

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 acoustiques

par

Julien ST-JACQUES

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 27 OCTOBRE, 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Julien St-Jacques, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Olivier Doutres, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Franck Sgard, codirecteur
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

M. Stéphane Hallé, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jérémie Voix, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Thomas Padois, membre du jury
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

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

LE 16 OCTOBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche Olivier Doutres, pour ses conseils et son soutien. Merci de m'avoir donné l'opportunité de participer à ce projet passionnant, ainsi que pour l'expérience enrichissante en tant qu'auxiliaire d'enseignement.

Je souhaite également adresser mes remerciements à mon codirecteur de recherche, Franck Sgard, dont le soutien et l'expertise ont été d'une importance capitale. Sa passion pour la recherche et m'a inspiré à me dépasser.

Ce travail de maîtrise n'aurait tout simplement pas vu le jour sans l'implication déterminante de Thomas Padois. J'adresse donc mes plus sincères remerciements à Thomas pour sa confiance, sa contribution inestimable, et le temps précieux qu'il m'a accordé.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité du Travail ainsi que Mitacs pour le financement de ce projet de recherche.

Un merci particulier à mon collègue Kevin Rouard, pour son soutien indéfectible au cours de ces deux dernières années. J'aimerais également adresser ma reconnaissance à tous les membres du projet : Hugues Néliste, Alain Berry, Nicolas Quaegebeur, François Grondin et Loïc Boileau pour leur aide et leur contribution au projet.

En outre, je souhaite remercier chaleureusement mes collègues : Lucie, Magdeleine, Hugo, Maël, Maxime P., Alexandre, Solenn, Maxime V., Fabien, Kevin C., Gauthier, Bastien et bien d'autres. Nos discussions stimulantes et nos échanges d'idées ont fait des deux dernières années une expérience enrichissante et inoubliable.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents et ma sœur pour leurs encouragements infailibles et leur soutien constant tout au long de mon parcours académique.

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 acoustiques

Julien ST-JACQUES

RÉSUMÉ

Une exposition prolongée au bruit en milieu de travail peut causer des troubles physiologiques et psychosociaux. Afin de protéger les travailleurs, la source de bruit peut être éliminée, substituée ou modifiée. Pour appliquer des moyens de contrôle à même la source, celle-ci doit être localisée spatialement. En milieux de travail, cette tâche peut être réalisée avec un système d'imagerie acoustique (SIA). Un SIA est composé d'une antenne sphérique de microphones, une caméra et un algorithme de formation de faisceaux (AFF). En fonction du type d'AFF, l'antenne peut être ouverte ou rigide. Une antenne rigide peut causer des effets de diffraction tandis que pour une antenne ouverte ceux-ci sont négligés. Le développement d'un SIA est une tâche complexe puisque ses performances dépendent de l'AFF, du type d'antenne, du nombre de microphones et de la géométrie selon laquelle ils sont répartis. Pendant le développement d'un AFF, une antenne de microphones permettant d'installer plusieurs microphones selon différentes géométries est nécessaire. L'effet de diffraction d'une antenne rigide ou ouverte peut exercer une influence sur les images acoustiques et doit être étudié. Ce travail de maîtrise s'inscrit dans un projet conjoint avec l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, l'École de technologie supérieure et l'Université de Sherbrooke pour le développement d'un SIA pour la localisation de sources acoustiques en temps réel en milieux de travail. Le premier objectif de mon projet de maîtrise est de concevoir deux antennes sphériques de microphones modulaires permettant d'installer un grand nombre de microphones. Le deuxième objectif est d'étudier l'influence de l'effet de diffraction d'une antenne rigide sur les images acoustiques obtenues et de valider la condition de transparence de deux antennes ouvertes. Deux antennes sphériques ouvertes modulaires ont été conçues et fabriquées. Ces antennes permettent d'installer un grand nombre de microphones avec un choix de plus de 500 positions. Ensuite, un modèle numérique par éléments finis permettant de simuler l'interaction d'une onde acoustique avec la structure d'une antenne de microphones a été développé. Ce modèle permet d'obtenir des signaux de microphones numériques pour ensuite générer les images acoustiques et étudier l'influence des effets de diffractions. Les résultats montrent que l'influence de la diffraction d'une antenne rigide avec algorithme de type conventionnel a pour effet de réduire la taille du lobe principal et d'augmenter le niveau des lobes secondaires. Aussi, les effets de diffraction causés par la structure de deux antennes ouvertes ont été comparés à une antenne théoriquement vide et ont été déterminés comme négligeable.

Mots-clés: Antenne de microphones sphérique, formation de faisceaux, diffraction, antenne ouverte, antenne rigide

Spherical microphone array design for acoustic source localization and study of the influence of the scattering effect on acoustic images

Julien ST-JACQUES

ABSTRACT

Prolonged exposure to noise in the workplace can lead to physiological and psychosocial disorders. In order to protect workers, the noise source can be eliminated, substituted or modified. To implement control measures at the source, it must be localized. In a workplace environment, an acoustic imaging system (AIS) can be used. An AIS is composed of a spherical microphone array (SMA), a camera and a beamforming algorithm. Depending on the type of beamforming algorithm, the SMA can be either rigid or open. A rigid array may cause the scattering of the acoustic wave, while for an open array, those effects are generally neglected. The development of an AIS is a complex task since its performance depends on the algorithm, the type of SMA, the number of microphones and the array geometry. During the development stage of an AIS, an SMA that allows for the installation of multiple microphones in various geometries is required. Also, the influence of the scattering effect caused by a rigid or open SMA can affect the acoustic images and must be assessed. This research work is part of a joint project with the IRSST, ÉTS and UdeS aimed at developing an AIS for real-time localization of acoustic sources in workplace environments. The first objective is the design of two modular SMA that allows for the installation of many microphones. The second objective is to study the influence of the scattering effect from a rigid SMA on acoustic images and to verify that the scattering effects of an open SMA are negligible. Two modular open SMA have been designed and manufactured. These SMA allow for the installation of a large number of microphones with more than 500 possible positions on the spherical support. Subsequently, a finite element model simulating the interaction of an acoustic wave with the structure of an SMA was developed. This model provides numerical microphone signals, which are then used to generate acoustic images with a beamforming algorithm. The images compared to assess the influence of the scattering effects. The results show that the scattering effects of a rigid SMA with the conventional beamforming in the frequency domain (CBF) algorithm are a smaller mainlobe and higher side lobes levels. The scattering effects caused by an open SMA were compared to a theoretically empty SMA and were deemed negligible.

Keywords: Spherical microphone array, beamforming, scattering, open array, rigid array

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
1.1 Concepts et définitions.....	7
1.2 Antennes ouvertes.....	10
1.3 Antennes rigides.....	18
1.4 Géométries de points sur une sphère	23
1.5 L'effet de diffraction acoustique.....	28
1.6 Synthèse critique.....	32
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET STRUCTURE DU DOCUMENT	35
2.1 Objectifs.....	35
2.2 Structure du document	35
2.2.1 Chapitre 3: Conception d'antennes sphériques de microphones	35
2.2.2 Chapitre 4: Influence de l'effet de diffraction sur une image acoustique obtenue avec une antenne de microphones sphérique par AFF.....	36
2.2.3 Annexes	36
CHAPITRE 3 CONCEPTION D'ANTENNES SPHÉRIQUES DE MICROPHONES...39	
3.1 Antennes ouvertes modulaires	39
3.1.1 Besoins et contraintes de conception	39
3.1.2 Antenne ouverte modulaire à structure filaire	40
3.1.3 Antenne ouverte modulaire avec tiges.....	41
3.2 Antennes de microphones dédiées à l'étude de l'influence de diffraction	43
3.2.1 Besoins et contraintes de conception.....	43
3.2.2 Antennes ouvertes à structure filaire.....	43
3.2.3 Antenne rigide.....	44
CHAPITRE 4 INFLUENCE OF THE SCATTERING EFFECT ON ACOUSTIC IMAGE OBTAINED WITH A SPHERICAL MICROPHONE ARRAY AND BEAMFORMING ALGORITHMS.....	45
4.1 Abstract.....	45
4.2 Introduction.....	46
4.3 Theoretical background	47
4.3.1 Conventional beamforming	47
4.3.2 Acoustic pressure on a rigid sphere surface.....	49
4.4 Methodology.....	49
4.4.1 Microphone array design	50
4.4.2 Numerical simulation.....	51
4.4.3 Experimental set-up	52

4.4.4	Acoustic image quality criteria	53
4.5	Results.....	54
4.5.1	Evaluation of the FE model	54
4.5.1.1	Verification of the FE model	54
4.5.1.2	Validation of the FE model.....	55
4.5.2	Influence of the scattering by a SMA on acoustic images.....	57
4.5.2.1	Rigid SMA.....	57
4.5.2.2	Open SMA designs	59
4.6	Conclusion	60
CONCLUSION.....		61
ANNEXE I	MODÈLE D'ÉLÉMENTS FINIS.....	63
ANNEXE II	MONTAGE POUR MESURES EN CHAMBRE SEMI-ANÉCHOÏQUE	65
ANNEXE III	RÉSULTATS 50 MICROPHONES	69
APPENDICE I	EFFECT OF THE ERROR ON THE SOUND SPEED AND MICROPHONE POSITION ON ACOUSTIC IMAGE OBTAINED WITH SPHERICAL MICROPHONE ARRAY	75
APPENDICE II	INFLUENCE OF THE SCATTERING EFFECT ON ACOUSTIC IMAGE OBTAINED WITH A SPHERICAL MICROPHONE ARRAY..	81
APPENDICE III	COMPARISON BETWEEN ACOUSTIC IMAGES OBTAINED WITH A RIGID SMA AND THE SHB AND AN OPEN SMA WITH THE CBF	85
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		89

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Synthèse des différentes conceptions d'antennes ouvertes issues de la littérature18
Tableau 1.2	Synthèse des différentes conceptions d'antennes rigides issues de la littérature23

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 0.1	Propagation du bruit Tirée de CNESST (2023, p. 11).....	2
Figure 0.2	Hiérarchie des moyens de contrôle du bruit	2
Figure 0.3	Sonomètre intégrateur de classe 2 Tirée de Soft dB (2023a, p. 1).....	3
Figure 0.4	Cartographie acoustique réalisée avec un sonomètre Tirée de Ahmed (2022.p. 7).....	3
Figure 0.5	Sonde d'intensité acoustique de classe 1 à deux microphones Tirée de Soft dB (2023, p. 1)	4
Figure 0.6	Image acoustique d'une machine obtenue par balayage avec une sonde intensimétrique Tirée de Soft dB (2023, p. 3)	4
Figure 0.7	Système d'imagerie acoustique avec antenne sphérique de microphones rigide Tirée de B&K (2016, p. 1).....	5
Figure 0.8	Image acoustique d'un local de travail avec la source et des réflexions sur les parois localisées avec les taches de couleur Tirée de Padois (2022, p. 1).....	5
Figure 1.1	Image acoustique d'une source à obtenue avec une antenne de microphones sphérique et un algorithme de formation de faisceaux.....	8
Figure 1.2	Antenne ouverte filaire Tirée de GFai tech (2023, p. 1).....	9
Figure 1.3	Antenne ouverte avec tiges Tirée de Padois (2017, p. 92).....	9
Figure 1.4	Antenne rigide Tirée de B&K (2016, p. 2).....	9
Figure 1.5	Image acoustique obtenue avec une antenne ouverte de 19.5 cm et 36 microphones avec le CBF. L'ellipse noire entoure le lobe principal à	

	-3 dB du maximum. La croix verte représente la position du maximum. Le gradient de couleur est la plage dynamique.....	10
Figure 1.6	Image acoustique avec lobe principal très large (CBF, antenne ouverte, 19.5 cm, 36 microphones, 800 Hz	10
Figure 1.7	Image acoustique avec lobes secondaires de niveau important pouvant être confondu avec une fausse source (SHB, antenne rigide, 19.5 cm, 36 microphones, 4000 Hz).....	10
Figure 1.8	Antenne sphérique ouverte de 12 microphones à base d’anneaux et de câbles Tirée de Peltonen (2001, p. 3).....	11
Figure 1.9	Antenne sphérique de 32 microphones ouverte avec tiges Tirée de Gover (2003, p. 8).....	11
Figure 1.10	Antenne sphérique ouverte avec tiges et noyau sphérique de 15 microphones et de 50 cm de diamètre Tirée de Noël (2006, p. 526).....	12
Figure 1.11	Antenne sphérique ouverte de 64 microphones faite à base de plusieurs anneaux concentriques Tirée de Sasaki (2012, p. 716)	12
Figure 1.12	Antenne sphérique ouverte de 72 microphones à structure filaire faite à base de câbles en fibre de fibre de carbone et de résine d’époxy Tirée de Legg (2012, p. 38)	13
Figure 1.13	Antenne sphérique ouverte à structure filaire de 64 microphones Tirée de Nakadai (2014, p. 1914)	14
Figure 1.14	Antenne sphérique ouverte à structure filaire de 32 microphones et de 7.5 cm de rayon Tirée de Djordjevic (2016, p. 5906).....	15
Figure 1.15	Antenne sphérique de 15 microphones avec tiges de 20 cm et un noyau sphérique de 7.62 cm de diamètre pour obtenir un diamètre d’antenne de 50 cm Tirée de Padois (2017, p. 92).....	15
Figure 1.16	Antenne sphérique de 36 microphones à structure filaire de 20 cm de diamètre Tirée de Wang & Chen (2018, p. 159).....	16

