaluer l'influence des différentes configurations d'ASM 41
3.4 Algorithme virtuel basé sur le pseudo-inverse de fonction de Green 45
3.5 Étude numérique pour évaluer l'algorithme VPIG 46
3.6 Développement et validation expérimentale 48
3.6.1 Développement d'un prototype d'ASM 48
3.6.2 Calibration des microphones par fonction de transfert 50
3.6.3 Configurations pour la validation expérimentale 50

CHAPITRE 4 RÉSULTATS 55
4.1 Influence de différentes conceptions d'ASM avec les algorithmes CBF et SHB 55
4.1.1 Influence des ASM selon la DNLP avec le CBF 55
4.1.2 Influence des ASM selon la DNLP avec le SHB 58
4.1.3 Influence des ASM selon l'ASN 61
4.1.4 Influence des ASM selon le MSR 62
4.1.4.1 Influence des ASM selon la distribution du MSR 65
4.1.4.2 Distribution du MSR avec le CBF 67
4.1.4.3 Distribution du MSR avec le SHB 69
4.1.4.4 Discussion 70
4.1.5 Conclusion 72
4.2 Étude numérique de l'algorithme VPIG avec une antenne ouverte 74
4.2.1 Choix de la géométrie pour la virtualisation en basses fréquences 74
4.2.2 Augmentation du rayon virtuel avec l'algorithme VPIG 76
4.2.3 Sensibilité de l'algorithme VPIG aux perturbations 80
4.2.3.1 Analyse du conditionnement 80
4.2.3.2 Modélisation des perturbations 82
4.2.3.3 Images acoustiques avec perturbation et régularisation 82
4.2.3.4 Influence des perturbations et de la régularisation sur l'ASN et le MSR 83
4.3 Validation expérimentale de l'algorithme VPIG avec une antenne ouverte 85
4.3.1 Validation du montage expérimentale avec l'algorithme CBF 86
4.3.2 Images acoustiques obtenues avec l'algorithme VPIG 89
4.3.3 Optimisation des paramètres d'agrandissement du rayon virtuel et de régularisation 90
4.3.4 Images acoustiques optimisées 97
4.3.5 Comparaison et combinaison des algorithmes CBF et VPIG avec l'algorithme hybride 98

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 101
5.1 Résumé des contributions principales 101
5.2 Limitation du travail 102
5.3 Portée et impact de l'étude 104

ANNEXE I TABLEAU DE CONVERSION KR_A 107

ANNEXE II ALGORITHME DE L'ANGLE SOLIDE 109

ANNEXE III RÉSULTATS DE CALIBRATION DES FONCTIONS DE TRANSFERTS 111

ANNEXE IV ALGORITHME DU CENTROÏDE 113

ANNEXE V MÉTHODE DE RÉGULARISATION 115

ANNEXE VI FACTEUR DE RÉGULARISATION AVEC L'ALGORITHME HYBRIDE 117

ANNEXE VII LISTES DES CONTRIBUTIONS PARUES DURANT CETTE THÈSE 121

BIBLIOGRAPHIE 125

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Formules du vecteur de balayage pour l'algorithme CBF 14

Tableau 1.2 Formules de gains pour l'algorithme SHB 17

Tableau 3.1 Résumé des géométries pour les ASM (première partie) 35

Tableau 3.1 Résumé des géométries pour les ASM (deuxième partie) 36

Tableau 3.2 Sélection de quinze géométries ainsi que leur nombre de microphones disponibles, donnant un total de 156 configurations. 44

Tableau 3.3 Dimensions des microphones 49

Tableau 4.1 Valeurs d'ASN, fréquences et kr_a 75

Tableau 4.2 Valeurs cibles d'ASN, de MSR et kr_{cible} 77

Tableau 4.3 Facteur d'agrandissement τ en fonction de la fréquence et des kr_{cible} .. 77

Tableau 4.4 Valeurs RSP, $\Delta\varphi_{\text{RMS}}$ et $\Delta\varphi_{\text{max}}$ 82

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 0.1 Schéma de l'émission de la source sonore à sa réception par l'antenne, puis au traitement des données jusqu'au résultat Image acoustique tirée de Padois, Doutres, Sgard & Berry (2019b) 5

Figure 1.1 Conception d'antennes sphériques à 36 microphones : (a) ouverte et (b) rigide Tirée de St-Jacques (2023) 11

Figure 1.2 Schéma et coordonnées d'une antenne sphérique de microphones 13

Figure 1.3 Principe d'un microphone virtuel 19

Figure 1.4 Description de l'image acoustique 24

Figure 3.1 Ordre maximal supporté par la géométrie N_{sup} et ordre maximal standardisé N_{max} 37

Figure 3.2 Les positions des géométries à 36 microphones ou au plus proche de ce nombre sont représentées dans le plan (ϕ,θ) 38

Figure 3.3 Images acoustiques illustrant le critère DNLP 39

Figure 3.4 Images acoustiques illustrant le critère d'ASN 41

Figure 3.5 Images acoustiques illustrant le critère MSR 41

Figure 3.6 Les configurations obtenues à partir de la simulation numérique 43

Figure 3.7 Étape de calcul pour produire une image acoustique avec l'algorithme VPIG 45

Figure 3.8 Schéma de l'antenne réelle et virtuelle face à une source 47

Figure 3.9 Antennes sphériques de microphones obtenues par impression 3D 49

Figure 3.10 Schéma-bloc du microphone, de la carte PCB et du boîtier d'alimentation 50

Figure 3.11 Calibration des microphones en salle réverbérante 51

Figure 3.12 Ensemble du dispositif de mesure 51

Figure 3.13 Point de vue depuis l'ASM en chambre anéchoïque 52

Figure 3.14 Étape de calcul pour produire une image acoustique avec l'algorithme VPIG régularisé 53

Figure 4.1 Le DNLP est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones 56

Figure 4.2 Le DNLP est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones 57

Figure 4.3 Le DNLP est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones 59

Figure 4.4 Le DNLP est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones 60

Figure 4.5 L'ASN est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones 62

Figure 4.6 L'ASN est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones 63

Figure 4.7 Le MSR est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones 64

Figure 4.8 Le MSR est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones 66

Figure 4.9 Distribution des MSR avec des ASM ouvertes de l'ensemble complet, avec le CBF et en fonction du nombre de microphones 68

Figure 4.10 Distribution du MSR avec les ASM ouvertes de l'ensemble limité, avec le CBF et en fonction du nombre de microphones 69

Figure 4.11 Distribution de MSR avec les ASM rigides de l'ensemble complet, avec le SHB et en fonction du nombre de microphones 71

Figure 4.12 Distribution du MSR avec les ASM rigides de l'ensemble limité, avec le SHB et en fonction du nombre de microphones 72

Figure 4.13 Sélection de géométrie pour antenne ouverte avec le CBF 76

Figure 4.14 Images acoustiques à 100 Hz 78

Figure 4.15 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour le CBF et l'algorithme VPIG 79

Figure 4.16 Nombre de conditionnement $\kappa(\check{\mathbf{G}}\mathbf{G}^{\dagger})$ en fonction de la fréquence. Le facteur d'agrandissement τ est varié à partir de trois kr_{cible} 81

Figure 4.17 Illustration de l'effet de perturbation sur les images acoustiques pour différentes valeurs de kr_{cible} 83

Figure 4.18 Illustration de l'effet de régularisation sur les images acoustiques pour $kr_{cible} = 2,53$ 84

Figure 4.19 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour l'algorithme VPIG 85

Figure 4.20 Critères de qualité d'une image acoustique en fonction de la fréquence pour l'algorithme VPIG sous perturbation 86

Figure 4.21 Validation expérimentale du montage avec le CBF - Images acoustiques 87

Figure 4.22 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour le CBF en chambre semi-anéchoïque 88

Figure 4.23 Images acoustiques avec l'algorithme VPIG 90

Figure 4.24 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de l'algorithme VPIG en chambre semi-anéchoïque 91

Figure 4.25 Champ de valeurs admissibles et trajectoire du centroïde 92

Figure 4.26 Convergence de l'algorithme de centroïde pondéré 94

Figure 4.27 Couples optimaux (τ, γ) et performances associées pour chaque fréquence avec barres d'erreurs 96

Figure 4.28 Images acoustiques optimisés de 130 Hz à 800 Hz 97

Figure 4.29 Images acoustiques à 315 Hz obtenues avec les algorithmes CBF, VPIG et hybride 99

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASM	Antenne sphérique de microphones
ASN	Angle solide normalisé
CBF	Formation de faisceaux conventionnelle dans le domaine fréquentiel - Conventional Beamforming in the Frequency domain
DNLP	Différence de niveau du lobe principal
MSR	Rapport des niveaux du lobe principal au maximum des lobes secondaires - Maximum Side-lobe to main-lobe Ratio
RSP	Rapport signal sur perturbation
SHB	Formation de faisceaux par harmoniques sphériques - Spherical Harmonic Beamforming
VPIG	Formation de faisceaux avec l'algorithme virtuel par pseudo-inverse de fonctions de Green

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Alphabet latin

$\mathbf{a}$	Vecteur de sources - Force (linéaire) (N/m=kg/s^2)
$\tilde{\mathbf{a}}$	Vecteur d'estimation de sources (kg/s^2)
$\mathbf{A}$	Matrice de la réponse de l'algorithme (kg^2/s^4)
$\mathbf{b}_n$	Vecteur de fonction de transfert
$\mathbf{C}$	Matrice interspectrale de puissance (Pa^2)
d	Gain du SHB
f	Fréquence (Hz = s^{-1})
f_s	Fréquence d'échantillonnage (Hz = s^{-1})
$\mathbf{g}$	vecteur de fonction de Green (m^{-1})
$\mathbf{G}$	Matrice de fonction de Green
$h_n^{(2)}$	Fonction de Hankel sphérique de seconde espèce
$\imath$	Nombre imaginaire pur, $\imath = \sqrt{-1}$
j_n	Fonction de Bessel sphérique de première espèce
k	Nombre d'ondes, $k = \omega/c$ (rad.m^{-1})
L	Nombre de points de focalisation
L_e	Niveau estimé donné par le lobe principal
L_r	Niveau de référence
L_s	Niveau du lobe secondaire
N	Ordre de troncature
$\mathbf{p}$	Vecteur de pression acoustique (Pa)
P_n^m	Fonction associée à Legendre
Q	Nombre de microphones
r	Rayon (m)
r_a	Rayon de l'antenne (m)
S	Nombre de sources

t	Temps (s)
$\mathbf{w}$	Vecteur de balayage
$\mathbf{W}$	Matrice de balayage
W	Fonction de filtrage
Y_n^m	Fonction d'harmoniques sphériques
$\mathbf{Y}$	Matrice de fonction d'harmoniques sphériques

Alphabet grec

α	Matrice de poids d'intégration
β	Facteur fractionné
γ	Facteur de régularisation
ε	Perturbation
η	Facteur de pondération
θ	Colatitude (rad)
Θ	Angle entre deux directions (rad)
λ	Longueur d'onde, $\lambda = 2\pi/k$ (m)
σ	Écart-type
τ	Facteur d'agrandissement du rayon
ϕ	Azimut (rad)
ϕ_e	Azimut estimé (rad)
φ	Phase perturbée
ω	Pulsation (Hz.rad)
Ω	Angle solide (sr)
$\overline{\Omega}$	Angle solide normalisé, exprimé en pourcentage (%)

Opérateurs

$\lceil \circ \rfloor$	Opérateur diagonal, donne la diagonale d'une matrice ou dispose un vecteur en une matrice diagonale

$\lceil \circ \rceil$	Partie entière supérieure d'un nombre
$\lfloor \circ \rfloor$	Partie entière inférieure d'un nombre
$\overline{\circ}$	Composante de vecteur
$\vec{\circ}$	Vecteur euclidien
$\breve{\circ}$	Opérande virtuel
$\hat{\circ}$	Transformée de Fourier
$\circ'$	Dérivée
$\circ^*$	Conjugué complexe
$\circ^\dagger$	Pseudo-inverse de Moore-Penrose
$\circ^H$	Produit hermitien (transposé-conjugué)
$\circ^T$	Transposée
$\odot$	Produit d'Hadamard
$\frac{\partial}{\partial \circ}$	Dérivée partielle
d	Opérateur différentiel

Exposants et indices

$\circ_{nm}$	Opérande modal par transformée sphérique
$\circ_n^m$	Ordre et degré d'harmonique sphérique
$\circ_m$	Indice d'ordre d'harmonique sphérique
$\circ_n$	Indice de degré d'harmonique sphérique
$\circ_l$	Indice de la grille de focalisation
$\circ_q$	Indice de microphone
$\circ_s$	Indice de source

Constantes

c	Vitesse du son, $c = 343$ (m.s^{-1})
p_{ref}	Pression sonore de référence, $p_{ref} = 20$ μPa
π	Constante d'Archimède, $\pi = 3,1415\ldots$
ρ_0	Masse volumique de l'air, $\rho_0 = 1.2$ kg/m^3

INTRODUCTION

0.1 Contexte

La santé auditive constitue un enjeu de santé publique à l'échelle mondiale. Le rapport mondial sur l'audition de l'Organisation Mondiale de la santé l'illustre clairement : plus de 1,5 milliard de personnes souffriront d'un déficit auditif au cours de leur vie (World health organization, 2021). Au-delà de la surdité, ces troubles peuvent entraîner du stress, de l'insomnie, voire des maladies cardiovasculaires. Parmi les interventions recommandées, la réduction du bruit en milieu de travail est identifiée comme une priorité tant en matière de prévention que de recherche.

La protection de l'audition des travailleurs est donc essentielle. La Section 0.1.1 présente le contexte de la surdité professionnelle, notamment au Québec. Différentes stratégies pour réduire l'exposition au bruit sont détaillées en Section 0.1.2. Afin de cibler les sources sonores, un diagnostic précis à l'aide d'instruments spécialisés est nécessaire (voir Section 0.1.3). La Section 0.1.4 introduit le principe de l'imagerie acoustique avec une antenne sphérique de microphones comme alternative à l'identification des sources sonores.

0.1.1 L'exposition au bruit en milieu de travail

Les travailleurs sont exposés à de nombreuses sources de bruit dans leur environnement professionnel. Ces sources peuvent être liées aux équipements de production, aux véhicules, aux systèmes de ventilation ou encore aux activités humaines. Certaines sont inhérentes à l'exécution des tâches de travail et participent au fonctionnement des activités professionnelles, notamment les signaux sonores de communication ou de sécurité (Smagowska, 2010; Robin, Krpic, Nélisse & Berry, 2020).

Selon Statistique Canada (2021), 60% des Canadiens âgés de 19 à 79 ans présentent un trouble auditif (surdité ou acouphène). Au Québec, les atteintes auditives liées au bruit professionnel

représentent la maladie professionnelle la plus coûteuse (Lebeau, Duguay & Boucher, 2014). En 2017, le coût sociétal était estimé à 2 milliards de dollars canadiens (INSPQ, 2023). Entre 2011 et 2021, le nombre de cas reconnus de surdité professionnelle a augmenté en moyenne de 12,1% par an. Aujourd'hui au Québec, 12% des travailleurs et 4% des travailleuses sont exposés à un bruit intense sur leur lieu de travail (Martin & Tissot, 2025). Les secteurs les plus touchés sont le secteur primaire (sylviculture, mines et carrières), les activités diverses de fabrication (bois, papier, plastique, viande) et la construction. Les lésions auditives constituent par ailleurs la catégorie de troubles professionnels dont la croissance est la plus rapide (Busque, Boucher, Lebeau & Bastien, 2020). Bien que le vieillissement de la population soit un facteur contributif, il ne suffit pas à expliquer cette hausse (Funes *et al.*, 2015).

Face à ce constat, le gouvernement du Québec a adopté en 2021 un décret visant à renforcer la protection auditive des travailleurs (Décret n°781, 2021). Depuis juin 2023, la valeur limite d'exposition quotidienne a été abaissée de 90 à 85 dB(A) sur 8 heures, et le facteur de bissection réduit de 5 à 3 dB(A). Concrètement, cela signifie qu'un travailleur ne peut plus être exposé à 95 dB(A) pendant 4 heures, mais seulement à 88 dB(A) pour la même durée. Cette mesure vise à mieux prévenir les atteintes auditives causées par une exposition prolongée au bruit.

0.1.2 Mesures correctives pour réduire l'exposition au bruit

Afin de réduire l'exposition des travailleurs au bruit, différentes mesures correctives peuvent être mises en œuvre. Elles sont classées par ordre d'efficacité (CNESST, 2023; Nélisse & Boulet, 2023) :

1. Supprimer, modifier ou remplacer la source.
2. Agir sur le chemin de propagation en intégrant des matériaux acoustiques ou des solutions actives.
3. Diminuer le temps de travail à proximité de la source.
4. Utiliser des dispositifs de protection auditive

La mise en œuvre des deux premières mesures nécessite d'identifier précisément les sources de bruit ainsi que les réflexions sur les surfaces environnantes. Il est également essentiel de hiérarchiser ces sources afin de prioriser les interventions pour les plus bruyantes d'entre elles. Cette démarche constitue l'objectif du diagnostic acoustique. Dans ce contexte, cette thèse vise à identifier les sources de bruit.

0.1.3 Les instruments de mesure pour le diagnostic acoustique

Les instruments prescrits pour mesurer les niveaux sonores sont le sonomètre et le dosimètre (ISO-9612, 2009; CSA Z107.56 :F18, 2022; Chiosa *et al.*, 2025). Le sonomètre et le dosimètre fournissent une mesure du niveau de pression acoustique et permettent d'évaluer le niveau d'exposition quotidienne. L'identification des sources est complétée par une enquête auprès des travailleurs et une exploration des zones les plus bruyantes. Le sonomètre et le dosimètre ne permettent pas de localiser directement les sources responsables de l'exposition au bruit. Afin d'obtenir une représentation spatiale du bruit, le sonomètre peut être utilisé pour réaliser une cartographie acoustique de l'environnement de travail. Les mesures sont généralement effectuées à la hauteur de l'oreille du travailleur en de multiples points répartis dans l'espace, puis interpolées afin d'obtenir une carte des niveaux sonores (Chalebun *et al.*, 2025). Bien que cette approche permette de visualiser la distribution spatiale des niveaux sonores, elle demeure longue à mettre en œuvre dans les grands environnements.

D'autres instruments de mesure peuvent être utilisés pour établir un diagnostic, tel que la sonde intensimétrique (Charron, 2022). La sonde intensimétrique, équipée de deux microphones, permet de mesurer l'intensité acoustique. Celle-ci peut être représentée par un vecteur indiquant la direction de propagation de l'énergie acoustique. La méthode de mesure par sonde intensimétrique nécessite de balayer horizontalement et verticalement une surface virtuelle située proche de la source de bruit (Soft dB Inc., 2022). Cette mesure est longue à réaliser. La surface de mesure est délimitée à partir de la détermination *a priori* de la position de la source. Le résultat est superposé

en transparence sur une photographie de l'environnement. L'avantage de cette méthode est de permettre l'identification des zones les plus bruyantes dans la surface de mesure. Son principal inconvénient est qu'elle ne permet pas de caractériser l'ensemble de l'environnement du poste de travail en une seule fois. Les réflexions locales peuvent introduire des erreurs de mesure. Certaines sources de bruit peuvent être difficiles d'accès, ce qui limite son usage dans les environnements complexes.

0.1.4 L'imagerie acoustique

L'utilisation d'une antenne sphérique de microphones (ASM) permet de caractériser un environnement sonore de manière omnidirectionnelle et à partir d'une seule position de mesure. Elle possède la plus grande ouverture de capture sonore, c'est-à-dire un angle d'observation omnidirectionnel. La figure 0.1 illustre le principe de génération d'une image acoustique, produite par un algorithme de localisation des sources à partir des signaux enregistrés par les microphones de l'antenne. Une onde acoustique émise par une source se propage selon un chemin direct et un chemin réfléchi (notamment par le sol). Ces ondes de pression sont captées par les microphones, puis traitées par un algorithme de formation de faisceaux (*beamforming*) basé sur l'analyse des différences de phase entre les signaux reçus. L'image acoustique est représentée sur un système de coordonnées sphériques, avec l'angle d'azimut ϕ sur l'axe horizontal et l'angle de colatitude θ sur l'axe vertical. La "tache" visible sur l'image correspond à un lobe principal, orienté vers la direction de la source, que l'on peut situer précisément grâce à la photographie de l'environnement superposée. Le code couleur indique le niveau de pression acoustique mesuré. Ainsi, l'image permet de localiser et quantifier les sources de bruit en milieu de travail. Cependant, l'antenne sphérique est généralement équipée de plus de 30 microphones, ce qui implique une étape de calibration et de câblage relativement longue. Elle est également de grande taille pour cibler les basses fréquences, ce qui la rend encombrante. L'image acoustique est considérée de bonne qualité si le niveau, la position et la taille de la source sont correctement

estimés et qu'aucun lobe secondaire parasite n'est présent. La taille du lobe principal doit être raisonnable par rapport au reste de l'image afin de localiser la source principale sans masquer les sources secondaires. Ce lobe est typiquement étroit dans les moyennes et hautes fréquences, mais devient plus large dans les basses fréquences, ce qui complique l'identification précise des sources.

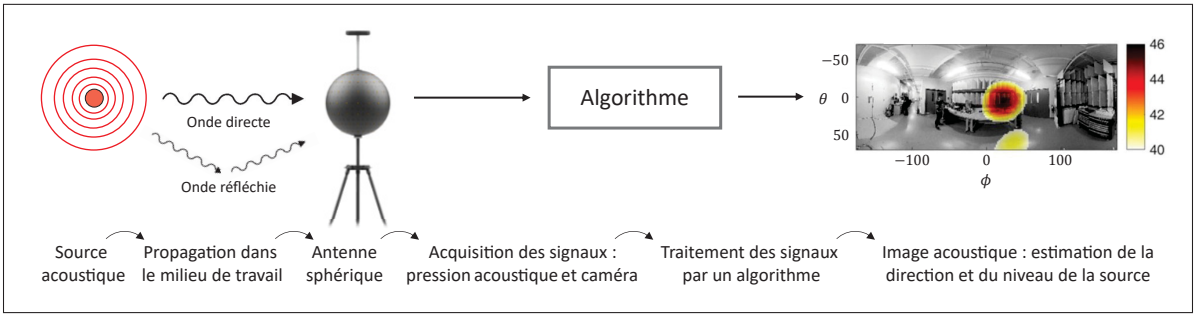


Figure 0.1 Schéma de l'émission de la source sonore à sa réception par l'antenne, puis au traitement des données jusqu'au résultat
Image acoustique tirée de Padois *et al.* (2019b)

0.2 Problématique de recherche

L'imagerie acoustique constitue une approche permettant d'identifier et de localiser les sources de bruit en milieu de travail. Cependant, ces environnements peuvent être complexes en raison de la présence de multiples sources, de réflexions et de réverbération. Afin d'évaluer les performances des antennes et des algorithmes d'imagerie acoustique, les travaux de cette thèse sont réalisés dans des conditions idéales, avec une source unique et en champ libre. Plusieurs enjeux demeurent associés à la conception des antennes sphériques de microphones ainsi qu'aux performances des algorithmes d'imagerie acoustique en basses fréquences. Ces problématiques sont présentées respectivement dans les Sections 0.2.1 et 0.2.2. Enfin, cette thèse s'inscrit dans un projet de recherche financé par l'IRSST et présenté en Section 0.2.3.

0.2.1 Une très grande variété d'antennes sphériques de microphones (ASM)

Il existe une grande variété de configurations pour la distribution des microphones sur une sphère. Ceux-ci peuvent être disposés selon un pas angulaire fixe (angles égaux), à distance égale, ou selon une structure en spirale. La qualité de l'image acoustique est influencée à la fois par la distribution des microphones et aussi par le nombre total de microphones. Un plus grand nombre de microphones permet de réduire les lobes secondaires et d'élargir la plage de fréquences admissible. Il est donc pertinent d'identifier la meilleure configuration pour les antennes sphériques, tout en visant une réduction du nombre de microphones afin de limiter les coûts d'investissement, le temps de calibration et le câblage — tout en maintenant une bonne qualité d'image acoustique, notamment en basses fréquences.

0.2.2 Des images acoustiques de qualité insuffisante en basses fréquences

L'algorithme classique de *beamforming* produit un lobe large en basses fréquences. Ce lobe peut devenir si étendu qu'il rend impossible la localisation d'une ou de plusieurs sources de bruit. Un lobe trop large entraîne une mauvaise estimation de la position de la source et peut provoquer un effet de masquage entre les lobes. Il est donc nécessaire de réduire cet effet en basses fréquences pour améliorer la localisation des sources. Une solution évidente consiste à augmenter la taille de l'antenne (ex. : 60 cm de diamètre pour une limite basse à 187 Hz avec (GFaI Tech, 2022a)). Toutefois, le système d'imagerie acoustique visé doit rester compact et facile à utiliser, ce qui impose une antenne de petite taille. Il en résulte un compromis difficile entre les objectifs de performance en basses fréquences et les contraintes de conception. Il est alors pertinent de développer un algorithme capable d'assurer une localisation précise des sources aux basses fréquences, tout en conservant une antenne de dimensions réduites.

0.2.3 Bilan

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) visant à développer un système d'imagerie acoustique capable de localiser les sources les plus bruyantes en milieu de travail. L'objectif est d'améliorer l'identification précise de ces sources, notamment en basses fréquences, à l'aide d'une antenne sphérique de microphones. Le système repose également sur une caméra vidéo panoramique et de l'électronique embarquée, permettant une imagerie acoustique en temps réel (Boileau *et al.*, 2024). Ce dispositif est conçu pour accélérer la détection des sources problématiques et faciliter la mise en œuvre de mesures correctives visant à protéger les travailleurs.

L'imagerie acoustique est une approche à l'identification rapide et précise des sources de bruit en milieu de travail afin de protéger les travailleurs des troubles auditifs. Il y a néanmoins un manque de consensus sur la conception d'ASM à utiliser et il existe un besoin de développer un algorithme novateur pour améliorer la qualité des images acoustiques en basses fréquences. Enfin, cette thèse contribue au projet de recherche financé par l'IRSST pour le développement d'algorithmes d'imagerie acoustique.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Les antennes sphériques de microphones (ASM) sont présentées en Section 1.1. La formulation générale des algorithmes de *beamforming* appliqués aux ASM est présentée en Section 1.2. La Section 1.3 propose ensuite une revue des algorithmes classiques de *beamforming*, tandis que des algorithmes de virtualisations sont abordés en Section 1.4. Les critères d'évaluation d'une image acoustique sont décrits en Section 1.5. Enfin, une synthèse critique de l'ensemble des approches est proposée en Section 1.6.

1.1 Les antennes sphériques de microphones

1.1.1 Caractéristiques des ASM

Différents types de conceptions d'ASM ont été développés. Les ASM peuvent être ouvertes ou rigides (voir figure 1.1). Les ASM sont qualifiées de type ouvert lorsque les microphones sont situés aux extrémités de tiges ou tenus par des câbles (Heilmann, Meyer & Döbler, 2008b; Djordjevic & Licanin, 2016; Padois, Sgard, Doutres & Berry, 2017; Padois, Doutres, Sgard & Berry, 2019a). Ces antennes sont considérées transparentes vis-à-vis de l'onde acoustique qui les traverse, c'est-à-dire que l'interaction entre l'onde incidente et l'antenne peut être considérée comme négligeable. Par exemple, une antenne ouverte tenue par des tiges a été développée par Noël, Planeau & Habault (2006). Son rayon est de 25 cm et elle est composée de 15 microphones. Une antenne de même rayon a été développée par Padois *et al.* (2017), mais cette fois-ci, contenant 14 microphones, dont un à chaque pôle. La compagnie GFaI Tech (2022b) propose une ASM, disponible commercialement, de 48 microphones. Les microphones sont tenus par des câbles pour un rayon de 17,5 cm. L'ASM a une limite d'utilisation recommandée à 291 Hz à -3 dB. GFaI Tech (2022a) a également développé une antenne ouverte avec 80 ou 120 microphones et un rayon de 30 cm, avec une limite d'utilisation recommandée à 185 Hz à -3 dB. L'augmentation du rayon permet ainsi de repousser la limite de mesure dans les basses fréquences. Une autre étude a examiné une ASM ouverte composée de 6 microphones placés au

centre de chaque face d'un cube de 50 cm de côté. Une ASM ouverte compacte comprenant 32 microphones et un rayon de 7,5 cm a été développée par (Djordjevic & Licanin, 2016). D'autres recherches ont exploré des ASM ouvertes avec 14 et 15 microphones disposés sur une sphère d'un rayon de 25 cm, dans le but d'améliorer l'imagerie acoustique (Padois *et al.*, 2017). Une ASM ouverte composée de 18 microphones positionnés de manière optimisée a également été conçue, avec un rayon de 20 cm (Padois *et al.*, 2019a). Des ASM ouvertes à double couche ont aussi été envisagées. Une configuration place 12 microphones répartis sur deux couches de rayons de 0,5 cm et 5 cm, pour des applications telles que la mesure de la réponse d'une salle, l'enregistrement sonore et l'imagerie acoustique (Merimaa, 2002).

Les ASM sont qualifiées de type rigide lorsque les microphones affleurent à la surface rigide de celle-ci (Petersen, 2004; Haddad & Hald, 2008; Hald, 2013; Araujo & Pinto, 2016). L'onde acoustique interagit alors avec l'antenne, générant ainsi un phénomène de diffraction non négligeable pour des longueurs d'onde inférieures à la dimension de l'antenne. L'antenne rigide, développée par Petersen (2004), comporte 64 microphones et a un rayon de 14 cm. Un autre exemple d'antenne rigide est développée par Araujo & Pinto (2016) avec 20 microphones. Une ASM rigide est disponible dans le commerce avec 36 microphones et un rayon de 9,75 cm (Haddad & Hald, 2008; Brüel & Kjaer, 2016). Par la suite, une configuration avec 50 microphones a été proposée (Hald, 2013). La compagnie Siemens a développé deux antennes rigides, chacune de 30 cm de rayon, l'une avec 36 microphones et l'autre avec 54 microphones, augmentant ainsi la limite de mesure hautes fréquences (Siemens, 2018). Des configurations rigides à double couche ont également été testées afin d'étendre la plage de mesure. L'une de ces antennes est composée de deux couches de 24 microphones : une couche rigide avec un rayon de 15 cm et une couche ouverte avec un rayon de 40 cm (Cariou, Delverdier, Paillasseur & Lamotte, 2012). Une autre antenne est composée de 32 microphones par couche, avec des rayons de 1,63 cm et 6 cm (Parthy, Jin & van Schaik, 2008), tandis qu'une troisième conception utilise des couches à 2,8 cm et 9,52 cm (Jin, Epain & Parthy, 2014).

Par ailleurs, St-Jacques (2023) a réalisé une revue de littérature sur les conceptions d'ASM, dont une partie des travaux porte sur la conception d'ASM ouvertes et rigides par impression 3D (voir figure 1.1).

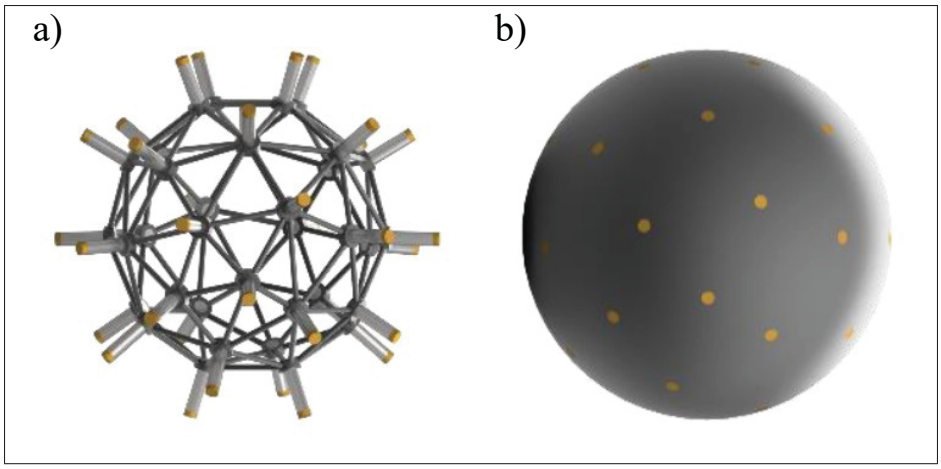


Figure 1.1 Conception d'antennes sphériques à 36 microphones : (a) ouverte et (b) rigide
Tirée de St-Jacques (2023)

Ces exemples illustrent la diversité des ASM (ouvertes ou rigides) et des paramètres utilisés. À titre indicatif, les rayons varient généralement entre 5 cm et 40 cm, tandis que le nombre de microphones se situe entre 12 et 120.

La dimension de l'ASM peut varier selon la gamme de fréquences à cibler. Le diamètre de l'antenne détermine approximativement la fréquence la plus basse mesurable et la plus petite distance entre deux microphones détermine approximativement la fréquence la plus haute. Enfin, la position et le nombre de microphones peuvent varier afin d'améliorer la qualité de l'image acoustique.

1.1.2 Comparaison des ASM

Peu d'études ont proposé une comparaison exhaustive des différentes géométries d'ASM pour l'imagerie acoustique. L'une de ces études a évalué les performances de cinq ASM ouvertes de rayon constant (Du, Leclere & Li, 2017). Les ASM sont chacune équipées de 64 microphones. Le *conventional beamforming* (CBF) est l'algorithme utilisé. Les géométries examinées sont le *t*-design, le Packing, le Covering, le Minimum Energy et la Spiral, qui s'est révélée offrir les meilleures performances en termes de largeur du lobe principal et de niveau des lobes secondaires. Une autre étude compare trois géométries de microphones — Equi-angle, Gaussian

et t-design — sur deux ensembles de microphones et utilise le *spherical harmonic beamforming* (SHB) (Rafaely, 2005a). Comme le nombre de microphones est imposé par la géométrie de l'ASM, le premier ensemble comprend respectivement 36, 18 et 12 microphones, tout en partageant un ordre de troncature identique. Le second ensemble comprend respectivement 36, 32 et 36 microphones, de façon à maintenir un nombre total de microphones similaire. Les résultats indiquent que la géométrie *t*-design minimise l'erreur de repliement spatial dans l'image acoustique, et que le gain en bruit blanc (le rapport entre la puissance du signal de sortie et la puissance du bruit blanc d'entrée) dépend du nombre de microphones plutôt que de la géométrie elle-même.

1.2 Formulation des algorithmes pour l'imagerie acoustique

Tout au long du document, la convention du signe utilisée est $e^{+\imath\omega t}$, dite convention d'ingénieur (Jarrett, Habets & Naylor, 2017), avec $\imath = \sqrt{-1}$ le nombre imaginaire et $\omega = 2\pi f$ la pulsation.

L'estimation d'une source ponctuelle est effectuée en chaque point de la grille de balayage $\vec{r}_l = (r_l, \phi_l, \theta_l)$ dont l'indice varie de $l = 1, \ldots, L$ avec L le nombre de points. L'amplitude d'une source ponctuelle, noté a, est estimée à partir du vecteur de pression mesuré $\mathbf{p}$ aux microphones de l'antenne et du vecteur de balayage (dit directionnel) $\mathbf{w}_l$. L'estimation correspond au produit scalaire de ces deux vecteurs complexes de dimension $\mathbb{C}^{Q\times 1}$, où Q est le nombre de microphones (Chiariotti, Martarelli & Castellini, 2019),

$$\tilde{a}_l(k) = \mathbf{w}_l^H(k)\,\mathbf{p}(k), \tag{1.1}$$

où $\tilde{\circ}$ indique qu'il s'agit de la valeur estimée, $\circ^H$ désigne l'opérateur conjugué transposé hermitien, $k = \omega/c$ est le nombre d'onde et c la célérité du son et r le rayon. L'estimation est effectuée pour chaque point $\vec{r}_l$ d'une grille de balayage dans le plan de focalisation. Le vecteur $\tilde{\mathbf{a}}$ ainsi obtenu forme une image acoustique dont le maximum d'amplitude est dans la direction de la source, située en $\vec{r}_s$.

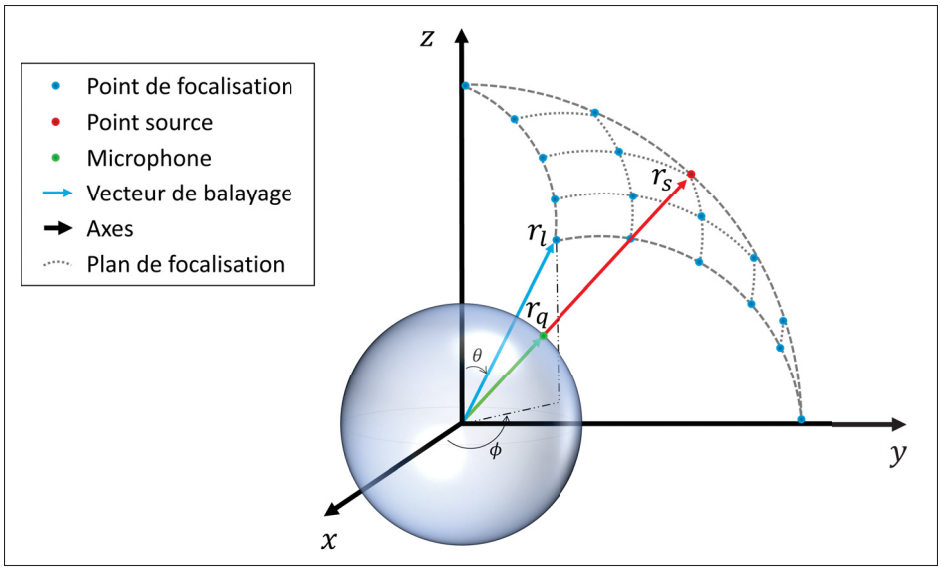


Figure 1.2 Antenne sphérique de microphones dans le plan cartésien et notation en coordonnées sphériques

La formulation se généralise sous forme matricielle (Leclère, Pereira, Bailly, Antoni & Picard, 2017; Padois *et al.*, 2023), où l'image acoustique est formée par les éléments diagonaux de la matrice $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{L \times L}$,

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{W}^H(k)\,\mathbf{C}(k)\,\mathbf{W}(k), \tag{1.2}$$

avec $\mathbf{W}(k)$ la matrice de balayage et $\mathbf{C}(k)$ la matrice interspectrale de la pression acoustique.

Les expressions précises de $\mathbf{W}$ et $\mathbf{C}$ varient selon l'algorithme utilisé. Elles sont détaillées dans les sections suivantes pour les cas du CBF et du SHB.

1.3 Les algorithmes classiques

1.3.1 *Beamforming* conventionnel en fréquence (CBF)

La matrice interspectrale est notée $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{Q \times Q}$ et est définie par

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{p}(k)\mathbf{p}^H(k), \tag{1.3}$$

où le vecteur $\mathbf{p} \in \mathbb{C}^{Q\times 1}$ contient la pression acoustique enregistrée par chaque microphone dans le domaine fréquentiel. La matrice de balayage est $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{Q\times L}$. Elle est construite à partir des vecteurs de balayage. Le vecteur de balayage $\mathbf{w}_l$ est obtenu à partir de formulations présentées dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Formules du vecteur de balayage pour l'algorithme CBF

$\mathbf{w}_l^{(i)}$	$\mathbf{w}_l^{(ii)}$	$\mathbf{w}_l^{(iii)}$	$\mathbf{w}_l^{(iv)}$
$\frac{1}{Q}\frac{\mathbf{g}_l}{\lvert\mathbf{g}_l\rvert}$	$\frac{1}{Q}\frac{\mathbf{g}_l}{\lvert\mathbf{g}_l\rvert^2}$	$\frac{\mathbf{g}_l}{\lvert\lvert\mathbf{g}_l\rvert\rvert^2}$	$\frac{1}{\sqrt{Q}}\frac{\mathbf{g}_l}{\lvert\lvert\mathbf{g}_l\rvert\rvert}$

Ces différents vecteurs ont été étudiés par Sarradj (2012). La première forme, notée $\mathbf{w}_l^{(i)}$, permet d'obtenir un vecteur de balayage qui ne contient que la phase de la fonction de transfert. Cette forme permet une réponse de l'algorithme maximale dans la direction de la source. La forme $\mathbf{w}_l^{(ii)}$ permet d'obtenir l'amplitude de la source avec $|\mathbf{g}_l|^2 = \sum_{q=1}^{Q} g_{ql} g_{ql}^*$, où $\mathbf{g}_l \in \mathbb{C}^{Q\times 1}$ est un vecteur colonne d'indice l, fonction de transfert d'éléments $g_{ql} = g(r_q|r_l)$ et $(\circ)^*$ est la conjugué complexe. La forme $\mathbf{w}_l^{(iii)}$ est l'expression d'un pseudo-inverse, minimisant par moindre carré le bruit dans l'estimation de la source, appelée parfois filtre de bruit blanc dans la littérature avec $||\mathbf{g}_l||^2 = \mathbf{g}_l^H \mathbf{g}_l$. Le résultat est proportionnel à l'amplitude de source. La forme $\mathbf{w}_l^{(iv)}$ est une version normalisée tenant compte explicitement du nombre de microphones et donnant aussi une réponse maximale dans la direction de la source. Sarradj (2012) a montré que la distance source-antenne est mieux estimée avec les formes $\mathbf{w}_l^{(i)}$ et $\mathbf{w}_l^{(iv)}$, selon le critère du maximum d'amplitude (voir Section 1.5.1). Selon ce critère, le niveau de source obtenu est légèrement sous-estimé par rapport au niveau simulé avec les formulations $\mathbf{w}_l^{(i)}$ et $\mathbf{w}_l^{(iv)}$, et tend à être identique avec les formulations $\mathbf{w}_l^{(ii)}$ et $\mathbf{w}_l^{(iii)}$ lorsque la fréquence augmente. La forme $\mathbf{w}_l^{(iii)}$ est la plus communément admise, car elle est la plus robuste face au bruit (Merino-Martínez *et al.*, 2019; Chiariotti *et al.*, 2019; Leclère *et al.*, 2017). Enfin, les éléments de $\mathbf{g}_l$ sont la solution de l'équation d'Helmholtz inhomogène pour une source ponctuelle en champ libre. Ils sont donnés selon une formulation en ondes sphériques (Jarrett *et al.*, 2017),

$$g(\vec{r}_q|\vec{r}_s, k) = \frac{e^{-\imath k r_{qs}}}{4\pi r_{qs}}, \tag{1.4}$$

où $r_{qs} = ||\vec{r}_q - \vec{r}_s||$ représente la distance euclidienne entre la position du microphone $\vec{r}_q$ ($r_q = r_a$, le rayon de l'antenne, pour tous les indices q) et la position de la source $\vec{r}_s$. L'indice des microphones est noté $q = 1, \ldots, Q$. L'Éq. 1.4 traduit une propagation d'ondes sphériques dont l'amplitude décroît en $1/4\pi r_{qs}$.

Le CBF présente un lobe principal orienté dans la direction de la source et des lobes secondaires de plus faible amplitude autour de cette dernière. La fréquence influence la taille du lobe principal. Il est large en basses fréquences et s'affine à mesure que la fréquence augmente (Petersen, 2004). La méthode par différences finies des pressions par paires de microphones permet d'outrepasser cette dépendance, néanmoins en augmentant le temps de calcul et le bruit dans le signal (Benesty & Chen, 2013; Jin *et al.*, 2021). En hautes fréquences, le nombre et l'amplitude des lobes secondaires augmentent, ce qui peut entraîner des erreurs dans la localisation de la source. Par ailleurs, une focalisation incorrecte, située en avant ou en arrière de la source, accentue les lobes secondaires (Padois *et al.*, 2017), réduisant ainsi la précision de l'image acoustique.

1.3.2 *Beamforming* par harmoniques sphériques (SHB)

La matrice interspectrale est notée $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{(N+1)^2 \times (N+1)^2}$ avec N l'ordre de troncature. Elle est exprimée dans le domaine des harmoniques sphériques où la dimension correspondant au nombre de microphones est perdue par intégration aux harmoniques sphériques. Elle est définie par

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{Y}^H \left(\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^T \odot \mathbf{p}\mathbf{p}^H \right) \mathbf{Y}, \tag{1.5}$$

où $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^{Q \times 1}$ est un vecteur de pondération qui correspond au poids de quadrature d'intégration de la géométrie de microphones (voir Tables 3.1 et 3.2). L'exposant $\circ^T$ désigne l'opérateur transposé. Le produit de Hadamard, représenté par le symbole $\odot$, est le produit scalaire, terme à terme, de chaque élément des matrices multipliées. Enfin, la fonction d'harmoniques sphériques s'écrit,

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) e^{\imath m \phi}, \tag{1.6}$$

où P_n^m est la fonction associée au polynôme de Legendre. Lorsque m est négatif, notons que Y_n^{-m} est obtenu en multipliant Y_n^m par le facteur de Condon-Shortley $(-1)^m$ (Jarrett *et al.*, 2017).

La matrice de balayage est notée $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{(N+1)^2 \times L}$. Les éléments de la matrice de balayage sont donnés par,

$$W_{n(n+1)+m,l} = d_n \, b_n^{-1^*}(r_l, r_q, k) \, Y_n^{m^*}(\theta_l, \phi_l), \tag{1.7}$$

dont les indices sont l'ordre $n = 0, 1, \ldots, N$ et le degré $m = -n, \ldots, n$. La fonction radiale de transfert b_n relie les points de scan r_l (ou la source de position r_s, voir Section 3.3) aux positions des microphones r_q. Pour des ondes sphériques, la fonction de transfert b_n est donnée ci-dessous. Elle est valable pour les ASM ouvertes et rigides et pour des microphones omnidirectionnels.

$$\begin{cases} b_n(r_q|r_s, k) &= (-\imath) k h_n^{(2)}(kr_s) j_n(kr_q) & \rightarrow \text{ASM ouverte}, \\ b_n(r_q|r_s, k) &= (-\imath) k h_n^{(2)}(kr_s) \left(j_n(kr_q) - \frac{j_n^{'}(kr_q)}{h_n^{'(2)}(kr_q)} h_n^{(2)}(kr_q) \right), & \rightarrow \text{ASM rigide}, \end{cases} \tag{1.8}$$

où $h_n^{(2)}$ est la fonction de Hankel sphérique du second type et j_n est la fonction de Bessel sphérique du premier type. Cette dernière génère des valeurs nulles qui sont compensées avec le type rigide. Les termes $(-\imath) k h_n^{(2)}(kr_s)$ assurent la prise en compte d'une propagation d'ondes sphériques d'origine r_s. Le premier terme en $j_n(kr_q)$ dans la parenthèse de l'équation de l'ASM rigide correspond à la partie incidente de l'onde alors que le second terme en $j_n^{'}(kr_q) \, h_n^{(2)}(kr_q) / h_n^{'(2)}(kr_q)$ représente la partie diffractée. L'opérateur $\circ^{'}$ désigne la dérivée de ces fonctions par rapport à la variable r.

Le gain, d_n, modifie la précision de l'estimation de sources, $\tilde{a}(\vec{r}_l, k)$, selon les objectifs considérés. Le Tableau 1.2 référence les différentes écritures de gain. Le résultat de l'algorithme avec un maximum d'amplitude dans la direction de la source ($\theta_l \approx \theta_s, \phi_l \approx \phi_s$) et un minimum d'amplitude dans les autres directions est obtenu en utilisant le gain d_n^{MD}. Ce gain maximise la directivité (MD) (Rafaely, 2019). Il diminue la contribution des sources réfléchies et du bruit ambiant dans le résultat, mais il est cependant sensible au bruit propre des capteurs en basses fréquences (Huang, Chen & Benesty, 2018). La taille du lobe est indépendante de la fréquence et dépend de l'ordre de troncature : plus N est grand, plus la largeur du lobe est fine. L'ordre de troncature est un nombre entier, ce qui génère des résultats identiques dans une bande de

fréquence. Carpentier (2023) propose de fractionner le SHB en deux ordres et de sommer les deux résultats selon un coefficient de pondération pour rendre la taille de lobe dépendante de la fréquence.

Tableau 1.2 Formules de gains pour l'algorithme SHB

d_n^{MD}	$d_n^{D\&S}$	d_n^{MWNG}	$d_{n,l}^{SHARP}$
$\frac{4\pi}{(N+1)^2}$	$\lvert\hat{b}_n(kr)\rvert^2$	$\frac{\lvert\hat{b}_n(kr)\rvert^2}{\sum_{n=0}^{N}\lvert\hat{b}_n(kr)\rvert^2}$	$\frac{1}{(N+1)^2}\frac{e^{-\imath kr_l}}{r_l}$

Le gain peut être choisi selon la simple notion des sommes et retards (D&S [1]), noté $d_n^{D\&S}$. Ce gain est robuste aux bruits (Rafaely, 2005b). Le $d_n^{D\&S}$ permet d'obtenir une réponse équivalente au CBF lorsque $\mathbf{w}_l = \mathbf{g}_l$. La comparaison de performances va être néanmoins limitée par l'ordre de troncature N de l'algorithme SHB. Afin que les performances soient similaires, l'ordre de troncature doit être supérieur au nombre d'onde adimensionnel kr correspondant à la fréquence maximale étudiée, selon la règle $N > kr$ (Rafaely, 2004, 2005b).

Le maximum du gain bruit-blanc (MWNG [2]) est très robuste face au bruit des capteurs et des incertitudes (Rafaely, 2019). Le gain d_n^{MWNG} donne une taille de lobe qui varie en fonction de la fréquence. Le lobe est large en basses fréquences et étroit en hautes fréquences, ce qui donne en basses fréquences une faible directivité au lobe. Rafaely (2019), Chap. 6, a montré que le MWNG est équivalent au CBF-$\mathbf{w}_l^{(iii)}$ avec une distribution de microphones uniforme sur une antenne sphérique.

Le gain SHARP [3] proposé par Haddad & Hald (2008), noté d_n^{SHARP}, ajoute un facteur de correction d'amplitude et de phase au gain d_n^{MD} en tenant compte de la distance entre la source et l'antenne. En conséquence, le gain SHARP donne le niveau de pression acoustique, contrairement aux autres gains qui donnent le niveau de force de la source. La fonction de transfert b_n de Haddad & Hald (2008) est cependant différente de celle partagée par Fisher & Rafaely (2011) et de celle de Jarrett *et al.* (2017) d'un facteur de $4\pi k$ près. Cette différence ne dépend que de la convention d'écriture adoptée. Le gain SHARP se comporte comme un filtre radial pour

[1] angl. *Delay & Sum*

[2] angl. *Maximum White Noise Gain*

[3] angl. *Spherical Harmonic Acoustic Resolved Presure*

compenser le niveau par rapport à la distance dans des conditions de champ libre. Différents filtres radiaux sont aussi proposés par Fisher & Rafaely (2011) dans cet objectif. Un dernier gain, plus complexe que les précédents, est l'adaptation du polynôme de Dolph-Chebyshev. Il permet de contrôler la largeur du lobe principal ou bien la hauteur des lobes secondaires. Ces deux paramètres, s'influençant l'un l'autre, demandent de viser un compromis (Rafaely, 2019).

1.3.3 Comparaison des algorithmes classiques

Les comparaisons des algorithmes CBF et SHB avec des ASM sont peu nombreuses dans la littérature. Rafaely (2005b) a comparé le SHB-$d_n = 1$ et le SHB-$d_n^{D\&S}$ par simulation numérique jusqu'à $kr = 5$. La comparaison numérique des performances en champ libre par Petersen (2004) du SHB-$d_n = 1$ avec le D&S (équivalent au CBF) est limitée en fréquences entre 130 Hz et 4 000 Hz. La comparaison expérimentale par Araujo & Pinto (2016) est réalisée dans une chambre anéchoïque entre 500 Hz et 1 250 Hz. Ces trois études précédentes démontrent la dépendance à la fréquence du résultat de l'algorithme du CBF et de l'indépendance en fréquences du SHB-$d_n = 1$. Une distinction importante entre le CBF et le SHB réside dans leurs performances dans les différentes gammes de fréquences. En basses fréquences, le CBF produit un lobe principal plus large que le SHB (hormis le SHB-d_n^{MWNG} qui est équivalent) (Rafaely, 2005b; Rouard *et al.*, 2022; Petersen, 2004; Araujo & Pinto, 2016). Avec le CBF, la taille du lobe principal dépend du rayon de l'ASM, tandis qu'avec le SHB, elle est déterminée par l'ordre de troncature des harmoniques sphériques. En hautes fréquences, la performance du CBF est influencée par l'espacement entre les microphones : plus la distance est faible, plus la limite fréquentielle est élevée. La performance du SHB est limitée par l'ordre de troncature maximal des harmoniques sphériques. Cet ordre de troncature définit la fréquence supérieure limite. Il dépend du nombre de microphones et de la géométrie utilisée (Rafaely, 2019; Padois, Fischer, Doolan & Doutres, 2021). Par conséquent, le rayon de l'ASM, le nombre de microphones et leurs positions sont des paramètres cruciaux dans la conception d'une ASM.

1.4 Les algorithmes virtuels

Cette section présente des algorithmes qui modifient virtuellement la taille de l'antenne ou le nombre de microphones, sans recourir à une modification physique de l'ASM. Cette approche est désignée sous le terme d'algorithme virtuel. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour obtenir de tels résultats. Elles reposent sur le transfert d'une pression acoustique virtuelle en une nouvelle position à partir d'une ou plusieurs pressions mesurées en d'autres positions (voir figure 1.3). Le principe basé sur la fonction de Green est présenté en Section 1.4.1. Un algorithme basé sur l'holographie pour augmenter virtuellement le rayon de l'ASM est décrit en Section 1.4.2. Des algorithmes basés sur une méthode inverse sont présentés en Section 1.4.3. Enfin, la combinaison des algorithmes classiques avec l'holographie et une méthode d'interpolation statistique est détaillé en Section 1.4.4.

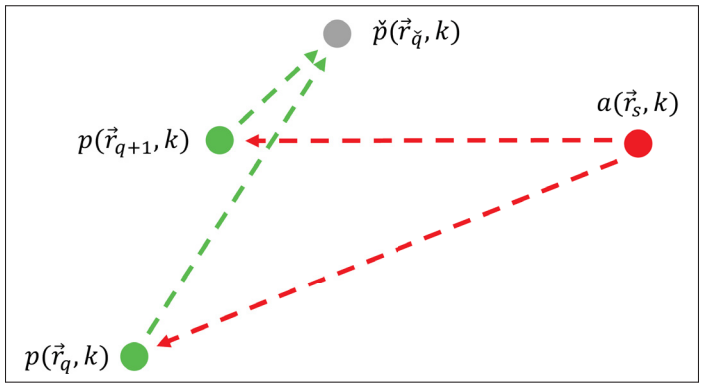


Figure 1.3 Principe d'un microphone virtuel avec a la source, p les pressions mesurées et $\check{p}$ la pression virtuelle

1.4.1 Algorithme virtuel basé sur la fonction de Green

Del Galdo, Thiergart, Weller & Habets (2011) proposent une relation linéaire fondée sur les fonctions de Green. En supposant que $p(\vec{r}_q, k) = a(\vec{r}_s, k)g(\vec{r}_q|\vec{r}_s, k)$, cette relation s'écrit

$$\check{p}(\vec{r}_{\check{q}}, k) = \frac{\check{g}(\vec{r}_{\check{q}}|\vec{r}_s, k)}{g(\vec{r}_q|\vec{r}_s, k)} p(\vec{r}_q, k), \tag{1.9}$$

où deux pressions acoustiques sont obtenues dans un même environnement, l'une est réelle $p(\vec{r}_q, k)$ et l'autre est virtuelle $\check{p}(\vec{r}_{\check{q}}, k)$, avec $\check{\circ}$ le symbole qui indique le caractère virtuel de la quantité. Cette expression permet de calculer la pression virtuelle en un point $\vec{r}_{\check{q}} = (\phi_{\check{q}}, \theta_{\check{q}}, r_{\check{q}})$ à partir d'une mesure réelle. Cette relation repose sur l'hypothèse d'une source ponctuelle à rayonnement isotrope dans un environnement faiblement réverbérant. Les auteurs valident cette relation à l'aide de deux antennes composées chacune de quatre microphones omnidirectionnels. Les directions d'arrivée estimées par les deux antennes sont utilisées pour trianguler la position d'une source, puis calculer la pression acoustique en une position virtuelle. Les résultats montrent qu'il est possible de générer la pression d'un microphone virtuel à partir des mesures réelles et des positions.

1.4.2 Algorithme virtuel avec l'holographie

Tiana-Roig, Torras-Rosell, Fernandez-Grande, Jeong & Agerkvist (2014) proposent un algorithme fondé sur l'holographie. L'algorithme consiste à transformer les pressions acoustiques en harmoniques sphériques pour estimer les coefficients de sources, puis à reconstruire les pressions virtuelles pour une antenne de rayon différent. L'image acoustique est ensuite obtenue à partir de cette pression virtuelle avec une formulation basée sur le principe de la somme et des retards du *beamforming*. L'étude évalue des rayons virtuels de $2r_a$ à $5r_a$ avec une ASM rigide de 50 microphones. Les résultats montrent une amélioration de la résolution et du MSR, bien que le bruit augmente à haute fréquence. Une réduction du lobe principal en basses fréquences est démontrée avec une image à 210 Hz.

1.4.3 Algorithme virtuel par méthode inverse et régularisation

Une méthode inverse de *beamforming* peut être appliquée pour obtenir l'image acoustique, avec l'ajout d'un paramètre de régularisation, γ, visant à atténuer le bruit et les lobes secondaires (voir Section V) (Yang, Shi & Yang, 2019; Shi, Yang, Guo, Li & Gui, 2023; Yang, Gao, Guo & Shi, 2023),

$$\tilde{\mathbf{a}}(k) = \mathbf{G}^H \left(\mathbf{G}\mathbf{G}^H + \gamma^2 \mathbf{D} \right)^{-1} \mathbf{p}(k), \tag{1.10}$$

où $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{Q \times L}$ est une matrice composée de fonctions de Green avec $Q < L$ et $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{Q \times Q}$ est une matrice de régularisation. La matrice de régularisation est souvent une matrice identité. Cependant, pour les travaux présentés dans cette section, elle est construite avec une image acoustique obtenue avec un premier *beamforming* (voir Éq. 1.2), puis elle est normalisée.

La pression virtuelle peut ensuite être obtenue avec (Yang *et al.*, 2019; Shi *et al.*, 2023),

$$\check{\mathbf{p}}(k) = \check{\mathbf{G}}(k)\tilde{\mathbf{a}}(k), \tag{1.11}$$

où les éléments de $\check{\mathbf{G}}$, notés $\check{g}_{\check{q},l}$, sont des fonctions de Green adaptées aux positions virtuelles. Pour une antenne ouverte et considérant des ondes sphériques, les éléments de $\check{\mathbf{G}}$ sont alors,

$$\check{g}_{\check{q},l} = \frac{e^{-\imath k r_{\check{q},l}}}{4\pi r_{\check{q},l}}, \tag{1.12}$$

avec $r_{\check{q}l} = ||\vec{r}_{\check{q}} - \vec{r}_l||$ et $\vec{r}_{\check{q}}$ représentant la position du microphone virtuel d'indice $\check{q} = 1, 2, \ldots, \check{Q}$. La pression virtuelle est ensuite utilisée avec la méthode hybride, afin d'obtenir une dernière image acoustique.

La méthode hybride présente une reformulation à la méthode inverse de *beamforming* (Padois, Gauthier & Berry, 2014),

$$\tilde{\mathbf{a}}(k) = \underline{\mathbf{G}}^H \left(\underline{\mathbf{G}\mathbf{G}}^H + \gamma^2 \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{L}^{-1} \beta \mathbf{p}(k), \tag{1.13}$$

où $\underline{\mathbf{G}} = \mathbf{G}\mathbf{L}^{-1}$, $\mathbf{L}^{-1} = \tilde{\mathbf{a}}(k)/||\tilde{\mathbf{a}}(k)||_\infty$ est une matrice de régularisation basé sur une image acoustique et $\beta = ||\underline{\mathbf{G}\mathbf{G}}^H + \gamma^2 \mathbf{I}||_2$ est un paramètre d'échelle pour compenser le poids de l'inversion. La méthode permet de réduire la taille du lobe principal et la présence des lobes secondaires lors de son utilisation avec une antenne plane circulaire.

Pour Yang *et al.* (2019), cette approche a été utilisée avec une antenne sphérique ouverte de 64 microphones et d'un rayon $r_a = 30$ cm. Ils proposent, en plus, un second passage à la dernière image acoustique obtenue avec la méthode hybride pour réduire davantage le lobe principal. L'augmentation du rayon virtuel est de $\check{r}_a = r_a + 10$ cm et +15 cm pour respectivement les fréquences 180 Hz et 540 Hz. Soit une augmentation du rayon de $1,33$ et $1,50$ fois. Shi *et al.*

(2023) remplacent la méthode inverse de *beamforming* par une reconstruction parcimonieuse : seuls les points de grille réellement nécessaires sont conservés. Ils montrent que l'erreur de reconstruction de la pression augmente avec l'augmentation virtuelle, de 1,5 à 3, et le rapport signal à bruit. La fréquence minimum atteinte est 125 Hz avec un rayon virtuel $\check{r}_a = 0{,}60$ cm, soit une augmentation de 2 fois. Yang *et al.* (2023) utilisent la couche virtuelle et la couche réelle pour évaluer la vitesse par différences finies à la place de la méthode inverse. L'augmentation du rayon virtuel est de $\check{r}_a = r_a + 15$ cm pour les fréquences 125 Hz et 500 Hz, correspondant à une augmentation du rayon de $1,50$ fois. Les auteurs de ces trois dernières références montrent que l'utilisation d'une pression virtuelle avec la méthode hybride permet de réduire le lobe principal et permet de réaliser des mesures en basses fréquences. Cependant, ces trois dernières références n'indiquent pas de rayons virtuels ni de facteur de régularisation optimaux, de limites en fréquences ou de valeurs pour quantifier la réduction du lobe principal.

Les algorithmes de *beamforming* virtuels permettent de modifier virtuellement le rayon ou le nombre de microphones, mais ils restent sensibles au bruit et aux erreurs de mesure. L'augmentation virtuelle repose sur des opérations inverses qui peuvent amplifier le bruit, les erreurs de phase et les imprécisions de calibration. Une réduction excessive du nombre de microphones réels conduit en outre à un sous-échantillonnage spatial que les microphones virtuels ne peuvent pas corriger.

1.4.4 Algorithme virtuel avec l'holographie et le krigeage

Forma *et al.* (2026) étudient le cas des ASM rigides. Pour les méthodes d'holographie, ils montrent que si $k\check{r}$ est trop grand, les harmoniques sphériques ne sont plus correctement représentées et la qualité de l'image s'effondre avec la virtualisation (les lobes secondaires seront trop importants dans l'image). Un fin compromis est obtenu avec $\lceil kr + 1 \rceil \leq \lceil k\check{r} \rceil \leq N_{\max}$, permettant une augmentation virtuelle du rayon de l'ASM d'un facteur de 4 à 10 en simulation. Expérimentalement, une image qui permet de localiser la source a été obtenue à 150 Hz avec 30 microphones et un rayon de 9.75 cm. L'augmentation du rayon de 8 à 10 fois permet de surpasser l'image obtenue avec le CBF et le SHB ($N = 2$) en taille de lobe principal et en MSR. Les images acoustiques sont toutefois de moindres qualités que celles obtenues en simulation : le

lobe principal n'étant pas uniforme et circulaire. Cette mauvaise qualité provient potentiellement d'erreurs de calibration et de bruits, inexistants lors de la simulation.

L'augmentation du nombre de microphones virtuels peut réduire le niveau des lobes secondaires (Heilmann, Meyer & Döbler, 2008a). Le krigeage permet d'augmenter virtuellement le nombre de microphones et d'accéder à un ordre de troncature supplémentaire avec le SHB (Padois *et al.*, 2023; Forma *et al.*, 2026), mais il ne supprime pas les limites physiques de l'antenne réelle : si les harmoniques d'ordre élevé sont mal conditionnés, l'interpolation ne peut pas recréer l'information manquante. Le krigeage est un algorithme statistique basé sur l'interpolation spatiale qui vise à prédire une valeur en s'appuyant sur les corrélations spatiales mesurées d'un ensemble de points (Grana, Mukerji & Doyen, 2021). Enfin, le choix d'un rayon virtuel ou d'un nombre de microphones virtuels optimaux reste peu documenté dans la littérature. Le réglage des paramètres virtuels demeure largement empirique et spécifique à chaque configuration.

1.5 Les critères d'évaluation de performance des images acoustiques

Dans le cas d'une seule source acoustique devant une ASM, l'image acoustique donne un lobe principal, indiquant la position de la source. Sur la figure 1.4 le lobe principal est entouré d'un lobe secondaire. Il y a aussi un lobe en arrière qui est représenté sur les côtés de l'image. Le maximum du lobe principal indique le niveau de la source. Trois critères sont présentés afin de quantifier la qualité des images acoustiques obtenues.

1.5.1 Niveau de la source estimé dans l'image acoustique

Le niveau estimé de la source est donné par le niveau maximum du lobe principal, soit le maximum atteint dans l'image acoustique (Sarradj, 2012),

$$L_e = 10 \log_{10}(\max_l(A_{ll})). \tag{1.14}$$

Une différence de ce niveau par rapport à celui attendu indiquera une mauvaise estimation du niveau et une perte de qualité.

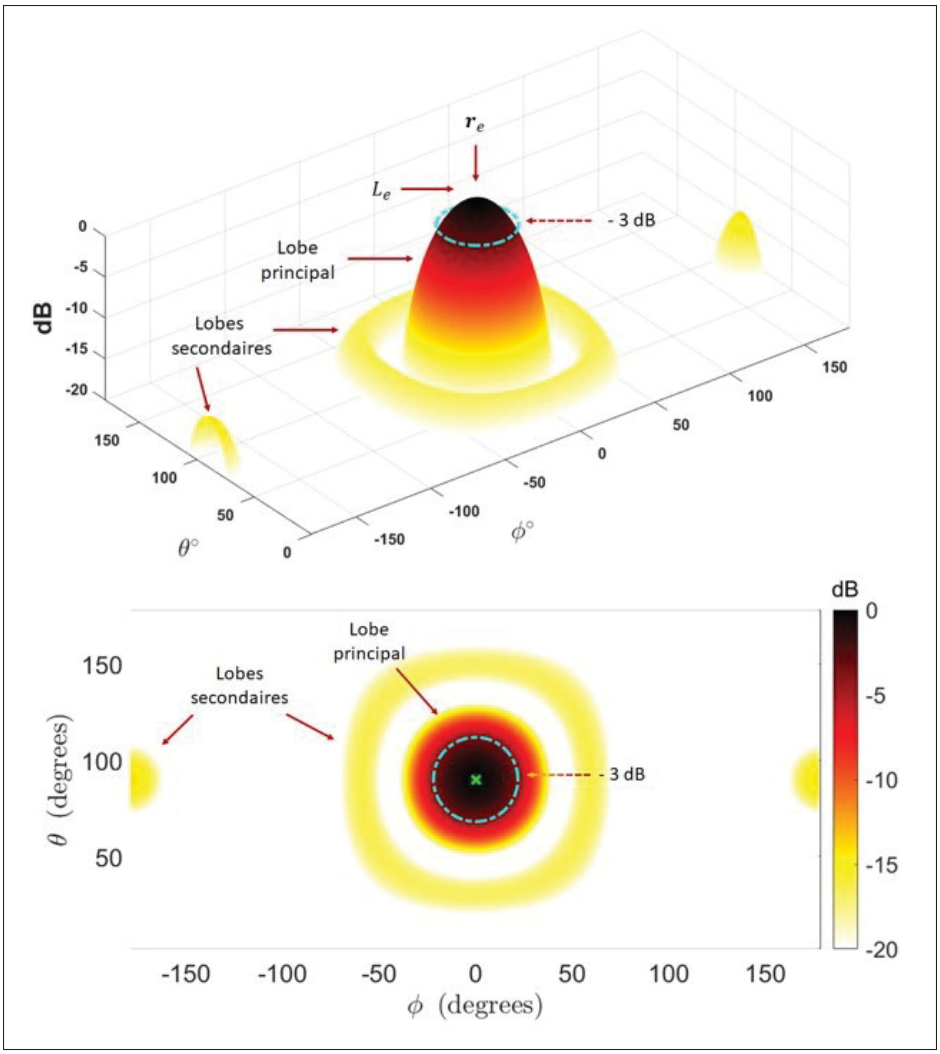


Figure 1.4 Exemple d'une image acoustique avec une source en son centre : (a) Image acoustique en 3D. (b) Image acoustique, la croix verte désigne la position de la vraie source

1.5.2 Taille du lobe principal dans l'image acoustique

La résolution spatiale donne une indication sur la capacité de l'algorithme à séparer deux sources l'une de l'autre (Lanslots, Deblauwe & Janssens, 2010). Dans le cas d'une source ponctuelle centrée, la résolution caractérise la largeur, ou bien dans le cas à deux dimensions, la surface du lobe principal. Plus la résolution est fine, plus le pouvoir de séparation des sources est grand.

Le lobe principal d'une antenne de microphones linéaire est caractérisé par sa largeur à mi-hauteur, mesurée entre la valeur crête et un point à -3 dB. Le lobe principal peut être caractérisé

par sa largeur et sa longueur, ou bien par sa surface (Arcondoulis & Liu, 2019; Padois *et al.*, 2021).

L'ellipse de covariance est une méthode d'évaluation de la surface du lobe dans l'image acoustique (Padois *et al.*, 2021). Les rayons de l'ellipse dépendent de la covariance des données en (θ, ϕ). La méthode permet d'entourer le lobe pour un seuil choisi et d'en calculer sa surface, $\mathcal{S} = \pi \times r_1 \times r_2$ avec r_1 et r_2 les rayons principaux de l'ellipse. Plus la surface est petite, plus le lobe est fin et plus précise est la localisation de la source. Cependant, l'ellipse repose sur l'hypothèse d'un plan bidimensionnel cartésien, tandis que les images acoustiques avec une ASM sont dans un plan sphérique.

1.5.3 Différence de niveau entre le lobe principal et le lobe secondaire

La différence entre le niveau du lobe principal et le niveau du lobe secondaire L_s est désignée par l'acronyme MSR et ce calcul comme suit MSR $= L_e - L_s$. Le niveau MSR caractérise la capacité de l'algorithme à minimiser les lobes secondaires. Un niveau du MSR élevé est associé à une réduction des lobes secondaires dans l'image acoustique (Haddad & Hald, 2008), facilitant ainsi une identification plus précise du lobe principal (Padois *et al.*, 2021).

1.6 Synthèse critique

Les antennes sphériques de microphones (ASM) constituent une solution pour localiser les sources de bruit en milieu de travail. Elles permettent d'obtenir une image acoustique afin d'identifier les sources les plus bruyantes et de faciliter la mise en œuvre de mesures correctives.

Les algorithmes classiques, le CBF et le SHB, constituent la base de l'imagerie acoustique. L'utilisation de différents vecteurs de balayage (CBF) ou de gains (SHB) permet d'ajuster la taille du lobe principal et le niveau des lobes secondaires. Cependant, ces algorithmes ne permettent pas d'obtenir systématiquement un lobe principal étroit aux basses fréquences. Sa largeur dépend principalement du rayon de l'antenne : plus celui-ci est grand, plus le lobe principal est fin.

Pour minimiser l'influence de l'ASM dans le champ acoustique, des modèles ouverts ont été développés. Leur utilisation repose sur l'hypothèse de transparence aux ondes acoustiques. Contrairement aux ASM rigides, dont l'influence acoustique peut être corrigée. La littérature présente une grande variété d'ASM se distinguant par leur géométrie, leur rayon et leur nombre de microphones. Cependant, il est encore difficile de choisir une géométrie selon un objectif donné, les performances étant généralement évaluées dans des conditions différentes. Il est donc nécessaire d'utiliser des critères objectifs pour évaluer les ASM, notamment un critère adapté aux coordonnées sphériques pour la taille du lobe principal. L'ensemble de ce travail permettrait d'identifier les géométries les plus prometteuses.

Le rayon de l'antenne agit principalement sur la limite d'utilisation en basses fréquences, tandis que le nombre de microphones réduit l'apparition de lobes secondaires aux hautes fréquences. Toutefois, la principale limitation reste la largeur du lobe principal aux basses fréquences, particulièrement si l'objectif est d'utiliser une ASM de petite taille pour les milieux de travail.

Afin d'améliorer la résolution spatiale, des méthodes de déconvolution ont été adaptées aux ASM (Chu, Yang & He, 2015; Chu, Zhao, Yang & Yang, 2019). Des algorithmes tels que DAMAS ou CLEAN-SC permettent de réduire l'influence du lobe principal et des lobes secondaires produits par les algorithmes classiques. Cependant, ces méthodes reposent sur un processus itératif dont le temps de calcul est élevé, ce qui limite leur utilisation.

Des algorithmes de virtualisation ont été développés pour les ASM. Ils permettent d'augmenter virtuellement le rayon de l'ASM ou le nombre de microphones afin d'améliorer les performances sans modifier physiquement l'antenne. L'augmentation virtuelle du rayon reste généralement limitée à environ trois fois le rayon réel de l'antenne. Les méthodes d'holographie permettent d'atteindre des facteurs d'agrandissement plus élevés, mais avec une dégradation de la qualité des images acoustiques. Les algorithmes virtuels sont cependant sensibles aux bruits (erreurs de positionnement des microphones, au bruit électronique). L'utilisation d'une régularisation est alors nécessaire afin de limiter l'amplification de ces perturbations. Il reste donc à améliorer la méthode de virtualisation basée sur la fonction de Green et la méthode inverse avec la régularisation afin d'obtenir une réduction plus importante de la largeur du lobe principal en basses avec une ASM compacte, notamment sur le choix des paramètres de régularisation et sur

les limites de l'augmentation virtuelle du rayon. La méthode virtuelle proposée n'applique pas de matrice de régularisation, ce qui permet de conserver et d'étudier une formulation simple. Le cas du CBF comme référence à l'algorithme virtuel avec une ASM ouverte reste à étudier car, contrairement au SHB avec une ASM rigide — déjà traité dans des travaux antérieurs (Forma *et al.*, 2026) — cette configuration n'a pas encore fait l'objet d'une analyse équivalente.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET STRUCTURE DE LA THÈSE

2.1 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est le développement d'un algorithme performant d'imagerie acoustique pour le milieu de travail avec une antenne sphérique de microphones, évalué dans des conditions acoustiques idéales. La source doit être particulièrement identifiable en basses fréquences tout en maintenant une utilisation sur une large bande de fréquences. Le lobe principal doit représenter la source avec précision : petite taille du lobe principal et bas niveau de lobe secondaire. Les sous-objectifs du travail sont les suivants :

- **Sous-Obj. 1** Comparer des antennes sphériques de microphones ouvertes et rigides avec les algorithmes classiques CBF et SHB (formulation (iii) et d_n^{MD}) afin de repérer les configurations les plus performantes.
- **Sous-Obj. 2** Développer un algorithme de virtuel permettant d'obtenir des images acoustiques de bonnes qualités en basses fréquences avec une ASM compacte (petit nombre de microphones et faible rayon).

L'originalité des travaux proposés relève de plusieurs natures :

a) Étude numérique en champ libre des antennes sphériques ouvertes et rigides combinée à l'évaluation systématique de multiples géométries de microphones (t-design, Lebedev, Maximal Volume, Efficient t-design, Maximum Determinant) à l'aide du CBF et SHB, mettant en évidence leurs avantages et leurs limites pour l'imagerie acoustique.

b) Étude en champ libre d'un algorithme de virtualisation basé sur les fonctions de Green permettant d'augmenter le rayon d'une ASM compacte. Proposition d'une stratégie d'optimisation du rayon virtuel et du facteur de régularisation afin d'améliorer la qualité des images acoustiques en basses fréquences.

2.2 Structure de la thèse

Le Chapitre 1 a présenté la revue de littérature. La théorie générale des algorithmes pour obtenir une image acoustique a été donnée. Les critères d'évaluation d'une image acoustique provenant de la littérature ont été décrits. Les deux algorithmes classiques de *beamforming*, des algorithmes virtuels et les méthodes de régularisation ont été présentés. Une synthèse critique permet de dégager les questions de recherche et de donner les objectifs du projet de thèse. Les chapitres suivants répondent aux objectifs définis.

2.2.1 Chapitre 3 : Méthodologie

Ce chapitre présente les différentes géométries d'ASM. Les critères d'évaluation d'une image acoustique utilisés sont ensuite reformulés. Un critère est d'ailleurs développé pour évaluer la taille du lobe principale en coordonnées sphériques. Les simulations et les configurations utilisées pour étudier l'influence des géométries d'ASM et évaluer l'algorithme virtuel sont ensuite détaillées. La conception de l'antenne, la calibration des microphones et les conditions expérimentales pour la validation de l'algorithme virtuel sont décrites.

2.2.2 Chapitre 4 : Résultats

La Section 4.1 présente les résultats d'un article accepté dans le *Journal of Sound and Vibration* intitulé *Numerical evaluation of spherical microphone array designs on acoustic images under ideal conditions using conventional and spherical harmonic beamforming*. Il s'agit ici d'une étude de l'influence des différentes ASM afin de répondre au sous-objectif 1. Quinze géométries d'ASM ont été sélectionnées allant de 16 à 64 microphones et avec des ASM ouvertes et rigides. Les algorithmes classiques CBF et SHB sont utilisés pour obtenir les images acoustiques. La gamme de fréquences et le rayon s'étendent de 200 Hz à 8 000 Hz et de 0.04 m à 0.40 m. L'analyse est réalisée sur un ensemble de 36 et 50 microphones avec trois critères d'évaluation. Les résultats sont ensuite analysés selon la distribution du MSR pour les quinze géométries de 16 à 64 microphones.

La Section 4.2 est une étude numérique portant sur l'utilisation d'un algorithme virtuel basé sur la fonction de Green et la méthode inverse pour améliorer les performances d'une petite ASM ouverte en variant son rayon afin de répondre au sous-objectif 2. De plus, le cas d'une ASM rigide avec l'holographie et le krigeage a déjà fait l'objet d'une étude approfondie. L'ASM sélectionné provient de l'étude présentée dans la Section 4.1.

La Section 4.3 présente la validation expérimentale de l'algorithme virtuel. Les mesures réalisées en chambre anéchoïque avec un prototype d'antenne de 24 microphones et de 5 cm de rayon sont d'abord comparées à des simulations à l'aide du CBF, utilisé comme algorithme de référence, afin de valider le dispositif expérimental. L'algorithme virtuel est ensuite évalué pour différentes fréquences et différents facteurs d'augmentation du rayon. Deux critères permettent de quantifier la qualité des images acoustiques obtenues. Les résultats mettent en évidence une bonne concordance entre simulations et expériences jusqu'à un certain seuil, au-delà duquel les perturbations expérimentales dégradent les performances. Une étude de sensibilité au bruit est également menée afin d'expliquer ces écarts.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

La Section 3.1 donne les références des ASM identifiées dans la littérature et utilisées dans cette thèse. La Section 3.2 présente les critères d'évaluation des images acoustiques. Les différentes méthodologies pour : l'influence de différentes configurations d'ASM, l'évaluation des algorithmes virtuels, le développement d'un prototype d'ASM ainsi que la validation expérimentale sont respectivement données en Section 3.3, Section 3.5 et Section 3.6.

3.1 Ensemble de géométries pour les ASM

À partir de la revue de la littérature, quinze géométries de microphones ont été identifiées. Le nombre de microphones considéré varie de 16 à 64, afin d'assurer une cohérence avec les travaux précédents.

Certaines géométries autorisent l'utilisation d'un nombre quelconque de microphones. Elles sont désignées comme un "ensemble complet" et incluent les géométries :

- *t*-design,
- Minimum Energy,
- Packing,
- Covering,
- Maximal Volume,
- Spiral.

En revanche, d'autres géométries sont contraintes par leur définition mathématique, restreignant ainsi le nombre de microphones disponibles. Ces géométries sont désignées comme un "ensemble limité" et comprennent les géométries :

- Equi-angle,
- Gauss-Legendre,
- Lebedev,
- Fliege,
- Efficient *t*-design,
- L-design,
- Maximum Determinant,
- Fibonacci.

Un résumé des géométries utilisées est présenté dans le Tableau 3.1 où des références bibliographiques supplémentaires sont fournies. Les géométries Maximal Volume, Efficient t-design, L-design et Maximum Determinant n'ont pas encore été introduites dans le domaine de l'imagerie acoustique sous forme d'ASM. Toutes les géométries du Tableau 3.1 peuvent être utilisées avec l'algorithme CBF, contrairement à l'algorithme SHB qui nécessite de respecter l'orthogonalité des harmoniques sphériques. La valeur de l'ordre de troncature N est définie avec le produit du nombre d'onde par le rayon d'ASM, selon la relation suivante (Song, Ellermeier & Hald, 2008) :

$$N = \begin{cases} \lfloor kr_a \rfloor + 1, & \text{si } \lfloor kr_a \rfloor + 1 \leq N_{\max}, \\ N_{\max}, & \text{si } \lfloor kr_a \rfloor + 1 > N_{\max} \end{cases} \tag{3.1}$$

où $\lfloor \circ \rfloor$ représente la fonction d'arrondi à l'unité inférieure et $N_{\max}$ est l'ordre de troncature maximal.

Tableau 3.1 Résumé des géométries pour les ASM (ensemble complet) incluant les principes de construction, les poids associés et les principales références bibliographiques. (première partie).

	Géométries	Remarques	Autres Références
Ensemble complet	t-design	La quadrature de cette géométrie est exacte pour les polynômes de degré au plus t et utilise des poids égaux, tels que $\alpha_q = \frac{4\pi}{Q}$ (Hardin & Sloane, 1996). Le t-design est l'une des géométries les plus utilisées en imagerie acoustique lorsqu'on considère une ASM rigide. Les codes sont disponibles sur le site de Sloane.	Petersen (2004); Araujo & Pinto (2016) Rafaely (2019); Du *et al.* (2017) Rafaely (2005a) Lecomte et al. (2016)
	Min. Energy	Cette géométrie résulte de la minimisation de l'énergie potentielle de Q points sur une sphère (Sloane). Les poids sont supposés égaux, tels que $\alpha_q = \frac{4\pi}{Q}$.	Du *et al.* (2017)
	Packing	Cette géométrie résout un problème géométrique, à savoir la manière optimale de serrer des sphères égales les unes contre les autres. Les centres de ces sphères servent de positions aux microphones. Aucun poids spécifique n'est fourni. Comme les positions des microphones sont naturellement équidistantes, les poids sont supposés égaux, tels que $\alpha_q = \frac{4\pi}{Q}$.	Du *et al.* (2017); Sloane
	Covering	La géométrie de recouvrement est dérivée de la solution du problème consistant à trouver la manière la plus efficace de minimiser l'épaisseur de recouvrement entre des sphères sans laisser d'interstice (J.H. Conway & N.J.A. Sloane, 1999). L'objectif est de minimiser la distance maximale entre les points sur la surface de la sphère. Les centres des sphères servent de positions aux microphones, et des poids égaux peuvent également être supposés.	Du *et al.* (2017); Sloane
	Max. Volume	Les positions des microphones sont celles qui maximisent l'enveloppe convexe d'un volume défini par Q (Hardin & Sloane, 1995). Les positions sont régulièrement espacées et les poids sont supposés égaux.	Du *et al.* (2017); Sloane
	Spiral	Nommée ainsi par Du *et al.* (2017), cette géométrie suit une disposition hélicoïdale fondée sur le nombre d'or, fournissant à la fois un nombre pair et impair de positions. Les poids sont supposés égaux.	Swinbank & Purser (2006) Burkardt (2019)

Tableau 3.1 Résumé des géométries pour les ASM (ensemble limité) incluant les principes de construction, les poids associés et les principales références bibliographiques. (deuxième partie).

	Géométries	Remarques	Autres Références
Ensemble Limité	Équi-Angle	Il existe $Q = 4(N+1)^2$ positions, avec des poids $\boldsymbol{\alpha}$, comme indiqué dans Rafaely (2019), et N est l'ordre de troncature maximal supporté.	Rafaely (2005a, 2024)
	Gauss-Leg.	Il existe $Q = 2(N+1)^2$ positions, avec des poids $\boldsymbol{\alpha}$, comme indiqué dans Rafaely (2019).	Rafaely (2005a, 2024)
	Lebedev	Construite en faisant tourner les axes d'un octaèdre, cette géométrie donne un nombre limité de microphones avec des poids presque égaux attribués aux positions. Elle a été utilisée en ambisonie et donne de meilleurs résultats que les géométries de Fliege et t-design pour la reproduction du champ sonore avec 50 microphones (Lecomte et al., 2016).	Lebedev & Laikov (1999) Burkardt (2010)
	Fliege	Obtenue par minimisation de l'énergie potentielle des points, considérés comme des charges électriques (Fliege & Maier, 1999), cette géométrie donne des points presque équidistants. Le nombre de positions est $Q = (N+1)^2$, et les poids sont presque égaux. Bien que proche de la définition de l'Énergie Min., les positions résultantes sont différentes.	Lecomte et al. (**?**) Womersley (2020)
	B&K	Les microphones et les poids de la géométrie Brüel et Kjær, appelée géométrie B&K, sont fournis avec 36 microphones dans l'article de Chu et al. (2019) (les colonnes azimuth and colatitude sont inversées dans la notation de l'article de référence) et avec 50 microphones dans la thèse de Moreno (2008).	Haddad & Hald (2008) Hald (2013); Chu *et al.* (2015)
	Efficient t-design	Les géométries t-design sphériques efficaces offrent un rapport optimal entre Packing et Covering avec des poids égaux et arrangés de manière symétrique ou asymétrique (Womersley, 2017). Ici, les points asymétriques sont simplement appelés t-design Efficace.	Womersley (2020)
	L-design	Cette géométrie est un t-design sphérique efficace avec des poids égaux et des points symétriques. Moins de positions sont disponibles qu'avec des points asymétriques. Elle est appelée L-design, comme nommée par Puhle (2020).	Womersley (2020)
	Max. Det.	Cette géométrie est optimisée pour espacer les positions des microphones en maximisant le déterminant de la matrice de Gram des positions. Womersley et Sloane fournissent les positions avec $Q = (N+1)^2$ microphones disponibles et des poids presque égaux (Womersley & Sloan, 2001).	Womersley (2020)
	Fibonacci	Les positions sont à distances presque égales, en spirales opposées suivant le nombre d'or. Des poids égaux sont supposés. Le nombre de positions est exclusivement pair.	Swinbank & Purser (2006) Wright (2018)

L'ordre de troncature maximal est défini par $N_{max} = \lfloor \sqrt{Q} \rfloor - 1$ (Battista, Chiariotti & Castellini, 2018), ce qui permet d'assurer une valeur haute et standardisée entre les différentes géométries. Toutefois, l'ordre supporté par la géométrie, noté N_{sup}, peut dépasser l'ordre maximal calculé comme illustré en figure 3.1. L'Éq. 3.1 ajuste la troncature en fonction de kr_a ; l'image acoustique avec le SHB reste inchangée tant que $N(kr_a) \leq N_{sup}$. Lorsque $N(kr_a) > N_{sup}$, un repliement spatial apparaît généralement. Dans de rares cas, cela peut aussi entraîner un resserrement du lobe principal sans repliement spatial. En condition sans bruit, la règle de troncature donnée par l'Éq. 3.1 permet d'obtenir des résultats de *beamforming* correspondant à des fonctions d'étalement du point[1]. En raison de sa simplicité, l'Éq. 3.1 constitue une référence et reste applicable même en présence de bruit.