Figure 1.17	Antenne sphérique ouverte avec tiges modulaires avec 252 positions possibles et de 40 cm de diamètre Tirée de Padois (2019, p. 556).....	16
Figure 1.18	Antenne sphérique ouverte avec permettant d'installer jusqu'à 19 microphones et de faire varier le rayon de 4.5 cm à 9 cm Tirée de González (2018, p. 3).....	16
Figure 1.19	Antennes sphériques ouvertes à structure filaire commerciale de 48 microphones Tirée de GFai tech (2023, p. 1).....	17
Figure 1.20	Antennes sphériques ouvertes à structure filaire commerciale de 120 microphones Tirée de GFai tech (2023a, p. 1).....	17
Figure 1.21	Antenne sphérique rigide de 64 microphones et de 28 cm de diamètre Tirée de Petersen (2004, p. 71).....	19
Figure 1.22	Antenne sphérique rigide de 60 microphones de 20.2 cm Duraismwami (2005, p. 11).....	19
Figure 1.23	Antenne sphérique rigide de 20 microphones Tirée de Araujo (2016, p. 5).....	20
Figure 1.24	Antenne rigide de 64 microphones et de 20 cm de diamètre Tirée de Gamper (2016, p. 1).....	20
Figure 1.25	Antenne sphérique rigide de 32 microphones et de 5 cm de rayon Tirée de Bai (2016, p. 1067).....	20
Figure 1.26	Trois antennes sphériques rigides de 36 microphones. Une antenne avec des alésages guide d'onde de forme conique, une antenne rigide simple et une antenne avec alésages guide d'onde de forme sphérique Tirée de Tontiwattanakul (2016, p. 177).....	21
Figure 1.27	Antenne simcenter Testlab 3D Acoustic Camera Avanced Tirée de Siemens (2018, p. 1).....	22
Figure 1.28	5/64 Audio Visual Camera Tirée de VisiSonics (2023, p. 1).....	22
Figure 1.29	Eigenmike Tirée de MH acoustics (2023, p. 1).....	22
Figure 1.30	Représentation 3D et 2D de la géométrie Angles égaux 64 microphones.	25

Figure 1.31	Représentation 3D et 2D de la géométrie Gauss 50 microphones.....	26
Figure 1.32	Représentation 3D et 2D de la géométrie t-design 50 microphones.....	26
Figure 1.33	Représentation 3D et 2D de la géométrie Lebedev 50 microphones.....	26
Figure 1.34	Représentation 3D et 2D de la géométrie Fliege 49 microphones.....	27
Figure 1.35	Représentation 3D et 2D de la géométrie Spirale 50 microphones	27
Figure 1.36	Représentation 3D et 2D de la géométrie B&K 36 microphones.....	28
Figure 1.37	Représentation 3D et 2D de la géométrie B&K 50 microphones.....	28
Figure 1.38	Simulation numérique de la pression acoustique abs(P) (Pa) mesuré dans le plan XY entourant une sphère rigide de 238 mm de diamètre provenant d'une source ponctuelle située à une distance source-récepteur de 1 m pour a) $f = 50$ Hz et b) $f = 4000$ Hz.....	29
Figure 3.1	Antenne sphérique ouverte modulaire à structure filaire de 40 cm de diamètre et grille des 540 positions possibles.....	40
Figure 3.2	Impression des deux hémisphères en 4 morceaux par impression 3D en ABS et antenne ouverte modulaire à structure filaire assemblée	41
Figure 3.3	Antenne sphérique ouverte modulaire à tiges de 40 cm de diamètre et grille des 450 positions possible	42
Figure 3.4	Usinage du noyau sphérique en aluminium et antenne ouverte modulaire avec tiges assemblées	42
Figure 3.5	Tige support de microphone	42
Figure 3.6	Rendu numérique de l'antenne ouverte à structure filaire de 36 microphones lors de la phase de conception et à la fin de l'impression 3D avec les supports d'impression	44
Figure 3.7	Rendu numérique de l'antenne rigide de 36 microphones lors de la phase de conception et après l'impression 3D en trois pièces	44
Figure 4.1	Rendered images of the 36-microphone SMA design for the a) empty SMA, b) rigid SMA, c) open wire frame SMA and open with rods SMA	50
Figure 4.2	Azimuthal and elevation coordinates for the a) 36-microphone geometry and b) 50-microphone geometry.....	51

Figure 4.3	FE model of the spherical propagation domain of 1 m in diameter with the a) rigid 36-microphone SMA and the b) open wire frame 36-microphone SMA.....	52
Figure 4.4	Picture of the a) rigid 36-microphone SMA and the b) open wire frame 36-microphone SMA during the experimental measurements.....	53
Figure 4.5	Absolute value of the acoustic pressure (abs(Pa)) on the surface of a rigid sphere around the azimuth for a single point source located at 1 m in front of the sphere ($\phi_s=0^\circ$, $\theta_s=90^\circ$) for a frequency of 2000 Hz. Obtained FE model (solid black line), analytical results (red dashed lines). The greyed area delimits the rear of the sphere and the grey dashed line the undisturbed field acoustic pressure value of 10 Pa.....	55
Figure 4.6	Comparison between the FE and experimental results for the EAR, MSR and MLD for the rigid SMA with the 36-microphone geometry for a point source located at 1m in front of the SMA.....	56
Figure 4.7	Comparison between the FE and experimental results for the EAR, MSR and MLD for the open wire frame SMA with the 36-microphone geometry for a point source located at 1m in front of the SMA.....	57
Figure 4.8	Comparison between the 36-microphone empty SMA and the rigid SMA results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA.....	58
Figure 4.9	Comparison between the 36-microphone empty, open wire frame and open with roids SMA results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA	59

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ÉTS	École de technologie supérieure
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail
UdeS	Université de Sherbrooke
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
SIA	Système d'imagerie acoustique
ASM	Antenne Sphérique de Microphones
SMA	<i>Spherical Microphone Array</i>
AFF	Algorithme de formation de faisceaux
CBF	<i>Conventional Beamforming in the Frequency domain</i>
SHB	<i>Spherical Harmonics Beamforming</i>
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
EAR	<i>Ellipse Area Ratio</i>
MSR	<i>Mainlobe-to-Sidelobe Ratio</i>
MLD	<i>Mainlobe Level Difference</i>
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
FE	<i>Finite Element</i>
PML	<i>Perfectly Matched Layer</i>

LISTE DES SYMBOLES

dB	Décibel
Pa	Pascal
Hz	Hertz
c_0	Célérité du son
P_0	Pression acoustique de référence
ρ_0	Densité
k	Nombre d'onde
φ	Azimut, coordonnée sphérique
θ	Élévation, coordonnée sphérique
ω	Pulsation acoustique
a	Rayon d'antenne sphérique
Q	Nombre total de microphones
L	Nombre total de points de la grille de balayage
A	Matrice de l'image acoustique
W	Matrice des facteurs de poids de directivité
C	Matrice inter-spectrale
$(.)^*$	Opérateur du conjugué complexe
$(.)^H$	Opérateur hermitien
g	Fonction de Green
$(.)'$	Dérivée première
$(.)!$	Opérateur de la série factorielle
α	Facteur de poids associé à la position d'un microphone

Y_n^m	Fonction des harmoniques sphériques
P_n^m	Polynôme de Legendre
n	Ordre des harmoniques sphériques
m	Mode des harmoniques sphériques
d_n	Facteur poids de directivité pour les harmoniques sphériques
b_n	Contribution de l'amplitude d'une onde sphérique sur une sphère rigide
$h_n^{(2)}$	Fonction d'Hankel de 2 ^e espèce
j_n	Fonction de Bessel de 1 ^{ère} espèce

INTRODUCTION

0.1 Contexte

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) définit le bruit comme tout ensemble de sons jugés indésirables puisqu'ils sont susceptibles d'affecter le bien-être, la santé mentale et physique. (Jarosińska & al., 2018). Une exposition prolongée au bruit peut causer des problèmes psychosociaux tels que la perte de sommeil, le stress, l'anxiété, ainsi que des problèmes physiologiques tels que des acouphènes et des pertes auditives (Pretzsch & al., 2021). Les pertes auditives sont parmi les conséquences les plus graves puisqu'elles affectent typiquement la gamme de fréquences associée à la voix humaine et ainsi détériorent les habiletés de communication (Nelson & al., 2005). En milieu de travail, le bruit peut nuire à la conversation entre travailleurs et être la cause de situations dangereuses.

Au Québec, le bruit au travail est la maladie professionnelle la plus recensée par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) (Duguay & al., 2014). Pour les années de 2015 à 2019, les troubles de l'oreille représentaient en moyenne 67% des cas des maladies professionnelles acceptés (CNESST, 2016-2020). Pour les années de 2020 et 2021, cette proportion a augmenté pour atteindre 79.8% et 86.1% (CNESST, 2021-2022). En 2011, une étude réalisée par l'institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST) estimait que l'environnement de travail de près de 359 000 Québécois était si bruyant qu'il y est difficile de maintenir une conversation à un mètre de distance (Ledoux & al., 2011). L'exposition au bruit varie selon le secteur d'activité économique. De 2007 à 2008, les secteurs ayant eu une prévalence d'exposition au bruit sont les secteurs manufacturiers, de services de réparation et d'entretien (24.6 %) et les secteurs d'industrie primaire, utilité publique et construction (18.2%). Outre le secteur d'activité, l'exposition au bruit varie aussi selon la catégorie professionnelle. Les ouvriers qualifiés étaient les plus sujets à être exposés au bruit (21.7 %), suivi des ouvriers non qualifiés et manœuvres (16 %), tandis que les cadres supérieurs étaient les moins sujets à une exposition au bruit (3.9 %).

0.2 Méthodes de contrôle du bruit

Généralement, le bruit en milieu de travail provient d'une source qui émet des ondes acoustiques se propageant dans l'environnement pour arriver à l'oreille de la personne. L'onde peut se propager directement ou être réfléchi sur les parois ou les objets, créant un champ acoustique complexe considéré comme diffus. Les trois types de solution de contrôle du bruit sont les actions appliquées directement à la source, sur le milieu de propagation et au niveau du récepteur (Canetto, 2019) (Figure 0.1). La CNESST propose une hiérarchie des catégories de solutions pour réduire l'exposition au bruit selon leur efficacité (Figure 0.2) (CNESST, 2023). Des mesures peuvent être appliquées au point de réception avec de l'équipement de protection individuelle (bouchons d'oreilles, serre-têtes antibruit). L'utilisation de l'équipement de protection individuelle est considérée comme une solution moins efficace puisque les protecteurs auditifs causent un inconfort (Groenewold & al., 2014). Des mesures administratives telles que la signalisation des zones bruyantes et la sensibilisation aux dangers du bruit peuvent aider à réduire l'exposition. Des moyens de contrôle technique peuvent être mis en place sur la source (installation d'amortisseurs ou de silencieux), sur le milieu de propagation (encoffrement et traitement des surfaces du local) ou sur le point de réception (cabine insonorisante). La source peut être éliminée (aménagement de l'établissement, mise en place d'un nouveau procédé) ou remplacée (modification d'un procédé, remplacement d'un outil). Les solutions appliquées à même la source sont considérées comme les plus efficaces.

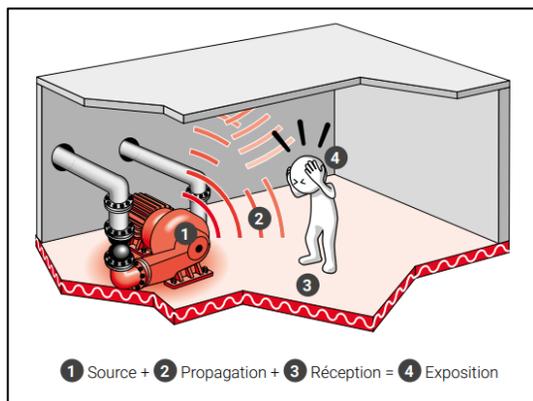


Figure 0.1 Propagation du bruit
Tirée de CNESST (2023, p.11)

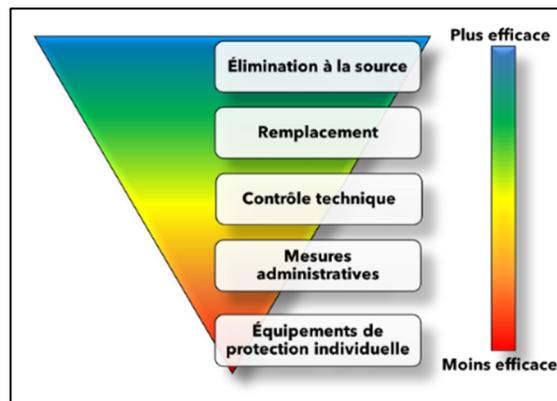


Figure 0.2 Hiérarchie des moyens de contrôle du bruit

Pour mettre en œuvre les solutions à même la source, celle-ci doit être localisée spatialement. Un outil commun pour mesurer le niveau de bruit dans un milieu de travail est le sonomètre (Figure 0.3). Le sonomètre est un instrument de mesure acoustique composé d'un microphone et d'une électronique embarquée permettant de calculer le niveau de pression acoustique en temps réel. En milieux de travail, la présence de plusieurs sources peut rendre la tâche de localisation avec sonomètre difficile puisque celui-ci ne permet qu'une mesure ponctuelle du niveau de pression. Ainsi, une mesure ponctuelle peut comprendre la contribution acoustique de plusieurs sources. Dans certains cas, les sources ne sont pas accessibles et un sonomètre n'est pas un outil adéquat. Le sonomètre peut être utilisé pour cartographier un milieu de travail (Figure 0.4). Pour ce faire, une série de mesure ponctuelle est effectuée selon une grille dans l'environnement de travail. Cette carte acoustique donne seulement un aperçu à une hauteur donnée et la précision dépend du nombre de points de mesure.



Figure 0.3 Sonomètre intégrateur de classe 2
Tirée de Soft dB (2023a, p.1)

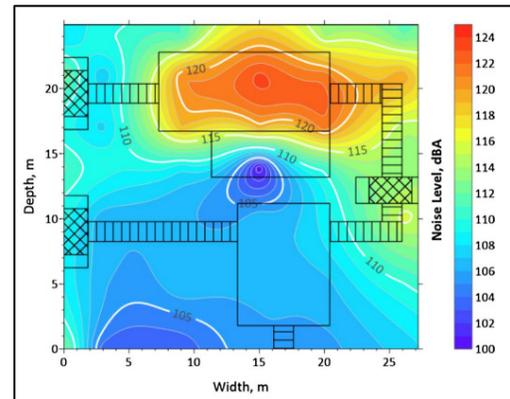


Figure 0.4 Cartographie acoustique réalisée avec un sonomètre
Tirée de Ahmed (2022, p.7)

Un autre outil de mesure est la sonde intensimétrique munie de deux microphones avec laquelle il est possible de mesurer l'intensité acoustique (Figure 0.5). Les deux microphones permettent de mesurer le niveau de pression acoustique et le vecteur d'intensité acoustique. Une sonde intensimétrique peut être utilisée pour faire une mesure ponctuelle comme un sonomètre ou pour cartographier le niveau d'intensité. La sonde est déplacée selon une grille de balayage près de la surface d'une machine et permet d'obtenir une cartographie du niveau d'intensité acoustique. Une image acoustique indiquant les sources de bruit sur une machine est obtenue

(Figure 0.6). Une sonde intensimétrique n'est pas adéquate lorsque la source n'est pas accessible, est en mouvement ou lorsque le travailleur est entouré de plusieurs sources. Il serait difficile d'effectuer un balayage d'un grand local avec plusieurs machines.