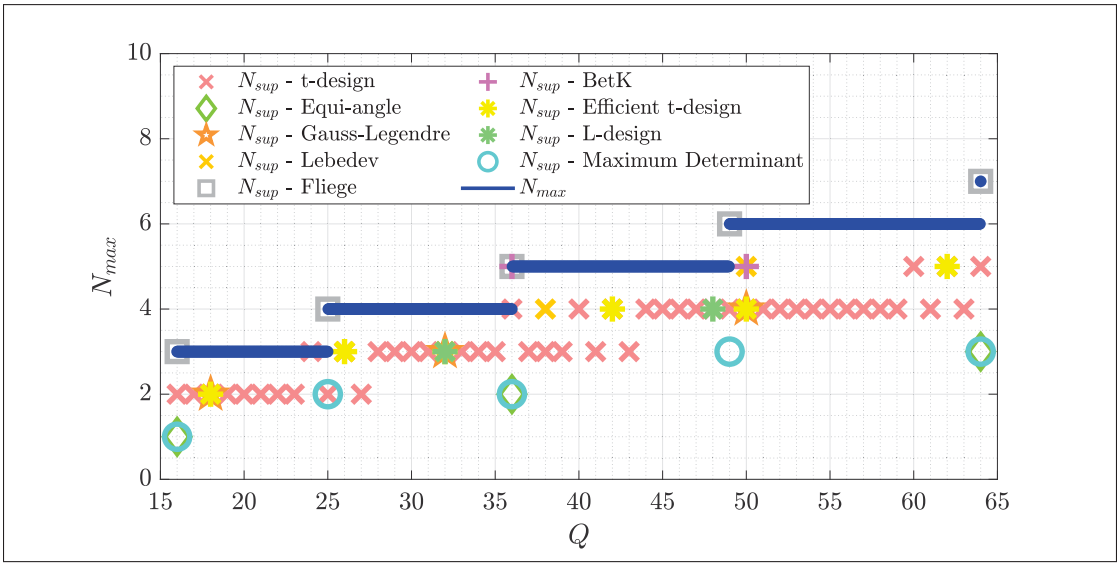


Figure 3.1 Ordre maximal supporté par la géométrie N_{sup} et ordre maximal standardisé N_{max}

La figure 3.2 présente la disposition des microphones sur l'ASM pour les géométries comportant un nombre de capteurs proche ou égal à 36. Les figures 3.2.(a) à .(e) et .(j) à .(n) présentent une distribution uniforme ou quasi uniforme des positions de microphones. Dans les figures 3.2.g, .h et .i, une disposition régulière des microphones est observée. Dans les figures 3.2.f et .o, les positions suivent un motif en spirale. Les géométries de type Lebedev, Fliege, Efficient *t*-design,

[1] *angl.* point spread functions

L-design et Maximal Determinant comportent des microphones placés aux pôles. Ces positions polaires peuvent entraîner des contraintes de conception, car elles nécessitent l'ajout d'un trépied au pôle inférieur pour maintenir l'ASM debout, et d'un second trépied au pôle supérieur pour fixer une caméra. Une rotation des positions permet de résoudre ce problème.

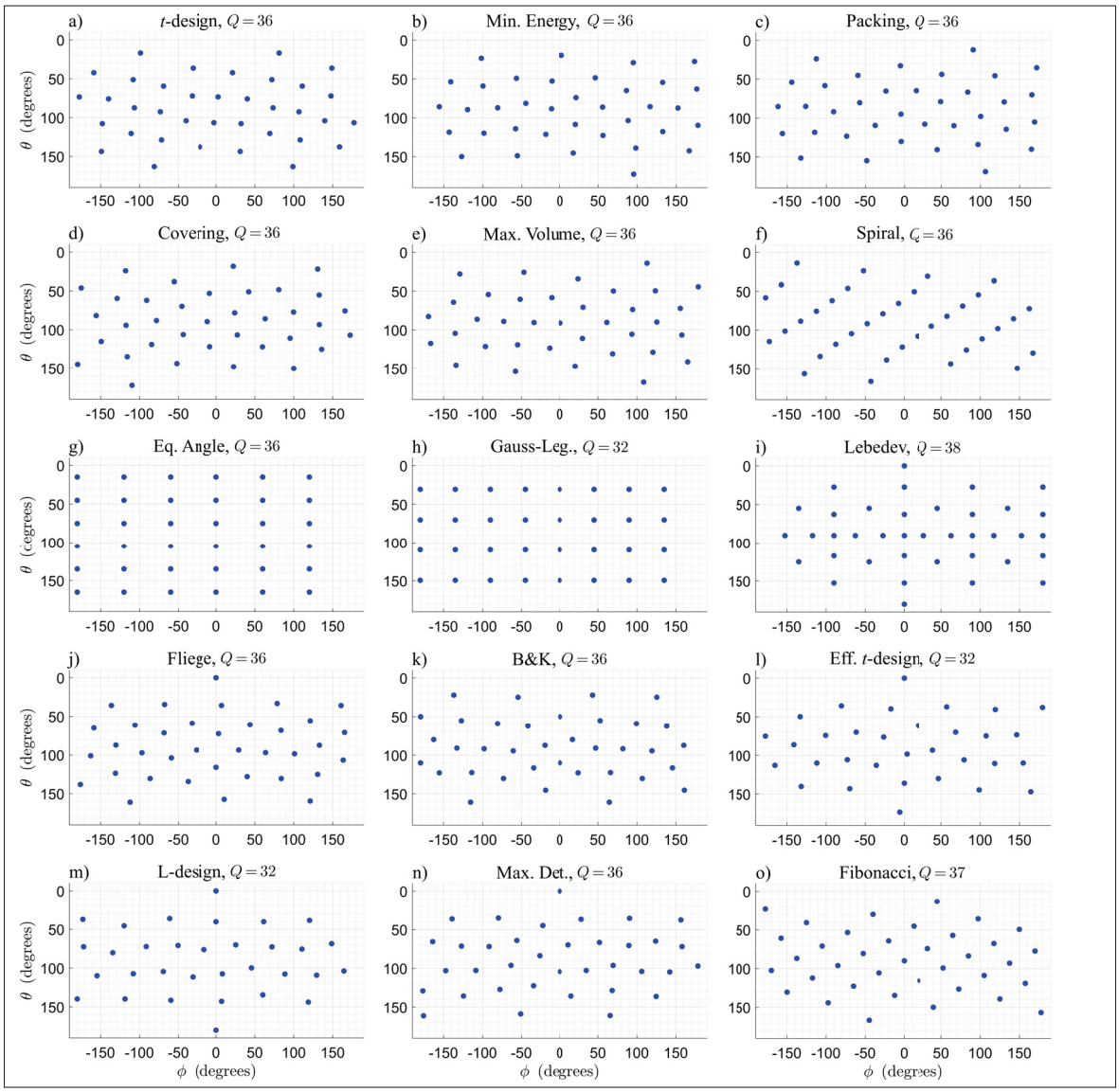


Figure 3.2 Les positions des géométries à 36 microphones ou au plus proche de ce nombre sont représentées dans le plan (ϕ,θ)

Les positions des microphones pour les différentes géométries sont disponibles en ligne dans le matériel complémentaire, qui contient également les ordres de troncature maximaux supportés,

les simulations numériques de la Section 3.3, ainsi que les résultats pour chaque configuration individuellement.

3.2 Critères d'évaluation

3.2.1 Différence de niveau du lobe principal (DNLP)

Pour rappel, dans une image acoustique, la valeur maximale du lobe principal doit théoriquement donner le niveau de la source (voir Section 1.5). Le critère de différence de niveau du lobe principal (DNLP) sert d'indicateur d'erreur sur le niveau estimé. La différence de niveau du lobe principal est donnée par DNLP $= L_e - L_r$, où L_e est le niveau estimé donné en Éq. 1.14 et où L_r est le niveau de référence délivré par la source, calculé selon $L_r = 10 \log_{10} |a|^2$ dB. La figure 3.3 montre un exemple d'images acoustiques pour illustrer le critère d'évaluation.

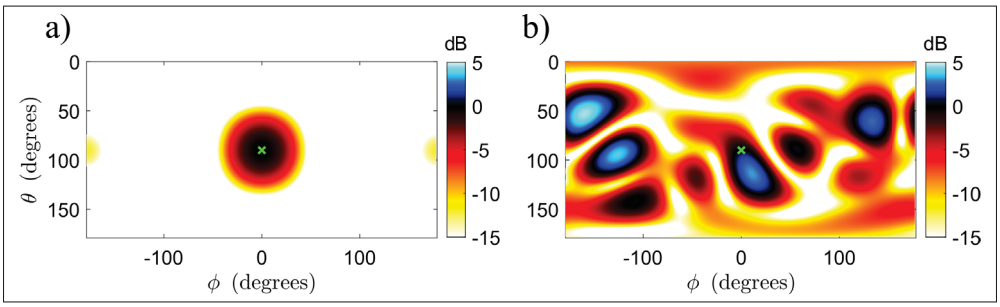


Figure 3.3 Exemple d'images acoustiques normalisées par rapport au niveau de référence L_r, permettant une discussion directe du critère de la DNLP, avec (a) DNLP = 0,0 dB et (b) DNLP = 4,7 dB. De plus, dans (b), le lobe principal est décalé de plus de 5° par rapport à la position attendue ici (croix verte), ce qui indique une erreur de localisation de la source due à un repliement spatial. Il est à noter qu'une valeur élevée de la DNLP n'implique pas nécessairement une erreur de localisation

3.2.2 Angle solide normalisé (ASN)

En imagerie acoustique, le lobe principal est un élément clé car il détermine la position de la source sonore. Un lobe principal plus étroit améliore la précision de la localisation de la source.

Lorsqu'on utilise une ASM, le lobe principal peut être caractérisé dans une représentation sphérique.

Un critère basé sur l'angle solide est proposé. L'angle solide Ω est défini par (Rouard *et al.*, 2023)

$$\Omega = \chi \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-1}^{1} \mathrm{d}(\cos\theta_l)\mathrm{d}\phi_l, \tag{3.2}$$

où χ représente un masque binaire pour laisser passer les valeurs au-dessus d'un certain seuil et d désigne l'opérateur différentiel.

Chaque point de l'image acoustique est associé à une cellule spécifique, et chaque cellule dont le niveau est supérieur ou égal à -3 dB est prise en compte dans le calcul. L'angle solide est ensuite normalisé par l'angle solide total d'une sphère (4π), ce qui permet d'obtenir l'angle solide normalisé (ASN),

$$\overline{\Omega} = \frac{\Omega}{4\pi}, \tag{3.3}$$

exprimé en pourcentage. Ce critère est introduit pour la première pour les images acoustiques. L'ASN est indépendant de la position du lobe principal dans l'image acoustique. Les évaluations présentées dans cette thèse sont néanmoins réalisées avec des images dont le lobe principal est centré. Le lecteur est invité à se reporter à l'Annexe II pour une présentation du pseudo-code de l'algorithme. Un lobe principal suffisamment étroit est défini comme ayant une valeur inférieure à 30 %, tandis qu'une valeur plus élevée indique que le lobe principal est trop large (voir figure 3.4). La capacité à séparer deux sources peut en être déduite en fonction de la taille du lobe principal (plus le lobe principal est petit, plus la capacité de séparation est grande). Dans certains cas, les lobes secondaires peuvent contribuer à l'ASN lorsque leur niveau dépasse le seuil de 3 dB, et que seul le rapport du lobe principal au lobe secondaire (MSR) peut révéler si cela se produit.

3.2.3 Niveau du lobe principal par rapport au lobe secondaire (MSR)

Pour rappel, le niveau du lobe principal par rapport au lobe secondaire, défini par $L_e - L_s$, caractérise la capacité de l'algorithme à minimiser le niveau des lobes secondaires L_s par

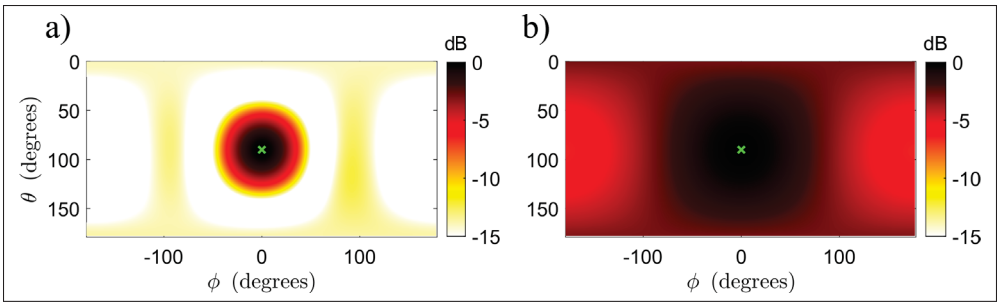


Figure 3.4 Exemple d'images acoustiques avec (a) un lobe principal étroit accompagné de lobes secondaires, conduisant à un ASN de 5%, et (b) un lobe principal large couvrant l'ensemble de l'image, entraînant un ASN de 50% (dépassant le seuil de 30%)

rapport au niveau du lobe principal L_e (voir Section 1.5.3). De plus, un lobe secondaire ayant un niveau élevé peut être interprété à mal comme une source acoustique, ce qui constitue un effet indésirable. Un MSR < 6 dB représente la limite au-delà de laquelle une image acoustique est rejetée (voir figure 3.5).

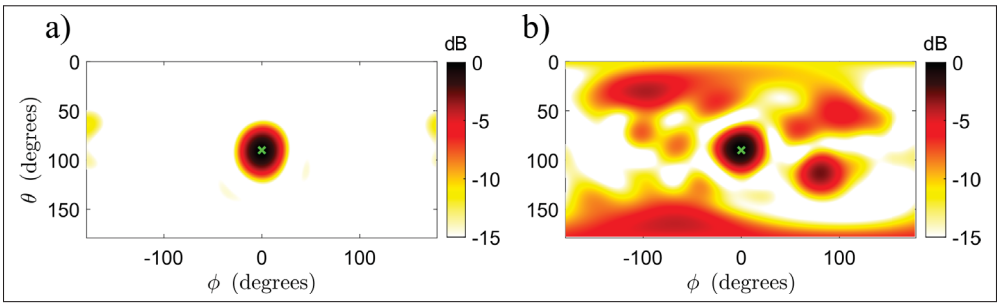


Figure 3.5 Exemple d'images acoustiques avec (a) un lobe principal accompagné d'un lobe secondaire faible, conduisant à un MSR de 10,9 dB (> 6 dB), et (b) un lobe principal avec de nombreux lobes secondaires forts, conduisant à un MSR de 2,8 dB (< 6 dB)

3.3 Simulations pour évaluer l'influence des différentes configurations d'ASM

Afin de comparer les performances des ASM, des simulations numériques sont réalisées. La source sonore est un monopole placé en ($\phi_s = 0°, \theta_s = 90°$). Une seule orientation de l'ASM est considérée, les performances étant supposées invariantes par rotation pour les géométries à distribution uniforme des microphones et peu sensibles à l'orientation pour les géométries à

distribution quasi uniforme. La distance entre la source et le récepteur a été choisie de manière à représenter un scénario pratique d'un environnement de travail, soit $r_s = 2$ m. La source émet des sons purs correspondant à 17 fréquences centrales de bandes de tiers d'octave allant de 200 à 8 000 Hz. Chaque son pur possède une amplitude correspondant à un niveau de pression sonore de 94 dB à 1 m de la source. La puissance de la source est calculée comme suit : $a = 4\pi p_0 10^{94/20}$ N m^{-1}, où p_0 représente la pression acoustique de référence ($p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa). Des conditions de champ libre sont supposées dans la simulation numérique afin d'éviter l'apparition de lobes supplémentaires dus aux réflexions sur le sol ou les parois. De plus, aucun bruit aléatoire n'est ajouté aux signaux des microphones, afin de se concentrer uniquement sur les performances des ASM. Les rayons d'ASM varient entre 4 et 40 cm avec un pas logarithmique, ce qui donne un total de 30 rayons distincts. La pression acoustique au microphone indicé q, notée $p_q(r_q, \phi_q, \theta_q)$, est déterminée en effectuant une transformée de Fourier sphérique inverse du champ généré par une source monopolaire de magnitude a. Ce processus tient compte des caractéristiques du réseau à travers la fonction de transfert $b_n(r_s, r_a, k)$ (ouverte ou rigide, voir Eq. 1.8) Rafaely (2019),

$$p_q(r_q, \phi_q, \theta_q, k) = a \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=-n}^{n} b_n(r_s, r_q, k)\, Y_n^{m^*}(\phi_s, \theta_s)\, Y_n^m(\phi_q, \theta_q) \tag{3.4}$$

où la sommation est tronquée dans le calcul selon, $N = \left\lceil 1{,}2\, kr_a + 8\, \frac{r_s/r_a + 1}{r_s/r_a} \right\rceil$ assurant des erreurs d'amplitude d'environ 10^{-9} Pereira (2013), et où $\lceil \cdot \rceil$ désigne la fonction donnant la partie entière inférieure d'un nombre. Le premier terme impose une pente de 1,2 par rapport à kr_a. Le second terme garantit un ordre minimal de $N = 8$ pour les sources en champ lointain et les réseaux de petit rayon (par exemple, pour $r_s = 2$ m, N varie de 9 à 10 lorsque r_a augmente de 0,04 à 0,40 m). Cet ordre de troncature vise à équilibrer la précision et le coût de calcul, les ordres plus élevés augmentant significativement le temps de traitement. La zone de balayage, dans laquelle la source est recherchée, est constituée d'une grille de 180×90 points répartis uniformément selon les angles d'azimut et de colatitude, à une distance de $r_l = 2$ m. L'image acoustique est ensuite obtenue respectivement à l'aide des algorithmes CBF ou SHB. Pour cela, la formulation classique en Éq. 1.2 est utilisée pour générer l'image acoustique. Pour le CBF, le vecteur de balayage $\mathbf{w}_l \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$ est construit à partir de la formulation *iii* du tableau 1.1. Le gain

du SHB, noté d_n, est un scalaire qui dépend de l'ordre N et est défini par la formulation MD du Tableau 1.2.

Un total de 318 240 images acoustiques sont générées (voir figure 3.6) où 156 configurations de géométries sont considérées (Voir Tableau 3.2)

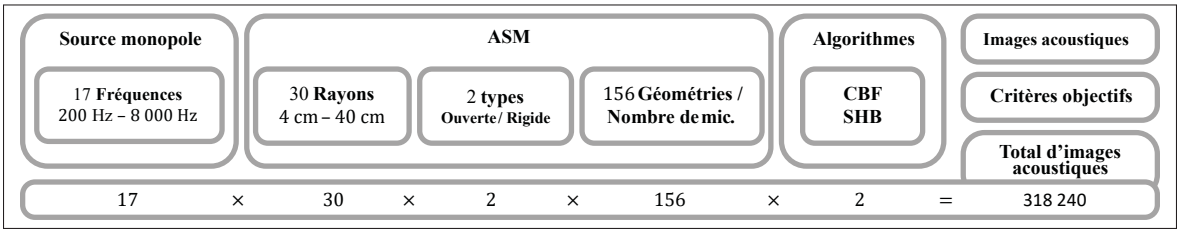


Figure 3.6 Les configurations obtenues à partir de la simulation numérique

Ainsi, les images obtenues peuvent être considérées comme des fonctions d'étalement du point d'ASM. Afin de se concentrer uniquement sur les performances des ASM, aucun bruit aléatoire n'est ajouté aux signaux des microphones. Les performances sont évaluées pour deux ensembles de microphones, 36* et 50*, avec les critères de DNLP, d'ASN et de MSR. Dans les figures présentées dans la section des résultats :

- un point magenta est ajouté au graphique pour indiquer une erreur de localisation de la source lorsqu'il y a un écart de plus de 5° en azimut ou en colatitude entre la position estimée de la source et sa position réelle ;
- un point noir indique les cas où aucun lobe secondaire n'est détecté, rendant ainsi le MSR non défini. Dans de telles situations, l'angle solide constitue une alternative pertinente pour évaluer les performances.

Afin d'approfondir l'analyse comparative des différentes géométries, l'effet du nombre de microphones sur le MSR est ensuite évalué, en utilisant un pas linéaire kr de 0,1 et en considérant ses valeurs minimale, maximale et moyenne.

Les résultats de ce travail sont donnés dans la Section 4.1.

Tableau 3.2 Les quinze géométries sélectionnées, ainsi que le nombre de microphones disponibles donnent un total de 156 configurations. Un ensemble complet est défini comme une configuration de 16 à 64 microphones par pas de 4, les nombres 25, 26, 37, 38, 42, 49, 50 et 62 étant en outre inclus pour correspondre à l'ensemble limité de microphones. Le symbole • représente les géométries où le nombre de microphones est le plus proche de 36, noté 36*, et le symbole ■ représente les géométries où le nombre de microphones est le plus proche de 50, noté 50*

	Geometries	**Q**																				
		16	20	24	25	26	28	32	36	37	38	40	42	44	48	49	50	52	56	60	62	64
Ens. complet	*t*-design	×	×	×	×	×	×	×	•	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	×	×	×
	Min. Energy	×	×	×	×	×	×	×	•	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	×	×	×
	Packing	×	×	×	×	×	×	×	•	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	×	×	×
	Covering	×	×	×	×	×	×	×	•	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	×	×	×
	Max. Volume	×	×	×	×	×	×	×	•	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	×	×	×
	Spiral	×	×	×	×	×	×	×	•	×	×	×	×	×	×	×	■	×	×	×	×	×
Ensemble limité	Equi-Angle	×							•													■
	Gauss-Leg.							•									■					
	Lebedev					×					•						■					
	Fliege	×			×				•							■						×
	B&K								•								■					
	Eff. *t*-design					×		•					×				■				×	
	L-design							•							■							
	Max. Det.	×			×				•							■						×
	Fibonacci				×					•						■						

3.4 Algorithme virtuel basé sur le pseudo-inverse de fonction de Green

L'algorithme virtuel est basé sur le pseudo-inverse de fonction de Green (VPIG). Il est utilisé pour faire varier virtuellement le rayon de l'ASM avec le facteur d'agrandissement τ, tel que $\check{r}_a = \tau r_a$ (voir figure 3.8 et 3.7). L'algorithme VPIG transforme la pression mesurée en une pression virtuelle à l'aide du produit matriciel $\check{\mathbf{G}}(k)\mathbf{G}^{\dagger}(k)$, où les matrices sont construites à partir de fonctions de Green associées aux positions réelles et virtuelles des microphones. La pression virtuelle $\check{\mathbf{p}} \in \mathbb{C}^{\check{Q}\times 1}$ est alors exprimée comme une combinaison linéaire de l'ensemble des pressions mesurées,

$$\check{\mathbf{p}}(k) = \check{\mathbf{G}}(k)\mathbf{G}^{\dagger}(k)\mathbf{p}(k). \tag{3.5}$$

où $\mathbf{G}^{\dagger}(k) = \mathbf{G}^{H}(k)\left(\mathbf{G}(k)\mathbf{G}^{H}(k)\right)^{-1}$ désigne le pseudo-inverse de Moore-Penrose. L'expression $\mathbf{G}^{\dagger}(k)\mathbf{p}(k)$ fournit une première estimation de la source, notée $\tilde{\mathbf{a}}$, sans facteur ni matrice de régularisation. Pour une antenne ouverte, les éléments des matrices $\mathbf{G}$ et $\check{\mathbf{G}}$ sont donnés respectivement par les Éq. 1.4 et 1.12.

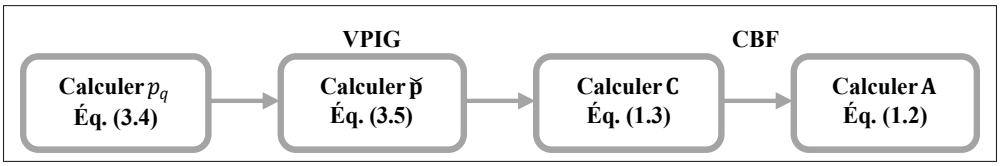


Figure 3.7 Étape de calcul pour produire une image acoustique avec l'algorithme VPIG

Contrairement à Del Galdo *et al.* (2011), qui utilisent les fonctions de Green pour estimer la pression en un point virtuel, le VPIG permet de calculer un ensemble de pressions virtuelles à partir d'un ensemble de pressions mesurées, constituant une ASM virtuelle complète sur laquelle peut être appliqué un algorithme d'imagerie acoustique. Les travaux de Yang *et al.* (2019) et Shi *et al.* (2023) utilisent également une méthode inverse régularisée suivie d'une extrapolation des pressions virtuelles. Cette thèse se distingue par son application à l'imagerie acoustique avec une ASM compacte, ainsi que par l'étude et l'optimisation des paramètres de virtualisation et de régularisation afin d'améliorer les performances en basses fréquences.

3.5 Étude numérique pour évaluer l'algorithme VPIG

Une simulation numérique est réalisée afin d'évaluer les performances de l'algorithme VPIG. Cette simulation reprend la méthodologie présentée en Section 3.3, avec quelques adaptations. La source sonore est encore un monopole placé à ($\phi_s = 0°, \theta_s = 90°$). La distance source-antenne est, quant à elle, fixée à $r_s = 4$ m, ce qui correspond aux conditions expérimentales présentées en Section 3.6.3. La source émet des sons purs correspondant à un niveau de pression sonore de 94 dB à 1 m. Le vecteur de fréquence s'étend de 50 Hz à 499 Hz avec un pas de 1 Hz, puis de 500 Hz à 4 000 Hz avec un pas de 5 Hz. Cela permet de conserver une haute résolution en basses fréquences tout en limitant le temps de calcul aux hautes fréquences. Les ASM ont un rayon de 5 cm. Une valeur qui correspond au critère d'antenne compacte et est plus petite que celles présentées dans la littérature pour la virtualisation. Le champ de pression est simulé à l'aide des harmoniques sphériques en condition de champ libre comme précédemment. La zone de balayage est à une distance de $r_l = 4$ m du centre de l'ASM et les paramètres de la grille de balayage demeurent inchangée (voir figure 3.8). L'image acoustique est ensuite obtenue avec les algorithmes de *beamforming* détaillé ci-après. Les performances sont systématiquement évaluées à travers trois critères : le DNLP, l'ASN, et le MSR.

Le CBF est appliqué à un ensemble de géométries d'ASM ouvertes et réelles, ayant les meilleurs compromis entre un MSR élevé et un nombre réduit de microphones, et qui sont identifiées lors de l'analyse des résultats en Section 4.1. Les configurations retenues sont les géométries Min. Energy à 22 microphones, Packing à 26 microphones, *t*-design à 24 microphones, Spiral à 36 microphones et Fibonacci à 25 microphones. Ces résultats sont présentés en Section 4.2.1. La meilleure configuration sélectionnée est utilisée ensuite. L'objectif est d'étendre aux basses fréquences les valeurs provenant des critères de performance de l'image acoustique jusqu'alors valide à de plus hautes fréquences seulement.

L'algorithme VPIG est présenté en Section 4.2.2 où le paramètre adimensionné (kr_a) est utilisé pour maintenir une valeur constante d'ASN ciblée (10%, 7,5% et 5%) aux basses fréquences. Ces valeurs correspondent à des valeurs discrètes $kr_{cible} = 1{,}80$, 2,53 et 3,11. Le facteur d'agrandissement est alors défini par $\tau = kr_{cible}/kr_a$.

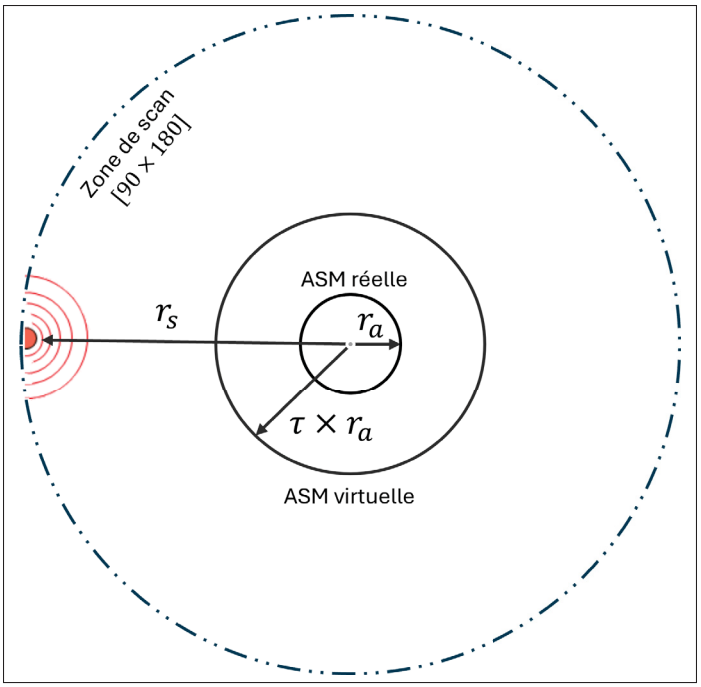


Figure 3.8 Schéma de l'ASM réelle de rayon r_a et virtuelle de rayon $\check{r}_a = \tau r_a$ face à une source à une distance r_s, avec délimitation de la zone de balayage

La stabilité numérique du processus de virtualisation est étudiée avec le nombre de conditionnement $\kappa(\check{\mathbf{G}}\mathbf{G}^{\dagger})$ en fonction de τ et de la fréquence. Cette approche permet de quantifier l'amplification des perturbations induites par le mauvais conditionnement du produit matriciel. Puis, la robustesse de l'algorithme VPIG est évaluée en comparant le MSR et l'ASN obtenues avec et sans perturbation aléatoire du spectre de pression, modélisée par $p_q^{\varepsilon} = p_q(1 + \varepsilon_q e^{\imath\varphi_q})$, où ε_q et φ_q définissent respectivement l'amplitude et la phase de la perturbation complexe. La perturbation est générée à partir de variables aléatoires de distribution normale, de moyenne nulle et de variance unitaire, puis normalisée afin d'obtenir le rapport signal sur perturbation (RSP) souhaité. Le rapport du signal sur la perturbation (bruit équivalent) est ensuite calculé tel que $\text{RSP} = 10\log\left(\sum_1^Q |p_q|^2 / \sum_1^Q |(p_q - p_q^{\varepsilon})|^2\right)$. Le RSP est calculé à partir de la puissance de la perturbation et dépend uniquement de l'amplitude. L'erreur de phase est obtenue à partir de l'argument du produit complexe entre le spectre perturbé et le spectre de référence, $\Delta\varphi_q = \arg\left(p_q p_q^*\right)$. L'erreur de phase quadratique moyenne est ensuite calculée selon $\Delta\varphi_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_1^Q \Delta\varphi_q^2 / Q}$, tandis que l'erreur de phase maximale est définie par

$\Delta\varphi_{max} = \max_q |\Delta\varphi_q|$. Enfin, l'influence du facteur d'agrandissement τ avec la perturbation est analysée à partir des images acoustiques obtenues à $f = 500$ Hz. Les résultats sont présentés en Section 4.2.3.

3.6 Développement et validation expérimentale

Cette section décrit la validation expérimentale de l'algorithme VPIG avec l'augmentation du rayon en condition de champ libre. L'hypothèse qu'un agrandissement soit possible en condition expérimentale contrôlée avec une antenne ouverte de petite taille est à valider. Habituellement, une antenne de plus grande dimension aurait été utilisée. À titre de comparaison, l'antenne commerciale de (GFaI Tech, 2022a) possède 120 microphones et un rayon de 30 cm, pour une limite d'utilisation de 187 Hz aux basses fréquences. De même, Shi *et al.* (2023) et Yang *et al.* (2023) utilisent une antenne de même rayon, mais composée de 48 microphones, afin d'obtenir des résultats exploitables jusqu'à 125 Hz. L'objectif est ici de réduire à la fois le rayon de l'ASM et le nombre de microphones. La contrainte d'une ASM de petite taille impose également l'utilisation de microphones miniatures. La conception et l'électronique de l'antenne sont décrites en Section 3.6.1. La calibration des microphones, en amplitude et en phase, est décrite en Section 3.6.2. La configuration expérimentale en chambre anéchoïque, la procédure d'utilisation de l'algorithme virtuel et les outils d'analyse sont donnés en Section 3.6.3.

3.6.1 Développement d'un prototype d'ASM

La figure 3.9 présente une ASM ouverte, de géométrie *t*-design avec 24 microphones, conçue sur le logiciel de conception Autodesk Inventor. Cette ASM a un rayon de 5 cm. Les réceptacles des microphones sont des cylindres creux d'un diamètre interne de 3 mm. Le diamètre externe est de 6 mm et la hauteur de 6 mm. Les tiges de maintien mesurent 6 mm de diamètre et relient chaque cylindre. Une numérotation de 1 à Q est placée à l'intérieur de l'ASM ainsi que les indications d'orientations de l'antenne : U, D, R, L, F, et B pour *Up*, *Down*, *Right*, *Left*, *Front* et *Back*. Une imprimante 3D Formlabs Form 2 a permis d'imprimer l'ASM *t*-design à 24 microphones. La résine Grey Pro V1 a été utilisée. L'épaisseur de couche a été ajustée automatiquement.

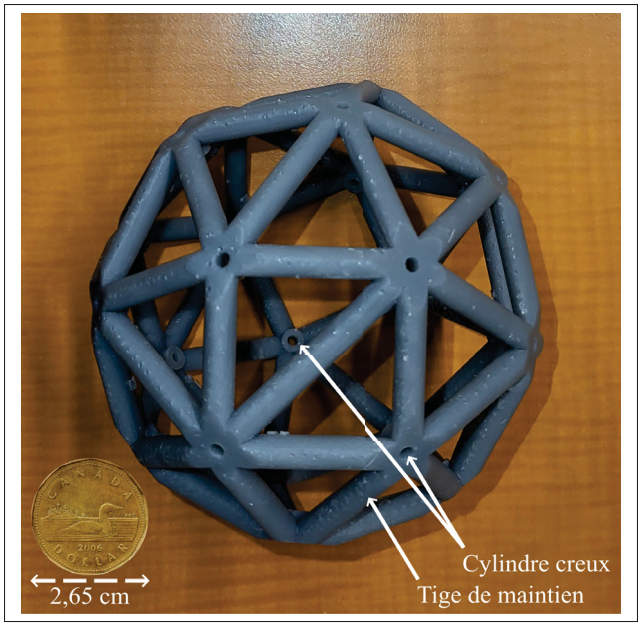


Figure 3.9 ASM obtenue par impression 3D : t-design, $Q = 24$ et $r_a = 5$ cm

L'installation de microphones B&K 4935 1/4", typiquement utilisés, est impossible en raison d'une longueur surpassant le rayon de l'antenne conçue. Les dimensions sont données dans le Tableau 3.3. Les microphones Knowles PG-23329-P07 sont utilisés à la place. Ils ont des dimensions petites, adaptées pour une ASM de 5 cm de rayon. Ce sont des microphones omnidirectionnels avec une réponse linéaire de 100 Hz à 10 kHz selon les spécifications techniques du fabricant. La figure 3.10 présente la chaîne de conditionnement du signal des microphones. Les microphones sont câblés pour un connecteur jack miniature 3,50 mm associé à une carte PCB de dimensions 12,65 × 38,00 mm. Elle est conçue pour amplifier le signal de chacun des microphones par 12 fois et intègre un filtre passe-haut avec une fréquence de coupure à 10 Hz. La carte PCB est câblée et se connecte à un boîtier d'alimentation à 12 voies qui contient des connecteurs BNC pour l'acquisition des signaux.

Tableau 3.3 Dimensions des microphones

Référence	**Diamètre**	**Longueur**
B&K 4935	7 mm	65 mm
Knowles PG-23329-P07	3 mm	2,57 mm

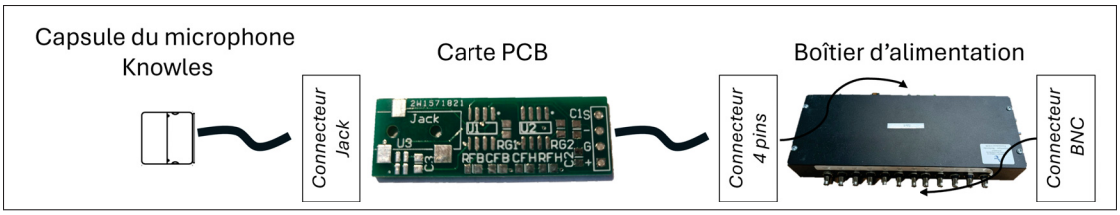


Figure 3.10 Schéma-bloc microphone + carte PCB + alimentation

3.6.2 Calibration des microphones par fonction de transfert

Les microphones, indicés q, sont calibrés en phase et amplitude en salle réverbérante à l'aide d'un microphone de référence. La fonction de transfert complexe utilisée pour cette calibration est donnée par,

$$H_{q\to ref}(f) = \frac{S_{ref}(f)S^*_{ref}(f)}{S_q(f)S^*_{ref}(f)}, \tag{3.6}$$

où S représente le spectre du signal mesuré. Cette fonction de transfert complexe permet de corriger l'amplitude avec l'autospectre du microphone de référence $S_{ref}(f)S^*_{ref}(f)$ et la phase avec l'interspectre du microphone à calibrer et du microphone de référence $S_q(f)S^*_{ref}(f)$. Le signal utilisé est un bruit blanc d'une durée de 10 secondes, généré via une connexion Hi-Speed USB Carrier NI USB-9162 couplée à une carte NI 9263. Quatre haut-parleurs Mackie HD 1531 sont positionnés aux coins de la salle réverbérante. Des réflecteurs sont disposés proches des murs pour assurer un champ sonore diffus et homogène en énergie en tout point de la salle. L'acquisition est réalisée à l'aide d'un châssis NI PXIe-1073 équipé d'une carte NI PXIe-4497. Les signaux sont échantillonnés à 51 200 Hz. Les microphones à calibrer sont des Knowles PG-23329-P07. En figure 3.11, le microphone de référence est positionné juste en dessous du microphone à calibrer, afin qu'il se situe dans le même champ acoustique. Ceci est réalisé pour les 24 microphones. Le microphone de référence est un B&K 4961 1/4", multichamp, préalablement calibré en amplitude. Les résultats de calibrations sont donnés en Annexe III.

3.6.3 Configurations pour la validation expérimentale

La figure 3.12 présente l'assemblage, comprenant l'antenne de géométrie t-design avec les 24 microphones Knowles câblés, connectés aux cartes PCB et aux boîtiers d'alimentation.

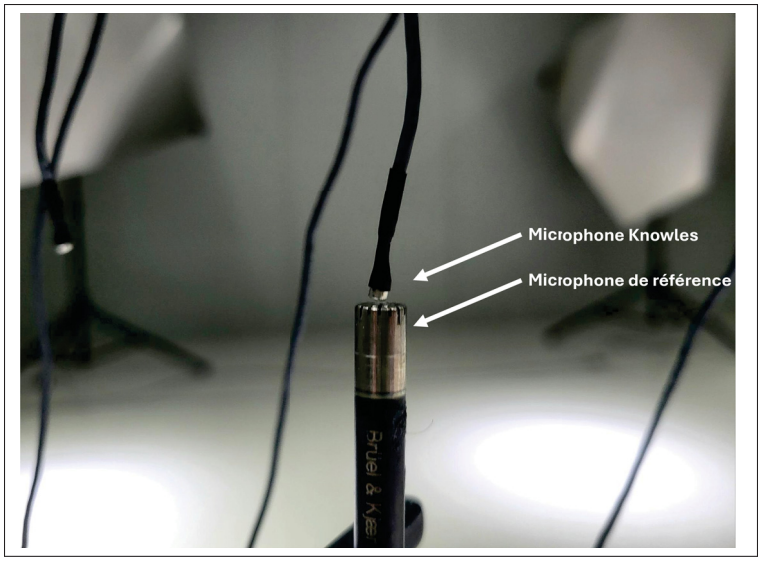


Figure 3.11 Calibration des microphones en salle réverbérante

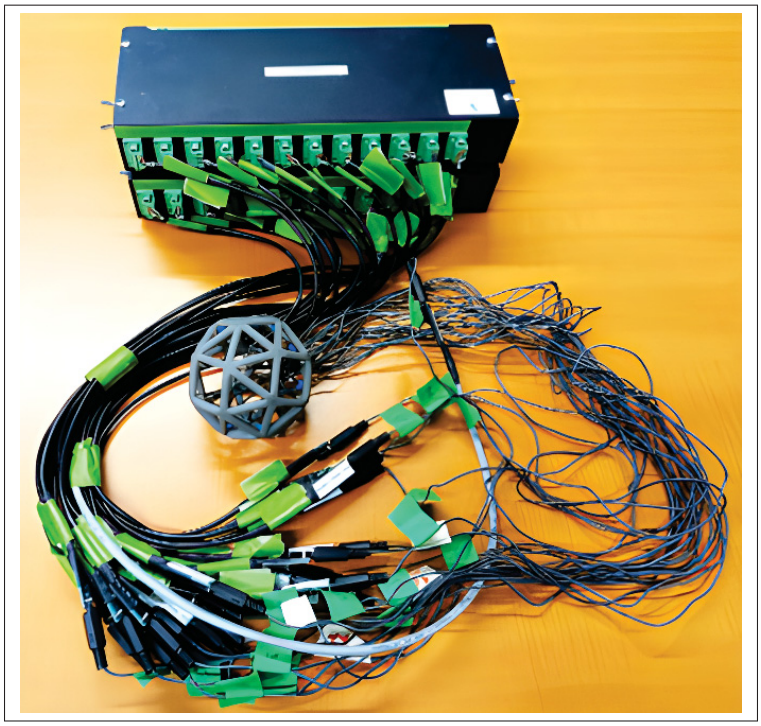


Figure 3.12 Ensemble du dispositif de mesure présentée sur une paillasse. L'ASM *t*-design contient les 24 microphones qui sont connectés aux cartes PCB puis aux deux boîtiers d'alimentation

Les mesures en conditions contrôlées sont réalisées en chambre anéchoïque. La chambre, initialement semi-anéchoïque, est rendue anéchoïque par la pose de cône supplémentaire au sol (voir figure 3.13). Un générateur Minarator MR2 émet un signal bruit blanc de 20 secondes. Le générateur est connecté à un haut-parleur Presonus Eris E5 qui est placé à une hauteur de 1,35 m au-dessus du sol et à 4 m en face de l'ASM. L'ASM utilisée est celle conçue en Section 3.6.1. L'ensemble du dispositif de mesure, de l'ASM aux boîtiers d'alimentation, est connecté au système d'acquisition Siemens SCADAS MOBILE à 48 voies pour une mesure synchrone de 30 s. Les signaux sont échantillonnés à $f_s = 51\,200$ Hz.



Figure 3.13 Point de vue depuis l'ASM en chambre anéchoïque. L'ASM est maintenue par une pince sur un trépied. Le haut-parleur est au fond de la chambre en face de l'ASM

Une comparaison entre les images acoustiques simulées et expérimentales obtenues avec le CBF est réalisée en Section 4.3.1 afin de valider le dispositif expérimental. La source étant unique et de position connue, cette comparaison permet de vérifier la cohérence du montage, de la calibration et du positionnement de l'ASM avant l'évaluation des approches virtuelles. Les images obtenues avec le CBF servent ensuite de référence pour mettre en évidence les gains apportés par l'algorithme virtuel. L'algorithme VPIG est ensuite utilisé en Section 4.3.2. La pression virtuelle obtenue est utilisée avec le CBF pour produire les images. Cette première application

est réalisée sans régularisation, afin d'observer les performances brutes de l'algorithme. Elles révèlent une sensibilité accrue au bruit et aux instabilités de l'inversion.

Pour y remédier, un facteur de régularisation est ajouté au pseudo-inverse de fonctions de Green. La reformulation reprend la méthode inverse de *beamforming*, voir Éq. 1.10, où la matrice de régularisation est une matrice identité D = I. Cependant, le pseudo-inverse est décomposé en valeurs singulières, voir Éq. A V-6, afin d'appliquer la régularisation sur les différents modes. La figure 3.14 présente les étapes de calculs pour y parvenir.

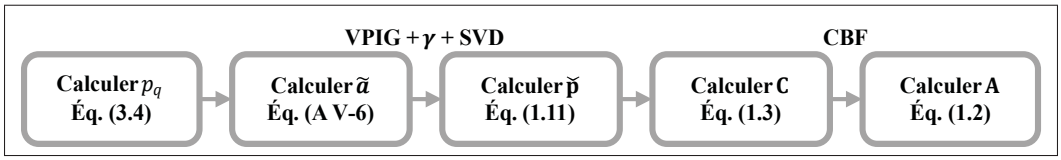


Figure 3.14 Étape de calcul pour produire une image acoustique avec l'algorithme VPIG régularisé et décomposé en valeurs singulières

Une étape d'optimisation des paramètres est ensuite menée, portant à la fois sur le facteur de régularisation γ et sur le rayon virtuel $\check{r}_a$. L'optimisation permet de trouver un couple de valeurs (τ, γ) qui permet de stabiliser l'inversion tout en maximisant la résolution spatiale. Pour ce faire, une grille de valeurs est explorée dans un espace défini par $\gamma \in [0, 1]$ et $\tau = \pm 4 \times r_{cible}$ avec $kr_{cible} = 1.8$. Chaque combinaison (τ, γ) est évaluée à partir d'indicateurs de performance tels que le MSR et l'ASN, calculés sur une carte de 100×100 points. Les résultats sont donnés en Section 4.3.3.

Pour exploiter efficacement les configurations admissibles, un algorithme de centroïde pondéré est introduit (voir Annexe IV). Il permet d'identifier un couple de valeurs optimales calculées à partir d'une fonction de score s_i qui combine les performances (MSRi, ASNi) et l'écart entre le centre de l'image (ϕ_s, θ_s) et la position de la source identifié par le lobe principal. Un poids w_i est attribué à chaque point admissible, permettant de calculer les valeurs optimales pondérées τ^* et λ^*. Le centroïde est alors une moyenne centrée sur les points les plus pertinents présents dans une zone de valeurs admissibles d'ASN et de MSR. La convergence de l'algorithme est contrôlée par l'avancement par paliers des zones admissibles. Les paliers de l'ASN varient de

45% à 30% par pas de 1% avec un MSR supérieur 6 dB, puis le MSR varie de 6 dB à 22 dB par pas de 0,1 dB en conservant un palier d'ASN inférieur à 30%. Un critère d'arrêt est fixé à MSR $\geq$ 22 dB ou lorsqu'il ne reste que 20 points admissibles.

Enfin, la pression virtuelle et l'image acoustique obtenue avec l'algorithme VPIG avec et sans régularisation (voir respectivement figures 3.7 et 3.14) sont utilisées avec l'algorithme hybride pour obtenir une nouvelle image acoustique (voir Éq. 1.13). Cet algorithme bénéficie à la fois de la pression virtuelle et de l'image, toutes deux régularisées. L'objectif est de démontrer que l'algorithme hybride seul ne suffit pas à obtenir une image acoustique de qualité avec une ASM compacte et en basses fréquences. Les résultats sont présentés en Section 4.3.5.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Influence de différentes conceptions d'ASM avec les algorithmes CBF et SHB

Cette section vise à comparer de manière systématique le CBF et le SHB pour des ASM ouvertes et rigides, en explorant une large gamme de rayons, de nombres de microphones et de géométries, afin d'identifier les facteurs clés pour concevoir une ASM optimale. Les conceptions existantes, qu'elles soient commerciales ou sur mesure, manquent souvent de justifications détaillées pour ces choix. Pour rappel, les géométries utilisées sont présentées en Section 3.1. L'évaluation des performances est basée sur des critères objectifs. Ils sont donnés en Section 3.2, incluant la précision du niveau de la source, la largeur du lobe principal et le niveau des lobes secondaires. La méthodologie des sections suivantes est donnée en Section 3.3. À cet égard, l'influence des conceptions d'ASM et des géométries de microphones sur l'imagerie acoustique est évaluée avec 36* et 50* microphones, en utilisant les critères de DNLP (Sections 4.1.1), d'ASN (Section 4.1.3), et du MSR (Section 4.1.4). Les désignations 36* et 50* sont utilisées par commodité : le nombre de microphones le plus proche est utilisé et dépend de la géométrie considérée (voir Tableau 3.2). Afin de faciliter la comparaison entre différentes fréquences et tailles d'antennes, les résultats sont exprimés en fonction du paramètre sans dimension physique : kr_a. Le Tableau I-1 fournit une référence permettant de convertir kr_a en valeurs physiques de fréquence et de rayon, aidant ainsi à estimer la plage opérationnelle pratique de l'antenne. Les conceptions d'ASM et les géométries de microphones sélectionnées sont également évaluées à l'aide de la distribution du MSR en Section 4.1.4.1, avec un nombre de microphones variable. La conclusion est donnée en Section 4.1.5.

4.1.1 Influence des ASM selon la DNLP avec le CBF

Les figures 4.1 et 4.2 affichent la différence de niveau du lobe principal par rapport au niveau de la source (DNLP) pour toutes les géométries en fonction de kr_a avec des microphones 36* et 50*. La DNLP est tracée en valeur absolue, telle que DNLP $= |L_e - L_r|$, où $|\cdot|$ désigne la

valeur absolue. La barre de couleur de DNLP va de 0 à 3 dB ; les valeurs en dehors de cette plage sont colorées en blanc.

Comme le montre la figure 4.1, la DNLP des ASM ouvertes se situe dans la zone égale à zéro. Ces résultats montrent que la géométrie et le nombre de microphones n'ont pas d'effet sur la DNLP avec le CBF et les ASM ouvertes.

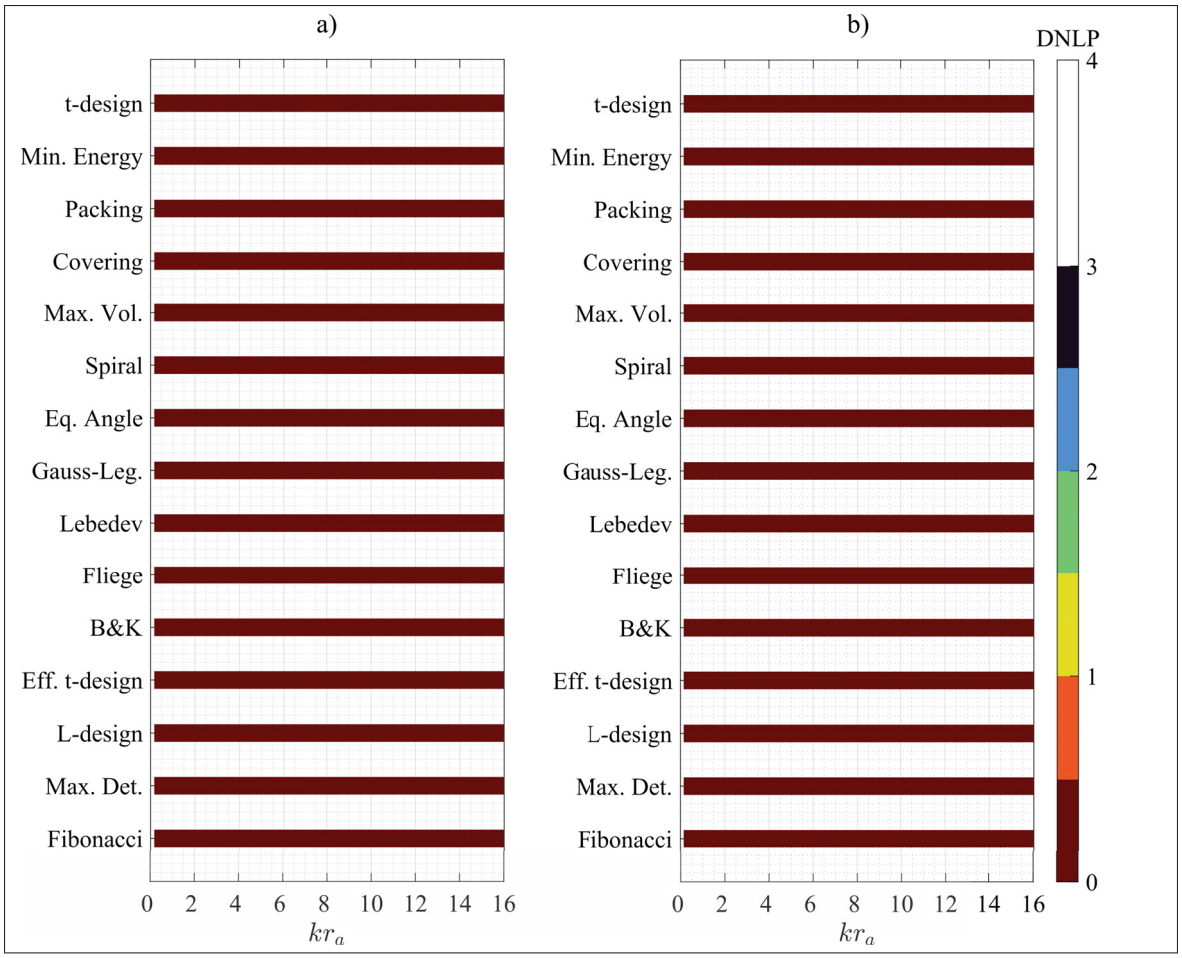


Figure 4.1 Le DNLP est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) l'ensemble à 36* microphones et (b) l'ensemble à 50* microphones (voir Tableau 3.2)

Ensuite, comme l'illustre la figure 4.2, la DNLP pour les ASM rigides reste comprise entre −0,5 dB et +0,5 dB pour $kr_a < 1{,}5$, ce qui indique que l'effet de diffraction est négligeable dans cette plage. Pour $kr_a > 1{,}5$, toutes les valeurs DNLP augmentent, atteignant +1 dB pour

chaque géométrie au-dessus de $kr_a = 4$. La géométrie Equi-Angle avec 36 microphones donne une valeur plus élevée de +2 dB. Au-delà de $kr_a = 4$, les géométries avec 36* microphones montrent une légère réduction de la DNLP par rapport à celles avec 50* microphones.

La conception d'une ASM rigide est connue pour induire un effet de diffraction qui perturbe le champ acoustique, augmentant la pression acoustique à l'avant de l'ASM tout en créant une zone d'ombre à l'arrière. Cet effet n'est pas compensé par l'algorithme CBF car il repose sur la fonction de Green en champ libre sans prise en compte d'une ASM rigide, ce qui conduit à une mauvaise estimation du niveau de la source avec ce type d'ASM. Cet écart explique les différences observées entre les ASM ouvertes et rigides.

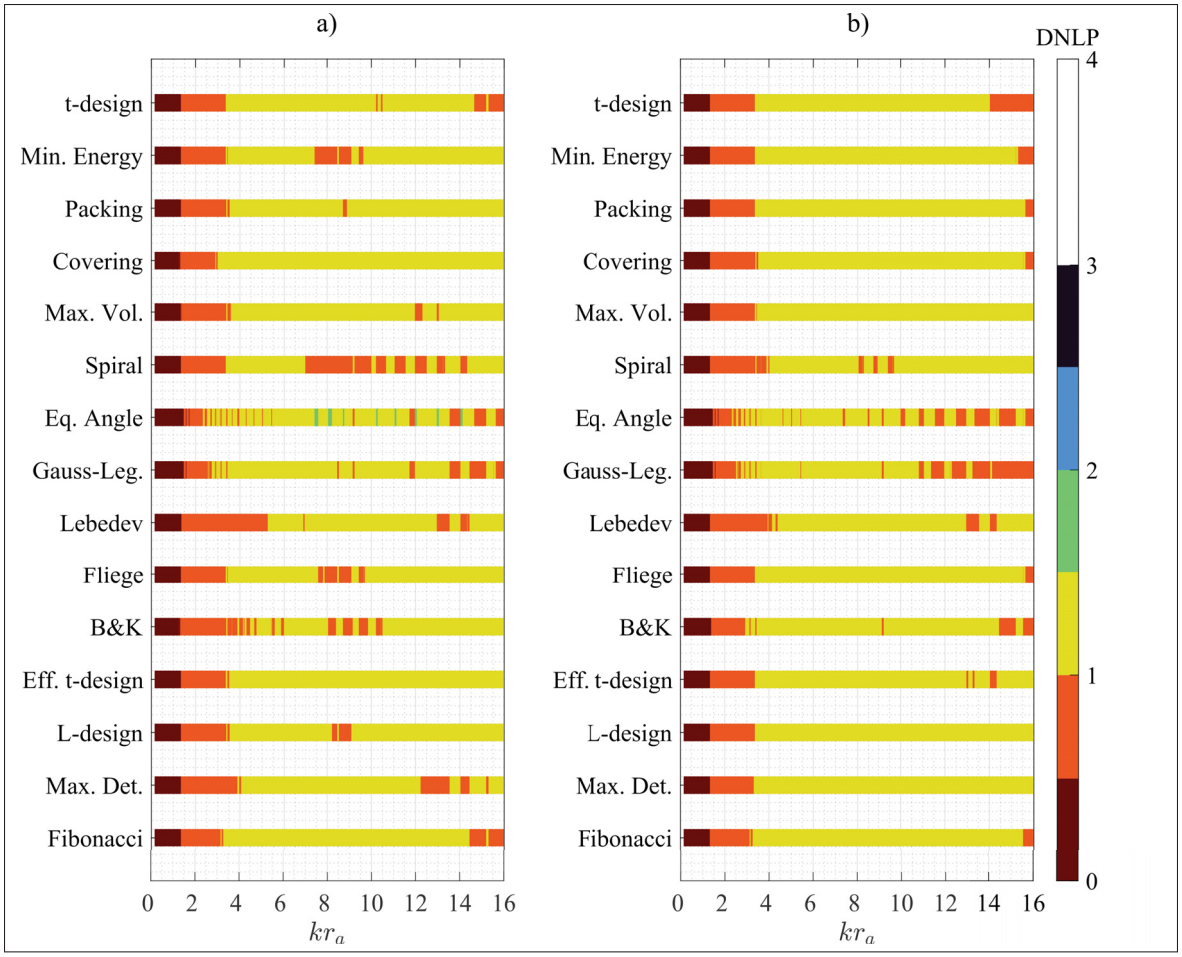


Figure 4.2 Le DNLP est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) l'ensemble à 36* microphones et (b) l'ensemble à 50* microphones (voir Tableau 3.2)

Le CBF est plus performant avec une ASM ouverte qu'avec une ASM rigide, car il est basé sur une fonction de Green en champ libre. Aucune erreur dans la position du lobe principal n'a été détectée pour l'une ou l'autre des configurations. Par conséquent, les ASM rigides ne seront pas prises en compte avec le CBF ; dorénavant, lorsque le CBF est mentionné, les ASM sont ouvertes.

4.1.2 Influence des ASM selon la DNLP avec le SHB

Les figures 4.3 et 4.4 montrent la DNLP pour toutes les géométries d'ASM comprenant les ensembles de $36^{\star}$ et $50^{\star}$ microphones en fonction de kr_a. Un écart du lobe principal par rapport à la position attendue de la source avec une erreur angulaire de 5°, en azimut ou en colatitude, est représenté par un point noir dans les figures. Aucune erreur de ce type n'a été observée dans les résultats précédents.

La figure 4.3 illustre les résultats obtenus avec les ASM ouvertes. Un écart de plus de +5° est couramment observé en raison des lobes secondaires. En outre, les écarts conduisant à une surestimation de la DNLP dans certaines régions ($kr_a = 5{,}8$, 7 et 8,2) sont liés à la division des zéros dans la fonction de Bessel (voir Eq. 1.8). Pour les valeurs supérieures à $kr_a = 5{,}8$, avec $Q = 36^{\star}$, aucune configuration ne permet d'obtenir un DNLP acceptable. De même, avec $Q = 50^{\star}$, aucune géométrie n'atteint un DNLP acceptable pour des valeurs de kr_a supérieures à 7, à l'exception du B&K, qui conserve des performances acceptables jusqu'à $kr_a = 8$.

La figure 4.4 illustre les résultats obtenus avec les ASM rigides. Les points noirs sont moins nombreux que pour les ASM ouvertes, ce qui indique que l'erreur de position de la source est moins importante. Des points noirs sont observés pour des valeurs supérieures, à $kr_a = 9$, avec les géométries à 36 microphones et pour des valeurs supérieures à $kr_a = 12$ avec les géométries à 50 microphones. Le DNLP augmente lorsqu'il y a une erreur de position. Une variation de 2 dB de la DNLP de la géométrie Equi-angle à $kr_a = 3$ et $kr_a = 4$ est observée pour $Q = 36$ et $Q = 64$ microphones, respectivement. Cela correspond à l'ordre de troncature supporté plus 1 de la géométrie Equi-angle et qui montre sa limite.

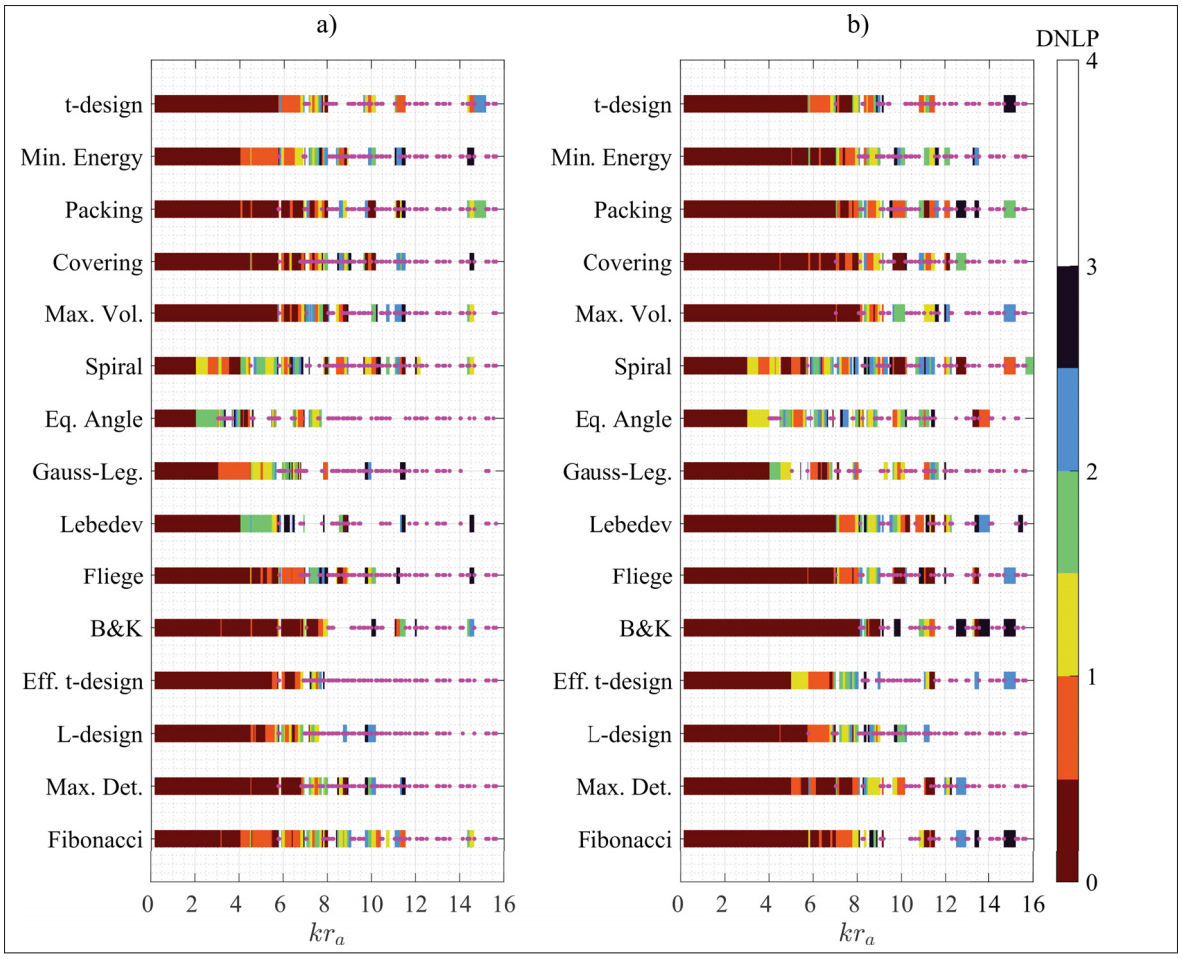


Figure 4.3 Le DNLP est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) l'ensemble à 36* microphones et (b) l'ensemble à 50* microphones (voir Tableau 3.2). Les points magenta indiquent une erreur de +5° dans les angles d'azimut ou de colatitude entre le lobe principal et la position de la source

Le SHB conduit à une meilleure DNLP avec une ASM rigide qu'avec une ASM ouverte, car il n'y a pas de valeur nulle avec les fonctions de Bessel. Les géométries Equi-angle et Gauss-Legendre donnent les plus mauvais résultats, quel que soit le nombre de microphones (36* ou 50*) et la conception de l'ASM (ouverte ou rigide). La géométrie en spirale est inefficace lorsqu'elle est utilisée avec une ASM ouverte. Contrairement au CBF, le SHB n'arrive généralement pas à estimer le niveau de référence aux fréquences élevées en raison de l'effet de repliement, qui se produit habituellement lorsque $kr_a > N_{max} + 1$. Dans le cas d'une antenne ouverte, le SHB n'est pas en mesure d'estimer de manière cohérente le niveau de référence au-delà de $N_{app} + 1$.

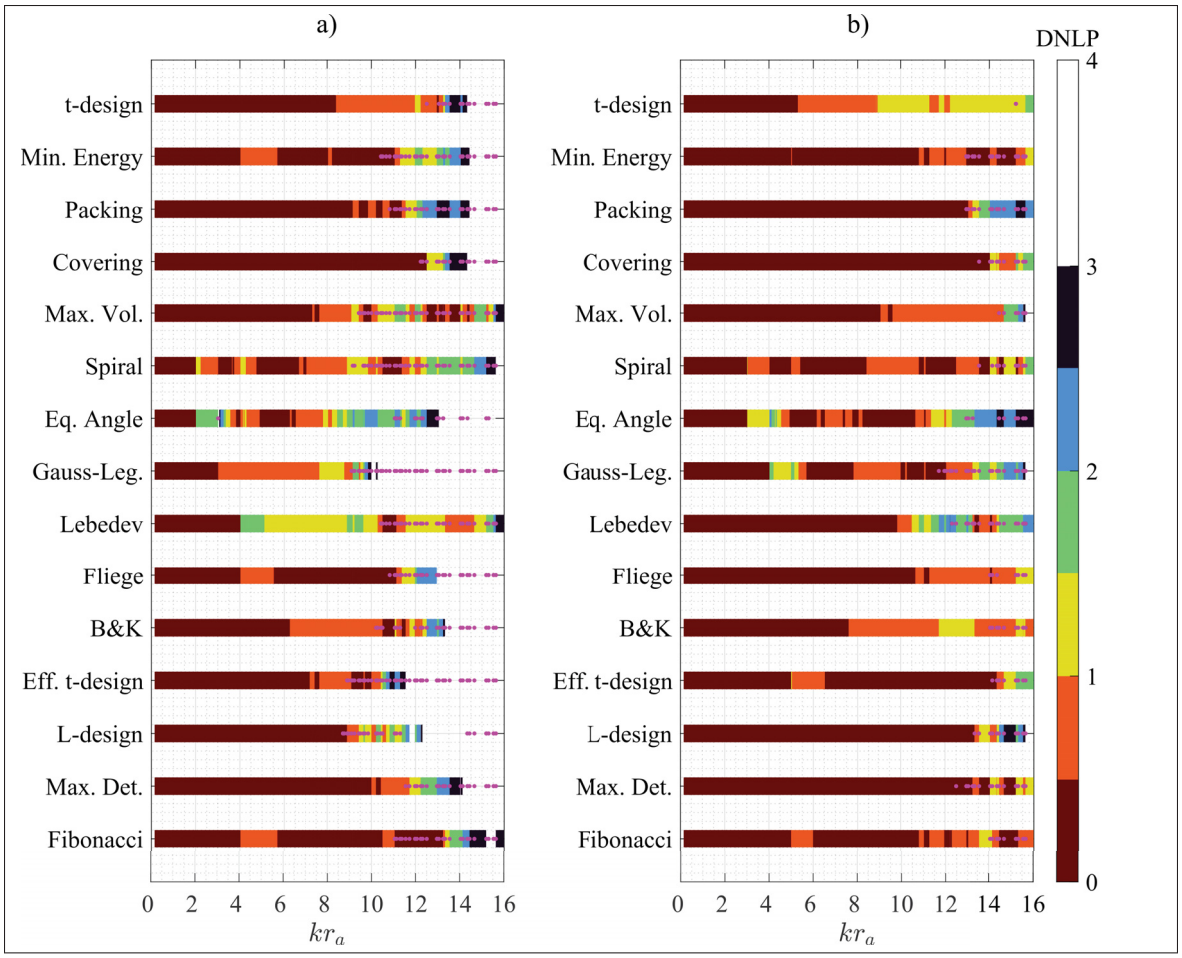


Figure 4.4 Le DNLP est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) l'ensemble à 36⋆ microphones et (b) l'ensemble à 50⋆ microphones (voir Tableau 3.2). Les points magenta indiquent une erreur de +5° dans les angles d'azimut ou de colatitude entre le lobe principal et la position de la source

Toutefois, dans le cas d'une antenne rigide, le SHB peut estimer le niveau de référence au-delà de ce seuil.

Dans les sections suivantes, seules les ASM rigides sont considérées avec le SHB. De plus, étant donné que les géométries Equi-angle et Gauss-Legendre fournissent la plus mauvaise DNLP, elles ne seront pas prises en compte dans les sections suivantes.

4.1.3 Influence des ASM selon l'ASN

Les figures 4.5 et figures 4.6 affichent l'ASN pour toutes les géométries avec les ensembles de 36* et 50* microphones, en utilisant respectivement l'algorithme CBF et l'algorithme SHB. Seules les valeurs d'ASN comprises entre 0% et 30% sont indiquées. Au-dessus de 30%, une localisation inefficace de la source est susceptible de se produire en raison d'un lobe principal excessivement grand. Là encore, les points noirs indiquent une erreur de localisation de la source.

La figure 4.5, avec le CBF, indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les géométries, quel que soit le nombre de microphones. Globalement, l'ASN dépasse le seuil de 30 % dans la plage des kr_a bas, en dessous de $kr_a = 1{,}3$. Lorsque $kr_a \ll 1$, le lobe principal est large, ce qui est une limite connue du CBF. Ensuite, à mesure que kr_a augmente, la valeur de l'ASN diminue, avec une valeur moyenne de 0,4 % à $kr_a = 10$. L'absence de points noirs dans les figures indique qu'il n'y a pas d'erreur de localisation de la source, le lobe principal s'aligne toujours sur la position de la source.

La figure 4.6 montre qu'il n'y a pas de différence entre les géométries en termes d'ASN et ce jusqu'à $kr_a = 8$ pour l'ensemble à 36* microphones et $kr_a = 12$ pour l'ensemble à 50* microphones, ce qui est défini par les erreurs de localisation. La valeur de l'ASN est en moyenne de 19,4 % pour $kr_a < 1$ et diminue en escalier au fur et à mesure que kr_a augmente. Cela est dû au fait que l'ordre N est choisi en fonction de kr_a ($N = \lfloor kr_a \rfloor + 1$), jusqu'à N_{max}. Lorsque des erreurs de localisation se produisent, la valeur de l'ASN augmente. Cela est dû à la contribution de nombreux lobes secondaires émergents causés par le repliement spatial.

En conclusion, l'ASN est à peine affectée par la géométrie d'ASM et l'algorithme. De grands lobes principaux émergent lorsque kr_a est petit, et ils diminuent lorsque kr_a augmente. Puis, la contribution de nombreux lobes secondaires augmente la valeur de l'ASN lorsque kr_a est élevé. La réduction du nombre de microphones de 50* à 36* n'influence pas l'ASN avec le CBF, alors que les points noirs augmentent avec le SHB. L'utilisation du CBF n'est pas recommandée en dessous de $kr_a = 1{,}3$, car son ASN dépasse 30%. Au lieu de cela, le SHB devrait être utilisé pour $kr_a < 1$ afin d'obtenir un ASN plus faible.

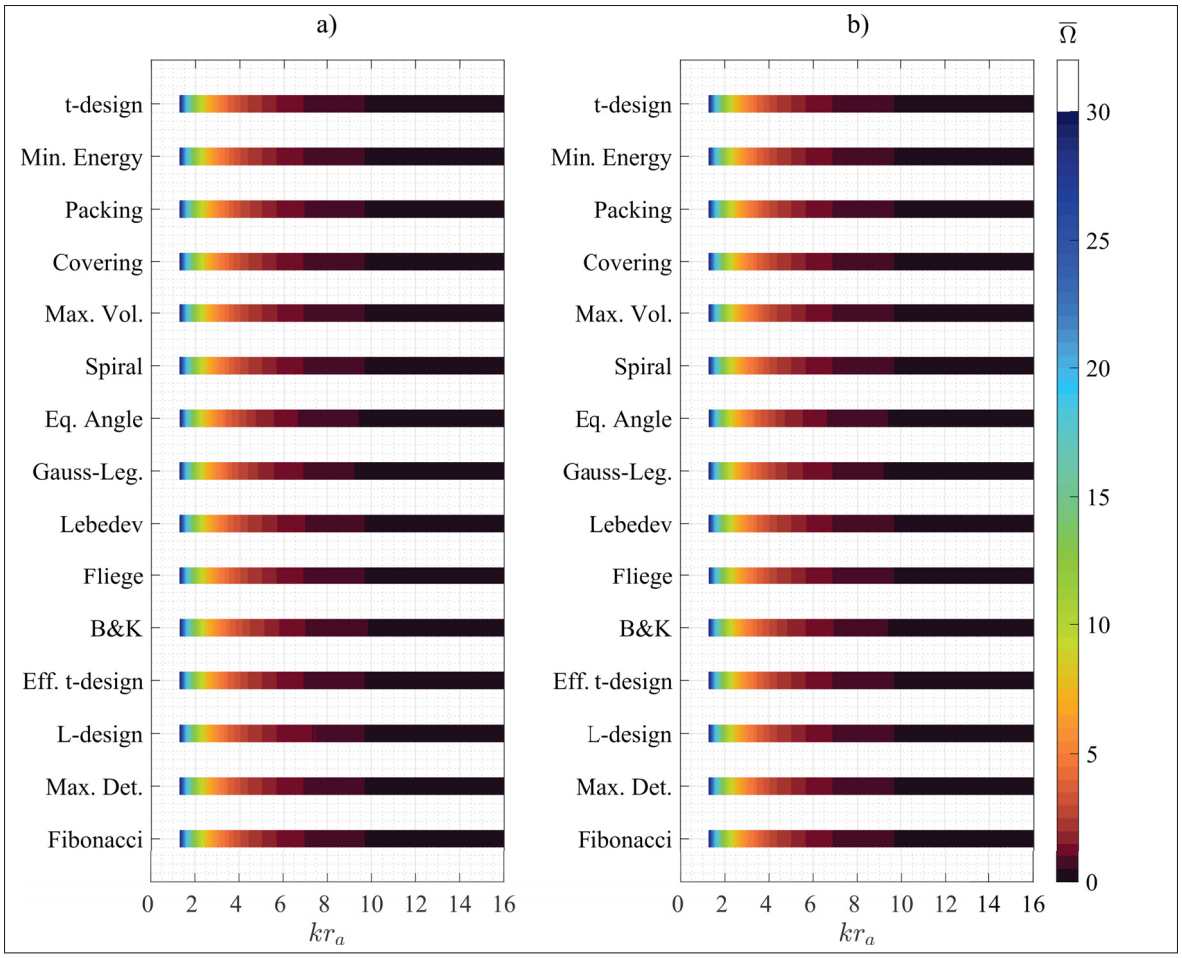


Figure 4.5 L'ASN est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) l'ensemble à 36* microphones et (b) l'ensemble à 50* microphones (voir Tableau 3.2)

4.1.4 Influence des ASM selon le MSR

La figure 4.7 et la figure 4.8 affichent le MSR obtenu avec les algorithmes CBF (ASM ouverte) et SHB (ASM rigide), respectivement. Le MSR est représenté dans l'intervalle [0, 24] dB pour chaque géométrie en fonction de kr_a. Si le MSR est inférieur à 6 dB, le niveau du lobe secondaire est considéré comme trop élevé et un point rouge est alors ajouté au graphique.

Pour le CBF de la figure 4.7, les MSR avant $kr_a = 2$ sont associés à un point noir qui indique l'absence de lobe secondaire. Le lobe principal est grand et unique. Les valeurs du MSR (après $kr_a = 2$) diminuent généralement pour toutes les géométries lorsque kr_a augmente. Parmi ces

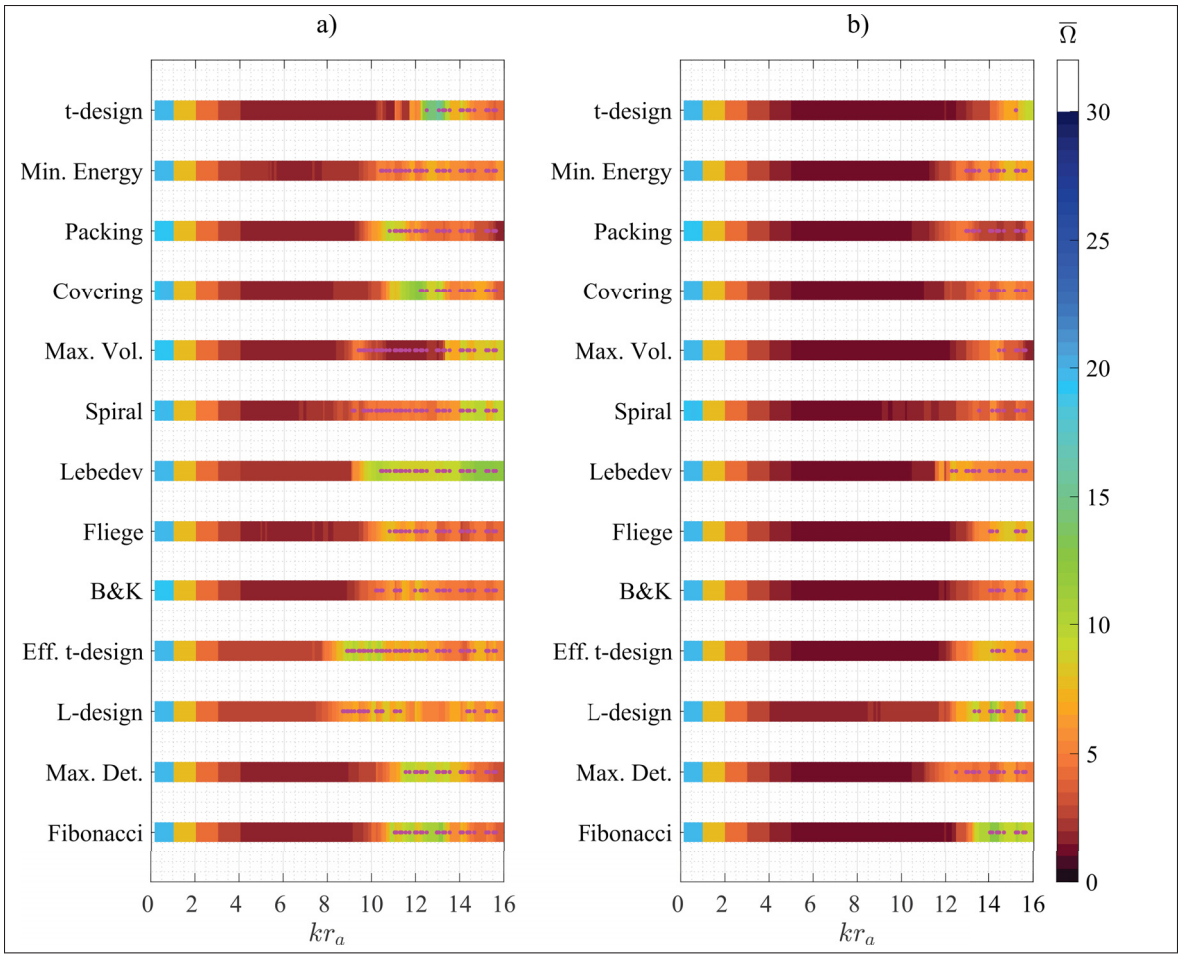


Figure 4.6 L'ASN est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) l'ensemble à 36⋆ microphones et (b) l'ensemble à 50⋆ microphones (voir Tableau 3.2). Les points noirs indiquent une erreur de +5° dans les angles d'azimut ou d'élévation entre le lobe principal et la position de la source

géométries, les géométries Equi-angle et Gauss-Legendre, pour les ensembles de microphones 36⋆ et 50⋆, présentent la diminution la plus forte. Toutefois, ces géométries présentent des lobes secondaires plus tardifs que les autres, aux alentours de $kr_a = 2$.

En utilisant l'ensemble à 36⋆ microphones, la plupart des géométries présentent des valeurs de MSR inférieures à 6 dB pour $kr_a > 6$, à l'exception des meilleures géométries, qui sont Spiral et B&K. Ces deux géométries conservent des valeurs de MSR supérieures à ce seuil, respectivement jusqu'à $kr_a = 14$ et pour toute la plage kr_a. Là encore, les géométries Equi-angle

et Gauss-Legendre sont les moins performantes, puisqu'elles affichent des valeurs de MSR inférieures à 6 dB, respectivement jusqu'à $kr_a = 4$ et $kr_a = 5$. L'augmentation du nombre de microphones, à 50*, modifie de manière significative les valeurs du MSR. Huit géométries présentent désormais des performances similaires, avec des valeurs de MSR constamment élevées sur la plage $kr_a = [2, 14]$: Equi-angle, Gauss-Legendre, Fliege, t-design, Packing, Efficient t-design, Fibonacci et Spirale. Les géométries les moins performantes sont Minimum Energy et Maximal Volume, qui ont des valeurs de MSR inférieures à 6 dB autour de $kr_a = 7$.

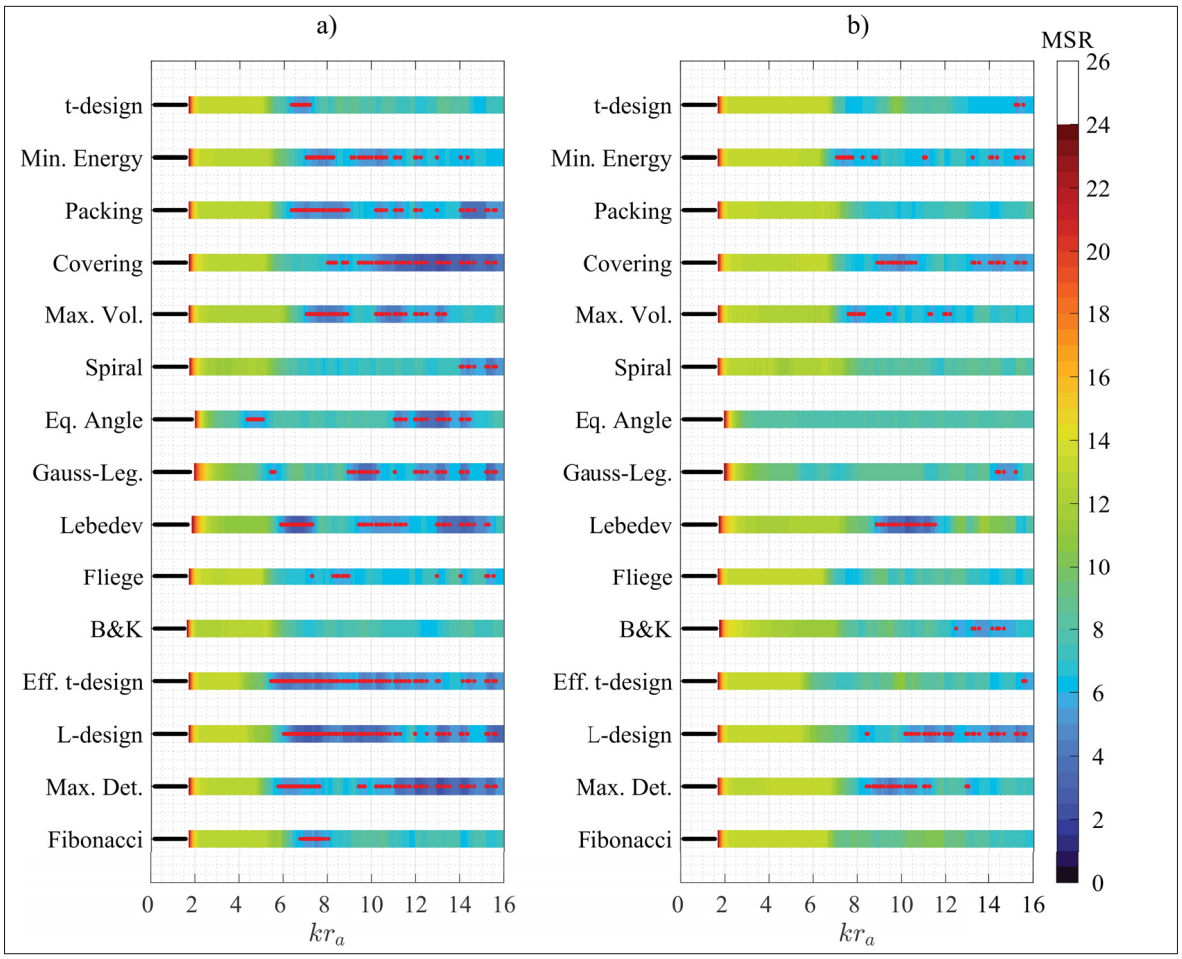


Figure 4.7 Le MSR est obtenu avec les ASM ouvertes, en utilisant l'algorithme CBF avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) les 36* microphones et (b) les 50* microphones (voir Tableau 3.2). Les points rouges correspondent à MSR < 6 dB. Les points noirs signifient qu'il n'y a pas de lobe secondaire dans l'image acoustique

Contrairement au CBF, où le lobe principal couvre l'ensemble de l'image à $kr_a < 2$, l'algorithme SHB présente un lobe principal plus petit ainsi que des lobes secondaires réduits. Dans la figure 4.8, le MSR augmente de 3 dB par kr_a jusqu'à $kr_a = 3$ pour la plupart des géométries et à partir d'un niveau supérieur à 6 dB. Le MSR augmente avec l'ordre de troncature. Au-delà de $kr_a = 3$, les valeurs du MSR dépendent de la géométrie. Les valeurs du MSR présentent alors une diminution globale, atteignant des valeurs inférieures à 6 dB (indiquées par des points rouges sur la figure).