Figure 0.5 Sonde d'intensité acoustique de classe 1 à deux microphones
Tirée de Soft dB (2023, p.1)



Figure 0.6 Image acoustique d'une machine obtenue par balayage avec une sonde intensimétrique
Tirée de Soft dB (2023, p.3)

Une troisième solution permettant d'effectuer la localisation et la hiérarchisation de sources acoustiques en milieux de travail est un système d'imagerie acoustique (SIA) constitué d'une antenne de microphones, d'une caméra et d'un traitement du signal avec un algorithme de formation de faisceaux (AFF) (Figure 0.7). Dans un milieu de travail intérieur, le son provient de toutes les directions. Dans ce cas, une antenne de microphones sphérique peut être utilisée (Chiariotti, 2019). L'image acoustique à elle seule peut être insuffisante pour effectuer la localisation d'une source puisqu'elle n'indique que la direction d'arrivée de l'onde. Pour aider à la localisation, l'image acoustique est superposée à l'image de l'environnement (Figure 0.8). Un SIA permet de localiser et de hiérarchiser plusieurs sources dans un environnement clos sans déplacer l'appareil. Un SIA permet également d'effectuer le diagnostic pour des sources acoustiques non accessibles.



Figure 0.7 Système d'imagerie acoustique avec antenne sphérique de microphones rigide
Tirée de B&K (2016, p.1)

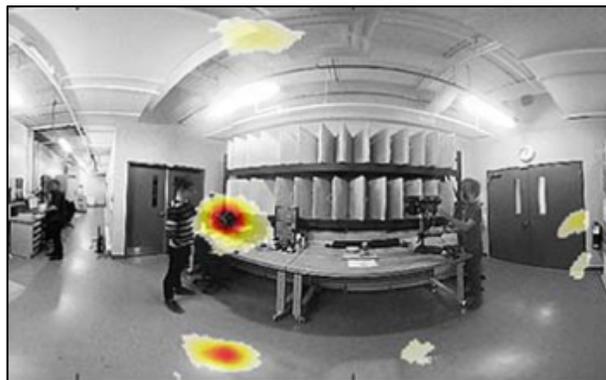


Figure 0.8 Image acoustique d'un local de travail avec la source et des réflexions sur les parois localisées avec les taches de couleur
Tirée de Padois (2022, p.1)

0.3 Développement d'un système d'imagerie acoustique temps réel

Ce travail de maîtrise s'inscrit dans le cadre d'un projet conjoint avec l'institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), l'École de technologie supérieure (ÉTS) et l'université de Sherbrooke (UdeS) visant le développement d'un SIA pour la localisation de sources acoustique en milieux de travail. À l'UdeS, un étudiant à la maîtrise est responsable du développement et de la conception de l'électronique embarquée du système et d'une interface à affichage en temps réel. À l'ÉTS, un étudiant au doctorat a pour objectif de recherche l'identification de l'agencement géométrique d'antenne optimale ainsi que le développement d'un AFF novateur. Ma contribution au projet comprend une portion de conception mécanique et une étude sur l'effet de diffraction de l'onde acoustique. Dans un premier temps, des antennes à support sphérique sont nécessaires pour les activités d'identification de géométrie d'antenne et de développement d'AFF. De plus, les effets de diffraction des différents supports d'antenne peuvent influencer les performances d'un SIA.

La première section de ce document se consacre à la revue de littérature sur les concepts généraux d'imagerie acoustique, de conception d'antennes, de géométrie d'antenne et sur l'étude des effets de diffraction. La section suivante présente les objectifs et la structure du document. Puis, la conception d'antennes ouvertes modulaires et d'antennes dédiée à l'étude de l'effet de diffraction est détaillée. Ensuite, un article soumis pour publication dans le

Journal of Sound and Vibration présente l'étude sur les effets de diffractions des antennes rigides et ouvertes sur les images acoustiques.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature couvre les deux principales composantes de mon projet de recherche, soit la conception d'antenne sphérique de microphones et l'étude de l'influence de la diffraction sur les images acoustiques. La section 1.1 introduit les différents concepts et définitions pertinentes. Les sections 1.2 et 1.3 présentent différentes conceptions d'antennes ouvertes et rigides. Plusieurs agencements géométriques permettant de répartir les microphones sur une sphère sont présentés à la section 1.4. Différents travaux de recherche en lien avec l'étude de l'effet de diffraction acoustique sont présentés à la section 1.5. La section 1.6 fait une synthèse critique de la revue de littérature.

1.1 Concepts et définitions

La Figure 1.1 présente une vue schématique de l'utilisation d'un SIA en milieu de travail. Une source génère des ondes acoustiques qui sont captées par une antenne sphérique de microphones. Le délai entre chaque microphone permet de déterminer la position de la source (Merino-Martinez & al., 2019). L'algorithme de traitement du signal qui permet d'effectuer cette tâche est référé comme un algorithme de formation de faisceaux ou *Beamforming* dans la littérature anglo-saxonne. Cet algorithme permet de générer une image acoustique où le lobe principal indique la position de la source et le gradient de couleur le niveau acoustique. Plusieurs algorithmes ont été développés et nécessitent soit des antennes à support rigide ou à support ouvert. La répartition des microphones peut également avoir un impact sur la qualité de l'image obtenue avec l'AFF.

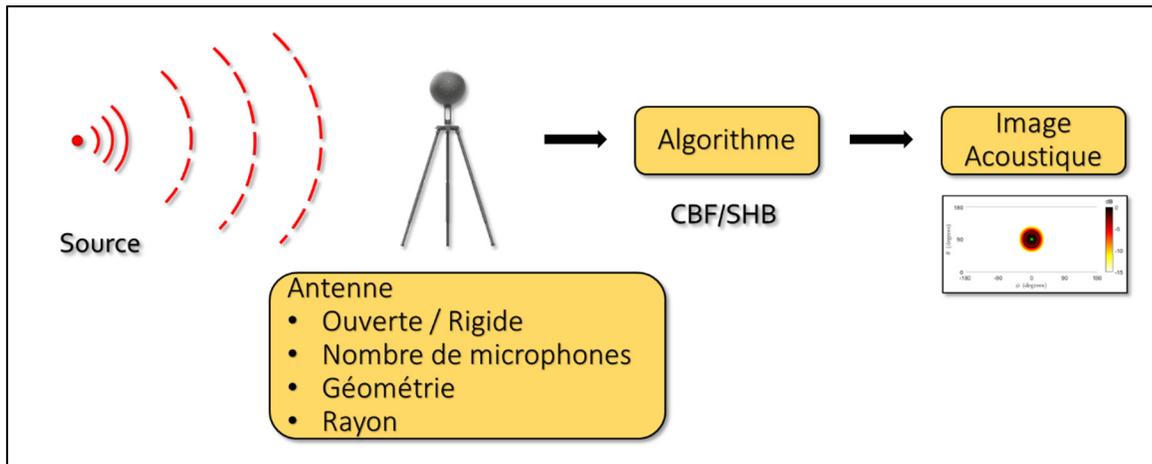


Figure 1.1 Image acoustique d'une source à obtenir avec une antenne de microphones sphérique et un algorithme de formation de faisceaux

Avec les antennes ouvertes, l'algorithme *Conventional Beamforming in the Frequency domain* (CBF) est utilisé. Cet AFF repose sur l'hypothèse de propagation en champ libre et sur l'absence d'objet causant la diffraction du front d'onde (Padois & al., 2023). La diffraction est le phénomène se produisant lorsqu'une onde acoustique rencontre un objet de même ordre de grandeur que la longueur d'onde (Truax, 1978). Ce phénomène modifie les délais temporels entre deux microphones, ce qui pourrait affecter l'image acoustique (Heilman & al., 2008). Pour satisfaire la condition de champ libre, il est souvent fait l'hypothèse que la structure de l'antenne est transparente et n'interagit pas avec les ondes acoustiques. Ainsi, l'objectif d'une conception d'antenne ouverte est d'atteindre la condition de transparence acoustique. Pour y arriver, les microphones sont généralement fixés sur une structure filaire (Figure 1.2) ou au bout de tiges fines (Figure 1.3). Les performances du CBF dépendent du rayon de l'antenne et de la fréquence de la source (Padois & al., 2021). Un lobe principal large est attendu pour les basses fréquences et des niveaux de lobe secondaire important pour les hautes fréquences (Fischer & al., 2017).

Contrairement au CBF, l'algorithme de *Spherical Harmonics Beamforming* (SHB) permet de prendre en compte les effets de diffraction en décomposant le champ acoustique dans le domaine des harmoniques sphériques (Petersen, 2004) (Rafaely, 2019). Ainsi, avec le SHB, une antenne rigide peut être utilisée. Pour les antennes rigides, les microphones sont installés

affleurants à la surface d'une sphère (Figure 1.4). Pour sa part, les performances du SHB dépendent de l'ordre des harmoniques sphériques (Haddad & Hald, 2008). Pour atteindre un ordre élevé, un grand nombre de microphones est requis (Battista & al., 2018). De plus, le SHB est sensible à l'orthogonalité des harmoniques sphériques qui nécessite la répartition des microphones selon une certaine géométrie sur la sphère (Lecomte & al., 2016).



Figure 1.2 Antenne ouverte
filaire
Tirée de GFai tech (2023, p.1)



Figure 1.3 Antenne ouverte
avec tiges
Tirée de Padois (2017, p.92)



Figure 1.4 Antenne rigide
Tirée de B&K (2016, p.2)

Le résultat obtenu par un AFF, lorsque représenté en 2D, est une image acoustique caractérisée par un lobe principal dont la valeur maximale indique la position et le niveau de la source (Figure 1.5). Un lobe principal petit est préférable pour une meilleure localisation. Dans le cas où le lobe principal est large, la localisation peut être difficile ou même impossible (Figure 1.6). En périphérie du lobe principal se trouvent des lobes secondaires non désirés inhérents à la géométrie de l'antenne et de la source (Figure 1.7) (Dougherty, 2008). Un lobe secondaire de fort niveau peut être interprété comme une source et donc mener à une fausse analyse de la situation.

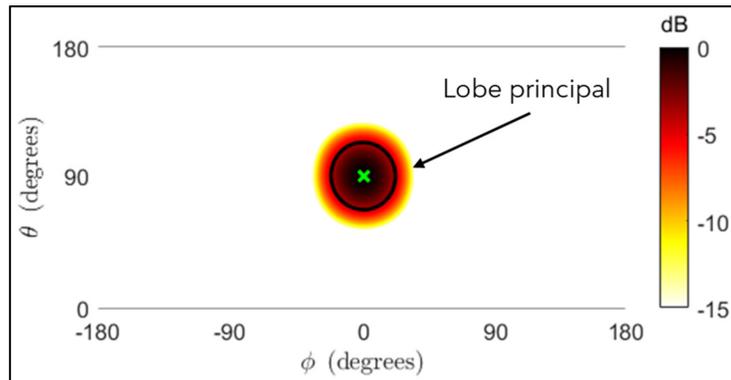


Figure 1.5 Image acoustique obtenue avec une antenne ouverte de 19.5 cm et 36 microphones avec le CBF

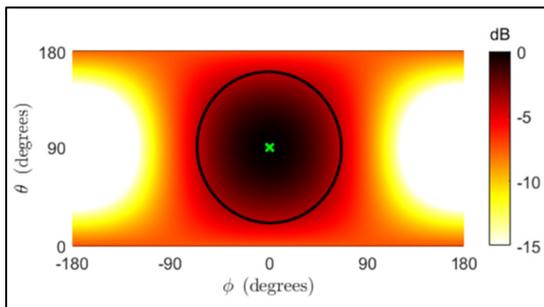


Figure 1.6 Image acoustique avec lobe principal très large (CBF, antenne ouverte, 19.5 cm, 36 microphones, 800 Hz)

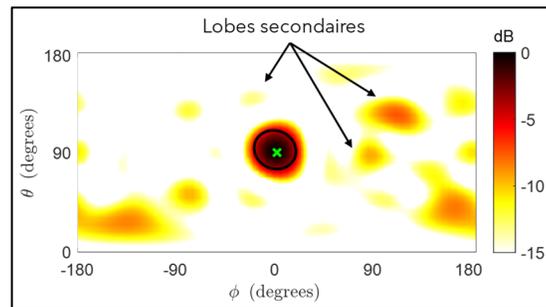


Figure 1.7 Image acoustique avec lobes secondaires de niveau important pouvant être confondu avec une fausse source (SHB, antenne rigide, 19.5 cm, 36 microphones, 4000 Hz)

1.2 Antennes ouvertes

Selon la littérature, deux approches existent pour la conception d'une antenne ouverte à savoir les antennes à structure filaire et les antennes à tiges. Les antennes à structure filaire sont généralement conçues en utilisant des câbles fins tendus ou par fabrication additive pour obtenir une structure similaire à un treillis. Pour les antennes à tiges, les microphones sont fixés au bout de tiges fines, lesquelles sont installées sur un noyau sphérique rigide. Pour les fréquences dont la longueur d'onde est supérieure à la dimension du noyau rigide et des tiges, l'antenne est considérée comme transparente (Carneiro & al., 2023).

En 2001, Peltonen & al. ont conçu une antenne sphérique de microphones ouverte à structure filaire avec 12 microphones et de 10 cm de diamètre (Peltonen & al., 2001) (Figure 1.8). La structure était constituée de deux anneaux perpendiculaires sur lesquels des câbles étaient tendus pour y fixer les microphones. Sur chaque anneau, plusieurs câbles permettent de former une grille 3D. Cette conception est simple et les composantes de la structure sont de petites dimensions. Cette méthode de conception permet seulement d'installer des microphones sur deux plans, soit les plans des deux anneaux. Une conception similaire avec plus d'anneaux permettrait d'installer un plus grand nombre de microphones et une meilleure dispersion spatiale.