Pour l'ensemble à 36* microphones, une valeur de MSR inférieure à 6 dB et inférieure à $kr_a = 1$ est atteinte avec les géométries B&K et Covering. Dans le cas optimal, la géométrie de Fibonacci présente la plage la plus large au-dessus de 6 dB jusqu'à $kr_a = 8$. Dans le cas le moins favorable, la géométrie Efficient *t*-design affiche une plage plus petite jusqu'à $kr_a = 7$. Pour l'ensemble à 50* microphones, dans le cas plus favorable, la géométrie Minimum Energy atteint une valeur maximale de MSR de 16 dB, et dans le cas le moins favorable, la géométrie L-design atteint un MSR maximal de 14 dB et stagne.

Les géométries ont une influence sur le MSR. Plus le MSR est élevé, plus les performances sont optimales, à moins que le lobe principal ne soit trop large. L'augmentation du nombre de microphones montre une amélioration de la plage utilisable de kr_a pour chacune des géométries. Par conséquent, le CBF n'est pas applicable pour $kr_a < 2$, et le SHB devrait être utilisé comme algorithme dans cette plage. La valeur du MSR augmente avec l'ordre de troncature. De $kr_a = 2$ à 3, les MSR sont presque équivalents entre le CBF et le SHB, sauf pour Equi-angle et Gauss-Legendre. De $kr_a = 3$ à 4, le SHB donne des MSR plus élevés que le CBF, excepté pour Spiral avec 36 microphones. Ceci est également observé dans le cas de $kr_a = 4$ à 5 sauf pour les géométries *t*-design et Spiral. Le MSR est le critère le plus restrictif.

4.1.4.1 Influence des ASM selon la distribution du MSR

Dans la section précédente, le MSR a été analysé en fonction de kr_a en utilisant les ensembles à 36* et 50* microphones. Dans cette section, le MSR est examiné en fonction du nombre de microphones, compris entre 16 et 64 pour chaque géométrie. Les valeurs du MSR sont résumées à l'aide d'un diagramme en boîte, où le symbole central représente le MSR moyen, et les bords

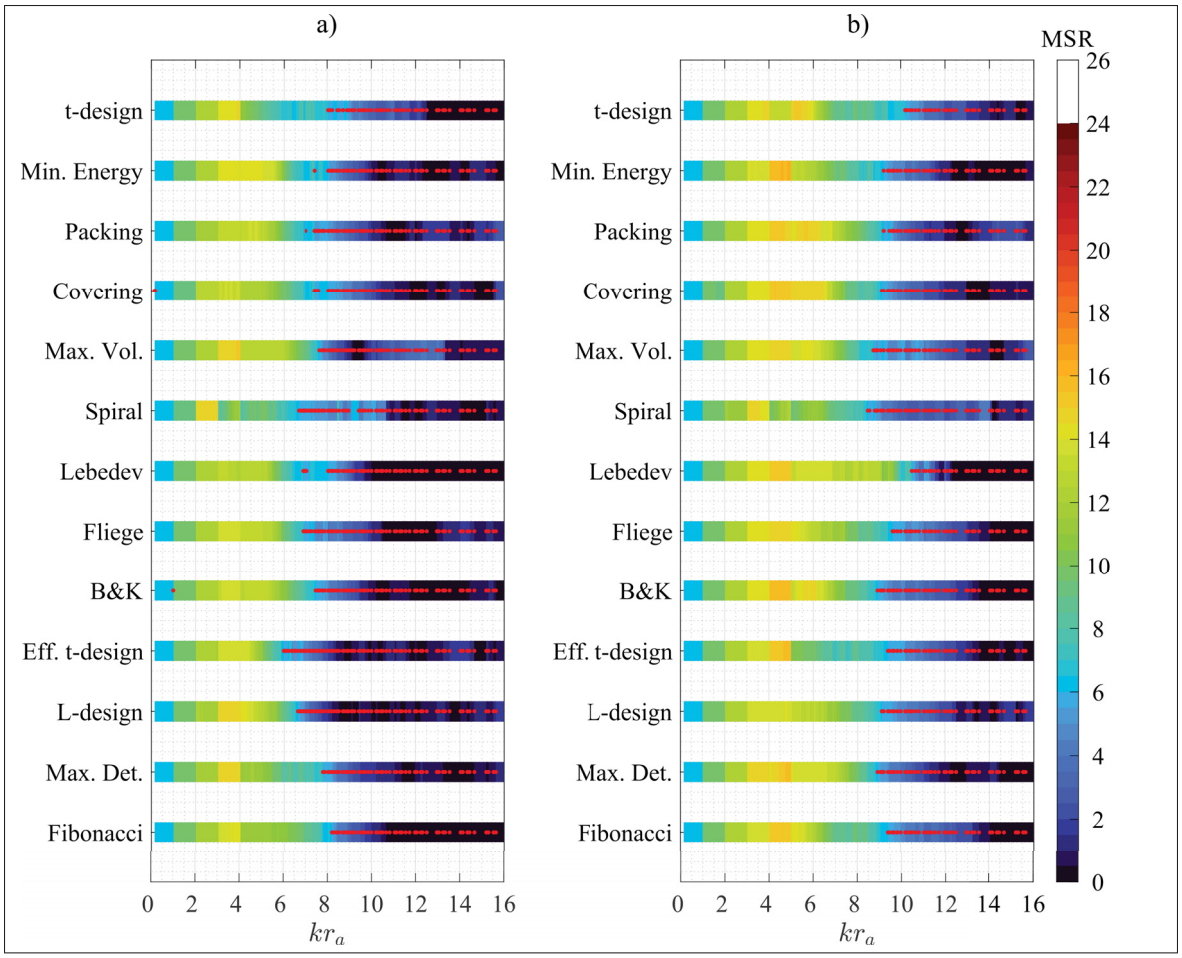


Figure 4.8 Le MSR est obtenu avec les ASM rigides, en utilisant l'algorithme SHB avec deux ensembles différents de nombres de microphones : (a) les 36⋆ microphones et (b) les 50⋆ microphones (voir Tableau 3.2). Les points rouges correspondent à MSR < 6 dB

supérieurs et inférieurs indiquent respectivement les valeurs maximales et minimales du MSR. Les valeurs de MSR sont évaluées sur une plage de kr_a définie par les limitations observées : $kr_a = 2$ (fixée par le CBF avec une ASM ouverte, où les lobes secondaires sont absents) et $kr_a = 8$ (fixée par le SHB avec une ASM rigide, car la plupart des valeurs de MSR tombent en dessous de 6 dB au-delà de ce kr_a). Une ligne horizontale en pointillés à MSR= 6 dB est incluse dans les figures comme seuil de référence. Idéalement, le bord inférieur du diagramme en boîte devrait rester au-dessus de ce seuil, car les valeurs de MSR inférieures à 6 dB sont considérées comme inefficaces. Par conséquent, un bord inférieur plus élevé du boxplot indique une meilleure performance de la MSR.

4.1.4.2 Distribution du MSR avec le CBF

L'ensemble complet des géométries est présenté dans la figure 4.9. Toutes les géométries de microphones suivent la même tendance générale : à mesure que le nombre de microphones augmente, le bord inférieur de la boîte de Tukey s'élève et elle devient plus étroite. Toutefois, cette relation n'est pas strictement linéaire, car l'augmentation du nombre de microphones ne se traduit pas toujours par une amélioration des performances. Par exemple, avec la géométrie *t*, un minimum de 28 microphones est nécessaire afin que le bord inférieur de la boîte dépasse le seuil de 6 dB. Cependant, l'augmentation du nombre de microphones à 32, 36, 42 ou même 50 n'améliore pas les performances. Les meilleurs résultats avec cette géométrie sont obtenus avec 62 microphones, bien que des performances comparables soient obtenues avec 48 microphones, ce qui permet une réduction de 25% du nombre de microphones. Parmi les autres géométries, c'est la Spiral qui donne les meilleurs résultats, en maintenant des valeurs de MSR supérieures à 6 dB entre 28 et 64 microphones. La boîte la plus étroite pour cette géométrie se situe à 60 microphones. Inversement, la géométrie Maximal Volume est la moins performante et ne convient pas à une utilisation avec le CBF et une ASM ouverte.

L'ensemble limité de géométries est illustré dans la figure 4.10. Les géométries Equi-Angle, Gauss-Legendre et Lebedev nécessitent au moins 50 microphones pour dépasser le seuil de 6 dB. En revanche, les géométries Fliege et B&K atteignent des performances comparables avec seulement 36 microphones. Les géométries d'Efficient *t*-design et de L-design sont moins efficaces que les géométries de Maximum Determinant et de Fibonacci. Notamment, la configuration de Fibonacci dépasse le seuil de 6 dB avec seulement 25 microphones. Les meilleures performances sont observées avec les géométries Fliege et Maximum Determinant lors de l'utilisation de 64 microphones.

L'augmentation du nombre de microphones permet de réduire les niveaux des lobes secondaires. Cependant, cette réduction n'est pas linéaire et dépend fortement de la géométrie. Certaines géométries, telles que Maximal Volume et L-design, ne sont pas bien adaptées à une utilisation avec CBF, alors que la géométrie Spiral offre généralement les meilleures performances.

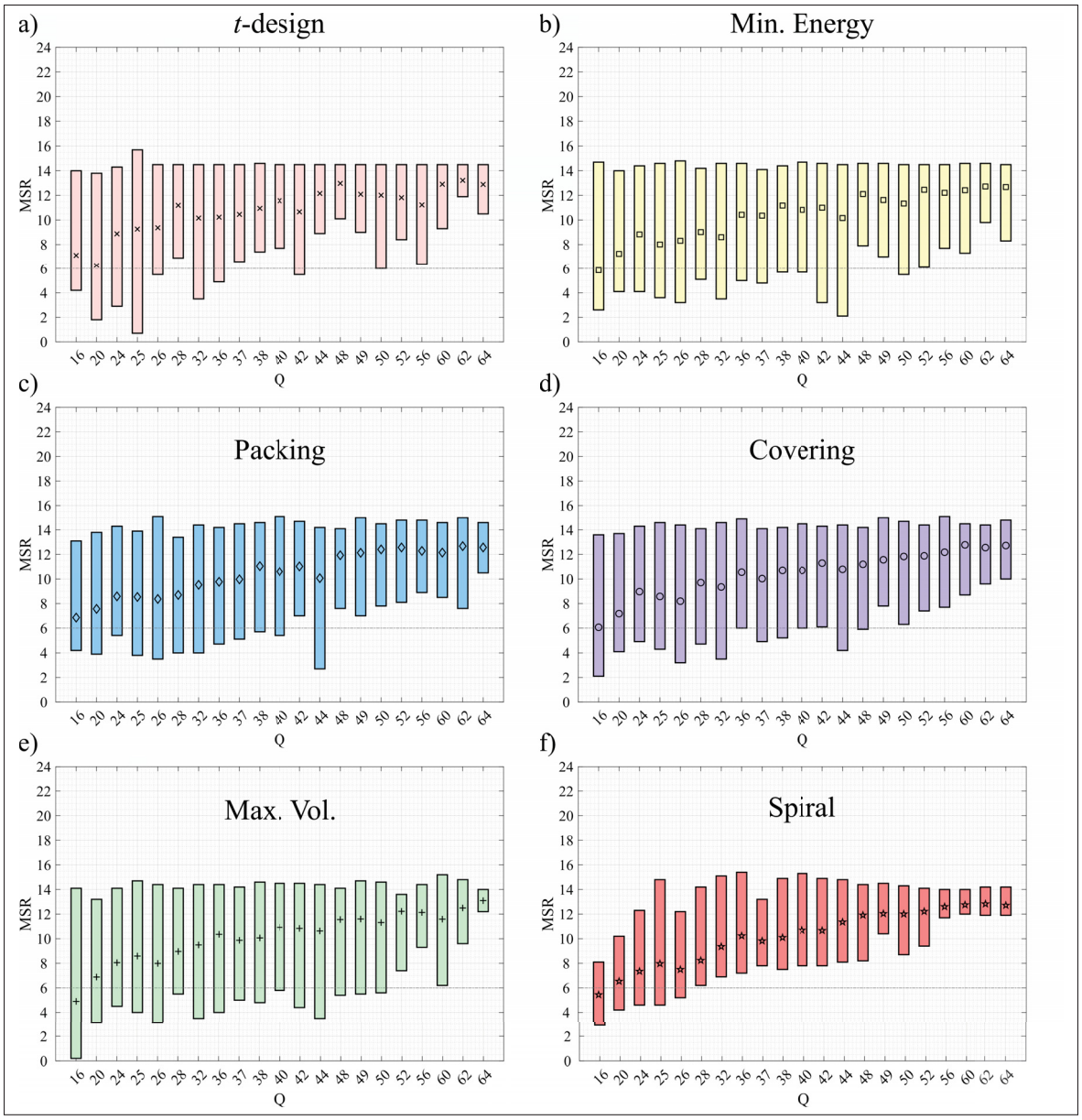


Figure 4.9 Distribution des MSR avec des ASM ouvertes de l'ensemble complet, avec le CBF et en fonction du nombre de microphones noté Q : (a) × t-design, (b) □ Min. Ener., (c) ◇ Packing, (d) ○ Covering, (e) + Max. Vol. et (f) ☆ Spiral. La ligne horizontale en pointillés correspond à un MSR = 6 dB

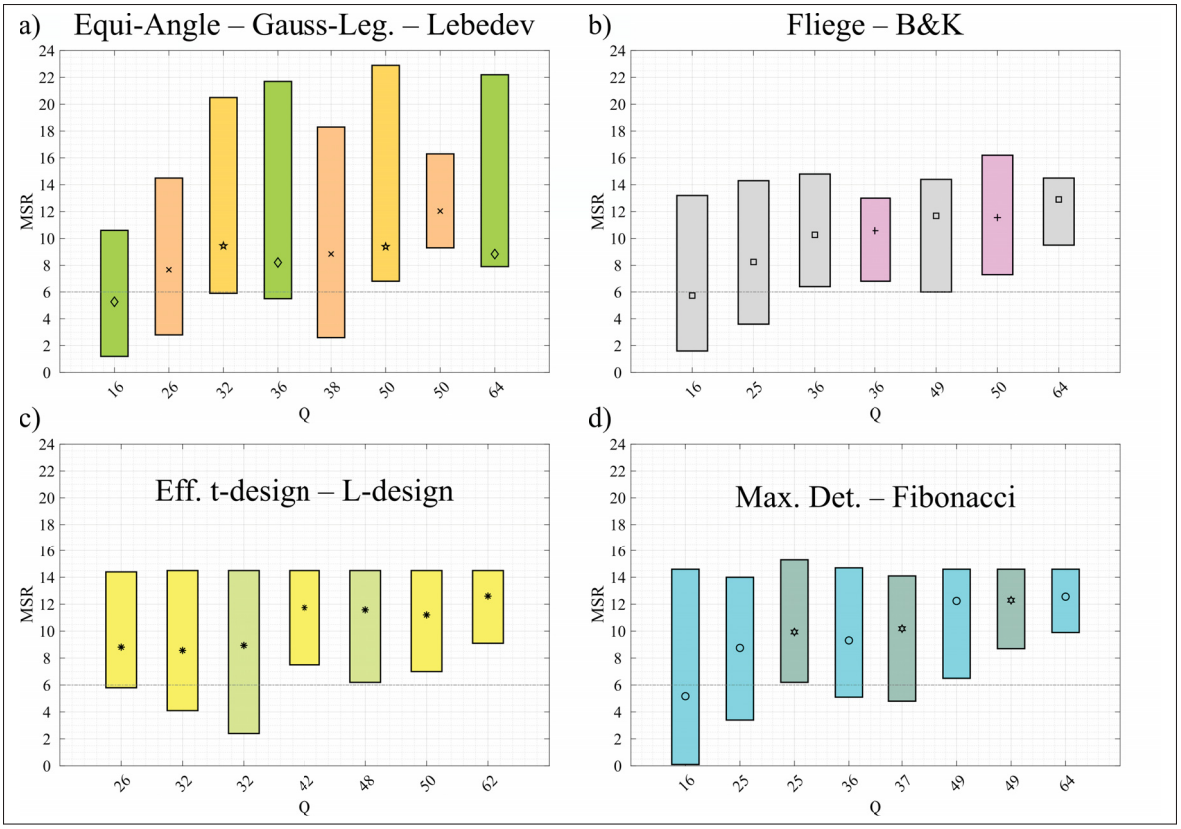


Figure 4.10 Distribution du MSR avec les ASM ouvertes de l'ensemble limité, avec le CBF et en fonction du nombre de microphones notés Q : (a) ◇ Eq.-Angle, ☆ Gauss-Leg., × Lebedev, (b) □ Fliege, + B&K, (c) ✳ Eff. Sph. t-design, ✳ L-design et (d) ○ Max. Det. et ✡ Fibonacci. La ligne pointillée horizontale correspond à MSR = 6 dB

4.1.4.3 Distribution du MSR avec le SHB

La figure 4.11 présente l'ensemble complet des géométries. Là encore, les résultats globaux suivent la même tendance générale : la boîte monte et devient plus étroite à mesure que le nombre de microphones augmente. Néanmoins, certaines géométries atteignent un bord inférieur plus élevé avec moins de microphones. Par exemple, avec la géométrie *t*-design, la première boîte dépassant le seuil de 6 dB ne nécessite que 24 microphones. Cependant, les boîtes pour les configurations avec 26 microphones, de 32 à 38 microphones, ainsi que 42 microphones, sont positionnées plus basses que celle à 24 microphones. Le bord supérieur le plus élevé de boîtes pour la géométrie *t*-design est également observé avec 24 microphones. Le meilleur résultat

est obtenu avec 64 microphones, tandis que 60 microphones fournissent des performances similaires avec une moyenne plus élevée et 48 microphones donnent des résultats comparables, offrant une réduction de 25% du nombre de microphones. La géométrie Maximal Volume atteint les meilleures performances par rapport aux autres géométries, dépassant le seuil de 6 dB avec seulement 32 microphones et atteignant le bord inférieur le plus élevé de la boîte avec 64 microphones. À l'inverse, les géométries Minimum Energy et Spiral sont les moins performantes, produisant le moins de MSR au-dessus du seuil de 6 dB.

La figure 4.12 présente l'ensemble limité des géométries. Les géométries Equi-Angle et Gauss-Legendre donnent les résultats les moins performants car aucune ne dépasse le seuil de 6 dB de manière significative. La géométrie Lebedev atteint les meilleures performances avec 50 microphones. La géométrie B&K présente des performances inférieures avec 50 microphones par rapport à la géométrie Fliege à 49 microphones. Néanmoins, les géométries Fliege et B&K sont moins efficaces que les géométries Efficient Spherical *t*-design et L-design, qui nécessitent au moins 42 et 48 microphones, respectivement. La géométrie Maximal Determinant surpasse la géométrie de Fibonacci à 49 microphones. Les géométries Fliege, Efficient Spherical *t*-design et Maximum Determinant atteignent leurs meilleures performances avec le plus grand nombre de microphones, respectivement 64, 62 et 64.

Encore une fois, l'augmentation du nombre de microphones contribue à réduire les niveaux des lobes secondaires. Cependant, cette diminution n'est ni linéaire ni uniforme et dépend fortement de la disposition des microphones. Certaines configurations, comme Equi-Angle et Gauss-Legendre, sont inefficaces pour une utilisation avec le SHB, tandis que la configuration *t*-design donne généralement les meilleurs résultats.

4.1.4.4 Discussion

Malgré une tendance générale à l'augmentation du MSR avec le nombre de microphones, une variabilité significative existe en fonction du nombre de microphones et de la géométrie. Par exemple, avec le CBF, une géométrie *t*-design avec 48 microphones est préférée à une géométrie Spiral pour le même nombre de microphones, alors que pour 49 microphones, la géométrie Spiral est plus performante que la *t*-design. Par conséquent, pour un nombre fixe de microphones,

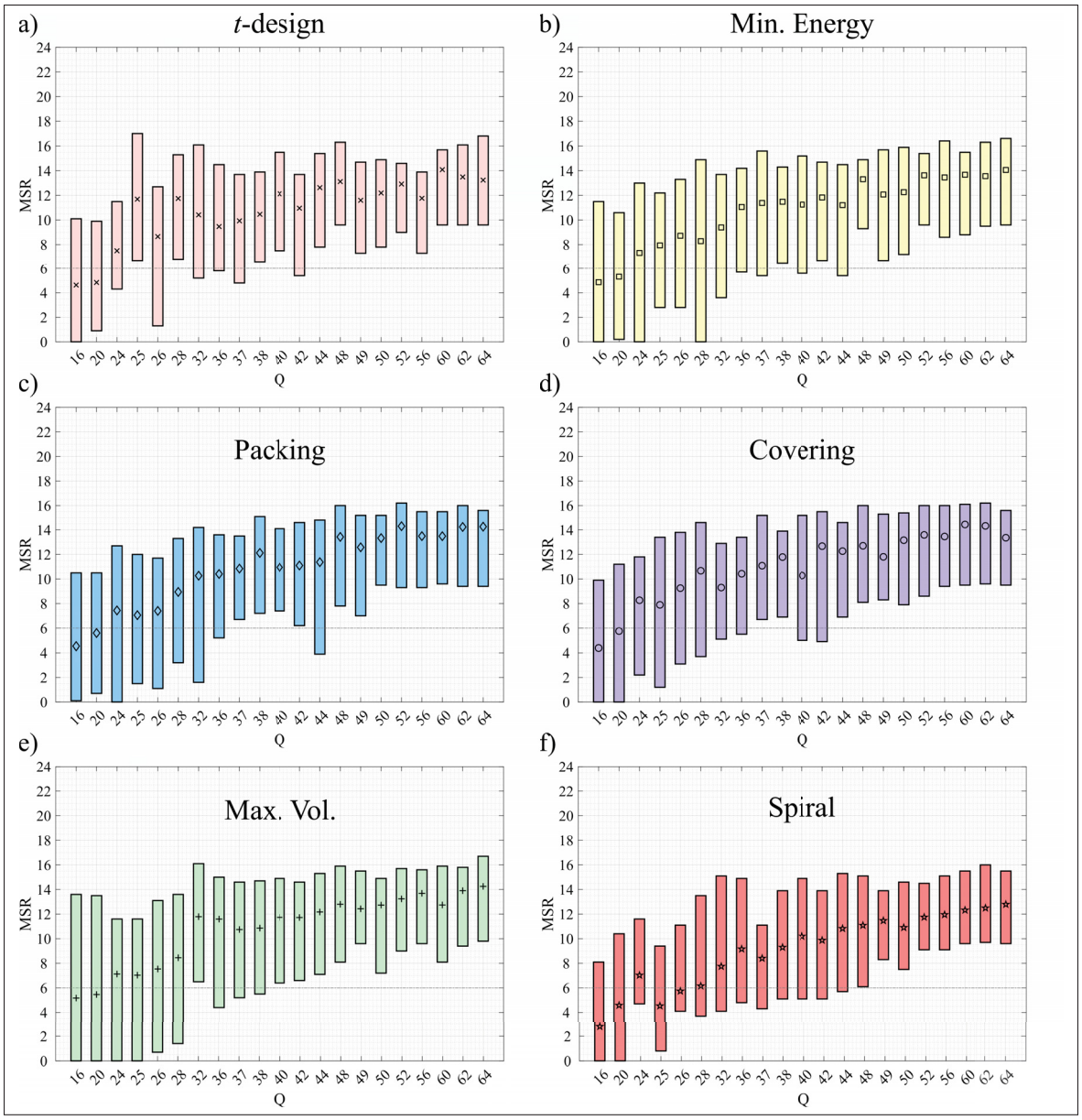


Figure 4.11 Distribution de MSR avec les ASM rigides de l'ensemble complet, avec le SHB et en fonction du nombre de microphones notés Q : (a) t-design, (b) Min. Ener., (c) Packing, (d) Covering, (e) Max. Vol. et (f) Spiral. La ligne pointillée horizontale correspond au MSR = 6 dB

il est conseillé d'évaluer les performances de la géométrie au cas par cas. Une observation similaire s'applique au SHB. Les géométries qui dépassent le seuil de 6 dB avec moins de microphones sont la *t*-design, la Packing, la Covering et la Maximum Determinant avec le SHB.

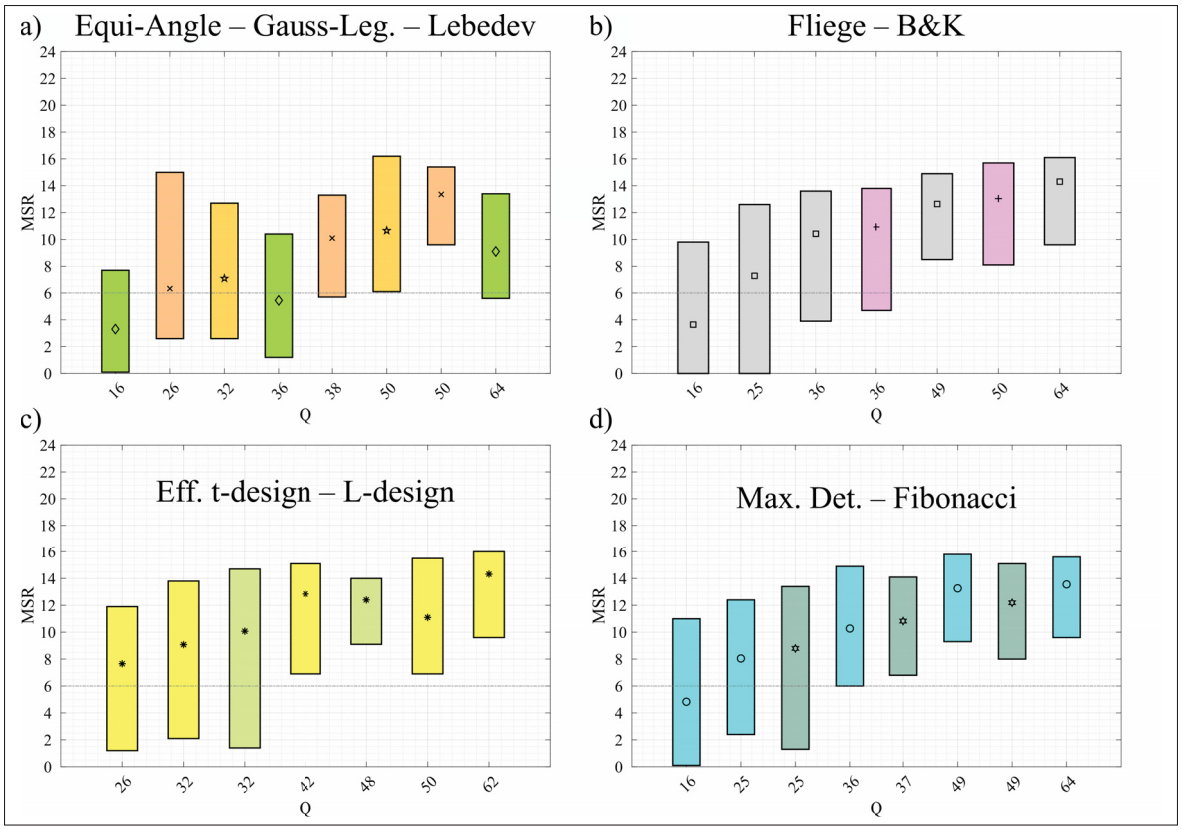


Figure 4.12 Distribution du MSR avec les ASM rigides de l'ensemble limité, avec le SHB et en fonction du nombre de microphones notés Q : (a) ◇ Eq. Angle, ☆ Gauss-Leg., × Lebedev, (b) □ Fliege, + B&K, (c) ✳ Eff. Sph. t-design, ✳ L-design et (d) ○ Max. Det. et ✡ Fibonacci. La ligne pointillée horizontale correspond à MSR = 6 dB

4.1.5 Conclusion

De nombreuses conceptions d'ASM ont été étudiées, mais une analyse complète des performances utilisant le CBF et le SHB faisait défaut. Cette étude comble cette lacune en comparant systématiquement diverses géométries d'ASM en fonction du paramètre sans dimension kr_a et du nombre de microphones. L'évaluation est menée à l'aide de critères objectifs, notamment la différence de niveau du lobe principal par rapport à la source, la largeur du lobe principal (angle solide normalisé) et le niveau du lobe principal par rapport au lobe secondaire, fournissant des informations pratiques.

Les images acoustiques ont été obtenues par simulations numériques du champ sonore généré par une source de type monopole et dans des conditions de champ libre. Les ASM d'intérêt étaient ouvertes ou rigides. Les critères objectifs susmentionnés ont été utilisés pour quantifier les performances des images acoustiques obtenues avec le nombre exact ou le nombre proche de microphones 36* et 50* en fonction de kr_a allant de 0,1 à 16. Ensuite, les images acoustiques ont été analysées en utilisant la distribution du rapport du niveau du lobe principal au lobe secondaire (MSR) en fonction du nombre de microphones allant de 16 à 64.

Il est recommandé d'utiliser une ASM ouverte avec l'algorithme CBF plutôt qu'une ASM rigide en raison d'une différence de niveau plus élevée du lobe principal. À l'inverse, avec l'algorithme SHB, une ASM rigide est recommandée plutôt qu'une ASM ouverte en raison d'une grande occurrence d'erreurs de localisation. De plus, les géométries Equi-Angle et Gauss-Legendre ne sont pas recommandées pour une utilisation avec l'algorithme SHB car leurs performances sont moins efficaces que celles des autres géométries.

En se basant sur la différence de niveau du lobe principal et l'angle solide normalisé, les résultats du CBF avec des ASM ouvertes restent similaires sur différentes géométries, contrairement à ceux du SHB avec une ASM rigide. Selon l'angle solide normalisé, le CBF n'est pas recommandé pour $kr_a < 1{,}3$, où le lobe principal occupe plus de 30% de l'image acoustique. Au lieu de cela, le SHB doit être utilisé à ces valeurs de kr_a pour obtenir un lobe principal plus petit. L'augmentation du nombre de microphones de 36* à 50* améliore les performances à des valeurs de kr_a plus élevées.

Selon l'analyse de la distribution du niveau du lobe principal par rapport au lobe secondaire, avec le CBF et les ASM ouvertes, la géométrie en Spiral est recommandée, car elle permet d'obtenir un niveau du lobe principal par rapport au lobe secondaire minimal plus élevé que les autres géométries. Avec l'algorithme SHB et les ASM rigides, une géométrie avec des microphones placés à égale distance est préférée, ce qui est obtenu avec la *t*-design.

4.2 Étude numérique de l'algorithme VPIG avec une antenne ouverte

L'algorithme VPIG a pour objectif d'augmenter virtuellement le rayon de l'antenne de microphones, qui pour rappel, doit être de petite taille avec peu de microphones. Dans la Section 4.2.1, le choix de la géométrie est discuté en se basant sur les résultats obtenus à la Section 4.1. La Section 4.2.2 est dédiée à l'augmentation virtuelle du rayon pour l'antenne choisie. Les limites de la méthode VPIG sont présentées dans la Section 4.2.3, notamment la nécessité de régularisation.

4.2.1 Choix de la géométrie pour la virtualisation en basses fréquences

Le choix de la géométrie pour la virtualisation en basses fréquences est réalisé à partir des résultats présentés en Section 4.1. La discussion s'appuie sur les critères d'évaluation définis précédemment. Une analyse complémentaire du MSR est ensuite réalisée sur une sélection de géométries afin de finaliser le choix.

Une conception d'antenne ouverte est retenue pour sa simplicité de fabrication. Le choix de la géométrie doit toutefois permettre d'assurer de bonnes performances. L'utilisation du CBF est privilégiée par rapport au SHB car ce dernier peut apporter des instabilités numériques lors de son utilisation avec une antenne ouverte. Afin de faciliter le déplacement du dispositif, une antenne de petite taille est choisie, avec un rayon fixé à 5 cm. Selon les recommandations de la section précédente, la taille du lobe principal doit rester inférieure à 30% d'ASN lorsque $kr_a > 1{,}3$, ce qui correspond, pour ce rayon d'antenne, à des fréquences supérieures à 1 420 Hz. En dessous de cette fréquence, les performances sont donc assurées par l'algorithme virtuel. Il convient de rappeler que, dans le cas d'une antenne ouverte utilisant le CBF, ni le nombre ni la disposition des microphones n'influencent le niveau estimé de la source ni la taille du lobe principal. Des valeurs d'ASN, valablent pour l'ensemble des géométries étudiées, à 15%, 7,5% et 5% sont présentées dans le Tableau 4.1 en fonction de la fréquence et de kr_a. Cette double dépendance s'explique par l'expression des résultats en fonction de la fréquence, tandis que l'utilisation de l'algorithme virtuel basé sur le pseudo-inverse de fonctions de Green (VPIG) dépend essentiellement de kr_a.

Tableau 4.1 Valeurs d'ASN, fréquences et kr_a

ASN	**Fréquence** (Hz)	$\mathbf{kr_a}$
15 %	1 960	1,80
7,5 %	2 760	2,53
5,0 %	3 400	3,11

Quant au troisième critère de performance, un MSR élevé dans les fréquences intermédiaires est associé à un lobe principal étroit, caractéristique d'une bonne qualité d'image acoustique. Compte tenu de la contrainte de taille de l'antenne, un nombre modéré de microphones est retenu. D'après les résultats de la distribution du MSR en fonction du nombre de microphones, présentés en Section 4.1, une configuration à 24 microphones apparaît pertinente. Ce choix correspond à une augmentation globale des valeurs minimales et moyennes du MSR (voir par exemple la géométrie Covering en figure 4.9).

Enfin, la distribution du MSR, évaluée sur l'intervalle $kr \in [2, 8]$, fournit une synthèse des valeurs minimale, moyenne et maximale observées. Toutefois, elle ne rend pas compte de la forme complète des courbes et doit être complétée par une analyse détaillée des résultats. Ainsi, le MSR des géométries comportant 24 microphones, ou un nombre aussi proche que possible de cette valeur, est analysé ci-après.

Les géométries Packing, Maximal Volume, Spiral à 24 microphones, Lebedev à 26 microphones et Maximum Determinant à 25 microphones présentent des performances inférieures à celle de la *t*-design à 24 microphones. Elles ne sont pas représentée pour cette raison. Les géométries *t*-design, Spiral, Covering et Minimum Energy à 24 microphones et Packing à 26 microphones sont représentées en figure 4.13. En dessous de 1 715 Hz, le MSR n'est pas défini, l'image étant pourvue d'un lobe principal sans lobes secondaires identifiables. Le MSR décroît ensuite jusqu'à environ 2 500 Hz, avant d'atteindre un plateau compris entre 9 et 13 dB. Ce plateau met en évidence une asymptote autour de 13 dB, caractéristique du CBF, sur la plage $[2\,500; 4\,000]$ Hz. La géométrie Packing à 26 microphones illustre cette asymptote : sa courbe reste légèrement supérieure à celle de la *t*-design, avec un écart maximal d'environ 0,5 dB et un pic de 13,4 dB à 2 760 Hz ($kr_a = 2{,}53$). La virtualisation de ce pic sera étudiée ultérieurement. L'augmentation du nombre de microphones n'améliore pas significativement l'asymptote dans cette plage de

fréquences. En conséquence, les configurations dépassant 24 microphones sont exclues du choix de la géométrie. Notamment les géométries Fliege, Efficient t-design et Fibonacci. Diminuer le nombre de microphones ne donne pas de meilleures performances sur l'ensemble des géométries. Enfin, les géométries Mimimum Energy et Covering à 24 microphones présentent des valeurs légèrement inférieures à celles de la t-design dans la zone du plateau. Pour conclure, la géométrie t-design à 24 microphones est retenue afin d'être utilisée avec l'algorithme VPIG. Elle présente un compromis optimal entre de hautes performances en valeur de MSR et un nombre réduit de microphones.

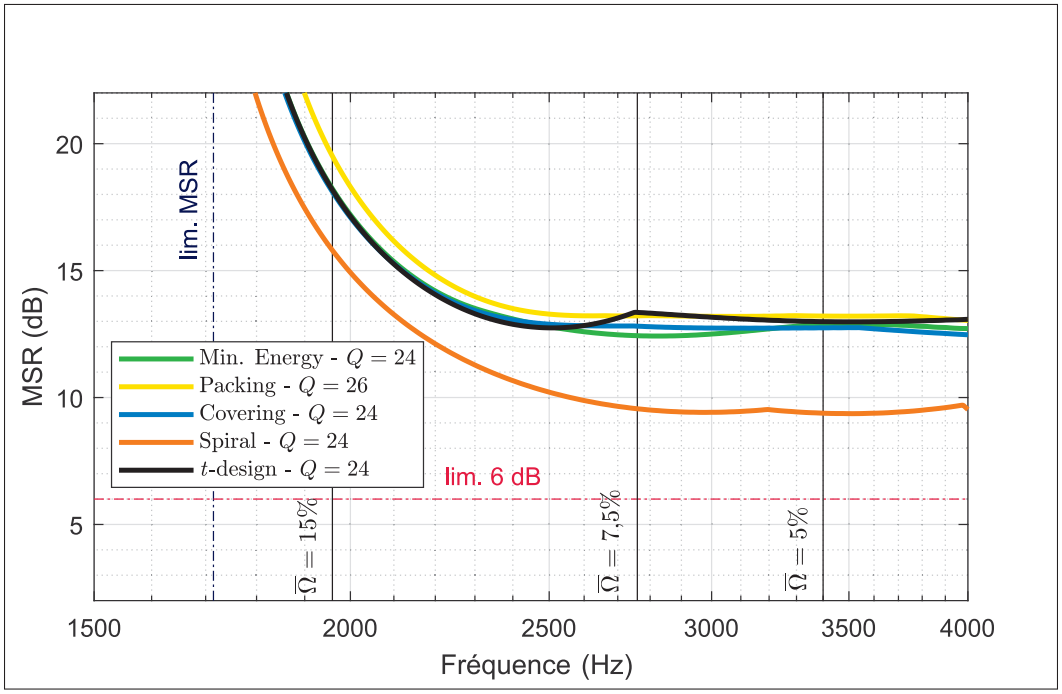


Figure 4.13 Sélection des géométries Min. Energy, Packing, t-design, Spiral et Fibonacci pour des ASM ouvertes avec le CBF : MSR

4.2.2 Augmentation du rayon virtuel avec l'algorithme VPIG

Aux basses fréquences, l'algorithme VPIG doit reproduire les performances du CBF pour des valeurs cibles définies par les critères d'évaluation. Ces valeurs correspondent à des objectifs de valeurs kr_a à atteindre par l'augmentation virtuelle du rayon de l'antenne. Le Tableau 4.2

présente les valeurs d'ASN et de MSR correspondants aux valeurs cibles en fonction du paramètre kr_a, noté ici kr_{cible}.

Tableau 4.2 Valeurs cibles d'ASN, de MSR et kr_{cible}

ASN	**MSR** (dB)	$\mathbf{kr}_{\text{cible}}$
15 %	18,2	1,80
7,5 %	13,4	2,53
5,0 %	13,0	3,11

L'algorithme VPIG permet de cibler un kr_a effectif et de maintenir cette valeur en fonction de la fréquence en ajustant virtuellement le rayon de l'antenne. Cet ajustement repose sur un facteur d'agrandissement τ, tel que le rayon virtuel s'écrit $\check{r}_a = \tau r_a$. Ainsi, lorsque $kr_a < kr_{\text{cible}}$ (basses fréquences), le rayon virtuel est augmenté, tandis que pour $kr_a > kr_{\text{cible}}$ (hautes fréquences), il est réduit. Des exemples de valeurs du facteur τ sont présentés dans le Tableau 4.3 en fonction de la fréquence et de kr_{cible}. À titre d'illustration, τ peut atteindre des valeurs supérieures à 20 à 100 Hz, selon le kr_{cible}. À l'inverse, un facteur $\tau < 1$ correspond à une réduction du rayon virtuel : par exemple, à $4,000$ Hz, le rayon est divisé par deux avec le $kr_{\text{cible}} = 1{,}80$.

Tableau 4.3 Facteur d'agrandissement τ en fonction de la fréquence et des kr_{cible}

		Fréquence (Hz)			
	τ	**100**	**500**	**1000**	**2000**
$\mathbf{kr}_{\text{cible}}$	**1,80**	19,7	3,9	2,0	1,0
	2,53	27,6	5,5	2,8	1,4
	3,11	34,0	6,8	3,4	1,7

Afin d'illustrer l'effet de l'algorithme VPIG sur la qualité d'image acoustique, la figure 4.14 présente les images acoustiques obtenues à 100 Hz pour la méthode CBF ainsi que pour différentes valeurs de kr_{cible}. La figure 4.14(a), avec le CBF, met en évidence un lobe principal large. En revanche, les images obtenues avec l'algorithme VPIG (Figures 4.14(b) à (d)) présentent un lobe principal plus étroit, dont la taille diminue à mesure que kr_{cible} augmente. Par ailleurs, l'apparition de lobes secondaires est observée pour les configurations correspondant aux figures 4.14(c) et (d).

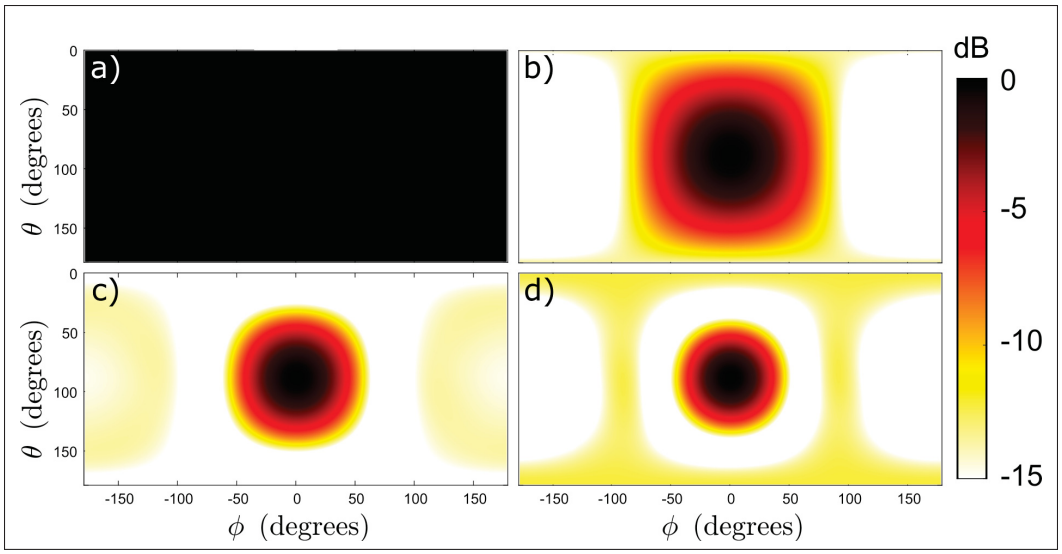


Figure 4.14 Images acoustiques à 100 Hz : (a) CBF, (b) VPIG-$kr_{\text{cible}} = 1{,}80$, (c) VPIG-$kr_{\text{cible}} = 2{,}53$ (d) VPIG-$kr_{\text{cible}} = 3{,}11$

Ces observations montrent que l'augmentation virtuelle du rayon améliore la taille du lobe principal et facilite la localisation de la source, en comparaison du CBF.

La figure 4.15 présente les valeurs obtenues des critères d'évaluation en fonction de la fréquence pour les trois kr_{cible} retenus. En dessous de 100 Hz, des écarts apparaissent entre les valeurs obtenues et les valeurs cibles. Cela se produit pour les fréquences dont la demi-longueur d'onde est supérieure à la distance source-antenne, soit $f < c/2r_s$. À l'inverse, aux hautes fréquences, les valeurs présentent une discontinuité marquée à $f_0 = c/2r_a$. C'est la fréquence à laquelle la longueur d'onde virtuelle est égale au diamètre de l'antenne, donnant une différence de phase nulle.