En 2002, Gover & al. ont conçu deux antennes sphériques avec tiges munies de 32 microphones, soit une antenne de 16 cm de diamètre prévue pour les hautes fréquences (300-3300 Hz) et une de 48 cm de diamètre pour les basses fréquences (300-1000 Hz) (Gover & al., 2003) (Figure 1.9). La structure des deux concepts consistait en un réceptacle cylindrique central dans lequel étaient installés deux microphones aux extrémités. Des tiges de 2.4 mm de diamètre étaient insérées dans le réceptacle cylindrique pour maintenir les microphones en place et obtenir un réseau sphérique. Le résultat était deux antennes ouvertes avec tiges fines pour lesquelles les effets de diffraction semblent limités. Ce concept permet d'obtenir une structure de petite dimension, mais peut être fragile.



Figure 1.8 Antenne sphérique ouverte de 12 microphones à base d'anneaux et de câbles
Tirée de Peltonen (2001, p.3)

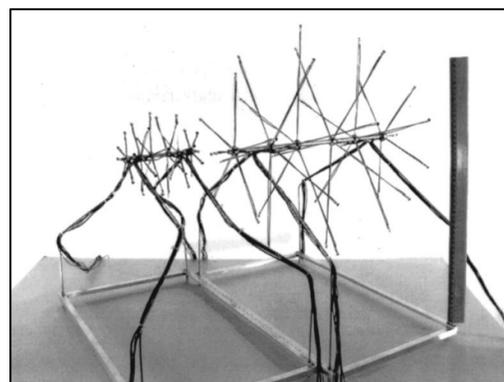


Figure 1.9 Antenne sphérique de 32 microphones ouverte avec tiges
Tirée de Gover (2003, p.8)

En 2006, Noël & al. ont développé une antenne de microphones ouverte avec un noyau sphérique sur lequel des microphones étaient installés sur des tiges (Noël & al., 2006) (Figure 1.10). Pour cette étude, l'objectif était de concevoir une antenne avec peu de microphones et de réduire les effets potentiels de diffraction. À cet effet, 15 microphones étaient fixés sur l'antenne avec des tiges pour former une antenne sphérique de 50 cm de diamètre. Pour déterminer la géométrie optimale de l'antenne, une sphère de diamètre de 50 cm a été divisée en 648 cellules, soit une cellule pour chaque position unique avec un pas en azimut et en élévation de 10° ($\Delta\phi = \Delta\theta = 10^\circ$). Cette conception est simple à fabriquer et le rayon de l'antenne peut varier en utilisant des tiges plus longues ou plus courtes.

En 2012, Sasaki & al. ont fabriqué une antenne sphérique ouverte de 64 microphones (Sasaki & al., 2012) (Figure 1.11). La structure était faite de plusieurs disques concentriques de différents diamètres agencés de manière à obtenir une répartition sphérique des microphones. Chaque microphone était installé sur le disque orienté vers le haut. Cette conception permet d'obtenir une structure de petite dimension, mais sa réalisation peut être complexe et nécessiter un grand nombre de pièces. Aussi, pour assurer la direction radiale de chaque microphone, des disques de plus grande dimension seraient nécessaires. Ce concept semble plus compact et potentiellement plus sensible aux effets de diffraction.

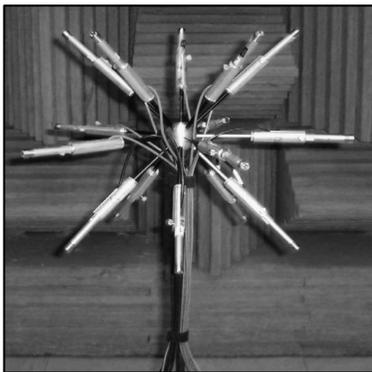


Figure 1.10 Antenne sphérique ouverte avec tiges et noyau sphérique de 15 microphones et de 50 cm de diamètre
Tirée de Noël (2006, p. 526)



Figure 1.11 Antenne sphérique ouverte de 64 microphones faite à base de plusieurs anneaux concentriques
Tirée de Sasaki (2012, p. 716)

En 2012, Legg a conçu une antenne filaire de 72 microphones de 0.6 m et de diamètre dans le cadre de ses travaux de recherche pour sa thèse de doctorat (Legg, 2012) (Figure 1.12). La structure était faite de câbles en fibre de carbone tendus et fixés à l'aide de résine époxy le tout sur un moule sphérique. Des tubes avec bague rainurée prévue pour enrouler les câbles sont utilisés aux nœuds pour maintenir les microphones en place. Cette conception élaborée permet d'obtenir une structure filaire plus solide grâce à l'utilisation de résine époxy tout en minimisant les dimensions de l'antenne.

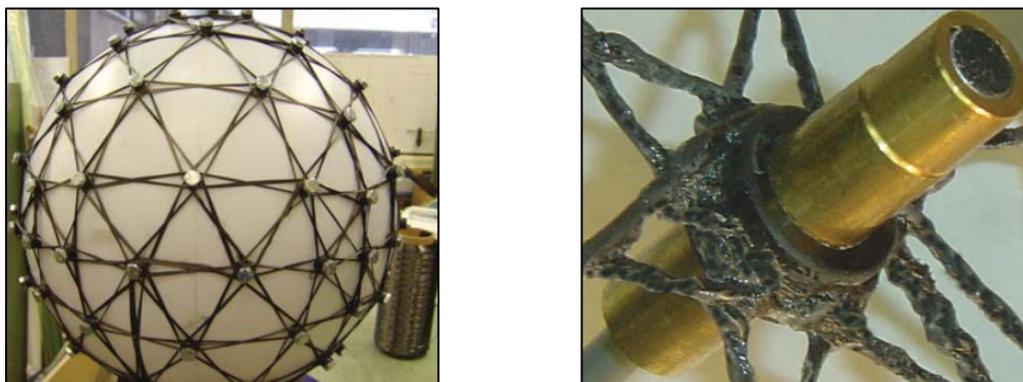


Figure 1.12 Antenne sphérique ouverte de 72 microphones à structure filaire faite à base de câbles en fibre de carbone et de résine d'époxy
Tirée de Legg (2012, p.38)

En 2014, Nakadai & al. ont conçu une antenne sphérique ouverte à structure filaire de 64 microphones et d'un rayon de 40 cm (Nakadai & al., 2014) (Figure 1.13). La géométrie de l'antenne a été basée sur celle d'un icosaèdre tronqué. La structure était faite de plusieurs plaques d'aluminium reliées par des fixations de plastique à trois points d'attache. Les fixations ont été fabriquées par impression 3D. Cette conception est simple à fabriquer et assembler, mais nécessite un grand nombre de pièces. Aussi, le blocage en rotation des fixations à trois points d'attache peut être problématique pour une utilisation répétée.

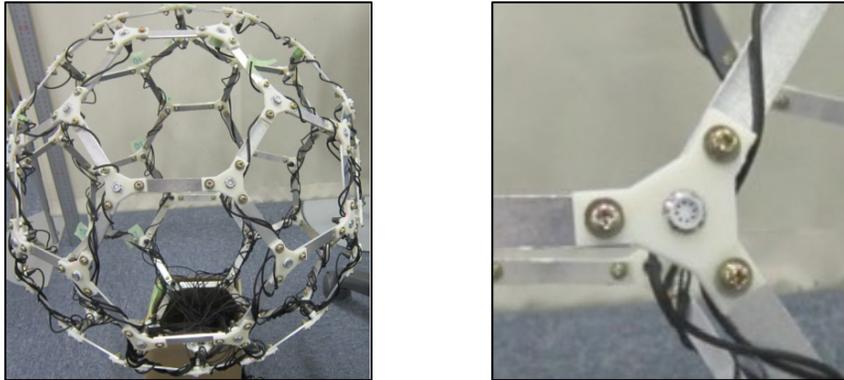


Figure 1.13 Antenne sphérique ouverte à structure filaire de 64 microphones
Tirées de Nakadai (2014, p. 1914)

En 2016, Djordjevic & Ciric ont conçu une antenne sphérique ouverte à structure filaire munie de 32 microphones et de 15 cm de diamètre (Djordjevic & Ciric, 2016) (Figure 1.14). La géométrie de l'antenne a été réalisée en combinant un dodécaèdre et un icosaèdre pour former un prisme de 32 sommets avec un espacement uniforme. Un microphone est fixé à chacun des sommets par un support avec une vis d'ajustement. Le support est une vis tubulaire dans laquelle un joint torique de caoutchouc maintient le microphone en place. Avec le filet de la vis, il est possible d'ajuster de quelques millimètres la protrusion du microphone et ainsi le rayon de l'antenne.

En 2017, Padois & al. ont conçu une antenne ouverte à tiges munie de 15 microphones (Padois & al., 2017) (Figure 1.15). Les tiges étaient d'une longueur de 20 cm et étaient installées sur un noyau sphérique rigide de 7.62 cm de diamètre pour obtenir une distance maximale entre les microphones de 50 cm. Le concept est similaire à celui réalisé par Noël & al. (Figure 1.10) avec le même nombre de microphones et le même diamètre d'antenne. L'objectif était de concevoir une antenne de petit format avec peu de microphones pour la prise de mesure à répétition. Les tiges sont installées de manière à former trois cercles coplanaires de cinq microphones.

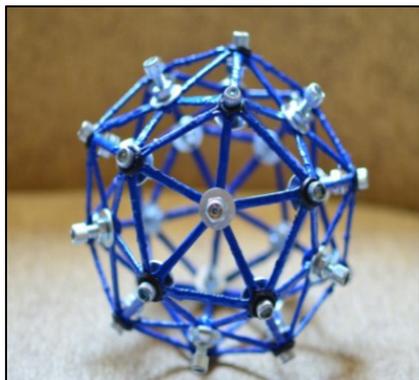


Figure 1.14 Antenne sphérique ouverte à structure filaire de 32 microphones et de 7.5 cm de rayon
Tirée de Djordjevic (2016, p. 5906)



Figure 1.15 Antenne sphérique de 15 microphones avec tiges de 20 cm et un noyau sphérique de 7.62 cm de diamètre pour obtenir un diamètre d'antenne de 50 cm
Tirée de Padois (2017, p. 92)

En 2018, Wang & Chen ont utilisé une antenne ouverte à structure filaire de 36 microphones et de 40 cm de diamètre (Wang & Chen, 2018) (Figure 1.16). La structure est faite de plusieurs anneaux dont les intersections sont des nœuds cylindriques avec un alésage permettant d'installer un microphone. L'antenne semble avoir été fabriquée en plastique par impression 3D en un seul morceau.

En 2019, Padois & al. ont conçu une antenne ouverte à tiges modulaire (Padois & al., 2019) (Figure 1.17). L'objectif était de concevoir une antenne ouverte modulaire permettant d'installer un grand nombre de microphones selon plusieurs géométries sur une même antenne. Comme le concept précédent (Padois & al., 2017), les microphones étaient fixés au bout de tiges de 9.5 cm de longueur et ensuite installés sur un noyau sphérique de 15 cm de diamètre pour former une antenne de 40 cm de diamètre. Sur le noyau sphérique, 252 alésages permettaient d'installer des tiges pour former différentes géométries d'agencement de microphones. Une rainure dans les tiges permettait de faire passer le câble du microphone à l'intérieur du noyau sphérique pour ensuite le faire sortir à la base. Le noyau sphérique a été fabriqué par impression 3D et les tiges en aluminium par usinage.



Figure 1.16 Antenne sphérique de 36 microphones à structure filaire de 40 cm de diamètre
Tirée de Wang & Chen (2018, p. 159)



Figure 1.17 Antenne sphérique ouverte avec tiges modulaires avec 252 positions possibles et de 40 cm de diamètre
Tirée de Padois (2019, p. 556)

En 2018, González & al. ont conçu une antenne ouverte avec tiges de 19 microphones à diamètre variable (González & al., 2018) (Figure 1.18). Des microphones étaient encastrés au bout de tiges, lesquelles étaient fixées sur un noyau sphérique. La méthode de fixation des tiges sur le noyau n'est nul autre que le branchement du microphone au système. La géométrie de l'antenne est un icosaèdre dont un microphone peut être installé sur 19 des faces. La 20^e face est inaffectée puisqu'elle est occupée par le support de l'antenne. En ajoutant une extension à la tige support de microphones, le rayon varie de 4.5 à 9 cm. L'antenne a été fabriquée par impression 3D. il est possible de fabriquer d'autres tiges pour faire varier le rayon de l'antenne.

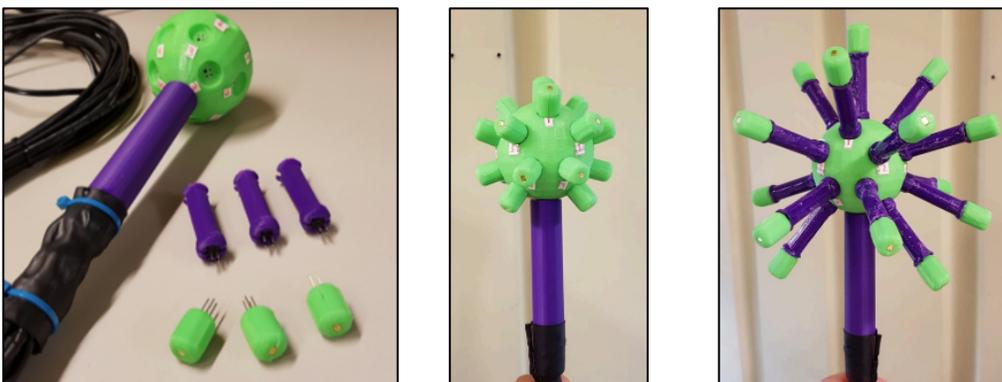


Figure 1.18 Antenne sphérique ouverte avec permettant d'installer jusqu'à 19 microphones et de faire varier le rayon de 4.5 cm à 9 cm
Tirée de González (2018, p. 3)

Du côté commercial, le fabricant GFai tech propose trois modèles d'antennes filaires soit une de 48, 80 et 120 microphones (GFai tech, 2023-2023a). Le modèle de 48 microphones a un diamètre de 35 cm et la plage de fréquence observable recommandée est de 291 Hz à 20 kHz (Figure 1.19). Les modèles de 80 et 120 microphones ont un diamètre de 60 cm et permettent d'identifier des sources en basse fréquence, soit de 185 Hz à 20 kHz (Figure 1.20). Les trois antennes ont une structure filaire faite de câbles tendus. Les microphones sont maintenus en place aux intersections des câbles et sont orientés selon une direction radiale.



Figure 1.19 Antennes sphériques ouvertes à structure filaire commerciale de 48 microphones
Tirée de GFai tech (2023, p. 1)



Figure 1.20 Antennes sphériques ouvertes à structure filaire commerciale de 120 microphones
Tirée de GFai tech (2023a, p. 1)

Le Tableau 1.1 présente une synthèse des différentes conceptions d'antenne ouvertes relevées dans la littérature. Plusieurs concepts ont été développés, cependant la vérification de l'hypothèse de transparence acoustique n'a pas été vérifiée. Avec les antennes ouvertes, le diamètre est généralement grand pour améliorer les performances du CBF en basses fréquences. Le diamètre de l'antenne et le nombre de microphones varient de concept en concept. Il ne semble pas y avoir un consensus pour la géométrie optimale. Une antenne modulaire semblable à celle développée par Padois (Padois & al., 2017) permettrait de tester un AFF avec différentes géométries.

Tableau 1.1 Synthèse des différentes conceptions d'antennes ouvertes issues de la littérature

Auteur	Type	Q mic	Da (cm)
Peltonen & al., 2001	Filaire	12	10
Gover & al., 2002, 2003	Tiges	32	16
Noël & al., 2006	Tiges	15	50
Sasaki & al., 2012	Filaire	64	Inconnu
Legg, 2012	Filaire	72	60
Nakadai & al., 2014	Filaire	64	40
Djordjevic & Ciric, 2016	Filaire	32	15
Padois & al., 2017	Tiges	15	50
Wang & Chen, 2018	Filaire	36	40
Padois & al., 2019	Tiges	Jusqu'à 252	40
González & al., 2018	Tiges	19	De 9 à 18
GFai tech, 2023	Filaire	48	35
GFai tech, 2023	Filaire	80	60
GFai tech, 2023	Filaire	120	60

1.3 Antennes rigides

Les antennes sphériques rigides sont constituées d'une sphère sur laquelle les microphones sont installés affleurant à la surface. Les antennes rigides ont l'avantage de permettre de dissimuler le câblage à l'intérieur de l'antenne.

En 2004, Petersen a utilisé une antenne sphérique rigide de 28 cm de diamètre de 64 microphones pour le développement de l'algorithme SHB (Petersen, 2004) (Figure 1.21). Le diamètre de 28 cm a été déterminé pour accommoder les microphones à l'intérieur de la sphère.

L'antenne est faite de deux coques hémisphériques permettant d'ouvrir l'antenne et d'y installer le microphone par l'intérieur. Le pôle inférieur permet d'installer un trépied à même la surface de l'antenne. Le câblage est groupé et dirigé à l'extérieur de l'antenne par un seul orifice.

En 2005, Duraiswami & al. ont conçu une antenne sphérique rigide à l'aide d'un abat-jour de plafonnier (Duraiswami, 2005) (Figure 1.22). L'antenne était une sphère rigide en plastique de 20.2 cm de diamètre sur laquelle 60 microphones étaient répartis. Puisque la portion inférieure de l'abat-jour était vide, 4 microphones de la géométrie ont été omis. Les câbles étaient dirigés dans le support central fixé au pôle inférieur.

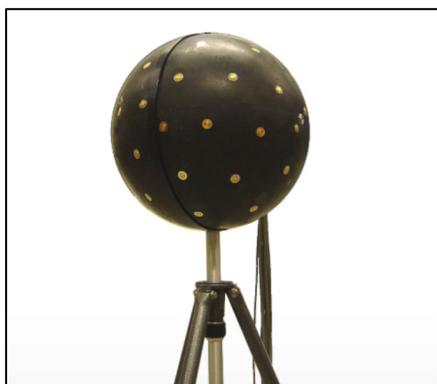


Figure 1.21 Antenne sphérique rigide de 64 microphones et de 28 cm de diamètre
Tirée de Petersen (2004, p. 71)



Figure 1.22 Antenne sphérique rigide de 60 microphones de 20.2 cm
Ttirée de Duraiswami (2005, p. 11)

En 2016, Araujo & al. ont conçu une antenne sphérique rigide de 20 microphones (Araujo, 2016) (Figure 1.23). L'antenne était une sphère creuse fractionnée en cinq parties et a été fabriquée en plastique par impression 3D. Les microphones étaient installés par l'intérieur de l'antenne de manière qu'ils soient affleurants à la surface extérieure. Les microphones étaient maintenus en place à l'aide de joint torique en caoutchouc dans les alésages. Les câbles ont été dirigés vers l'extérieur par un seul orifice.

En 2016, Gamper & al. ont développé une antenne sphérique rigide de 20 cm de diamètre sur laquelle étaient installés 64 microphones (Gamper & al., 2016) (Figure 1.24). L'objectif était

d'utiliser une antenne sphérique de microphones rigide pour caractériser un environnement bruyant pour l'évaluation d'appareils de télécommunication. L'antenne est une sphère creuse visiblement faite de plastique et en deux parties. Les microphones sont installés par l'intérieur.

En 2016, Bai & al. ont conçu une antenne sphérique rigide de 5 cm de rayon avec 32 microphones (Bai & al., 2016) (Figure 1.25). La géométrie est basée sur celle d'un icosaèdre et un microphone est installé à chaque nœud et au centre de chaque face. L'antenne rigide a été fabriquée par impression 3D en deux pièces. Un support tubulaire permettait de diriger le câblage à l'extérieure de l'antenne.

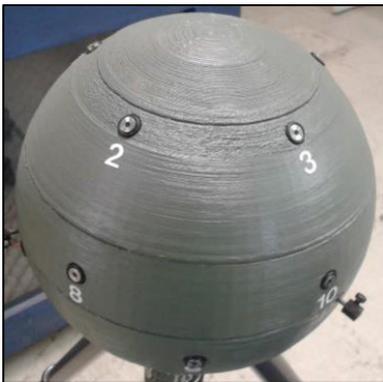


Figure 1.23 Antenne sphérique rigide de 20 microphones
Tirée de Araujo (2016, p. 5)



Figure 1.24 Antenne rigide de 64 microphones et de 20 cm de diamètre
Tirée de Gamper (2016, p. 1)



Figure 1.25 Antenne sphérique rigide de 32 microphones et de 5 cm de rayon
Tirée de Bai (2016, p. 1067)

En 2016, Tontiwattanakul & al. ont conçu 3 antennes rigides de 36 microphones avec l'objectif de réduire le repliement spatial (Tontiwattanakul & al., 2016) (Figure 1.26). Pour y arriver, il étudie l'influence d'ajouter des guides coniques et sphériques d'onde pour chaque microphone. Une des antennes évaluées est un antenne rigide simple avec les microphones affleurants à la surface. Une deuxième antenne rigide a des alésages en forme de cône à la position de chaque microphone. Ainsi, le microphone est au centre de l'alésage conique et celui-ci agit comme guide d'onde. Une troisième antenne est faite avec des alésages sphériques. Les résultats montrent que l'ajout d'alésage guide d'onde aux microphones d'une antenne rigide permet d'améliorer les performances d'un SIA sur une plus grande plage de fréquences et une

meilleure directivité. L'alésage sphérique était plus performant que l'alésage en cône. Les alésages guide d'onde ne sont pas efficaces pour les basses fréquences, mais montrent du potentiel pour les hautes fréquences. Les antennes ont été fabriquées par impression 3D en deux pièces. Cependant, l'ajout d'un alésage guide d'onde vient faire varier le rayon de l'antenne.

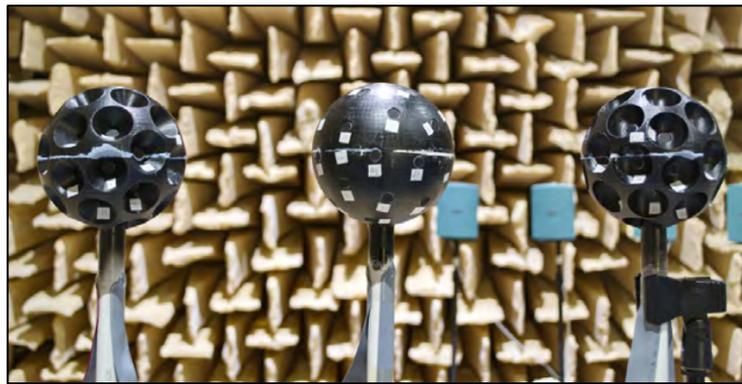


Figure 1.26 Trois antennes sphériques rigides de 36 microphones. Une antenne avec des alésages guide d'onde de forme conique, une antenne rigide simple et une antenne avec alésages guide d'onde de forme sphérique
Tirée de Tontiwattanakul (2016, p.177)

Il existe quelques modèles commerciaux de SIA avec une antenne rigide. Le fabricant Brüel & Kjaer offre une antenne rigide sphérique, soit le système de formation de faisceaux sphérique type 8606 (Brüel & Kjaer, 2016). Ce modèle est une antenne sphérique rigide de 19.5 cm de diamètre avec une configuration de 36 ou de 50 microphones. La plage de fréquence observable recommandée par le fabricant est de 100 Hz à 12800 Hz. L'antenne sphérique rigide de 36 et de 50 microphones du fabricant Brüel & Kjaer est communément utilisée dans la littérature (Hald & al., 2007) (Moreno, 2008) (Jacobsen & al., 2011) (Tiana-Roig & al., 2014) (Chu & al., 2019).

D'autres modèles commerciaux d'antenne rigide sphérique sont disponibles, entre autres par les fabricants Siemens, VisiSonics et MH acoustics. L'entreprise Siemens offre le modèle Simcenter Testlab 3D Acoustic Camera Advanced, une antenne sphérique rigide de 36 ou 54 microphones (Siemens, 2018) (Figure 1.27). VisiSonics, quant à eux, offre le modèle 5/64

Audio Visual Camera qui permet la localisation en temps réel avec une électronique embarquée (VisiSonics, 2023) (Figure 1.28). L'antenne rigide de diamètre de 20 cm comprend un agencement de 64 microphones et 5 caméras. MH acoustics offre le modèle Eigenmike, une antenne sphérique rigide de 8.4 cm de diamètre muni de 32 microphones (MHacoustics, 2023) (Figure 1.29).



Figure 1.27 Antenne
simcenter Testlab 3D
Acoustic Camera Avanced
Tirée de Siemens (2018, p. 1)



Figure 1.28 5/64 Audio
Visual Camera
Tirée de VisiSonics
(2023, p. 1)



Figure 1.29 Eigenmike
Tirée de MH acoustics
(2023, p. 1)

Le Tableau présente une synthèse des différentes conceptions d'antennes rigides relevées dans la littérature. Pour les antennes rigides, le diamètre d'antenne est plus petit puisque les performances du SHB ne dépendent pas du diamètre, mais plutôt de l'ordre des harmoniques sphériques qui requiert un grand nombre de microphones. Plusieurs concepts utilisent 64 microphones pour atteindre un ordre des harmoniques sphériques élevé.

Tableau 1.2 Synthèse des différentes conceptions d'antennes rigides issues de la littérature

Auteur	Type	Q mic	Da (cm)
Petersen, 2004	Rigide	64	28
Duraiswami, 2005	Rigide	60	20.2
Araujo, 2016	Rigide	20	Inconnu
Gamper & al., 2016	Rigide	64	20
Bai & al., 2016	Rigide	32	10
Tontiwattanakul & al., 2016	Rigide	36	Inconnu
Brüel & Kjaer, 2016	Rigide	36 ou 50	19.5
Siemens, 2018	Rigide	36 ou 50	Inconnu
VisiSonics, 2023	Rigide	64	20
MHAcoustics, 2023	Rigide	32	8.4

1.4 Géométries de points sur une sphère

Les caractéristiques physiques de l'antenne ont un impact direct sur la qualité de l'image acoustique. Le diamètre de l'antenne et l'espacement inter-microphone influencent la qualité de l'image pour les basses fréquences et les hautes fréquences respectivement (Chiariotti & al., 2019). Autre que le diamètre de l'antenne, la position des microphones sur une antenne influence l'échantillonnage spatial du champ acoustique (Lai & al., 2017). Le CBF est peu sensible à la position exacte des microphones, mais il requiert une diversité de distances inter-microphone. Au contraire, le SHB requiert une certaine géométrie avec des positions précises de microphones pour assurer l'orthogonalité des harmoniques sphériques. La littérature, il existe plusieurs géométries permettant de répartir des points sur une sphère.

En 2005, Rafaely compare trois géométries pour la localisation de source acoustique avec une antenne rigide par décomposition en harmoniques sphériques, soit la géométrie des angles égaux, de Gauss et t-design (Rafaely, 2005). L'objectif est d'identifier quelle géométrie permet

de réduire le repliement spatial. La géométrie des angles égaux (Figure 1.30) requiert $4(N + 1)^2$ microphones, avec N l'ordre maximal des harmoniques sphériques. Selon cette géométrie, les points sont plus rapprochés près des pôles. L'avantage avec la géométrie des angles égaux est l'espacement angulaire régulier avec un espacement en azimut ϕ et en élévation θ de $2(N + 1)$ (Rafaely, 2019). Le désavantage est le grand nombre de microphones requis pour un ordre N . La géométrie de Gauss (Figure 1.31) quant à elle requiert 2 fois moins de microphones pour un même ordre des harmoniques sphériques, soit $2(N + 1)^2$. L'avantage est donc la réduction du nombre de microphones requis pour un ordre N , par contre aux l'espacement angulaire n'est pas régulier. Pour cette géométrie, l'espacement en azimut ϕ est de $2(N + 1)$ et celle en élévation θ de $(N + 1)$. Pour sa part, la géométrie de t-design (Figure 1.32) permet une répartition quasi uniforme sur la surface de la sphère avec un espacement inter-microphone constant. Cette géométrie nécessite au moins $(N + 1)^2$ microphones (Hardin & al., 1996). L'avantage du t-design est le nombre minimal requis de microphone pour obtenir un ordre N et le désavantage est l'espacement angulaire non constant. Les résultats montrent que la géométrie t-design permet une meilleure orthogonalité des ordres des harmoniques sphériques et donc moins de repliement spatial pour un ordre N tout en nécessitant moins de microphones.