En figure 4.15.a, le DNLP obtenu avec le VPIG est proche de 0 dB, comparable à celui obtenu avec le CBF entre 100 Hz et 3 000 Hz. L'algorithme ne modifie donc pas significativement l'estimation du niveau. Parmi les configurations étudiées, celle correspondant à $kr_{\text{cible}} = 3{,}11$ est la moins performante, car elle présente les valeurs de DNLP les plus faibles.

En Figure 4.15.b, avec le CBF, la taille du lobe principal est supérieur à 30% pour des fréquences inférieures à 1 420 Hz. Ce qui limite la localisation de la source aux fréquences. L'algorithme

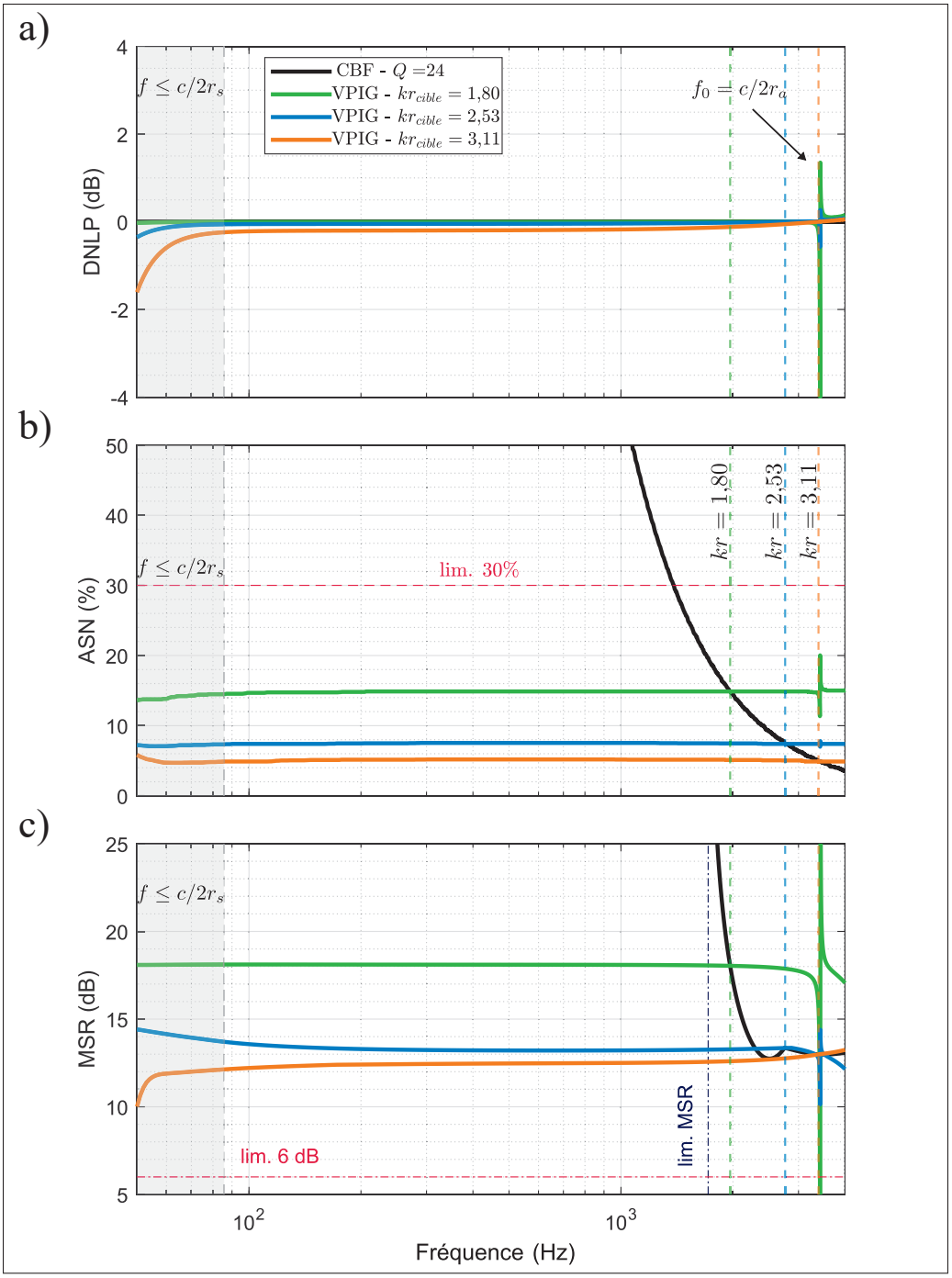


Figure 4.15 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour le CBF et l'algorithme VPIG, (a) DNLP, (b) ASN et (c) MSR. Trois kr_{cible} sont utilisés 1,80, 2,53 et 3,11

VPIG permet de lever cette limitation. À $kr_{\text{cible}} = 1{,}80$, l'ASN est de 15% sur la gamme de 100 Hz à 3 000 Hz. De même, l'ASN pour les $kr_{\text{cible}} = 2{,}53$ et $kr_{\text{cible}} = 3{,}11$ est respectivement de 7,5% et 5%.
En Figure 4.15.c, avec le MSR, la valeur $kr_{\text{cible}} = 1{,}80$ est correctement reproduite entre 100 Hz et 3 000 Hz. Les autres valeurs de kr_{cible} présentent un comportement similaire, bien que de légères variations subsistent.

Sur l'ensemble de ces résultats, la variation du rayon de l'antenne permet, avec l'algorithme VPIG, de conserver en grande partie la valeur des critères d'évaluation au kr_{cible} choisi entre 100 Hz et 3 000 Hz. En particulier, à $kr_{\text{cible}} = 1{,}80$ les valeurs sont correctement reproduites. En revanche, pour des valeurs plus élevées de kr_{cible}, de légères déviations apparaissent et tendent à s'accentuer avec l'augmentation de ce paramètre.

4.2.3 Sensibilité de l'algorithme VPIG aux perturbations

Cette section est une étude numérique et vise à analyser la sensibilité de l'algorithme VPIG aux perturbations de la pression acoustique, en fonction de la fréquence et des kr_{cible}.

4.2.3.1 Analyse du conditionnement

L'algorithme VPIG repose sur le produit matriciel $\check{\mathbf{G}}\mathbf{G}^{\dagger}$ (voir Éq. 3.5), qui assure la transformation de la pression acoustique réelle en une pression acoustique virtuelle. Ce qui correspond au passage d'une antenne de rayon réel à une antenne de rayon virtuel. L'opérateur † désigne le pseudo-inverse de Moore-Penrose. Les matrices $\mathbf{G}(f, r)$ et $\check{\mathbf{G}}(f, \check{r})$ dépendent de la fréquence ainsi que respectivement du rayon réel et du rayon virtuel. Toutefois, le calcul du pseudo-inverse de $\mathbf{G}$, combiné au changement du rayon avec la matrice $\check{\mathbf{G}}$, est susceptible d'amplifier les erreurs présentes dans la pression acoustique réelle. La sensibilité de l'algorithme peut être évaluée à l'aide du nombre de conditionnement κ. Un produit matriciel bien conditionné correspond à $\kappa = 1$, tandis qu'un mauvais conditionnement se traduit par $\kappa \gg 1$.

La figure 4.16 présente le nombre de conditionnement $\kappa(\check{\mathbf{G}}\mathbf{G}^{\dagger})$ en fonction de la fréquence. Les valeurs de kr_{cible} présentées précédemment sont utilisées. Le facteur τ est varié en fonction de

la fréquence. Lorsque kr_{cible} coïncide avec la valeur de kr_a correspondante (i.e. kr_a = 1,80, 2,53 ou 3,11), le facteur d'agrandissement vérifie $\tau = 1$, ce qui implique $\kappa = 1$. Dans ce cas, le produit matriciel est parfaitement conditionné, en effet les valeurs que contiennent les matrices $\mathbf{G}$ et $\check{\mathbf{G}}$ sont identiques.

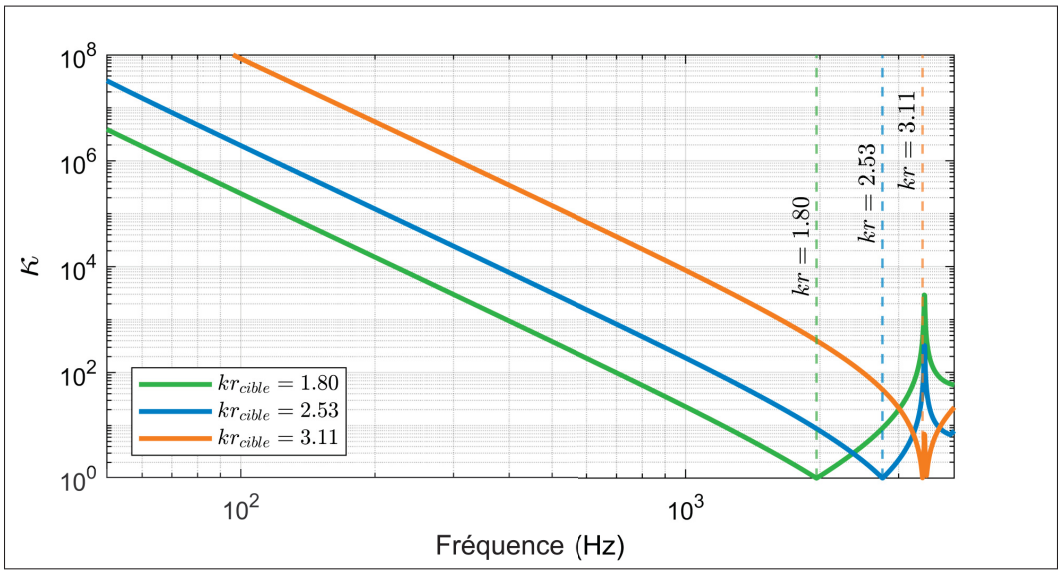


Figure 4.16 Nombre de conditionnement $\kappa(\check{\mathbf{G}}\mathbf{G}^{\dagger})$ en fonction de la fréquence. Le facteur d'agrandissement τ est varié à partir de trois kr_{cible}

Aux basses fréquences, lorsque $\tau < 1$, le produit matriciel est dans l'ensemble mal conditionné. Les valeurs forment des lignes droites. Le nombre de conditionnements augmente linéairement (en échelle logarithmique) à mesure que la fréquence diminue. La configuration correspondant au kr_{cible} = 1,80 présente les valeurs les plus faibles, avec $\kappa > 10^2$ uniquement en dessous de 700 Hz. À l'inverse, pour kr_{cible} = 3,11, le conditionnement se dégrade plus fortement, avec $\kappa > 10^2$ en dessous de 2 500 Hz. Lorsque $\tau > 1$, le produit matriciel reste également mal conditionné. Un pic apparaît à la fréquence $f_0 = c/2r_a$, pour laquelle la longueur d'onde virtuelle est égale au diamètre réel de l'antenne, ce qui génère une phase nulle. Ainsi, plus la valeur de kr_{cible} est élevée, plus l'algorithme VPIG devient sensible aux perturbations. Toutefois, en simulation numérique, ce mauvais conditionnement n'affecte pas les résultats, car son effet se manifeste en présence de perturbations. L'effet de telles perturbations est étudié dans la section suivante et peut être atténué par l'utilisation d'une régularisation.

4.2.3.2 Modélisation des perturbations

L'hypothèse selon laquelle une perturbation aléatoire peut engendrer des erreurs significatives lors de l'utilisation de l'algorithme VPIG est examinée. Cette perturbation pourrait provenir d'un défaut combiné de positionnement et de calibration. Pour tester cette hypothèse, une perturbation aléatoire est introduite dans le signal de pression complexe, à chaque microphone, selon $p_q^\varepsilon = p_q \left(1 + \varepsilon_q e^{\imath\varphi_q}\right)$, où ε_q représente l'amplitude de la perturbation et φ_q sa phase. Les valeurs de ε_q et φ_q sont tirées aléatoirement selon une loi normale centrée réduite, puis la perturbation est normalisée afin d'obtenir le RSP souhaité. Le Tableau 4.4 présente les valeurs RSP, $\Delta\varphi_{RMS}$ et $\Delta\varphi_{max}$, en distinguant trois cas : absence de perturbation, perturbation avec un RSP de 50 dB et perturbation avec un RSP de 25 dB. L'erreur de phase augmente lorsque le RSP diminue. Ces perturbations correspondent à de faibles erreurs introduites dans le spectre complexe des microphones. Dans la suite, seul le RSP sera mentionné, les erreurs de phase correspondantes étant implicitement celles indiquées au Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Valeurs RSP, $\Delta\varphi_{RMS}$ et $\Delta\varphi_{max}$

RSP (dB)	$\Delta\varphi_{RMS}$ (°)	$\Delta\varphi_{max}$ (°)
∞	0,0	0,0
50	0,1	0,2
25	1,7	3,8

4.2.3.3 Images acoustiques avec perturbation et régularisation

La figure 4.17 illustre l'effet de la perturbation (RSP = 25 dB) sur les images acoustiques obtenues avec l'algorithme VPIG, sans régularisation, pour deux valeurs de kr_{cible} (1, 80 et 2, 53). La fréquence est fixée à $f = 500$ Hz pour chaque image. Deux configurations sont considérées : un cas de référence sans perturbation (colonne de gauche) et un cas perturbé (colonne de droite). Dans le cas non perturbé, la figure 4.17(a), l'image acoustique présente un lobe principal bien défini et dépourvu de lobes secondaires. En revanche, la figure 4.17(c), un lobe secondaire apparaît, bien que le lobe principal demeure étroit et centré. De manière générale, le lobe principal conserve une forme circulaire et une distribution uniforme. Dans le cas perturbé, la figure 4.17(b), le lobe principal devient irrégulier, perdant sa circularité et son

uniformité. La figure 4.17(d), le lobe principal disparaît, laissant place à de nombreux lobes secondaires.

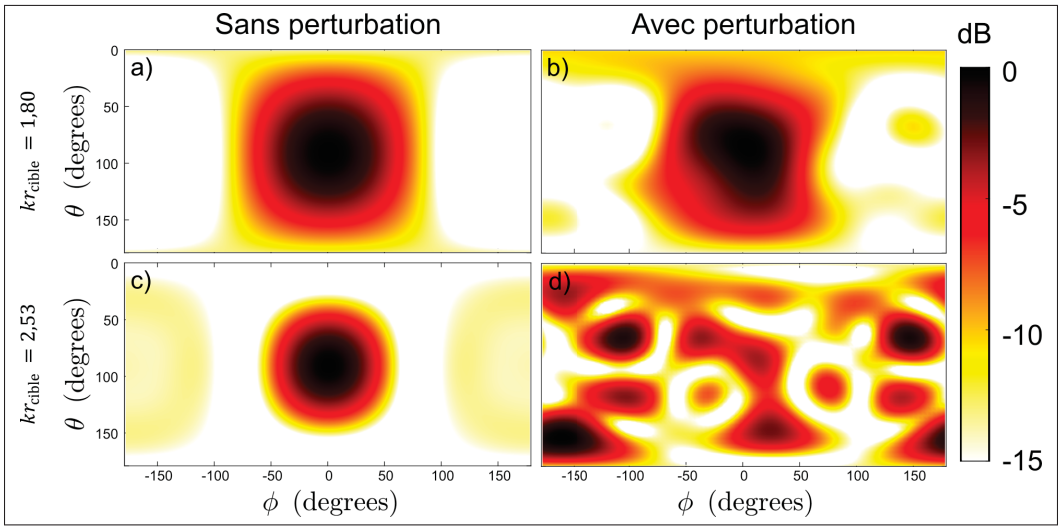


Figure 4.17 Images acoustiques à 500 Hz. Illustration l'effet de la perturbation avec un RSP de 25 dB. Les valeurs ciblées sont $kr_{cible} = 1,80$ et $kr_{cible} = 2,53$, ce qui correspond à un facteur d'agrandissement de rayon respectif de $\tau = 3,93$ et $\tau = 5,52$

La figure 4.18 illustre les images acoustiques obtenues avec l'algorithme VPIG une régularisation à partir de la configuration de la figure 4.17(d). La figure 4.18(a), avec $\gamma = 0,01$, montre un lobe principal irrégulié avec des lobes secondaires tandis que la figure 4.18(b), avec $\gamma = 0,05$, montre un lobe principal uniforme et non circulaire avec des lobes secondaires. Ainsi, une faible régularisation suffit à restaurer un lobe principal identifiable. Toutefois, sa valeur doit être ajustée afin d'obtenir une image acoustique de qualité.

4.2.3.4 Influence des perturbations et de la régularisation sur l'ASN et le MSR

Les performances sont analysées à partir d'un ensemble d'images acoustiques, en utilisant les critères de l'ASN et du MSR, comme illustré en figure 4.19 et figure 4.20.

La figure 4.19 illustre les performances en termes d'ASN (a) et de MSR (b) en fonction de la fréquence. Les couleurs correspondent aux valeurs de kr_{cible} (vert : 1,80 ; bleu : 2,53 ; orange :

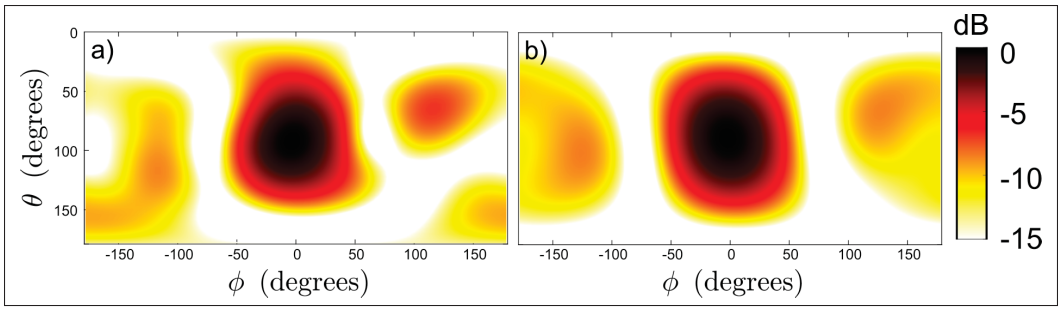


Figure 4.18 Images acoustiques à 500 Hz. Illustration l'effet de la perturbation avec un RSP de 25 dB. La valeur ciblée est $kr_{cible} = 2,53$. La valeur de régularisation est : (a) $\gamma = 0,01$ et (b) $\gamma = 0.05$

3,11), tandis que les styles de traits distinguent les niveaux de perturbation (trait plein : non perturbé ; tirets : RSP = 50 dB ; pointillés : RSP = 25 dB). Les cas perturbés montrent une dégradation aux basses fréquences par rapport aux cas non perturbés. Cette dégradation s'accentue lorsque le RSP diminue, rendant plus difficile l'obtention de performances comparables au cas non perturbé. Cet effet est d'autant plus prononcé que la valeur de kr_{cible} est grande. Ces résultats mettent en évidence la forte sensibilité de l'algorithme aux perturbations aux basses fréquences, y compris pour un RSP de 50 dB, correspondant pourtant à un niveau de perturbation modéré.

La figure 4.20 présente les performances en termes d'ASN (a) et de MSR (b) pour les configurations précédentes avec $\gamma = 0,05$. Les courbes non perturbées et non régularisées sont reportées une nouvelle fois sur les figures pour référence. La régularisation permet de corriger les effets des perturbations pour RSP = 50 dB. Toutefois, les courbes montrent une dégradation en dessous de 1 000 Hz. Cette dégradation est caractérisée par une hausse de l'ASN et une baisse du MSR. Cette tendance est principalement due à la régularisation qui atténue les petites valeurs singulières. En revanche, pour RSP = 25 dB, des performances comparables sont atteintes avec l'ASN pour des fréquences supérieures à 300 Hz, mais restent dégradées en termes de MSR. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de la régularisation aux basses fréquences.

Ces observations montrent que l'augmentation virtuelle du rayon améliore la résolution spatiale en réduisant la taille du lobe principal, mais qu'elle amplifie les perturbations. Au-delà d'un certain seuil, cet effet conduit à une dégradation marquée de la qualité de l'image acoustique.

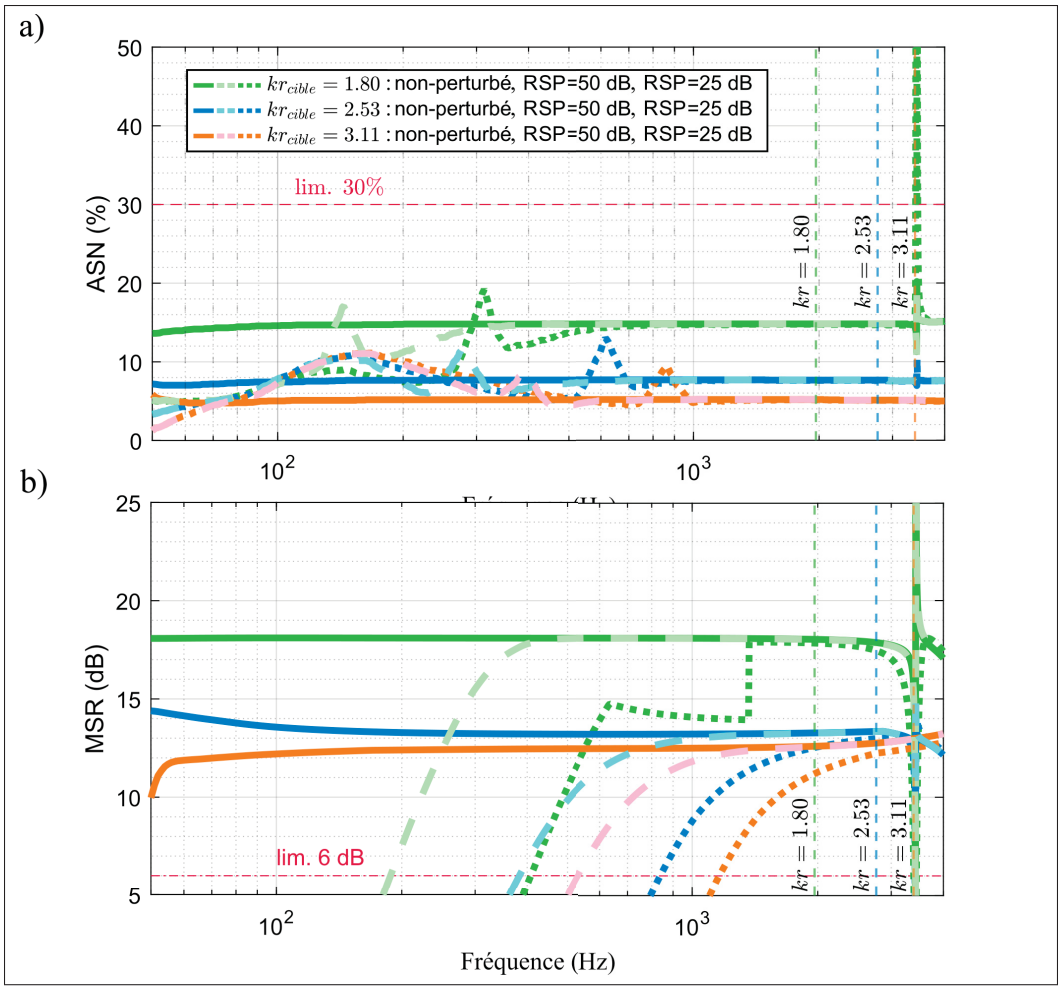


Figure 4.19 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour l'algorithme VPIG, (a) ASN et (b) MSR et trois cas : — non perturbé, - - - RSP = 50 dB et ····· RSP = 25 dB

L'ensemble de ces résultats confirme que l'algorithme VPIG est sensible aux perturbations et nécessite l'introduction d'une régularisation afin de limiter leur amplification.

4.3 Validation expérimentale de l'algorithme VPIG avec une antenne ouverte

Le prototype d'ASM utilisé est une antenne ouverte de géométrie *t*-design, de rayon 5 cm, comportant 24 microphones. Les résultats obtenus avec le CBF sont d'abord comparés aux simulations afin de valider le dispositif expérimental, voir Section 4.3.1. Les images acoustiques du VPIG sont ensuite évaluées en Section 4.3.2. Compte tenu de la sensibilité de l'algorithme aux

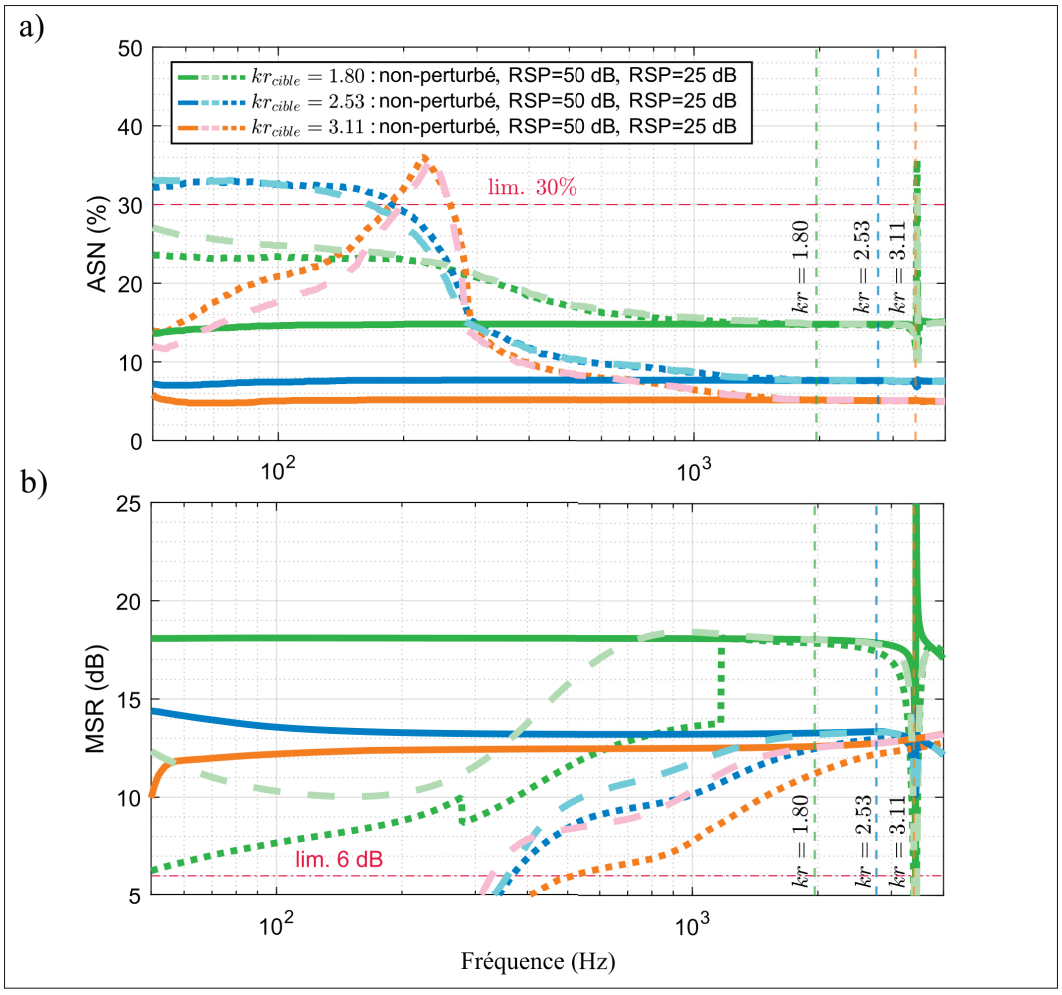


Figure 4.20 Critères de qualité d'une image acoustique en fonction de la fréquence pour l'algorithme VPIG et un facteur de régularisation $\gamma = 0{,}05$, (a) ASN et (b) MSR et trois cas : — non perturbé, - - - RSP = 50 dB et ····· RSP = 25 dB

perturbations, une optimisation des paramètres de régularisation et du rayon virtuel est proposée en Section 4.3.3. Enfin, une amélioration supplémentaire des performances est présentée en Section 4.3.5 à l'aide de l'algorithme hybride.

4.3.1 Validation du montage expérimentale avec l'algorithme CBF

Les images acoustiques obtenues à l'aide du CBF sont présentées en figure 4.21. Les images sont données pour différentes fréquences comprises entre 100 Hz et 4 000 Hz. Les simulations et mesures sont respectivement présentées dans la colonne de gauche et de droite.

À 1 000 Hz, en basse fréquence, le lobe principal apparaît large, ce qui est cohérent avec la petite taille de l'ASM. À mesure que la fréquence augmente, le lobe principal se resserre, permettant une localisation plus précise de la source. Par ailleurs, le lobe principal est centré de manière similaire dans les résultats simulés et expérimentaux, ce qui confirme le bon positionnement de l'ASM par rapport à la source. En revanche, entre 2 000 Hz et 4 000 Hz, des lobes secondaires supplémentaires apparaissent dans les mesures expérimentales par rapport aux simulations. Les images expérimentales présentent également une certaine asymétrie. Ces écarts entre simulation et expérience sont probablement liés à des erreurs de positionnement ou de calibration des microphones.

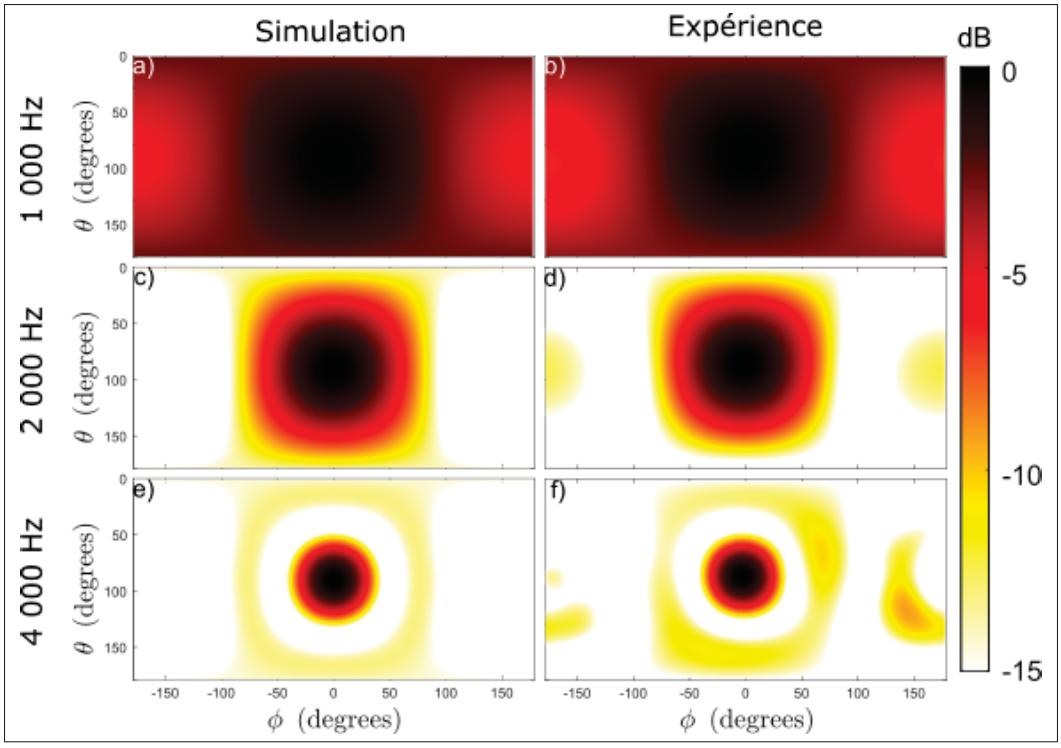


Figure 4.21 Validation expérimentale du montage avec le CBF : comparaison entre les simulations numériques et les mesures expérimentales pour différentes fréquences. Les images acoustiques montrent une bonne correspondance

La figure 4.22 présente les valeurs d'ASN (a) et de MSR (b) en fonction de la fréquence avec le CBF.

En figure 4.22(a), le CBF (courbe rose) dépasse la limite des 30% d'ASN à 1 375 Hz. Cette

valeur est proche de celle obtenue en simulation (1 420 Hz). La courbe est décroissante, comme attendu, bien que des fluctuations soient observées. En figure 4.22(b), les valeurs obtenues avec le CBF sont certes supérieures au seuil de 6 dB, mais indiquent des lobes secondaires de niveaux très variables. Les valeurs sont globalement plus faibles que prévu. Le MSR n'est plus calculable en dessous de 1 935 Hz, ce qui indique l'absence de lobes secondaires. Cette limite est atteinte à une fréquence plus élevée que celle prédite par les simulations.

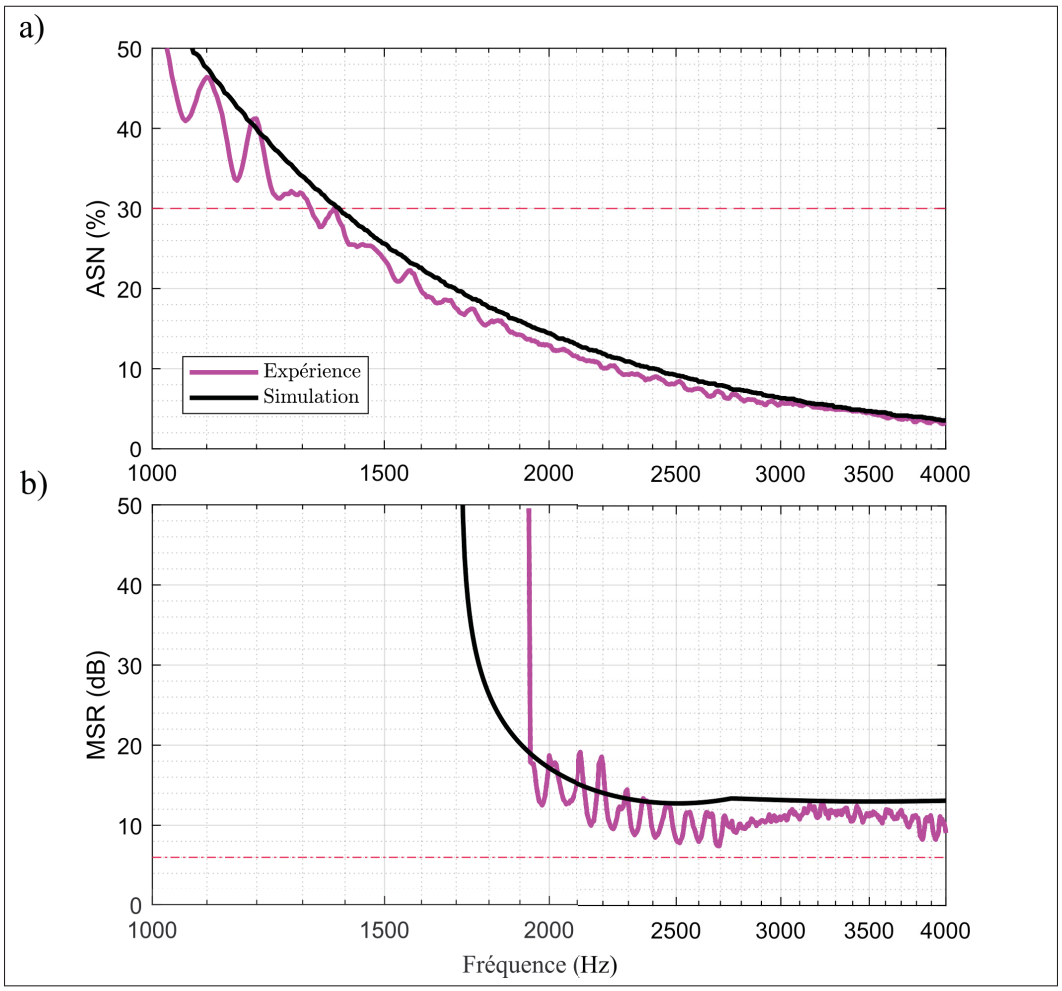


Figure 4.22 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour le CBF en chambre semi-anéchoïque, (a) ASN et (b) MSR

4.3.2 Images acoustiques obtenues avec l'algorithme VPIG

La figure 4.23 compare les images acoustiques simulées (colonne de gauche) et expérimentales (colonne de droite) obtenues avec l'algorithme VPIG. Trois cas représentatifs sont considérés : 100 Hz ($\tau = 20$), 500 Hz ($\tau = 4$) et 1 000 Hz ($\tau = 2$). La comparaison entre les simulations et les résultats expérimentaux permet d'évaluer les performances de la méthode. L'image acoustique obtenue avec le CBF à 2, 000 Hz en figure 4.21 ($kr_{\text{cible}} = 1{,}83$) constitue la référence visée pour chacune des configurations étudiées.

Les images provenant de la simulation présentent le même lobe que celui obtenu avec le CBF à 2 000 Hz. Les images expérimentales présentent des anomalies par rapport à la simulation. À 100 Hz, l'image montre de nombreux lobes étroits et épars dont le lobe principal n'est pas centré. À 500 Hz, l'image montre une distorsion significative du lobe principal. À ces deux dernières fréquences, la localisation de la source n'est pas possible. Ces images de mauvaise qualité traduisent une virtualisation expérimentale perturbée. Au contraire, à 1 000 Hz, l'image montre un lobe principal peu déformé, proche de l'image de la simulation.

La figure 4.24 présente les valeurs d'ASN (a) et de MSR (b) en fonction de la fréquence avec l'algorithme VPIG et pour différentes valeurs de kr_{cibles}.
En figure 4.24(a), lorsque la fréquence diminue, l'algorithme VPIG maintient un ASN correspondant à la valeur attendue pour $kr_a = kr_{cible}$ jusqu'à 695 Hz pour $kr_{cible} = 1{,}80$, et jusqu'à 1 000 Hz pour $kr_{cible} = 2{,}53$ et $3{,}11$. Toutefois, des fluctuations importantes apparaissent aux très basses fréquences, reflétant une instabilité de l'algorithme dans cette bande de fréquences.
En figure 4.24(b), les valeurs du MSR présentent de fortes fluctuations. Les valeurs diminuent rapidement et passent sous le seuil de 6 dB à 500 Hz ($kr_{\text{cible}} = 1{,}80$), 855 Hz ($kr_{\text{cible}} = 2{,}53$) et 1 200 Hz ($kr_{\text{cible}} = 3{,}11$). En dessous de ces fréquences, la localisation de la source n'est plus possible. Les valeurs expérimentales sont en dessous de celles provenant de la simulation.

Ainsi, la méthode VPIG ne reproduit pas correctement les images attendues pour le facteur d'agrandissement $\tau > 2$, ce qui est cohérent avec l'étude numérique (Section 4.2.3), qui montrait une sensibilité croissante de l'algorithme aux perturbations lorsque le rayon virtuel augmente.

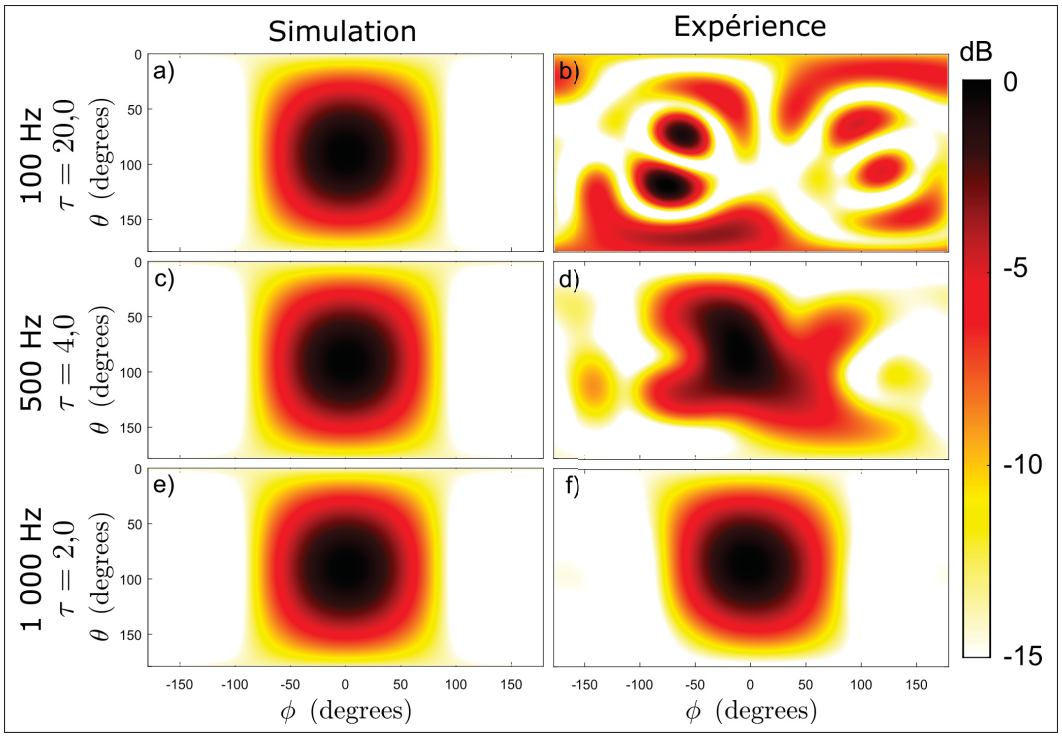


Figure 4.23 Images acoustiques avec l'algorithme VPIG : comparaison entre les simulations numériques et les mesures expérimentales pour différentes fréquences avec $kr_{cible} = 1{,}80$

Cette observation met en évidence la nécessité d'appliquer une régularisation en contexte expérimental.

4.3.3 Optimisation des paramètres d'agrandissement du rayon virtuel et de régularisation

Afin d'améliorer la qualité des images acoustiques obtenues expérimentalement, une étude paramétrique des facteurs d'agrandissement du rayon virtuel τ et de régularisation γ est réalisée. Les images acoustiques sont évaluées sur une bande de fréquence en tiers d'octave comprise entre 100 et 800 Hz, à l'aide des critères de taille du lobe principal (ASN) et de rapport de niveau entre le lobe principal et le lobe secondaire (MSR). Ces évaluations permettent de définir un champ de performances en fonction de (τ, γ) selon ces critères. Un algorithme pondéré, fondé sur le calcul du centroïde de l'ASN, du MSR et de la position du lobe principal (voir Annexe IV), permet ensuite de restreindre ce champ à un couple de valeurs optimales $(\overline{\tau}, \overline{\gamma})$.