En 2016, Lecomte & al. ont comparé trois géométries pour des applications dans le domaine de l'ambisonie, soit les géométries de Lebedev et t-design avec 50 points et Fliege avec 49 points (Lecomte & al., 2016). La géométrie de Lebedev (Figure 1.33) est une approximation de l'intégrale de surface d'une sphère et permet une symétrie de rotation (Beentjes, 2015). La formulation permettant d'obtenir les coordonnées des points de la géométrie de Lebedev sont décrits dans (Lebedev & al., 1999). La géométrie Fliege (Figure 1.34) permet d'obtenir des points sur une sphère avec un pas quasi équidistant et pour un nombre de points qui peut être impossible d'obtenir avec la géométrie de t-design (Fliege & al., 1999). Les résultats obtenus par Lecomte & al. montrent que la géométrie de Lebedev permet d'obtenir un ordre N plus élevé sans repliement spatial pour des applications dans le domaine de l'ambisonie.

En 2022, Rouard & al. ont comparé les géométries t-design, Lebedev et spirale (Figure 1.35) pour des antennes de microphones sphériques avec pour objectif d'évaluer l'influence de la fréquence du signal de la source ainsi que du rayon de l'antenne sur l'image acoustique (Rouard & al., 2022). La géométrie en spirale disperse les points sur un nombre de plans horizontaux équidistants et assigne un point pour chaque latitude (Du & al., 2017). Parmi les algorithmes considérés, le CBF et le SHB sont utilisés pour générer les images acoustiques. L'influence du rayon et de la fréquence du signal de la source sur les images acoustiques est évaluée. Les résultats montrent que la taille d'ellipse obtenue avec l'antenne ouverte et le CBF est indépendante de la géométrie et dépend plutôt du rayon et de la fréquence. Avec l'antenne rigide et le SHB, la géométrie en spirale ne permet pas d'effectuer la localisation de la source. Globalement, le SHB permet d'obtenir un petit lobe principal en basses fréquences et le CBF en hautes fréquences. Le CBF est aussi utilisé avec une antenne rigide et la taille du lobe principal est plus petite que celle obtenue avec le SHB pour la fréquence de 3000 Hz. Ce résultat montre qu'une antenne rigide peut aussi être utilisée avec le CBF. L'effet de diffraction causé par une antenne rigide pourrait être négligeable avec le CBF.

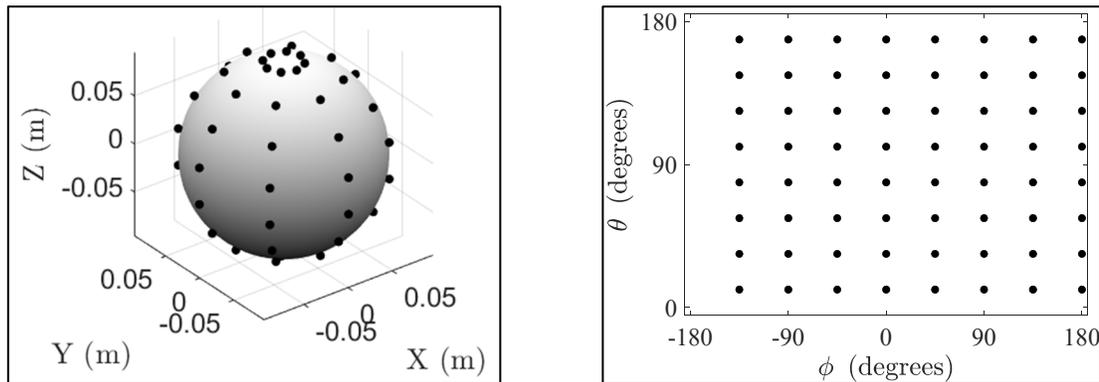


Figure 1.30 Représentation 3D et 2D de la géométrie Angles égaux 64 microphones

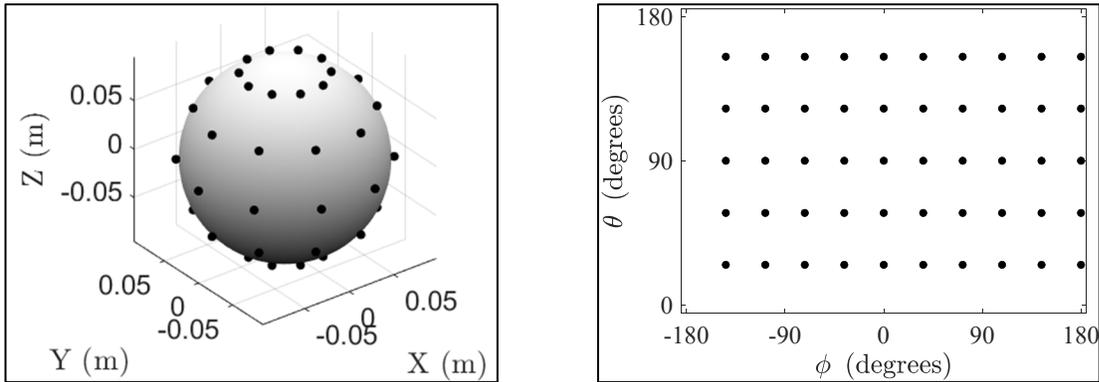


Figure 1.31 Représentation 3D et 2D de la géométrie Gauss 50 microphones

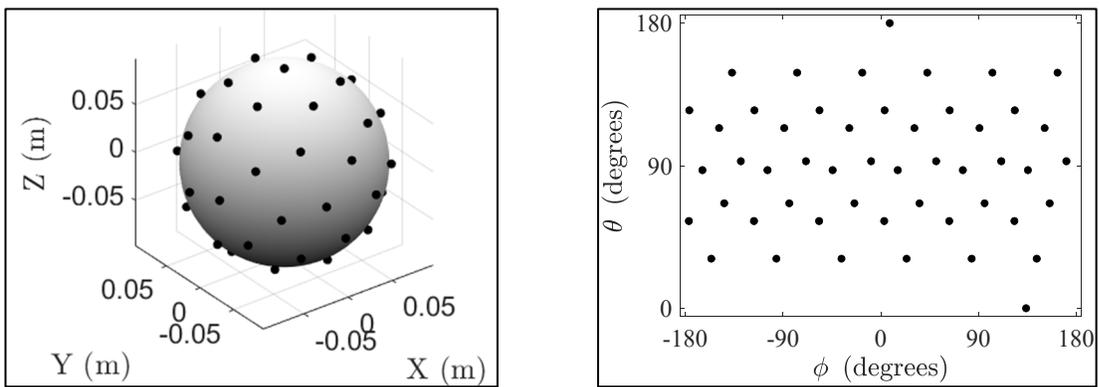


Figure 1.32 Représentation 3D et 2D de la géométrie t-design 50 microphones

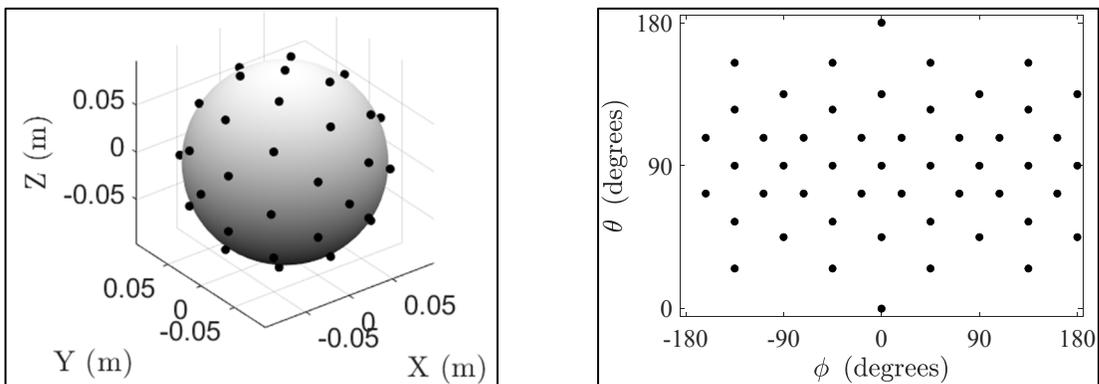


Figure 1.33 Représentation 3D et 2D de la géométrie Lebedev 50 microphones

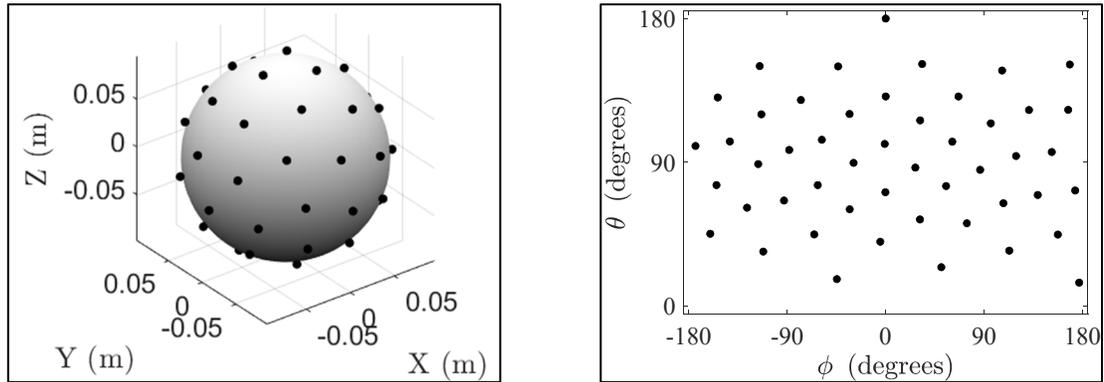


Figure 1.34 Représentation 3D et 2D de la géométrie Fliege 49 microphones

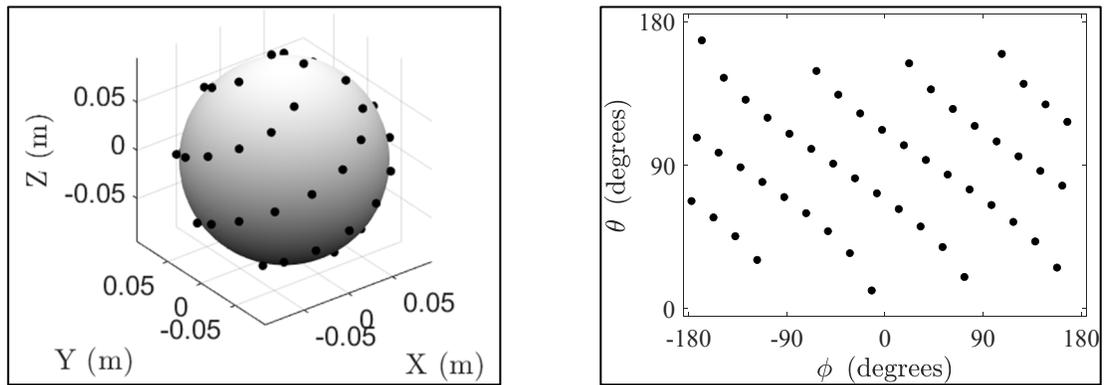


Figure 1.35 Représentation 3D et 2D de la géométrie Spirale 50 microphones

Une géométrie éprouvée et redondante dans la littérature est celle des antennes commerciales de Brüel & Kjaer pour 36 et 50 microphones (Figure 1.36) (Figure 1.37) (Brüel & Kjaer, 2016). Les coordonnées des points de la géométrie de 36 microphones sont données dans (Chu & al., 2019) et celle de la géométrie de 50 microphones dans (Moreno, 2008).

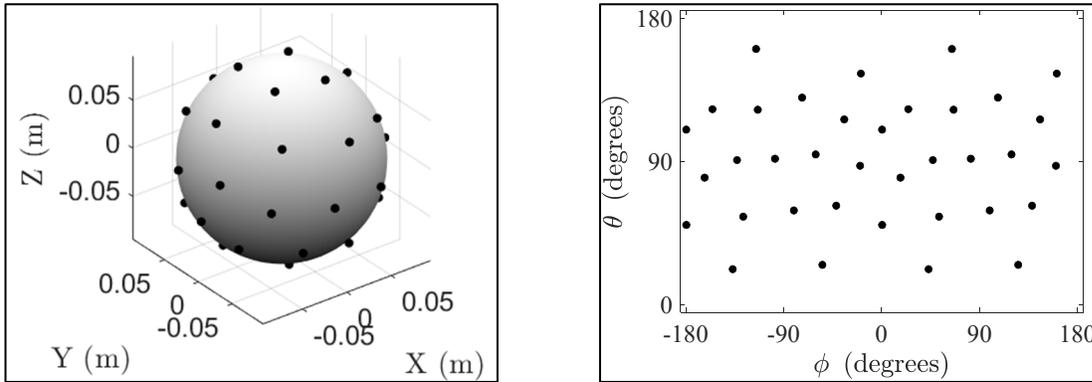


Figure 1.36 Représentation 3D et 2D de la géométrie B&K 36 microphones

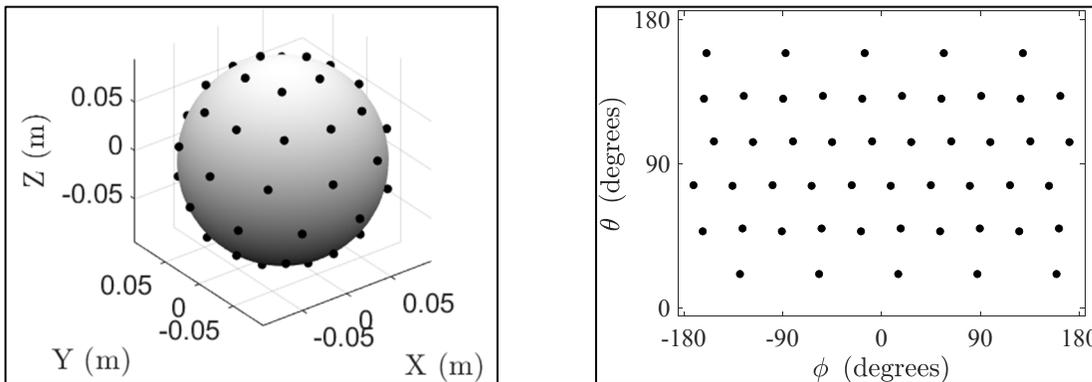


Figure 1.37 Représentation 3D et 2D de la géométrie B&K 50 microphones

1.5 L'effet de diffraction acoustique

La diffraction est le phénomène se produisant lorsqu'une onde acoustique se propage autour d'un objet de même ordre de grandeur à la longueur d'onde acoustique (Truax, 1978). Lorsque la longueur d'onde est petite par rapport à la dimension de l'objet, l'onde est réfléchiée à l'avant de l'objet et une zone d'ombre est créée à l'arrière (Figure). Une zone d'ombre est caractérisée par une atténuation d'amplitude. Pour les basses fréquences, la longueur d'onde est grande et peut ainsi se propager autour de l'objet sans créer de zone d'ombre (Figure 1.38). Dans le cas où l'objet est de dimension similaire à la longueur d'onde, l'onde est diffractée autour de l'objet et les arêtes de l'objet créent de nouveaux fronts d'onde de même fréquence, mais de plus faible intensité.

La première solution analytique au problème de diffraction d'une onde acoustique sur une sphère rigide a été proposée par Rayleigh en 1896 (Rayleigh, 1896) et ensuite reformulée par plusieurs (Logan, 1965) (Sommerfeld, 2004). Depuis, la solution a été développée et est couramment utilisée pour le traitement du signal pour des applications en acoustique. En 2019, Rafaely présente la solution générale permettant de calculer la pression acoustique mesurée sur la surface d'une sphère rigide en prenant compte l'effet de diffraction (Rafaely, 2019).

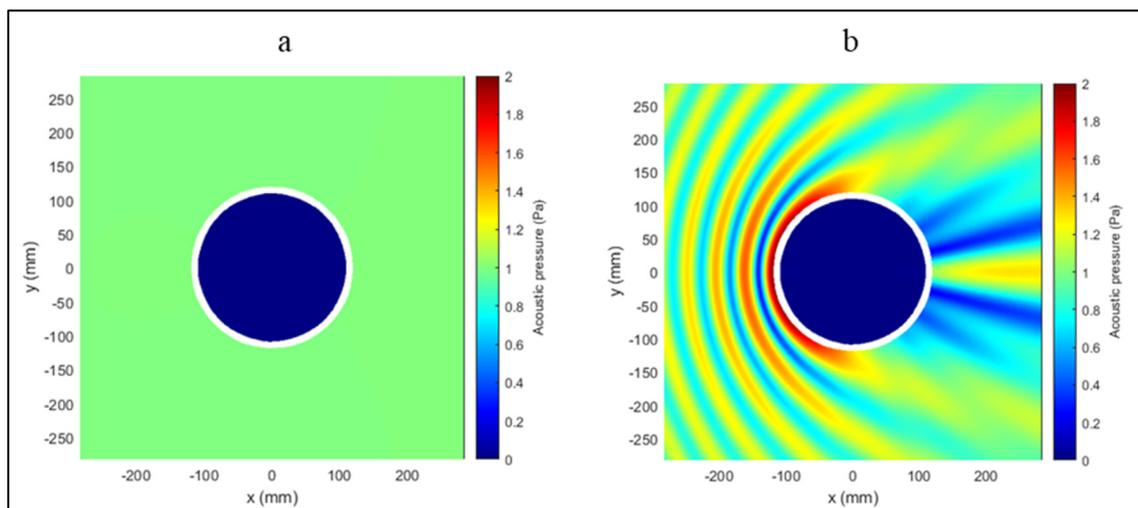


Figure 1.38 Simulation numérique de la pression acoustique $abs(P)$ (Pa) mesuré dans le plan XY entourant une sphère rigide de 238 mm de diamètre provenant d'une source ponctuelle située à une distance source-récepteur de 1 m pour a) $f = 50$ Hz et b) $f = 4000$ Hz

Le phénomène de diffraction de l'onde acoustique et son effet ont été traités auparavant dans la littérature pour des applications en intensimétrie mais pas pour l'imagerie acoustique. En 2000, Parkins & al. établissent une relation entre l'erreur de phase mesurée par deux microphones sur une sphère rigide causée par le phénomène de diffraction (Parkins, 2000). Pour le cas d'une onde plane entrant en contact avec une sphère rigide, l'erreur de phase ou le délai temporel mesuré par deux microphones varie de manière linéaire avec le nombre de Helmholtz ka . Puisque l'onde n'a plus un chemin direct d'un microphone se trouvant devant la sphère rigide à un microphone de derrière, elle doit parcourir une plus grande distance, soit la demi-circonférence. Ils comparent l'erreur de phase mesurée entre deux microphones séparés par une distance égale au diamètre d'une sphère pour les cas avec ou sans la sphère

rigide. En reprenant la formulation de la pression acoustique mesurée sur la surface d'une sphère rigide et celle mesurée en un même point sans la sphère, l'équivalence

$$ka_r = \frac{2}{3}ka_t \quad (1.1)$$

est obtenue, où k est le nombre d'onde, a_r et a_t sont les diamètres d'une antenne rigide et d'une antenne ouverte théorique vide. Selon cette relation, le nombre d'Helmholtz ka d'une sphère rigide est équivalent au $\frac{2}{3}$ de celui d'une sphère théorique ouverte (Jung & al., 2022). Le nombre d'Helmholtz est un nombre adimensionné représentant le rapport entre la longueur d'onde caractéristique de l'antenne et celle de la source.

En 2008, Meyer & Elko proposent une méthode pour améliorer les performances d'un AFF en réduisant les effets du repliement spatial (Meyer & Elko, 2008). Pour les AFF du domaine des harmoniques sphériques tel que le SHB, la qualité de l'image pour les hautes fréquences dépend de l'ordre des harmoniques. Une solution pour augmenter les performances pour les hautes fréquences est d'augmenter le nombre de microphones. Puisque le nombre de microphones requis est $(N + 1)^2$ pour atteindre un ordre élevé, cette solution peut être onéreuse. La méthode proposée est de tirer avantage de l'effet de diffraction causée par une antenne sphérique de microphones rigide. Le phénomène de diffraction de la sphère rigide crée une zone de réflexion devant l'antenne caractérisée par une augmentation d'amplitude et une zone d'ombre derrière où l'amplitude est diminuée. En prenant compte du phénomène de diffraction d'une sphère rigide, la directivité de l'AFF est améliorée.

En 2009, Gillett fait l'étude de l'influence de la diffraction sur la localisation de sources acoustique par antennes de microphones sur une demi-sphère rigide (Gillett, 2009). L'étude était particulièrement orientée pour des antennes de microphones installés sur un casque sphérique pour la localisation de sources acoustiques en milieu de combat. Il compare une antenne rigide à une antenne théorique parfaitement transparente en condition de champ libre.

Les résultats obtenus avec l'antenne rigide en prenant en compte l'effet de diffraction sont supérieurs à ceux de l'antenne théorique répliquant le champ libre.

En 2014, Wiederhold & al. comparent différentes configurations de microphones avec une sphère rigide pour le domaine de l'intensimétrie acoustique (Wiederhold & al., 2014). Ils comparent différents nombres de paires de microphones et agencement géométrique pour le cas d'une sphère rigide et celui d'une sphère théorique parfaitement transparente. Pour la sphère rigide, la diffraction est prise en compte lors des calculs. Pour la sphère théorique parfaitement transparente, seuls le câblage et les supports de microphones causent la diffraction et celle-ci est négligée. Les résultats obtenus avec la sphère rigide en prenant en compte l'effet de diffraction ont généré moins d'erreurs que celle d'une sphère parfaitement transparente pour la mesure de l'intensité acoustique et sa direction.

En 2019, Farahikia réalise une étude sur l'effet de diffraction sur la performance de réseaux de microphones linéaires différentiels embarqué sur un objet rigide (Farahikia, 2018). Les réseaux de microphones linéaires différentiels sont utilisés pour des applications en audio directionnelles. Un modèle numérique par la méthode des éléments finis est réalisé pour obtenir des signaux de microphones sur une sphère rigide. La validation expérimentale est effectuée en utilisant une boule de quilles avec un réseau linéaire de chaque côté de la boule et une source acoustique devant. Les résultats montrent que la géométrie de l'objet diffractant sur lequel ce type de réseau de microphones est installé peut avoir un impact sur leur performance.

En 2022, Lehmann & al. proposent une méthode de formation de faisceaux adaptée pour des conditions de propagation avec perturbations telles que les effets de réflexion, la diffraction et les zones d'ombre créées par un objet entre la source et l'antenne de microphone (Lehmann & al., 2022). Le formalisme de plusieurs méthodes de formation de faisceaux repose sur la fonction de Green de propagation en champ libre. En milieu de travail industriel, cette hypothèse peut s'avérer fautive et les perturbations du milieu de propagation peuvent influencer les résultats de l'AFF. La méthode proposée consiste à obtenir des fonctions de Green améliorées qui prennent en compte les effets des perturbations du champ acoustique. Les

fonctions de Green améliorées sont obtenues à l'aide de fonction de transfert obtenue avec un modèle numérique par la méthode des éléments de frontières. L'influence des effets des perturbations du champ acoustique sur les performances de l'AFF est évaluée avec plusieurs critères tels que la taille du lobe principal, le niveau des lobes secondaires et le niveau du lobe principal. La validation expérimentale est effectuée avec une antenne plane circulaire stationnaire et rotative. Les résultats montrent que l'influence des perturbations du champ acoustique sur l'image acoustique est l'augmentation de la taille du lobe principal et du niveau des lobes secondaires. Une hypothèse est qu'une portion des microphones sur l'antenne se trouvent dans une zone d'ombre. Le signal mesuré par ces microphones subit un retard temporel dans le délai de propagation qui équivaut à une source plus éloignée que le cas réel. Ces erreurs sur les délais temporels pourraient augmenter la taille du lobe principal et réduire le niveau du lobe principal.

1.6 Synthèse critique

Cette revue de littérature a permis d'identifier différentes conceptions d'antennes ouvertes et rigides réalisées dans le passé. Pour les antennes ouvertes, deux conceptions redondantes sont celles des structures filaires et celles avec tiges. Les structures d'antennes filaires avec câbles permettent de réduire au minimum la dimension de l'antenne. En revanche, il peut être difficile d'assurer la direction radiale des microphones. Il est intéressant de noter que Peltonen (Peltonen & al., 2021) et Gover (Gover & al., 2003) ont mentionné vouloir réduire la dimension des composantes du support sphérique pour réduire l'influence des effets de diffraction, mais ils n'ont pas vérifié si ces effets sont négligeables. Pour assurer les blocages en rotation, d'autres points de fixation peuvent être nécessaires. Aussi, une phase de développement d'AFF peut nécessiter une utilisation à répétition et une structure avec câbles tendus peut s'avérer fragile. Les concepts d'antenne avec tiges sont généralement des structures plus rigides que les structures filaires. Cependant, l'installation des tiges à répétition peut causer une défaillance des tiges. Les concepts d'antenne rigide sont plus simples, la conception générale est une coque sphérique en deux hémisphères.

La littérature montre que plusieurs géométries d'antennes ont été utilisées pour la localisation de sources avec un AFF. La performance d'un AFF dépend de l'échantillonnage spatial du champ acoustique. La majorité des concepts d'antenne sont pour une géométrie fixe. Lors du développement d'un AFF, les performances de plusieurs géométries doivent être étudiées et donc il faudrait fabriquer un grand nombre d'antennes. Seul le concept d'antenne avec tiges réalisé par Padois & al. en 2017 permet d'installer un nombre variable de microphones selon différentes géométries. Cependant, ce concept ne permet que 252 positions et les tiges en plastique avec rainures avaient tendance à briser dans l'alésage fileté du noyau sphérique. Les antennes rigides sont généralement utilisées avec un AFF du domaine des harmoniques sphériques tel que le SHB. La performance du SHB dépend de l'orthogonalité des harmoniques sphériques et les microphones doivent être répartis selon une géométrie spécifique. Ainsi, une antenne modulaire rigide ne serait pas adéquate.

Une conception d'antenne de microphones prévue pour une phase de développement d'un AFF devrait :

- Être une antenne ouverte
- Être assez résistante pour une utilisation à répétition
- Permettre l'installation d'un grand nombre de microphones
- Permettre l'installation des microphones selon différentes géométries
- Permettre de faire varier le rayon de l'antenne

Dans la littérature, l'influence de l'effet de diffraction a été traitée pour des applications d'intensimétrie acoustique. Parkins & al. ont montré que la longueur d'onde caractéristique d'une antenne d'intensimétrie rigide est 33% plus grande que celle d'une antenne théorique parfaitement transparente. Dans le domaine de l'imagerie acoustique, peu de littérature montre l'influence de l'effet de diffraction sur les performances d'un AFF. Lehmann & al. ont fait l'étude de l'effet de diffraction causée par un objet entre la source et une antenne plane. Ils ont évalué les effets sur les images acoustiques avec des critères d'images objectifs, soit la taille du lobe principal, le niveau des lobes secondaires et le niveau du lobe principal. Cependant,

cette étude ne s'applique pas aux effets causés par l'antenne elle-même et n'a pas été réalisée avec des antennes sphériques. L'influence des effets de diffraction d'une antenne sphérique sur les images acoustiques n'a pas été traitée auparavant dans la littérature. La diffraction acoustique causée par les antennes rigides est connue et le SHB est généralement l'AFF choisi pour prendre en compte ce phénomène. Cependant, une antenne rigide a été utilisée avec le CBF, un AFF qui ne prend pas en compte la diffraction (Rouard & al. 2022). Pour les hautes fréquences (3000 Hz), le lobe principal des images acoustiques obtenues avec l'antenne rigide et le CBF était plus petit que celles obtenues avec l'antenne rigide et le SHB. L'influence des effets de diffraction d'une antenne rigide sur les images acoustiques obtenue avec le CBF doit être évaluée. Pour le cas d'une simple sphère, la solution analytique de la pression acoustique mesurée à sa surface comprenant à la fois la partie du champ incident et diffracté est connue (Rafaely, 2019). Pour le cas d'une structure complexe telle qu'une antenne ouverte à structure filaire ou avec tiges, la solution analytique n'est pas si triviale. Pour valider la condition de transparence d'une antenne ouverte, un modèle numérique permettant de simuler l'interaction d'une onde avec la structure de l'antenne est nécessaire.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET STRUCTURE DU DOCUMENT

2.1 Objectifs

Les deux objectifs identifiés sont :

1. Concevoir et fabriquer deux antennes sphériques de microphones ouvertes (filaire et avec tiges) modulaires permettant l'installation d'un grand nombre de microphones selon plusieurs géométries.
2. Étudier l'influence des effets de diffraction causés par l'interaction d'une onde acoustique avec une antenne ouverte ou rigide sur les images acoustiques obtenues avec un AFF du type CBF.