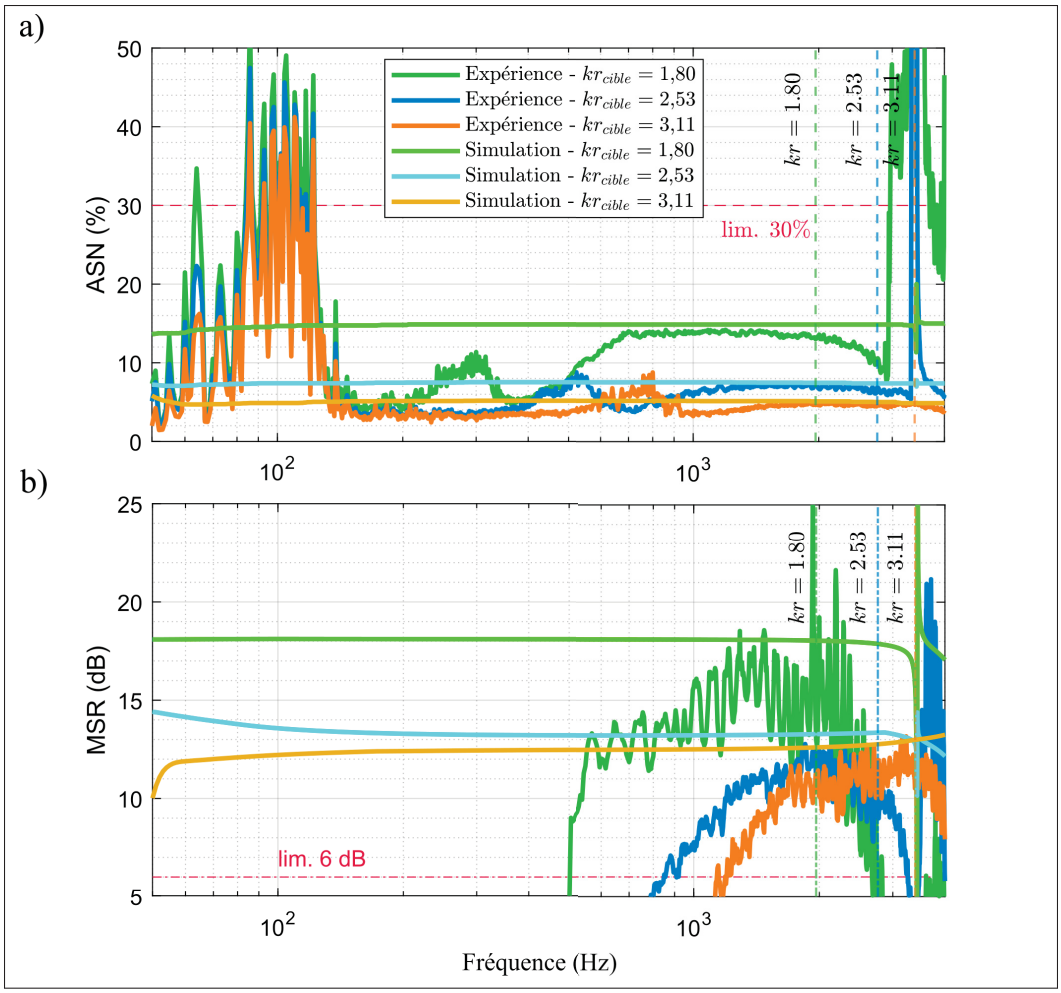


Figure 4.24 Critères de qualité d'images acoustiques en fonction de la fréquence pour l'algorithme VPIG en chambre semi-anéchoïque, (a) ASN et (b) MSR

La figure 4.25 présente, à titre d'illustration, les valeurs expérimentales de l'ASN en (a) et du MSR en (b) en fonction du paramètre de régularisation γ et du facteur d'agrandissement τ à 500 Hz. L'échelle de couleurs associe le bleu foncé à des valeurs non idéales, par exemple ASN $\geq$ 30% et MSR $\leq$ 6 dB, correspondant respectivement à un lobe principal trop large et à un lobe secondaire d'amplitude trop proche du lobe principal. À l'inverse, les teintes rouge orangé correspondent à des valeurs plus favorables, telles que ASN $<$ 10% et MSR $>$ 15 dB, traduisant un lobe principal étroit et un lobe secondaire de faible niveau. Cependant, les zones optimales selon l'ASN et le MSR ne coïncident pas dans le plan (τ, γ). En effet, la figure 4.25 montre en (a) que ASN $<$ 10% est obtenu pour $\tau \in [5,\ 7{,}7]$ et $\gamma \in [0{,}02,\ 0{,}22]$, ainsi que pour

$\tau \in [7{,}7,\ 8]$ et $\gamma \in [0{,}04,\ 1]$. En revanche, en (b), MSR > 15 dB correspond à une bande de valeurs $\tau \in [2{,}9,\ 3{,}8]$, pour l'ensemble des valeurs de γ. Ainsi, l'obtention simultanée d'un lobe principal étroit et d'un lobe secondaire de faible niveau ne correspond pas aux mêmes couples (τ, γ). Dans ce contexte, un algorithme de centroïde est utilisé afin de déterminer un couple optimal de valeurs $(\overline{\tau}, \overline{\gamma})$, représentant un compromis entre ces deux critères.

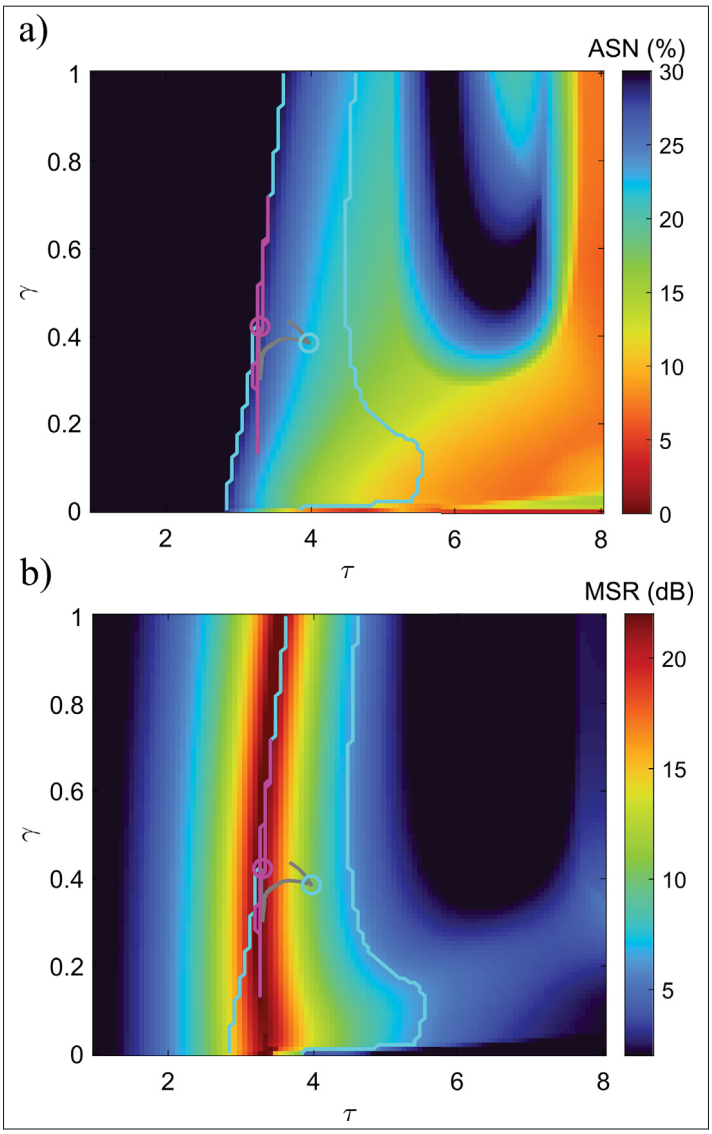


Figure 4.25 Champ de valeurs admissibles et trajectoire du centroïde à 500 Hz pour l'ASN en (a) et le MSR en (b) en fonction des paramètres τ et γ

Le contour cyan, en figure 4.25(a) et (b), délimite l'ensemble conjoint d'ASN $\leq$ 30% et du MSR $\geq$ 6 dB. Cet ensemble correspond à plusieurs valeurs (τ, γ) qui respectent les critères de qualité d'une image acoustique. Dans cet ensemble, le centroïde est positionné en (τ = 4,21, γ = 0,38), représentant des valeurs à l'équilibre, parmi toutes les autres, pour un ASN $\leq$ 30% et un MSR $\geq$ 6 dB. Le tracé gris indique la migration du centroïde de la première itération jusqu'à la dernière, soit 176 itérations au total. Le contour magenta délimite le dernier ensemble admissible conjoint, avec 77 points, pour un ASN $\leq$ 30% et un MSR $\geq$ 22 dB, dont les valeurs sont (τ = 3,30, γ = 0,42). L'ensemble conjoint délimité par le contour magenta est étroit selon l'axe des abscisses (τ) et est étendu selon l'axe des ordonnées (γ), ce qui peut être quantifié à l'aide de l'écart-type dans chaque direction. Ici, (σ_τ^- = 0,02, σ_τ^+ = 0,03) et (σ_γ^- = 0,08, σ_γ^+ = 0,09).

L'algorithme du centroïde (voir Annexe IV), avec ses paramètres actuels, favorise une solution avec un lobe secondaire d'un faible niveau par rapport au lobe principal et un lobe principal large. Un ensemble avec un MSR > 22 dB entre $\gamma \in [0,\ 0{,}05]$ et $\tau \in [3{,}1,\ 3{,}5]$ aurait pu être des paramètres minimisant davantage la valeur de l'ASN et maximisant le MSR. Cet ensemble constitue un groupe séparé. Ce groupe est supprimé dès que l'algorithme détecte des groupes mineurs séparés. L'algorithme ne converge pas vers ce groupe afin que le centroïde reste à l'intérieur du groupe principal. Cette analyse est applicable aux autres fréquences.

La figure 4.26 présente les itérations de l'algorithme du centroïde pondéré. La figure 4.26(a) montre la progression des valeurs seuils pour les ensembles conjoints de l'ASN (axe gauche) et du MSR (axe droit) au cours des itérations. L'algorithme avance par paliers successifs : d'abord, l'ASN est réduit de 45 % à 30 % par pas de 1 %, tout en maintenant un MSR supérieur à 6 dB ; ensuite, le MSR est augmenté de 6 dB à 22 dB par pas de 0,1 dB, en conservant l'ASN inférieur à 30 %. Ces conditions permettent de définir itérativement un ensemble de valeurs admissibles dans le champ (τ, γ) jusqu'au critère d'arrêt : soit MSR = 22 dB ou 20 points restant dans l'ensemble des valeurs admissibles.

En figure 4.26(b), le nombre de points admissibles dans le champ (τ, γ) est représenté en fonction des itérations pour différentes fréquences. À 125 Hz il n'y a aucun nombre de points à estimer dès la première itération. Les fréquences les plus basses présentent un faible nombre d'itérations. Elles atteignent rapidement l'un des critères d'arrêt. Le centroïde est alors calculé à

partir des points restant dans l'ensemble admissible. Au-dessus de 160 Hz toutes les fréquences ont 176 itérations maximums. Ces fréquences ont atteint le critère du MSR à 22 dB minimum et conduit à des valeurs avec de plus grands nombres de points. C'est à 200 Hz que l'on obtient le plus grand nombre de points (487 sur 10 000).

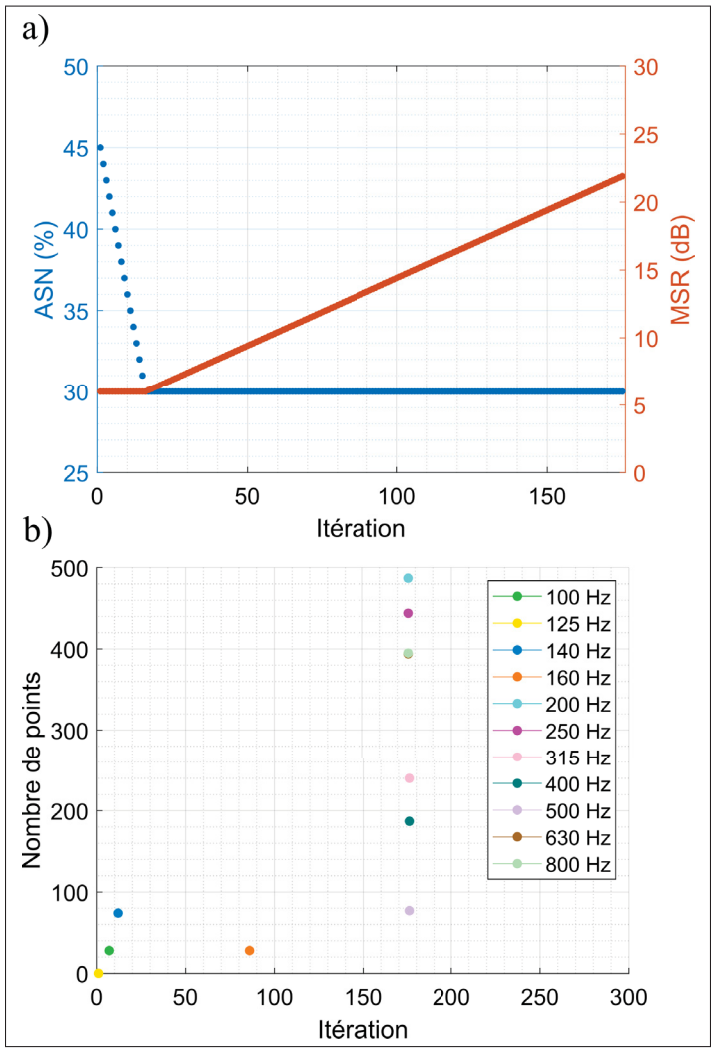


Figure 4.26 Convergence de l'algorithme de centroïde pondéré : (a) paliers d'admissibilité pour l'ASN et le MSR ; (b) points admissibles en fonction des itérations pour chaque fréquence

En figure 4.27, les couples de valeurs optimales (τ, γ) obtenus à l'aide de l'algorithme du centroïde, ainsi que les valeurs correspondantes d'ASN et de MSR, sont présentés. Contrairement à une représentation unidimensionnelle, chaque point correspond au centroïde des valeurs

admissibles, définissant ainsi un couple de paramètres dans le plan (τ, γ) ou (ASN, MSR), pour chaque fréquence. Les écarts-types associés, représentant la dispersion des solutions au sein du dernier ensemble admissible autour de ce centroïde, sont également reportés.

Les valeurs optimales (τ, γ) pour différentes fréquences sont présentées en figure 4.27(a). Pour les fréquences les plus basses, 100 Hz et 125 Hz, l'algorithme du centroïde ne donne pas de valeurs viables. Elles ne sont pas représentées sur la figure. La fréquence la plus basse qui admet des valeurs viables est 140 Hz avec $(\tau = 13{,}87, \gamma = 0{,}12)$. Le facteur d'agrandissement est d'ailleurs proche de celui attendu en l'absence de régularisation : $\tau = 14{,}04$ pour $kr_{\text{cible}} = 1{,}80$. Par ailleurs, les écarts-types apparaissent plus élevés selon γ que selon τ (voir figure 4.25), traduisant une plus grande dispersion dans cette direction. La régularisation atténue en priorité les petites valeurs singulières, plus présentes pour des valeurs élevées de τ. À l'inverse, les grandes valeurs singulières sont moins affectées lorsque le niveau de régularisation augmente. Les couples (τ, γ) obtenus à chaque fréquence correspondent à des valeurs relativement faibles de τ ($kr_{\text{cible}} = 1{,}80$), associées à des valeurs plus admissibles plus variées avec γ. Enfin, le facteur de régularisation tend à augmenter avec la fréquence, suggérant que les valeurs singulières nécessitent une régularisation plus contraignante afin de garantir une image acoustique de qualité.

Les valeurs d'ASN et de MSR sont présentées en figure 4.27(b). L'ensemble des valeurs se situent entre 25,73% et 33,31% d'ASN et 6,32 dB à 33,33 dB pour le MSR. Les écarts-types traduisent la variation des valeurs d'ASN et de MSR. À 140 Hz, le MSR est supérieur à 6 dB. En revanche, l'ASN est supérieur à 30%, donc l'images n'est pas suffisamment de bonne qualité. À 160 Hz, l'image présente un ASN = 30.8% légèrement au-dessus du critère des 30% pour une taille de lobe suffisamment étroite pour localiser la source. Les résultats au dessus de 160 Hz présentent les MSR les plus élevés et les ASN les plus faibles. Cette tendance représente des images acoustiques avec un lobe secondaire plus faible en niveau et un lobe principal moins large lorsque la fréquence augmente. Les écarts-types sont faibles en basses fréquences et augmentent avec la fréquence. Ce comportement, en fonction de la fréquence des écarts-types, indique que la virtualisation d'une fréquence proche de $kr_{cible} = 1{,}80$ admet un plus grand nombre de valeurs admissibles.

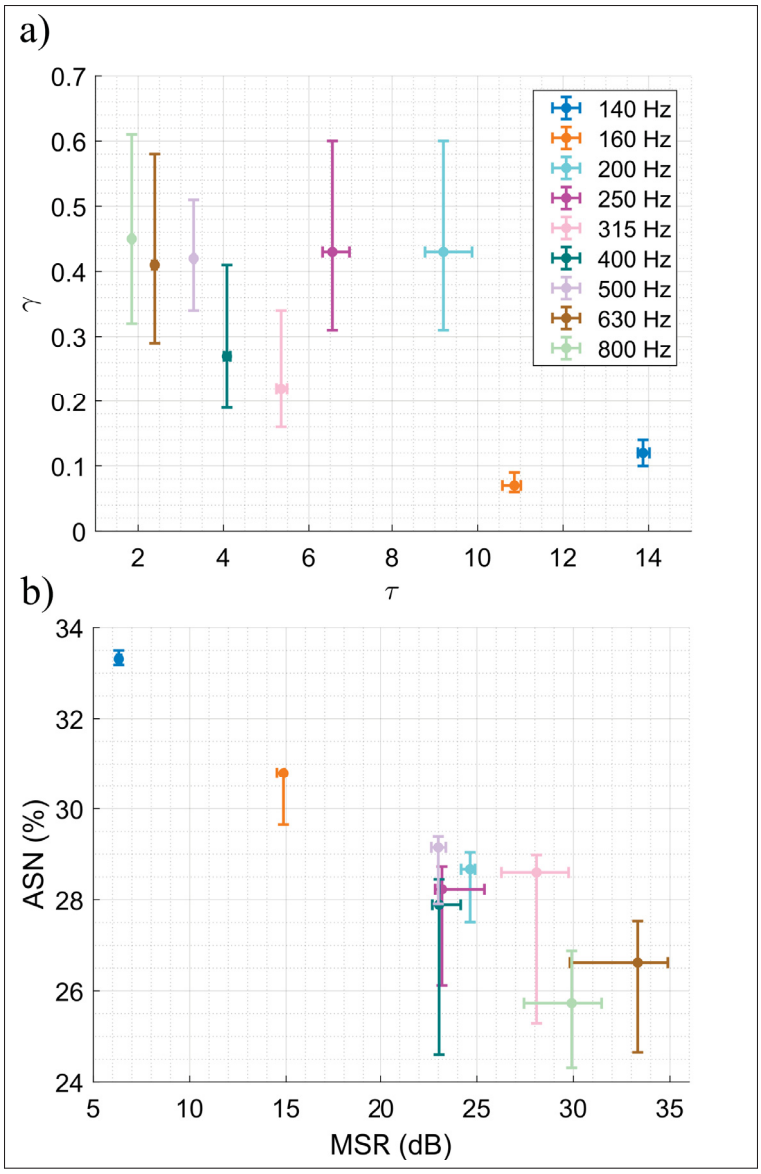


Figure 4.27 Couples optimaux (τ, γ) et performances associées pour chaque fréquence avec barres d'écart-type : (a) Paramètres optimisés de régularisation et d'agrandissement virtuel ; (b) Performances en ASN et MSR. Le palier limite de l'ASN est fixé à 30%

Les paliers progressifs d'ASN et de MSR permettent d'identifier les valeurs $(\tau,\ \gamma)$. Une tendance générale est observée : γ diminue et τ augmente lorsque la fréquence diminue. De même, l'ASN augmente et le MSR diminue lorsque la fréquence diminue. Un front de valeurs de MSR donne

au facteur de régularisation γ de larges écart-types. Il est recommandé d'utiliser les couples de valeurs $(\tau,\ \gamma)$ sans dépasser les écarts-types afin de limiter la dégradation des résultats.

4.3.4 Images acoustiques optimisées

La figure 4.28 présente les images acoustiques obtenues avec l'algorithme VPIG et avec les facteurs d'agrandissement τ et de régularisation γ optimisés. Les valeurs optimisées sont celles présentées en figure 4.27. Ces images, provenant de l'expérience, sont obtenues pour des fréquences allant de 140 Hz à 630 Hz. Pour rappel, ces images sont de meilleurs qualités que celles obtenues avec le CBF (voir figure 4.14 à 100 Hz et figure 4.21 à 1 000 Hz).

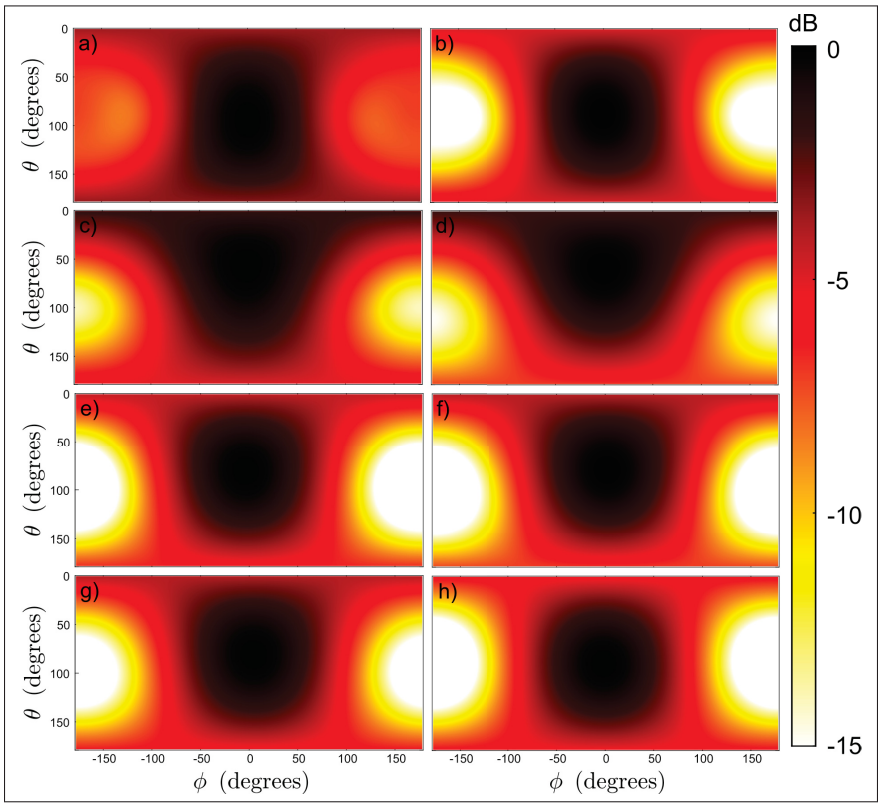


Figure 4.28 Images acoustiques optimisées : (a) 140 Hz, (b) 160 Hz, (c) 200 Hz, (d) 250 Hz, (e) 315 Hz, (f) 400 Hz, (g) 500 Hz, (h) 630 Hz

En figure 4.28(a), une image est obtenue dès 140 Hz, avec un MSR inférieur à 6 dB. En figure 4.28(b), à 160 Hz, le MSR augmente, donnant une image acoustique de meilleure qualité.

Les images acoustiques (a), (b), (e) à (h) sont centrées. Les images (c) et (d), à 200 Hz et 250 Hz, présentent cependant un décentrage.

La qualité des images s'améliore globalement avec la fréquence, tandis que le facteur d'agrandissement optimal diminue progressivement. Le besoin de virtualisation diminue à mesure que la fréquence augmente. La qualité d'image demeure limitée, bien qu'elle satisfasse les limites des critères d'évaluations (MSR> 6 dB et ASN< 30%). Ces images sont satisfaisantes au regard de ce que peut produire le CBF dans ces conditions d'expérience.

4.3.5 Comparaison et combinaison des algorithmes CBF et VPIG avec l'algorithme hybride

La figure 4.29 illustre les images acoustiques reconstruites à 315 Hz à partir de quatre configurations d'algorithmes : (a) CBF, (b) CBF + algorithme hybride avec $\gamma_1 = 0{,}02$, (c) VPIG avec $\gamma_2 = 0{,}22$ et $\tau = 5{,}35$ et (d) VPIG avec γ_2 + algorithme hybride avec γ_1. Pour rappel, les algorithmes VPIG et hybride disposent chacun de leur propre paramètre de régularisation. Ces paramètres peuvent être choisis différemment afin d'ajuster plus finement la qualité de l'image acoustique.

En figure 4.29(a), le CBF produit une image acoustique de mauvaise qualité aux basses fréquences, avec un lobe principal large occupant l'image. En figure 4.29(b), l'algorithme hybride utilise cette image comme point de départ pour reconstruire une nouvelle image acoustique. L'algorithme hybride avec une faible valeur de régularisation ($\gamma_1 = 0{,}02$) ne localise pas la source, indiquant que l'information de l'image produite par le CBF n'est pas suffisante pour reconstituer un lobe principal centré comme attendu. En figure 4.29(c), l'algorithme VPIG permet d'obtenir un lobe principal distinct et néanmoins large. Enfin, en figure 4.29(d), la combinaison avec l'algorithme hybride donne un lobe principal fin accompagné de lobes secondaires symétriques. Cette configuration offre la meilleure performance. La valeur du facteur de régularisation est de 10% du facteur utilisé avec l'algorithme VPIG. Cet ordre de grandeur constitue le meilleur compromis pour obtenir une image acoustique de qualité (Voir Annexe VI).

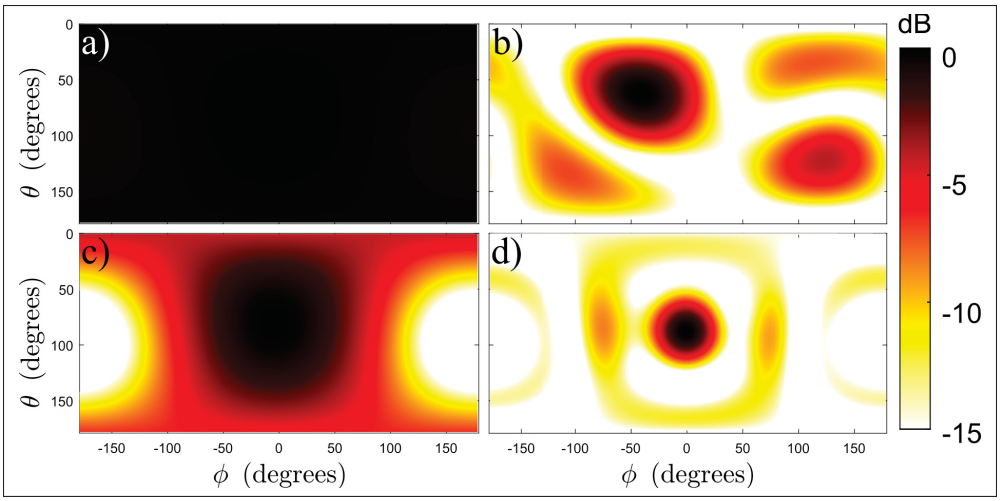


Figure 4.29 Images acoustiques à 315 Hz obtenues avec les algorithmes : (a) CBF, (b) CBF + hybride ($\gamma_1 = 0{,}02$), (c) VPIG ($\tau = 5{,}35$, $\gamma_2 = 0{,}22$) et (d) VPIG ($\tau = 5{,}35$, $\gamma_2 = 0{,}22$) + hybride ($\gamma_1 = 0{,}02$)

Cette comparaison met en évidence la complémentarité des deux algorithmes, VPIG et hybride, par rapport au CBF. Le VPIG améliore la résolution spatiale en réduisant la largeur du lobe principal, tandis que l'algorithme hybride exploite cette information pour réduire davantage le principal. Leur combinaison produit ainsi une image acoustique de meilleure qualité que leur utilisation séparée. Ces résultats montrent que la virtualisation constitue une étape pertinente avant l'application d'un algorithme avancé aux basses fréquences.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Résumé des contributions principales

Afin de protéger les travailleurs des troubles auditifs, les sources de bruit doivent être rapidement identifiées. Ces dernières peuvent provenir de n'importe quelle direction et les antennes sphériques de microphones répondent à cette contrainte, car elles mesurent la pression acoustique de manière omnidirectionnelle. Les algorithmes classiques de localisation (*beamforming*) permettent d'obtenir des images acoustiques où la source de bruit est visible par un lobe. Cependant, en basses fréquences, le lobe principal est trop large et rend difficile la visualisation de la position de la source. Dans cette thèse, il s'agissait donc d'obtenir un algorithme performant pour localiser précisément les sources acoustiques en basses fréquences avec une antenne de petite taille. Le premier objectif était de déterminer une géométrie optimale d'antenne sphérique de microphones pour ensuite réaliser le second objectif, proposer un algorithme performant.

Le premier objectif a porté sur la détermination des performances d'une grande variété d'antennes avec l'algorithme classique de *beamforming* conventionnel en fréquence (CBF) et l'algorithme classique de *beamforming* par harmoniques sphériques (SHB). Cette comparaison, réalisée avec des simulations numériques en champ libre et une seule source acoustique, a rassemblé quinze géométries d'antennes ouvertes et rigides différentes allant de 16 à 64 microphones. Les performances des méthodes de *beamforming* varient selon le type d'antenne et la géométrie employée. Le CBF permet d'obtenir de meilleurs résultats avec une antenne sphérique ouverte. Pour $kr_a < 2$, son utilisation n'est pas recommandée en raison d'un lobe principal trop large. Le SHB, au contraire, est plus performant à faible kr_a et s'adapte mieux aux antennes sphériques rigides. Parmi les géométries d'antennes étudiées, Spiral et t-design sont optimales pour le CBF, tandis que le t-design convient au SHB. Les géométries Equi-Angle et Gauss-Legendre sont moins efficaces avec le SHB. Enfin, une augmentation du nombre de microphones améliore les performances, surtout pour les grandes valeurs de kr_a.

Le second objectif a porté sur l'algorithme VPIG afin d'améliorer les performances en basses fréquences, à partir d'une antenne sphérique de petite taille de type t-design, composée de 24 microphones, et de rayon $r = 5$ cm. Les résultats obtenus avec le CBF ont tout d'abord permis de valider le bon fonctionnement du dispositif expérimental, tout en mettant en évidence une limite fréquentielle autour de 1 600 Hz. L'étude numérique de l'agrandissement virtuel du rayon a ensuite montré la possibilité d'étendre les performances vers les basses fréquences par rapport au CBF. Toutefois, l'algorithme VPIG s'est révélé sensible aux perturbations, y compris de faible amplitude (RSP = 50 dB), conduisant notamment à l'apparition de lobes secondaires marqués. La comparaison entre des simulations idéales et perturbées a ainsi mis en évidence la nécessité d'introduire une régularisation afin de limiter l'influence de perturbations. Une optimisation conjointe des paramètres d'agrandissement τ et de régularisation λ, fondée sur un algorithme de centroïde pondéré, a permis d'identifier des couples de valeurs admissibles avec les critères de qualité d'image (ASN $< 30\%$ et MSR > 6 dB). Cette approche permet d'obtenir des images acoustiques valides jusqu'à 160 Hz, soit une amélioration d'un facteur dix par rapport à la limite du CBF. Une extension jusqu'à 140 Hz reste envisageable mais avec un léger dépassement du critère d'ASN. Enfin, l'utilisation combinée de l'algorithme VPIG et d'un algorithme hybride permet d'améliorer la qualité des images acoustiques en réduisant significativement la largeur du lobe principal aux basses fréquences. Néanmoins, les résultats obtenus en conditions contrôlées suggèrent que des améliorations sont nécessaires pour une application *in situ*.

5.2 Limitation du travail

Toutefois, cette thèse comporte des limitations. L'évaluation des différentes combinaisons de géométries ainsi que l'évaluation numérique (dans une moindre mesure) et expérimentale reposent sur des conditions idéales, de champ libre, sans présence de réflexion sur le sol ou les parois et sans sources secondaires. De plus, les études numériques n'incluent pas de bruit dans la pression acoustique des microphones. Néanmoins, le bruit est étudié dans une certaine

mesure dans le dernier chapitre et montre que l'algorithme virtuel y est sensible, ce qui limite les performances de l'augmentation du rayon de l'antenne.

En ouverture de cette thèse, l'application en milieu de travail devra donc être davantage étudiée en présence de réflexions sur le sol et les parois, d'un champ réverbéré, de bruit ambiant et de sources acoustiques multiples.

En perspective de rapidité calculatoire, les solutions des harmoniques sphériques exprimées dans le domaine temporel offrent des temps de calcul plus rapides par rapport à ceux effectués dans le domaine fréquentiel. Une manière de réduire le temps de calcul, mais qui requiert un espace de stockage dédié, est de précalculer les matrices d'harmoniques sphériques et de les stocker pour leur utilisation ultérieure. Ces matrices ne dépendent que de l'ordre de troncature et des angles (ϕ, θ) de la grille de balayage ou des microphones et peuvent être facilement réutilisées avec une configuration fixée.

Concernant l'amélioration de la boîte à outils de codes, l'ajout du bruit aléatoire et une étude de son impact sur les performances des différentes configurations de géométries et d'algorithmes seraient intéressants.

Enfin, une amélioration des parties électroniques pour la réduction du bruit et une tolérance de conception sur la position des microphones plus fiable amélioreraient la robustesse du prototype d'antenne. Une calibration rigoureuse en amplitude et en phase est recommandée. De même, la régularisation du bruit lors de l'inversion de la fonction de Green avec l'algorithme virtuel est recommandée. Des travaux futurs pourraient comparer la méthode de sélection du paramètre de régularisation proposée dans cette thèse, fondée sur l'algorithme du centroïde, avec des méthodes classiques telles que la validation croisée généralisée (GCV) ou la méthode de la courbe en L (L-curve). Il serait également pertinent d'évaluer la robustesse de ces approches dans différents environnements acoustiques (champ réverbérant, bruit de fond, sources multiples).

5.3 Portée et impact de l'étude

En perspective de formes alternatives aux antennes sphériques, les antennes cylindriques offrent davantage de possibilités de manipulation tout en conservant un balayage omnidirectionnel. De plus, nous pouvons imaginer que l'opérateur déplace l'antenne dans l'environnement pour obtenir plusieurs angles de prises de mesure. Il serait pertinent d'exploiter cette démarche pour appliquer la photogrammétrie aux données obtenues avec une caméra de profondeur de champ, puis d'y intégrer les images acoustiques afin de visualiser les sources de bruits dans une scène virtuelle. À cette technique, il faut également exploiter les matrices interspectrales à chaque position de l'antenne pour constituer une antenne virtuelle de grande taille et obtenir une image acoustique avec des lobes réduits, plus précise du milieu de travail. Le couplage de ces résultats avec un logiciel de simulation acoustique pour le bâtiment pourrait faire gagner un temps considérable dans le processus allant du diagnostic à la proposition de solutions vérifiées.

Les apports scientifiques et techniques de cette thèse sont multiples. En reprenant les critères d'évaluation classique en imagerie acoustique, elle en propose un adapté aux coordonnées sphériques : l'angle solide normalisé. Il évalue la contribution des lobes au-dessus d'un seuil sous la forme d'un pourcentage de remplissage de l'image. De plus, cette thèse fournit un ensemble de résultats précis permettant d'identifier les configurations optimales d'antennes en fonction du paramètre kr_a et du nombre de microphones disponible via une boîte à outils de codes en langage MATLAB disponible en ligne. Enfin, cette thèse propose un algorithme performant, en basses fréquences, permettant de réduire la taille du lobe principal et un prototype d'antenne de 10 cm de diamètre, la plus petite à notre connaissance de la littérature imprimée d'un seul tenant. À titre de comparaison, parmi les antennes commerciales les plus répandues, la plus compacte est celle de B&K. Elle possède 36 microphones pour un diamètre de $19,5$ cm.

Les retombées de ce travail trouveront un intérêt pour les professionnels du diagnostic acoustique et plus globalement le secteur de la santé au travail. Cela intéressera également la communauté scientifique concernant les aspects théoriques des algorithmes de localisation de sources acoustiques et l'utilisation de la boîte à outils.

ANNEXE I

TABLEAU DE CONVERSION kr_a

Ce tableau donne la conversion d'un nombre sans dimension kr_a en fréquence (Hz) et en rayon (m). Pour lire ce tableau, le lecteur peut choisir une fréquence et un rayon, et obtenir à l'intersection de deux valeurs le résultat du nombre fréquence-rayon kr_a. Les résultats d'imagerie acoustique avec le même rapport kr_a sont identiques : par exemple, une image acoustique avec un rayon $r_a = 0,40$ m à 200 Hz est la même image acoustique pour un rayon $r_a = 0,10$ m et à 800 Hz.

Tableau-A I-1 Le nombre sans dimension kr_a en fonction du rayon et de la fréquence

		Rayon (m)			
	kr_a	**0.04**	**0.10**	**0.20**	**0.40**
Fréquence (Hz)	**200**	0.15	0.37	0.73	1.47
	250	0.18	0.46	0.92	1.83
	315	0.23	0.58	1.15	2.31
	400	0.29	0.73	1.47	2.93
	500	0.37	0.92	1.83	3.66
	630	0.46	1.15	2.31	4.62
	800	0.59	1.47	2.93	5.86
	1000	0.73	1.83	3.66	7.33
	1250	0.92	2.29	4.58	9.16
	1600	1.17	2.93	5.86	11.72
	2000	1.47	3.66	7.33	14.65
	2500	1.83	4.58	9.16	18.32
	3150	2.31	5.77	11.54	23.08
	4000	2.93	7.33	14.65	29.31
	5000	3.66	9.16	18.32	36.64
	6300	4.62	11.54	23.08	46.16
	8000	5.86	14.65	29.31	58.62

ANNEXE II

ALGORITHME DE L'ANGLE SOLIDE

Cette annexe présente l'algorithme utilisé pour le calcul de l'angle solide Ω associé à un lobe détecté sur une grille sphérique discrétisée en coordonnées sphériques (ϕ, θ). L'algorithme repose sur une sommation surfacique élémentaire appliquée aux points du lobe identifiés selon un critère de seuil. Il permet ainsi de déterminer la portion de sphère couverte par le lobe en tenant compte de la structure régulière du maillage. Les entrées principales sont les coordonnées angulaires des points sélectionnés, la grille complète, ainsi que le seuil de détection. La figure II-1 montre le passage itératif du masque binaire sur les cellules intermédiaires de la grille allant de haut en bas, puis de gauche à droite.

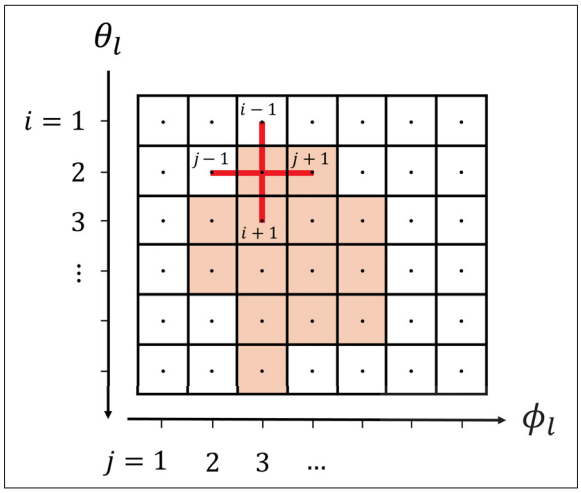


Figure-A II-1 Exemple de grille avec des cellules rouges représentant la détection d'un lobe au-dessus du seuil (masque binaire). L'angle solide est calculé avec les angles (ϕ_l, θ_l) adjacents représentés par la croix rouge

Algorithme-A II-1 Calcul de l'angle solide total (Ω) sur une grille (ϕ_l, θ_l)

Input : $\boldsymbol{\phi_l}$: azimuts des points (vecteur),
$\boldsymbol{\theta_l}$: élévations des points (vecteur),
χ : points à ignorer hors seuil (vecteur)

Output : $\boldsymbol{\Omega}$: Angle solide total

Créer la grille à partir de ϕ_l et θ_l;
$[grid,] \leftarrow$ `meshgrid`(ϕ_l, θ_l);
Mettre en `NaN` les points de la grille aux indices χ;
$grid[\chi] \leftarrow$ `NaN`;
S'assurer que θ_l commence à 0;
if $\theta_l[1] == -\pi/2$ **then**
  $\theta_l \leftarrow \theta_l + \pi/2$
else if $\theta_l[1] \neq 0$ **then**
  Erreur : θ_l doit commencer à 0
else
end if
Ajouter une valeur de fin et de début à ϕ_l et θ_l pour compléter la grille;
$\phi_l[:, \texttt{length}(\phi_l) + 1] \leftarrow -\phi_l[:, 1]$;
$\phi_l \leftarrow [(\phi_l[\texttt{end} - 1] - \phi_l[\texttt{end}] + \phi_l[1]), \phi_l]$;
if $\theta_l[end] \neq \pi$ **then** $\theta_l[\texttt{end} + 1] \leftarrow \theta_l[\texttt{end}] + 2 \times (\pi - \theta_l[\texttt{end}])$;
else $\theta_l[\texttt{end} + 1] \leftarrow \pi$;
$\theta_l \leftarrow [0, \theta_l]$;
Initialiser $\Omega \leftarrow 0$, et $\Omega' \leftarrow 0$;
for $i = 2$ **to** $length(\phi_l) - 1$ **do**
  for $j = 2$ **to** $length(\theta_l) - 1$ **do**
    if *`NaN` n'existe pas pour* $grid[j-1, i-1]$ **then**
      Calculer $\Delta\phi = \frac{1}{2}(\phi_l[i+1] - \phi_l[i-1])$;
      Calculer $\Delta \cos\theta = -\cos\left(\frac{\theta_l[j+1] - \theta_l[j]}{2} + \theta_l[j]\right) \ldots$
        $+ \cos\left(\frac{\theta_l[j-1] - \theta_l[j]}{2} + \theta_l[j]\right)$;
      $\Omega' \leftarrow \Delta\phi \times \Delta\cos\theta$;
      $\Omega \leftarrow \Omega + \Omega'$;
    end if
  end for
end for
return Ω

ANNEXE III

RÉSULTATS DE CALIBRATION DES FONCTIONS DE TRANSFERTS

Les figures III-1(a) et (b) présentent respectivement le module et la phase des fonctions de transfert de calibration $H_{q\rightarrow ref}(f)$ obtenues pour les 24 microphones Knowles, notés de K1 à K24. Les fonctions de calibration sont affichées avec une résolution de 1 Hz. Chaque courbe correspond à la calibration d'un microphone Knowles.

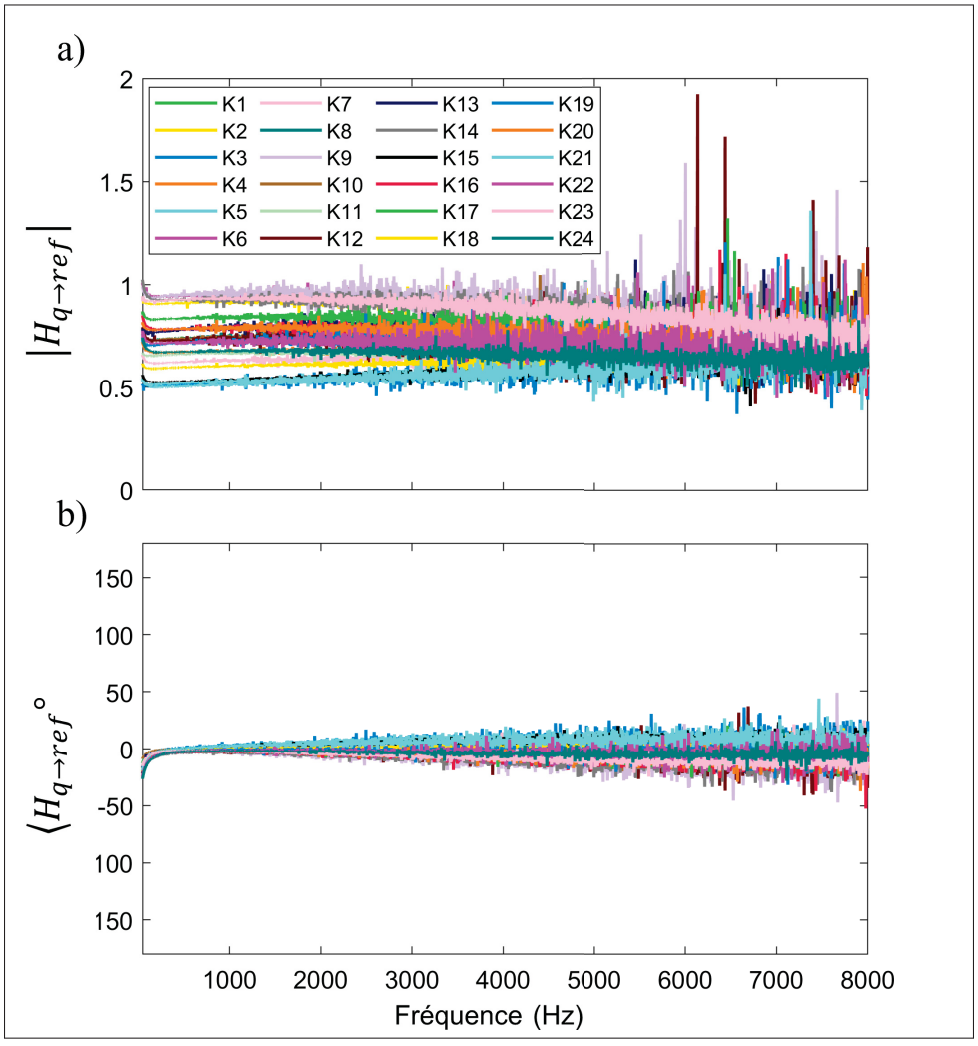


Figure-A III-1 (a) Module $|H_{q\rightarrow ref}(f)|$ et (b) phase $\langle H_{q\rightarrow ref}(f)$ des fonctions de transfert mesurées pour les 24 microphones Knowles

Le module des fonctions de transfert noté $|H_{q\rightarrow ref}(f)|$ en figure III-1(a) présente une réponse comprise entre 0,5 et 1,5 sur la plage fréquentielle de 50 Hz à 8 kHz. Une dispersion croissante est observée au-delà de 5 kHz. La phase, notée $\langle H_{q\rightarrow ref}(f)$ en figure III-1(b), montre un comportement cohérent entre les différents microphones en basses fréquences et des variations de phases plus importantes dans les hautes fréquences.

Pour conclure, une faible variabilité entre les différents microphones est observée. La calibration par fonction de transfert apporte une correction par le module de ½ à 2 et par la phase de 0° à 50°. Ces fonctions de transfert de calibration sont ensuite utilisées avec les mesures expérimentales $S_q(f)$, telles que $S_q(f) \times H_{q\rightarrow ref}(f)$.

ANNEXE IV

ALGORITHME DU CENTROÏDE

L'objectif est de déterminer un couple de valeurs optimales par une approche heuristique. Ces valeurs sont notées $(\overline{\tau}, \overline{\gamma})$, où τ est le taux d'agrandissement du rayon virtuel, et γ le facteur de régularisation. Elles sont calculées à partir d'un centroïde. Trois champs de solutions bivariées sont utilisés : le rapport du lobe secondaire au lobe principal $\mathrm{MSR}(\tau, \gamma)$, l'angle solide normalisé $\mathrm{ASN}(\tau, \gamma)$, et l'erreur de position du lobe principal dans l'image acoustique $\Delta(\phi, \theta)(\tau, \gamma)$.

Le centroïde est donné par,

$$\overline{\tau} = \sum_i w_i, \tau_i \quad ; \quad \overline{\gamma} = \sum_i w_i, \gamma_i, \tag{A IV-1}$$

où w_i est un poids dépendant des champs de solutions. Ces poids sont obtenus selon,

$$w_i = \frac{s_i}{\sum_j s_j}, \tag{A IV-2}$$

où s_i est un score. Ce score est déterminé dans une zone de valeurs correspondant à $(\mathrm{MSR} \geq \alpha \cap \mathrm{ASN} \leq \beta)$, où α et β sont des valeurs définies arbitrairement.

L'algorithme est itératif : si la zone contient plus de 20 points et que la fin des vecteurs de valeurs n'est pas atteinte, alors l'itération continue. Le score est défini par,

$$s_i = \frac{\min(\mathrm{ASN})}{\mathrm{ASN}_i} + \frac{\mathrm{MSR}_i}{\max(\mathrm{MSR})} + \Delta(\phi_i, \theta_i), \tag{A IV-3}$$

où $\Delta(\phi_i, \theta_i)$ est une distance angulaire normalisée par rapport à un point cible :

$$\Delta(\phi_i, \theta_i) = \frac{\sqrt{(\phi_i - \phi_s)^2 + (\theta_i - \theta_s)^2}}{\sqrt{2}}. \tag{A IV-4}$$

Le score de l'ASN favorise les faibles valeurs d'ASN, car un lobe principal de petite taille est préférable. Le score du MSR favorise les grandes valeurs, car un lobe principal sans lobe

secondaire est optimal. Le score de l'erreur de position ajuste le poids en fonction de la position du maximum du lobe principal, afin de favoriser une image acoustique centrée.

Une heuristique supplémentaire est introduite pour renforcer la robustesse du processus. S'il existe plusieurs groupes distincts pour une zone de valeurs, alors le groupe contenant les MSR le plus élevé est conservé, et le centroïde est calculé dans ce groupe uniquement.

Cette méthode permet ainsi de sélectionner itérativement une configuration $(\overline{\tau}, \overline{\gamma})$ robuste, en exploitant efficacement les zones de hautes performances tout en minimisant les effets des artefacts ou des lobes secondaires.

ANNEXE V

MÉTHODE DE RÉGULARISATION

Afin d'atténuer les conséquences des imperfections des signaux mesurés (erreur de calibration, présence de bruits), la régularisation peut être utilisée. La régularisation consiste à légèrement modifier une valeur singulière (qui génère une valeur nulle) en valeur régulière (qui ne génère pas de valeur nulle) afin que l'inverse de cette valeur ne donne pas une valeur infinie. Dans le système d'équation linéaire $\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{a}$, une petite perturbation de la pression produit une perturbation de la force de la source (Moler, 2017),

$$\mathbf{p} + \delta\mathbf{p} = \mathbf{G}(\mathbf{a} + \delta\mathbf{a}). \tag{A V-1}$$

La propriété de norme sous-multiplicative donne $\|\mathbf{p}\| \leq \|\mathbf{G}\|\|\mathbf{a}\|$. En développant l'Éq. A V-1 et en élimant les termes non perturbés, la résolution du système est $\|\delta\mathbf{a}\| \leq \|\mathbf{G}^{\dagger}\|\|\delta\mathbf{p}\|$. Puis vient l'inégalité suivante,

$$\frac{\|\delta\mathbf{a}\|}{\|\mathbf{a}\|} \leq \kappa(\mathbf{G})\frac{\|\delta\mathbf{p}\|}{\|\mathbf{p}\|} \tag{A V-2}$$

où $\kappa(\mathbf{G}) = \|\mathbf{G}\|\|\mathbf{G}^{\dagger}\|$ est le nombre de conditionnement de la matrice $\mathbf{G}$ et correspondant au rapport des valeurs singulières maximale et minimale, $\kappa(\mathbf{G}) = \sigma_{max}/\sigma_{min}$, avec $\|\cdot\|$ la norme euclidienne (norme ℓ^2). L'inégalité montre que s'il y a une perturbation du système, alors sa résolution donne une réponse d'autant plus déformée que le rapport des valeurs singulières est élevé. Si la matrice est bien conditionnée, alors $\kappa(\mathbf{G}) = 1$, le système est stable, sinon la matrice est mal conditionnée $\kappa(\mathbf{G}) \geq 1$, le système est sensible aux petites perturbations $\delta\mathbf{p}$ et entraîne une perturbation $\delta\mathbf{a}$ amplifiée. Le conditionnement d'un problème inverse discret est hautement dépendant de la distance source-antenne et de la fréquence, notamment quand $2\pi f/c \gg r_S$ (Nelson & Yoon, 2000). Ainsi, on peut évaluer le conditionnement de l'ensemble des matrices avec $\kappa(\mathbf{G}\mathbf{G}^{\dagger})$ (Fernandez-Grande, 2016).

L'ajout d'un facteur de pénalisation γ permet de régulariser les valeurs singulières pour minimiser l'amplification. C'est la régularisation de Tikhonov. La solution régularisée de l'estimation de la

force de la source $\tilde{\mathbf{a}}$ s'écrit (Battista *et al.*, 2018),

$$\tilde{\mathbf{a}} = \arg\min_{\mathbf{a}} \left\{ \|\mathbf{p} - \mathbf{G}\mathbf{a}\|^2 + \gamma^2 \|\mathbf{a}\|^2 \right\} \tag{A V-3}$$

La solution est exprimée par l'Éq. 1.10. La matrice $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{Q \times L}$ peut être décomposée en valeurs singulières (str, 2016),

$$\mathbf{G} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^H, \tag{A V-4}$$

où $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{Q \times Q}$ et $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{L \times L}$ sont des matrices orthogonales de rotation contenant les vecteurs singuliers gauches et droits, et $\boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{C}^{Q \times L}$ est une matrice diagonale d'étirement dont les éléments sont les valeurs singulières σ_q. La décomposition en valeurs singulières permet d'écrire (Chelliah, Raman & Muehleisen, 2017),

$$\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{V}\mathbf{F}\boldsymbol{\Sigma}^{\dagger}\mathbf{U}^H\mathbf{p} \tag{A V-5}$$

$$= \sum_{q=1}^{Q} f_q \left(\frac{\mathbf{v}_q \mathbf{u}_q^H}{\sigma_q} \right) \mathbf{p}, \tag{A V-6}$$

où $\mathbf{F}$ est une matrice diagonale contenant les facteurs de filtrage f_q permettant de réduire l'influence des petites valeurs singulières sans changer significativement les grandes valeurs singulières,

$$f_q = \frac{\sigma_q^2}{\sigma_q^2 + \gamma^2}. \tag{A V-7}$$

Le facteur de régularisation γ peut être défini de différentes manières : une valeur fixée heuristiquement ou par recherche algorithmique (validation croisée généralisée, courbe en L).

ANNEXE VI

FACTEUR DE RÉGULARISATION AVEC L'ALGORITHME HYBRIDE

Le facteur de régularisation avec l'algorithme hybride (voir Éq. 1.13) n'est pas utilisé de la même manière qu'avec l'algorithme VPIG (voir Éq. A V-6). L'algorithme hybride réutilise l'image acoustique, puis utilise le facteur de régularisation à la fois pour améliorer l'image acoustique, mais aussi pour sa mise à l'échelle. Tandis que l'algorithme VPIG est décomposé en valeurs singulières pour ensuite appliquer la régularisation. Ainsi, la valeur du facteur de régularisation, γ, n'est pas la même à appliquer. Pour rappel, l'algorithme hybride utilise l'image améliorée avec l'algorithme VPIG. Seul le cas de l'image acoustique obtenue avec l'algorithme VPIG à 315 Hz, avec les valeurs obtenues avec l'algorithme du centroïde (τ = 5,35, γ = 0,22), est donné à titre d'illustration. Le raisonnement est applicable aux autres fréquences.

La figure VI-1 présente les images acoustiques obtenues avec l'algorithme VPIG et l'algorithme hybride pour différentes valeurs de γ. La figure VI-1(a) montre un lobe principal large dépourvu de lobes secondaires permettant d'identifier une source au centre de l'image. Les figures VI-1(b) à (d) montrent les images acoustiques obtenues aux valeurs respectives γ = [0,02, 0,09, 1,28] avec σ_1^2 = 43.54. Ces exemples sont marqués dans les figures suivantes, respectivement, avec $+$, $\times$ et $*$. Les figures VI-1(b) et (d) montrent que l'algorithme hybride permet de réduire la taille du lobe principal par rapport à la figure VI-1(a). La figure VI-1 est l'image de moins de bonne qualité obtenues avec cette configuration.

La figure VI-2 présente les critères de qualité en fonction du rapport du paramètre de régularisation et de la première valeur singulière. En figure VI-2(a), l'ASN est inférieur à 30% dans deux régions distinctes représentées en rouge donnant. L'ASN atteint des valeurs plateau de part et d'autre de la figure. Seule une faible plage de valeurs γ/σ_1^2 donne un ASN supérieur à 30% au centre de la figure. En figure VI-2(b), le MSR est supérieur à 6 dB dans deux régions distinctes représentées en bleu et moins larges qu'avec l'ASN. La première région atteint un maximum avec le MSR et la seconde région montre une valeur de MSR croissante, indiquant l'absence de

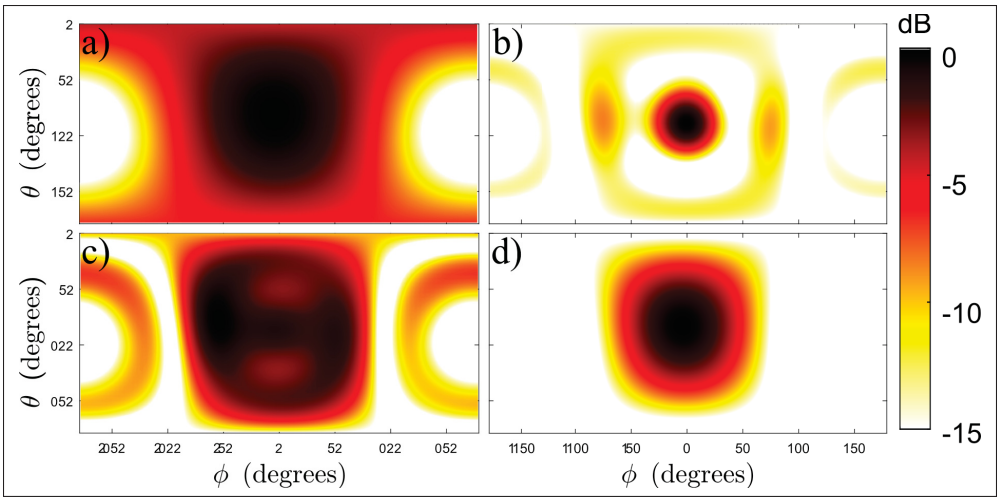


Figure-A VI-1 Images acoustiques à 315 Hz obtenues avec l'algorithme (a) VPIG ($\tau = 5{,}35$, $\gamma = 0{,}22$) et l'algorithme (b) hybride ($\gamma = 0{,}02$), (c) hybride ($\gamma = 0{,}09$) et (d) hybride ($\gamma = 1{,}28$)

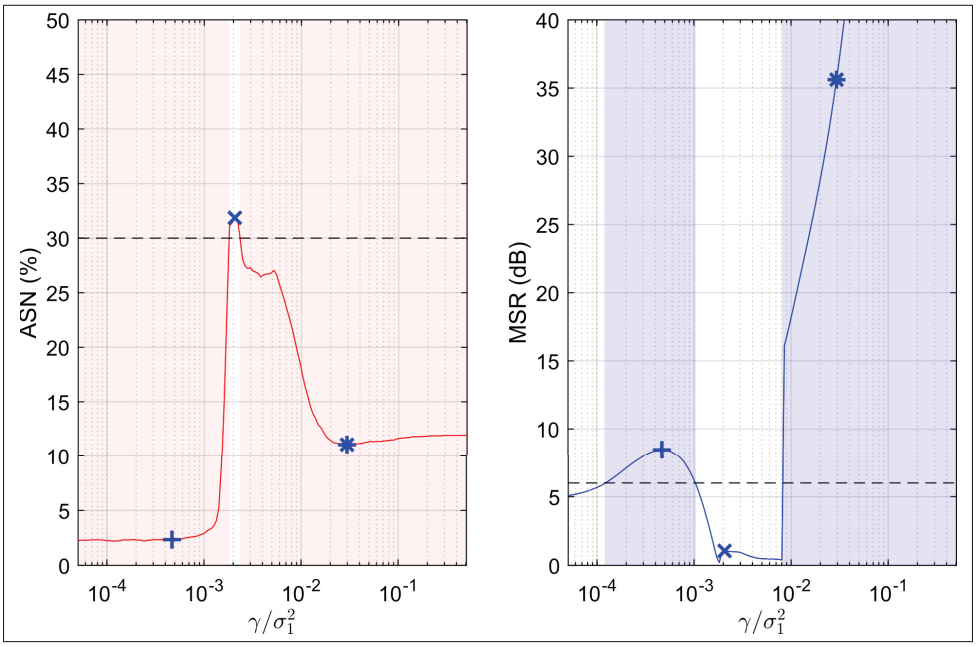


Figure-A VI-2 Critères d'images acoustiques en fonction du paramètre de régularisation γ/σ_1^2 : (a) ASN et (b) MSR

lobes secondaires. Les différentes régions identifiées sont reportées à la figure suivante. Leurs régions communes indiquent une bonne qualité d'image acoustique.

La figure VI-3 présente les normes de l'algorithme hybride des membres de l'Éq. 1.13 qui sont inversés. La norme du produit des matrices de fonctions de Green donne une asymptote

horizontale et la norme de la diagonalisation du facteur de régularisation donne une droite de pente positive. Pour de faibles valeurs de γ, la régularisation est insuffisante et la matrice inversée reste fortement influencée par la norme de $\underline{\mathbf{GG}}^H$. À l'inverse, pour des valeurs élevées, le terme $\gamma^2\mathbf{I}$ domine et impose une forte régularisation. La valeur pertinente de γ doit donc être recherchée dans les régions de validité des critères de qualité. La première région est associée à une régularisation très faible, alors que la seconde correspond à une régularisation faible, mais effective. Il est recommandé, après utilisation de l'algorithme VPIG, de prendre une très faible valeur de facteur de régularisation avec l'algorithme hybride.

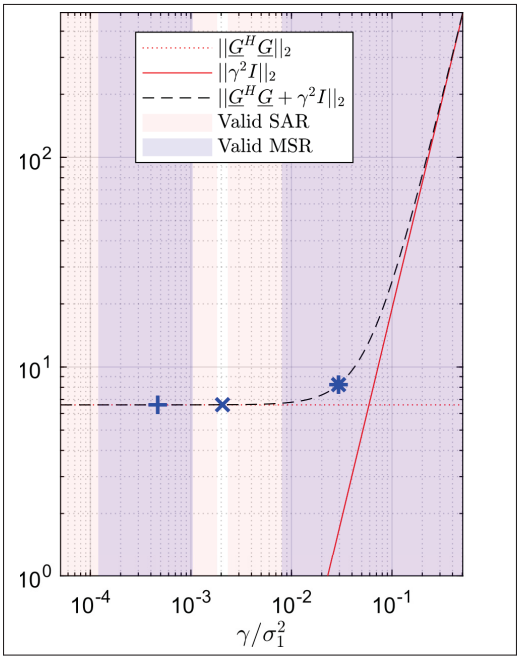


Figure-A VI-3 Normes de l'algorithme hybride et région d'images acoustiques de qualité en fonction du paramètre de régularisation γ/σ_1^2

ANNEXE VII

LISTES DES CONTRIBUTIONS PARUES DURANT CETTE THÈSE

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un projet de recherche subventionné par l'IRSST ayant pour objectif le développement d'un système d'imagerie acoustique permettant de localiser les sources sonores bruyantes en milieu de travail. Ce projet a mobilisé une approche pluridisciplinaire en collaboration avec l'Université de Sherbrooke, combinant une antenne sphérique de microphones, une caméra vidéo panoramique et sphérique, l'électronique embarquée, ainsi qu'un algorithme pour localiser les sources en temps réel.

Dans ce contexte, plusieurs contributions scientifiques ont été produites, dont certaines en tant que premier auteur, d'autres en collaboration. Cette annexe présente la liste complète des contributions issues de ce projet de recherche, en distinguant les publications réalisées en tant que premier auteur (voir Section 1) et celles en tant que coauteur (voir Section 2).

1. En tant que premier auteur

Journal

Rouard, K., St-Jacques, J., Forma, L., Sgard, F., Doutres, O., Quaegebeur, N., Nélisse, H., Grondin, F., & Padois, T. (2026). Numerical evaluation of spherical microphone array designs on acoustic images under ideal conditions using conventional and spherical harmonic beamforming. Journal of Sound and Vibration.

Conférences

Rouard, K., St-Jacques, J., Sgard, F., Doutres, O., Nélisse, H., Boileau, L., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., & Padois, T. (2023). A criterion based on the calculation of a solid angle to assess the quality of acoustic images obtained with a SMA. Acoustic Week in Canada, Montréal.

Rouard, K., St-Jacques, J., Sgard, F., Nelisse, H., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., Doutres, O., & Padois, T. (2022). Numerical comparison of acoustic imaging algorithms for a spherical microphone array. Berlin Beamforming Conference.

Autres contributions à la diffusion scientifique

Participation au concours Ma thèse en 180 secondes (2023), finale locale de l'ÉTS, présentation vulgarisée du projet de recherche.

Rouard, K., St-Jacques, J., Doutres, O., Sgard, F., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., Boileau, L., Nélisse H., et Padois, T. (2023). Développement d'un algorithme performant pour la localisation de sources acoustiques avec une antenne sphérique de microphones. Affiche scientifique présentée à l'école d'été CAJC-IRP à l'Université de Sherbrooke.

2. En tant que coauteur

Journaux

Forma, L., Rouard, K., Doutres, O., Sgard, F., Nélisse, H., Quagebeur, N., Boileau, L., Padois, T. (2025). Virtualization-based acoustic imaging for low-frequency source localization. Journal of Sound and Vibration.
Contribution : Proposition d'une approche de variation du rayon virtuel en fonction de la fréquence et développement d'une première base de code pour des résultats préliminaires.

Doutres, O., Lopez, M., Rouard, K., Campagna, L.-P., Cougoulic, T., Jutras, A., Lauzon, D., & Pépin-Pagé, P.-L. (2023). Assessment of noise in the campus of École de technologie supérieure in Montréal and proposal of an acoustic metamaterial for the reduction of electrical transformer noise Canadian Acoustics. Canadian Acoustics, 51(2).

Padois, T., St-Jacques, J., Rouard, K., Quaegebeur, N., Grondin, F., Berry, A., Nélisse, H., Sgard, F., & Doutres, O. (2023). Acoustic imaging with spherical microphone array and Kriging. JASA Express Lett, 3(4), 042801. https ://doi.org/10.1121/10.0017790

Conférences

Boileau, L., Lemay, J., Rouard, K., St-Jacques, J., Doutres, O., Padois, T., Sgard, F., Nélisse, H., Grondin, F., Berry, A., & Quagebeur, N. (2024). Hardware design and software implementation of a portable GPU-Based 3D acoustic camera for industrial noise management. Berlin Beamforming Conference.

St-Jacques, J., Rouard, K., Sgard, F., Nélisse, H., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., Boileau, L., Doutres, O., & Padois, T. (2023). Influence of the scattering effect on acoustic image obtained with a spherical microphone array. Acoustic Week in Canada, Montréal.

St-Jacques, J., Rouard, K., Sgard, F., Nélisse, H., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., Boileau, L., Doutres, O., & Padois, T. (2022). Effect of the error on the sound speed and microphone position on acoustic image obtainde with a spherical microphone array. Acoustic Week in Canada, Montréal.

Communications

Forma, L., Rouard, K., Doutres, O., Nélisse, H., Sgard, F. et Boileau, L. (2024). Localisation de sources basses fréquences avec des antennes de microphones compactes. Conférence du réseau AIRS.

Doutres, O., Lopez, M., Rouard, K., Campagna, L.-P., Cougoulic, T., Jutras, A., Lauzon, D., Pépin-Pagé, P.-L., Purson, A. (2023). Noise evaluation at the École de Technologie Supérieure campus in Montréal : A student project. Acoustic Week in Canada.

Magazine

Padois, T., St-Jacques, J., Rouard, K., Quaegebeur, N., Grondin, F., Berry, A., Nélisse, H., Sgard, F., & Doutres, O. (2022, janvier). Et si on pouvait voir le bruit ? Substance ÉTS. https ://substance.etsmtl.ca/et-si-on-pouvait-voir-le-bruit

BIBLIOGRAPHIE

(2016). Singular value decomposition (the SVD). YouTube. Repéré le 2025-11-07 à https://www.youtube.com/watch?v=mBcLRGuAFUk.

Araujo, F. H. & Pinto, F. A. (2016). Comparison between the spherical harmonics beamforming and the delay-and-sum beamforming. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 253, 1007–1017.

Arcondoulis, E. & Liu, Y. (2019). An iterative microphone removal method for acoustic beamforming array design. *Journal of Sound and Vibration*, 442, 552–571. doi : 10.1016/j.jsv.2018.11.005.

Battista, G., Chiariotti, P. & Castellini, P. (2018). Spherical harmonics decomposition in inverse acoustic methods involving spherical arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 433, 425–460. doi : 10.1016/j.jsv.2018.05.001.

Benesty, J. & Chen, J. (2013). *Study and design of differential microphone arrays*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. doi : 10.1007/978-3-642-33753-6.

Boileau, L., Lemay, J., Rouard, K., St-Jacques, J., Doutres, O., Padois, T., Sgard, F., Nélisse, H., Grondin, F., Berry, A. & Quagebeur, N. (2024). Hardware design and software implementation of a portable GPU-based 3D acoustic camera for industrial noise management. *10th Berlin Beamforming Conference*.

Brüel & Kjaer. (2016). Spherical beamforming systems based on spherical beamforming type 8606. Repéré à https://www.bksv.com/media/doc/bn0690.pdf.

Burkardt, J. (2010). Quadrature rules for the sphere. Repéré le 2023-07-15 à https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/datasets/sphere_lebedev_rule/sphere_lebedev_rule.html.

Burkardt, J. (2019). Fibonacci spiral grid on a sphere. Repéré à https://people.math.sc.edu/Burkardt/m_src/sphere_fibonacci_grid/sphere_fibonacci_grid.html.

Busque, M.-A., Boucher, A., Lebeau, M. & Bastien, N. (2020). *Evolution des indicateurs annuels de lésions professionnelles indemnisées au Québec de 2012 à 2017* (Rapport n°R-1112). Montréal. Repéré à https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1112.pdf?v=2022-02-23.

Cariou, C., Delverdier, O., Paillasseur, S. & Lamotte, L. (2012). Tool for interior noise sources detection in aircraft with comparison of configurations. *4th Berlin Beamforming Conference*, pp. 8.

Carpentier, T. (2023). Spherical beampatterns with fractional orders. *Forum Acusticum*.

Chalebun, J., Harnpicharnchai, K., Chuppawa, W., Nghiep, L. K., Khotprom, A. & Tudpor, K. (2025). Noise monitoring using noise contour map in automotive part industry in Thailand. *Studies in Health Technology and Informatics*. doi : 10.3233/SHTI250733.

Charron, S. (2022). Changement réglementaires - Bruit. Webinaire : Bruit en milieu de travail : apprivoiser les changements réglementaires - INSPQ [Webinaire]. Montréal. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/bruit-effets-sante-securite.

Chelliah, K., Raman, G. & Muehleisen, R. T. (2017). An experimental comparison of various methods of nearfield acoustic holography. *Journal of Sound and Vibration*, 403, 21–37. doi : 10.1016/j.jsv.2017.05.015.

Chiariotti, P., Martarelli, M. & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise source localization – reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27.

Chiosa, V., Dugré, I., Jaramillo, C.-A., Mallette, L., Nélisse, H. & Boulet, S. N. (2025). *Prise en charge des risques liés à l'exposition au bruit en milieu de travail : Guide sur l'identification du risque et le mesurage*. Repéré à https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/prise-en-charge-risques.pdf.

Chu, Z., Yang, Y. & He, Y. (2015). Deconvolution for three-dimensional acoustic source identification based on spherical harmonics beamforming. *Journal of Sound and Vibration*, 344, 484–502. doi : 10.1016/j.jsv.2015.01.047.

Chu, Z., Zhao, S., Yang, Y. & Yang, Y. (2019). Deconvolution using CLEAN-SC for acoustic source identification with spherical microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 440, 161–173. Repéré à https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.10.030.

CNESST. (2023). *Prise en charge des risques liés à l'exposition au bruit en milieu de travail : Guide sur les moyens pour réduire l'exposition des travailleuses et des travailleurs.*

CSA Z107.56 :F18. (2022). Mesure de l'exposition au bruit. Repéré à https://www.csagroup.org/store/product/2426766/.

Del Galdo, G., Thiergart, O., Weller, T. & Habets, E. A. (2011). Generating virtual microphone signals using geometrical information gathered by distributed arrays. *2011 Joint Workshop on Hands-free Speech Communication and Microphone Arrays*, pp. 185–190. doi : 10.1109/HSCMA.2011.5942394.

Djordjevic, A. & Licanin, M. (2016). Construction, calibration, evaluation of spherical microphone array and its application for beamforming. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, pp. 4598–4609.

Du, C., Leclere, Q. & Li, B. (2017). Design and evaluation of open spherical microphone arrays. *24th International Congress on Sound and Vibration*. Repéré à https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01595873.

Décret n°781. (2021). modifiant la loi sur la santé et la sécurité du travail, le code de sécurité pour les travaux de construction, le représentant à la prévention dans un établissement et abrogeant la qualité du milieu de travail. *Gazette officielle du Québec*, 153(24), 2722–2733. Repéré à https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/S-2.1,%20r.%2013.

Fernandez-Grande, E. (2016). Sound field reconstruction using a spherical microphone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3), 1168–1178. doi : 10.1121/1.4943545.

Fisher, E. & Rafaely, B. (2011). Near-field spherical microphone array processing with radial filtering. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 19(2), 256–265. doi : 10.1109/TASL.2010.2047421.

Fliege, J. & Maier, U. (1999). The distribution of points on the sphere and corresponding cubature formulae. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 19(2), 317–334. doi : 10.1093/imanum/19.2.317.

Forma, L., Rouard, K., Doutres, O., Sgard, F., Nélisse, H., Quagebeur, N., Boileau, L. & Padois, T. (2026). Virtualization-based acoustic imaging for low-frequency source localization. *Journal of Sound and Vibration*, 623, 119515. doi : 10.1016/j.jsv.2025.119515.

Funes, A., Martin, R., Fortier, P., Deshaies, P., St-Cyr, J.-P. & Tremblay, I. (2015). *Surdité professionnelle : cas acceptés par la commission de la santé et de la sécurité du travail au Québec – Mise à jour 1997-2012*. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2018_surdite_professionnelle.pdf.

GFaI Tech. (2022a). Sphere120 AC Pro - 120 channel system for 3D measurements. Repéré à https://www.gfaitech.com/fileadmin/gfaitech/documents/datasheets/acoustic-camera-sphere-120-array-datasheet-20.pdf.

GFaI Tech. (2022b). Sphere48 AC Pro - 48 channel system for acoustic measurements in 2D and 3D. Repéré à https://www.gfaitech.com/fileadmin/gfaitech/documents/datasheets/acoustic-camera-sphere-48-array-datasheet-20.pdf.

Grana, D., Mukerji, T. & Doyen, P. (2021). *Seismic reservoir modeling : theory, examples, and algorithms* (éd. first). John Wiley & Sons.

Haddad, K. & Hald, J. (2008). 3D Localization of acoustic sources with a spherical array. *EuroNoise - SFA*, 123, 1585–1590. doi : 10.1121/1.2933754.

Hald, J. (2013). Spherical beamforming with enhanced dynamic range. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 6(2), 1334–1341. doi : 10.4271/2013-01-1977.

Hardin, R. H. & Sloane, N. J. A. (1995). Codes (spherical) and designs (experimental). *Proceedings of Symposia in Applied Mathematics*, 50, 177–206.

Hardin, R. H. & Sloane, N. J. A. (1996). McLaren's improved snub cube and other new spherical designs in three dimensions. *Discrete & Computational Geometry*, 15(4), 429–441. doi : 10.1007/BF02711518.

Heilmann, G., Meyer, A. & Döbler, D. (2008a). Beamforming in the time-domain using 3D-microphone Arrays. *XIXth Biennial Conference of the New Zealand Acoustical Society*.

Heilmann, G., Meyer, A. & Döbler, D. (2008b). Time-domain beamforming using 3D-microphone arrays. *Bebec*.

Huang, G., Chen, J. & Benesty, J. (2018). A flexible high directivity beamformer with spherical microphone arrays. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(5), 3024–3035. doi : 10.1121/1.5038275.

INSPQ. (2023). Surdité professionelles : Briser le silence.

IRSST. Développement d'un système d'imagerie acoustique temps-réel pour localiser les sources de bruit en milieux de travail. Repéré le 2026-06-17 à https://www.irsst.qc.ca/recherche-sst/projets/projet/i/5600/n/developpement-d-un-systeme-d-imagerie-acoustique-temps-reel-pour-localiser-les-sources-de-bruit-en-milieux-de-travail-2018-0026.

ISO-9612. (2009). Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail - méthode d'expertise. (2). Repéré à https://www.iso.org/fr/standard/41718.html.

Jarrett, D. P., Habets, E. A. P. & Naylor, P. A. (2017). Chap. 2 - Theoritical preliminaries of acoustics. Dans *Theory and applications of spherical microphone array processing* (vol. 9). Cham : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-42211-4.

J.H. Conway & N.J.A. Sloane. (1999). *Sphere packings, lattices and groups* (éd. Third). Springer-Verlag New York.

Jin, C. T., Epain, N. & Parthy, A. (2014). Design, optimization and evaluation of a dual-radius spherical microphone array. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 22(1), 193–204. doi : 10.1109/TASLP.2013.2286920.

Jin, J., Huang, G., Wang, X., Chen, J., Benesty, J. & Cohen, I. (2021). Steering study of linear differential microphone arrays. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 29, 158–170. doi : 10.1109/TASLP.2020.3038566.

Lanslots, J., Deblauwe, F. & Janssens, K. (2010). Selecting sound source localization techniques for industrial applications. 5.

Lebeau, M., Duguay, P. & Boucher, A. (2014). Costs of occupational injuries and diseases in Québec. *Journal of Safety Research*, 50, 89–98. doi : 10.1016/j.jsr.2014.04.002.

Lebedev, I. V. & Laikov, N. D. (1999). A quadrature formula for the sphere of the 131st algebraic order of accuracy. *Doklady Mathematics*, 59(3), 477–481.

Leclère, Q., Pereira, A., Bailly, C., Antoni, J. & Picard, C. (2017). A unified formalism for acoustic imaging based on microphone array measurements. *International Journal of Aeroacoustics*, 16(4-5), 431–456. doi : 10.1177/1475472X17718883.

Lecomte, P., Gauthier, P.-A., Langrenne, C., Berry, A. & Garcia, A. (2016). A fifty-node Lebedev grid and its applications to ambisonics. *Journal of the Audio Engineering Society*, 64(11), 868–881. doi : 10.17743/jaes.2016.0036.

Martin, R. & Tissot, F. (2025). *Exposition des travailleuses et travailleurs québécois au bruit intense en milieu de travail : résultats de l'Enquête québécoise sur la santé de la population, 2020-2021*. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/publications/3699.

Merimaa, J. (2002). Applications of a 3-D microphone array. *Audio Engineering Society Convention 112th*, (5501).

Merino-Martínez, R., Sijtsma, P., Snellen, M., Ahlefeldt, T., Antoni, J., Bahr, C. J., Blacodon, D., Ernst, D., Finez, A., Funke, S., Geyer, T. F., Haxter, S., Herold, G., Huang, X., Humphreys, W. M., Leclère, Q., Malgoezar, A., Michel, U., Padois, T., Pereira, A., Picard, C., Sarradj, E., Siller, H., Simons, D. G. & Spehr, C. (2019). A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays : part of the "aircraft noise generation and assessment" special issue. *CEAS Aeronautical Journal*, 10(1), 197–230. doi : 10.1007/s13272-019-00383-4.

Moler, C. (2017). What is the condition number of a matrix ? [mathworks]. Repéré le 2025-11-07 à https://blogs.mathworks.com/cleve/2017/07/17/what-is-the-condition-number-of-a-matrix/.

Moreno, G. (2008). *Spherical nearfield acoustical holography*. (Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, Kengens Lynqby).

Nelson, P. & Yoon, S. (2000). Estimation of acoustic source strength by inverse methods : Part I, conditionning of the inverse problem. *Journal of Sound and Vibration*, 233(4), 639–664. doi : 10.1006/jsvi.1999.2837.

Noël, C., Planeau, V. & Habault, D. (2006). A new temporal method for the identification of source directions in a reverberant hall. *Journal of Sound and Vibration*, 296(3), 518–538. doi : 10.1016/j.jsv.2005.12.056.

Nélisse, H. & Boulet, S. N. (2023). *Prise en charge des risques liés à l'exposition au bruit en milieu de travail : Guide sur la sélection et l'utilisation des protecteurs auditifs.*

Padois, T., Sgard, F., Doutres, O. & Berry, A. (2017). Acoustic source localization using a polyhedral microphone array and an improved generalized cross-correlation technique. *Journal of Sound and Vibration*, 386, 82–99. doi : 10.1016/j.jsv.2016.09.006.

Padois, T., Doutres, O., Sgard, F. & Berry, A. (2019a). Optimization of a spherical microphone array geometry for localizing acoustic sources using the generalized cross-correlation technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132, 546–559. doi : 10.1016/j.ymssp.2019.07.010.

Padois, T., Fischer, J., Doolan, C. & Doutres, O. (2021). Acoustic imaging with conventional frequency domain beamforming and generalized cross-correlation : a comparison study. *Applied Acoustics*, 177, 107914. doi : 10.1016/j.apacoust.2021.107914.

Padois, T., St-Jacques, J., Rouard, K., Quaegebeur, N., Grondin, F., Berry, A., Nélisse, H., Sgard, F. & Doutres, O. (2023). Acoustic imaging with spherical microphone array and kriging. *JASA Express Lett*, 3(4), 042801. doi : 10.1121/10.0017790.

Padois, T., Gauthier, P.-A. & Berry, A. (2014). Inverse problem with beamforming regularization matrix applied to sound source localization in closed wind-tunnel using microphone array. *Journal of Sound and Vibration*, 333(25), 6858–6868. doi : 10.1016/j.jsv.2014.07.028.

Padois, T., Doutres, O., Sgard, F. & Berry, A. (2019b). *Développement d'une antenne microphonique intégrant un système optique pour identifier la position des sources sonores les plus bruyantes en milieu industriel* (Rapport n°R-1038). Montréal, QC, Canada. Repéré à https://www.deslibris.ca/ID/10100000.

Parthy, A., Jin, C. & van Schaik, A. (2008). Measured and theoretical performance comparison of a co-centred rigid and open spherical microphone array. *2008 International Conference on Audio, Language and Image Processing*, pp. 1289–1294. doi : 10.1109/ICALIP.2008.4590251.

Pereira, A. (2013). *Acoustic imaging in enclosed spaces*. (Thèse de doctorat, INSA de Lyon).

Petersen, S. O. (2004). *Localization of sound sources using 3D microphone array*. Repéré à http://www.oscarpetersen.dk/speciale/Thesis.pdf.

Puhle, C. (2020). Spherical acoustical holography using planar microphone arrays. *Berlin Beamforming Conference*, pp. 15.

Rafaely, B. (2005a). Analysis and design of spherical microphone arrays. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 13(1), 135–143. doi : 10.1109/TSA.2004.839244.

Rafaely, B. (2005b). Phase-mode versus delay-and-sum spherical microphone array processing. *IEEE Signal Processing Letters*, 12(10), 713–716. doi : 10.1109/LSP.2005.855542.

Rafaely, B. (2019). *Fundamentals of spherical array processing* (éd. 2nd ed. 2019). Cham : Springer International Publishing : Imprint : Springer. doi : 10.1007/978-3-319-99561-8.

Rafaely, B. (2024). Fundamentals of spherical array processing. MATLAB Central File Exhange. Repéré le 2024-02-13 à https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68655-fundamentals-of-spherical-array-processing.

Rafaely, B. (2004). Plane-wave decomposition of the sound field on a sphere by spherical convolution. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(4), 2149–2157. doi : 10.1121/1.1792643.

Robin, O., Krpic, T., Nélisse, H. & Berry, A. (2020). Acoustic characterization of tonal and broadband backup alarms in laboratory and field conditions. *Applied Acoustics*, 163, 107228. doi : 10.1016/j.apacoust.2020.107228.

Rouard, K., St-Jacques, J., Sgard, F., Nelisse, H., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., Doutres, O. & Padois, T. (2022). Numerical comparison of acoustic imaging algorithms for a spherical microphone array. *Berlin Beamforming Conference*.

Rouard, K., St-Jacques, J., Sgard, F., Doutres, O., Nélisse, H., Boileau, L., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F. & Padois, T. (2023). A criterion based on the calculation of a solid angle to assess the quality of acoustic images obtained with a SMA. *Journal of the Canadian Acoustical Association*.

Sarradj, E. (2012). Three-dimensional acoustic source mapping with different beamforming steering vector formulations. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 1–12. doi : 10.1155/2012/292695.

Shi, S., Yang, B., Guo, Q., Li, Y. & Gui, C. (2023). Low-frequency sound source localization and identification with spherical microphone arrays extrapolation method. *Frontiers in Physics*, 11, 1172536. doi : 10.3389/fphy.2023.1172536.

Siemens. (2018). Simcenter Solid Sphere Array.

Sloane, N. J. A. Home page. Repéré à http://neilsloane.com.

Smagowska, B. (2010). Noise at workplaces in the call center. *Archives of Acoustics*, 35(2), 253–264. doi : 10.2478/v10168-010-0024-2.

Soft dB Inc. (2022). Mezzo sound intensity probe with mezzo intensity analyzer module - User guide. Repéré à https://softdb.com/_files/_acoustic-division/Mezzo/Mezzo_IntensityAnalyzer_User_Guide.pdf.

Song, W., Ellermeier, W. & Hald, J. (2008). Using beamforming and binaural synthesis for the psychoacoustical evaluation of target sources in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(2), 910–924. doi : 10.1121/1.2822669.

St-Jacques, J. (2023). *Conception d'antennes de microphones sphériques pour la localisation de sources acoustiques et étude de l'influence de l'effet de diffraction sur les images acousitques*. (Mémoire de maitrise, Université du Québec, Montréal).

Statistique Canada. (2021). Hearing health of canadian adults [Poster]. Repéré à https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-627-m/11-627-m2021077-eng.htm.

Swinbank, R. & Purser, R. J. (2006). Fibonacci grids : A novel approach to global modelling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(619), 1769–1793. doi : 10.1256/qj.05.227.

Tiana-Roig, E., Torras-Rosell, A., Fernandez-Grande, E., Jeong, C.-H. & Agerkvist, F. T. (2014). Enhancing the Beamforming map of Spherical Arrays at Low Frequencies using Acoustic Holography.

Womersley, R. (2020). Interpolation and cubature on the sphere. Repéré à https://web.maths.unsw.edu.au/~rsw/Sphere.

Womersley, R. S. [arXiv :1709.01624 [math]]. (2017). Efficient spherical designs with good geometric properties. arXiv.

Womersley, R. S. & Sloan, I. H. (2001). How good can polynomial interpolation on the sphere be ? *Advances in Computational Mathematics*, 14, 195–226.

World health organization. (2021). *World report on hearing*. Geneva.

Wright, G. (2018). A collection of matlab functions for experimenting with different point sets on the sphere [Repository]. Repéré le 2023-11-23 à https://github.com/gradywright/spherepts.

Yang, B., Shi, S. & Yang, D. (2019). Acoustic source localization using the open spherical microphone array in the low-frequency range. *MATEC Web of Conferences*, 283, 04001. doi : 10.1051/matecconf/201928304001.

Yang, B., Gao, Y., Guo, Q. & Shi, S. (2023). A low frequency noise source localization and identification method based on a virtual open spherical vector microphone array. *Applied Sciences*, 13(7), 4368. doi : 10.3390/app13074368.