2.2 Structure du document

2.2.1 Chapitre 3: Conception d'antennes sphériques de microphones

Le CHAPITRE 3 présente la méthodologie de conception d'antennes sphériques de microphones. La section 3.1 présente la méthodologie de conception de deux antennes ouvertes modulaires destinées aux mesures dans le cadre du développement d'AFF. Une première antenne de microphone ouverte à structure filaire permettant 540 différentes positions de microphones a été conçue et fabriquée par impression 3D. Une deuxième antenne ouverte avec tiges et noyau sphérique permettant 450 positions a été fabriquée par usinage CNC en aluminium. La section 0 présente la méthodologie de conception des antennes utilisées lors des mesures en chambre anéchoïque réalisée dans le cadre de l'étude de l'influence de l'effet de diffraction. Les antennes modulaires présentées à la section 3.1 n'ont pas été utilisées dans le cadre de l'étude sur l'influence de la diffraction puisque ce sont des antennes de travail destiné au développement d'algorithme. Des prototypes d'antennes à géométrie fixe ont plutôt été

considérés. Deux antennes de microphones ouvertes à structure filaire et rigides ont été fabriquées par impression 3D. Des géométries de 36 et 50 microphones couramment utilisées dans la littérature ont été choisies (Figure 1.36) (Figure 1.37).

2.2.2 Chapitre 4: Influence de l'effet de diffraction sur une image acoustique obtenue avec une antenne de microphones sphérique par AFF

Le CHAPITRE 4 est un article soumis pour publication dans le *Journal of Sound and Vibration* intitulé « *Influence of the scattering effect on acoustic images obtained with a spherical microphone array and beamforming algorithms* ». L'article présente une étude numérique sur l'effet de diffraction pour des antennes rigides et ouvertes. Trois types d'antennes sont étudiés, soit une antenne rigide, une antenne ouverte à structure filaire et une antenne ouverte avec tiges. Deux géométries d'antennes sont considérées, soit 36 et 50 microphones. Un modèle numérique par la méthode des éléments finis permet de simuler l'interaction d'une onde acoustique avec la structure des antennes et ainsi d'obtenir les signaux de microphones numériques pour générer les images acoustiques. Les images acoustiques obtenues avec les trois antennes sont comparées à celle d'une antenne théorique parfaitement transparente, L'analyse est faite sur la base de trois critères de qualité d'image objectifs, soit la taille du lobe principal, le niveau des lobes secondaires et le niveau du lobe principal. Seulement les résultats pour la géométrie de 36 microphones sont présentés dans le corps de l'article. Les résultats pour la géométrie de 50 microphones sont présentés dans l'ANNEXE III.

2.2.3 Annexes

L'ANNEXE I présente des images du modèle d'éléments fini permettant de simuler l'interaction entre une onde acoustique et la structure d'une antenne ouverte ou rigide. Le domaine de propagation, la couche absorbante et les différents maillages sont présentés. L'ANNEXE II présente des images prises lors des mesures en chambre anéchoïque pour la validation du modèle d'élément finis. Des images de la source expérimentale, des antennes ouverte et rigide de 36 microphones sont présentées. L'ANNEXE III présente les figures en lien avec les antennes de 50 microphones mentionnées dans l'article intitulé « *Influence of the*

scattering effect on acoustic images obtained with a spherical microphone array and beamforming algorithms ». Les images des différentes antennes, la vérification du modèle avec les antennes de 50 microphones et les comparaisons des résultats numériques sont présentées.

CHAPITRE 3

CONCEPTION D'ANTENNES SPHÉRIQUES DE MICROPHONES

Ce chapitre présente la méthodologie de conception d'antennes sphériques de microphones. La section 3.1 présente la conception et fabrication de deux antennes sphériques ouvertes modulaires et la section 0 la conception d'antennes ouvertes et rigides de 36 et 50 microphones.

3.1 Antennes ouvertes modulaires

Les performances d'un SIA dépendent du type d'AFF, du type d'antenne, du nombre de microphones et de la géométrie selon laquelle les microphones sont dispersés sur l'antenne. Une antenne modulaire permet d'installer un nombre variable de microphones selon plusieurs géométries. Au total, deux antennes sphériques ouvertes modulaires ont été conçues et fabriquées.

3.1.1 Besoins et contraintes de conception

Les besoins de conception étaient :

- Un nombre variable de microphones peut être installé
- Les microphones peuvent être installés selon différentes géométries
- Le rayon de l'antenne peut varier

Les contraintes de conception étaient :

- Doit être adaptée pour des microphones ¼" de diamètre
- Doit être adaptée pour deux types de connecteurs (coaxiale et coudé)

3.1.2 Antenne ouverte modulaire à structure filaire

Ce concept est basé sur les structures d'antenne filaire à câbles tendus. Pour augmenter la rigidité, la structure est faite en plastique et les nœuds sont reliés par des tiges (Figure 3.1). Pour permettre un nombre variable de microphones et une multitude de géométries, le diamètre de la sphère est fixé à 40 cm et sa surface est divisée en 540 positions. Les coordonnées possibles sont de $-180 \leq \varphi < 180$ en azimut et $-70 \leq \theta \leq 70$ en élévation avec un espacement uniforme et unilatéral de 10 degrés (Figure 3.1). Les pôles supérieur et inférieur sont délibérément non affectés pour permettre l'installation du trépied et d'une caméra. Les microphones sont maintenus en place par serrage avec du ruban de téflon. Le câblage est dirigé vers l'intérieur de la sphère et ensuite aux orifices près du pôle inférieur. La sphère est conçue en deux parties pour faciliter l'installation des microphones par l'intérieur. Les deux hémisphères sont orientés avec des goupilles et maintenus en place avec un assemblage boulonné et une tige filetée et installée sur un trépied. L'avantage de ce concept est qu'il permet un grand nombre de positions réparties uniformément en azimut et en élévation. Les deux hémisphères ont été fabriqués en acrylonitrile butadiène styrène (ABS) par impression 3D (Figure 3.2). L'ABS a été choisi puisqu'il offre une bonne résistance aux impacts, rigidité et est plus léger que les autres matériaux communs pour la fabrication additive avec imprimantes à dépôt de matière (Durga Rajesh & al., 2023). Chaque hémisphère a été imprimé en 4 morceaux, lesquels ont été assemblés et collés (Figure 3.2).

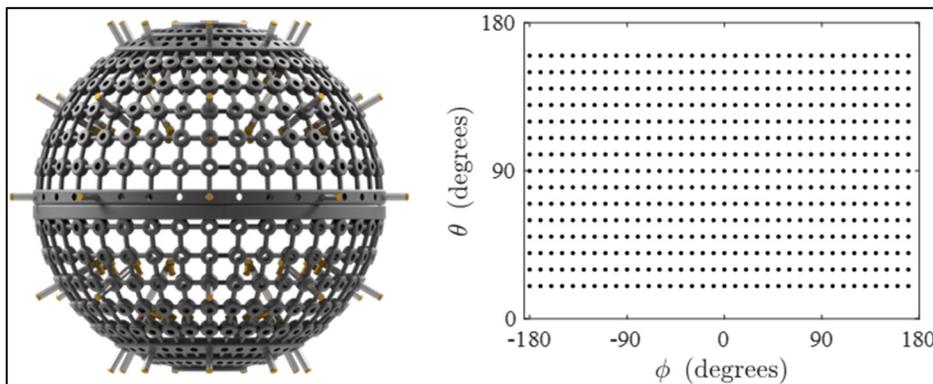


Figure 3.1 Antenne sphérique ouverte modulaire à structure filaire de 40 cm de diamètre et grille des 540 positions possibles

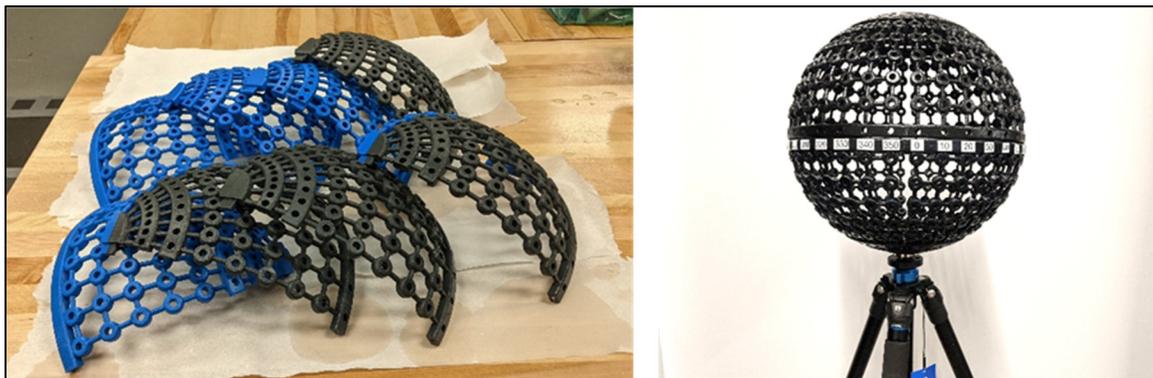


Figure 3.2 Impression des deux hémisphères en 4 morceaux par impression 3D en ABS et antenne ouverte modulaire à structure filaire assemblée

3.1.3 Antenne ouverte modulaire avec tiges

Ce concept est fait à base d'un noyau sphérique de 15 cm de diamètre dans laquelle des tiges de support de microphone sont installées (Figure 3.3). Les tiges (Figure 3.5) peuvent être fabriquées avec différentes longueurs, ce qui permet de faire varier le rayon. Les tiges actuelles permettent d'obtenir un diamètre de 40 cm. Une rainure à section variable dans les tiges permet d'installer les deux types de connecteurs (coudé, coaxiale). Le noyau central (Figure 3.4) a été usiné en aluminium 6061-T6. Ce matériau a été choisi puisqu'il offre une bonne résistance et est léger. Les tiges de support sont fabriquées en aluminium et les bagues de serrage en plastique. Le plastique a été choisi pour les bagues puisqu'elles sont en contact avec les microphones. Au total, le concept permet 450 positions différentes (Figure 3.3) pour installer une tige support de microphone. Pour augmenter le nombre de positions près des pôles avec un espacement uniforme en azimut ainsi qu'en élévation, les coordonnées sont dispersées périodiquement.

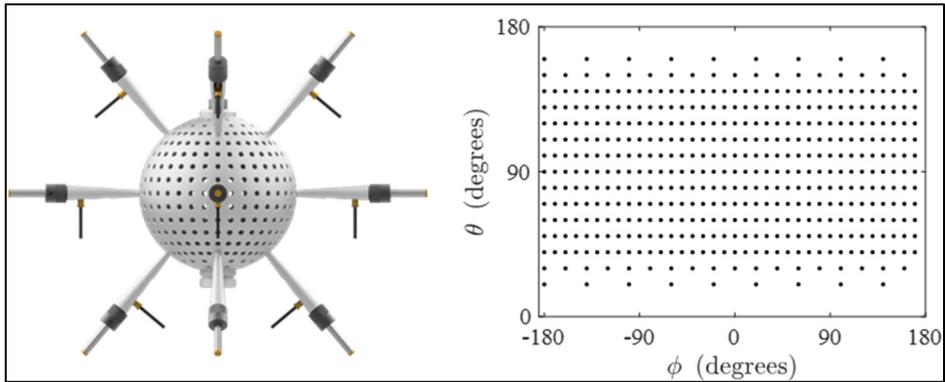


Figure 3.3 Antenne sphérique ouverte modulaire à tiges de 40 cm de diamètre et grille des 450 positions possible



Figure 3.4 Usinage du noyau sphérique en aluminium et antenne ouverte modulaire avec tiges assemblées



Figure 3.5 Tige support de microphone

3.2 Antennes de microphones dédiées à l'étude de l'influence de diffraction

Un modèle d'éléments finis a été développé pour étudier l'influence des effets de diffraction. Pour valider le modèle, les résultats numériques ont été comparés à des résultats expérimentaux obtenus avec des antennes ouvertes et rigides de 36 et 50 microphones. Le choix des géométries est justifié dans la section 4.4.1.

3.2.1 Besoins et contraintes de conception

Les besoins de conception étaient :

- L'installation des microphones est simple
- La fabrication des antennes est simple, peu coûteuse et rapide
- L'antenne rigide permet la gestion du câblage par un seul orifice

Les contraintes de conception étaient :

- Doit être adaptée pour des microphones ¼"
- Doit être adaptée pour deux types de connecteurs (coaxiale et coudé)
- Doit permettre d'installer soit 36 ou 50 microphones (Figure 1.36) (Figure 1.37)

3.2.2 Antennes ouvertes à structure filaire

L'objectif de conception de cette antenne ouverte est de réduire au minimum l'empreinte de la structure tout en étant assez résistant pour favoriser une utilisation répétée. Une structure filaire a été choisie pour réduire au minimum la dimension de l'antenne. La structure (Figure 3.6) est faite de tiges de 5 mm de diamètre et les microphones sont maintenus par serrage dans des bagues. Un support à la base de l'antenne permet de l'installer sur le trépied. Le câblage peut être dirigé vers un seul ou plusieurs orifices. Les antennes ouvertes de 36 et 50 microphones ont été fabriquées par impression 3D en ABS en un seul morceau (Figure 3.6). Les deux antennes ont été imprimées en 43 heures avec environ 300 g de plastique chacune.

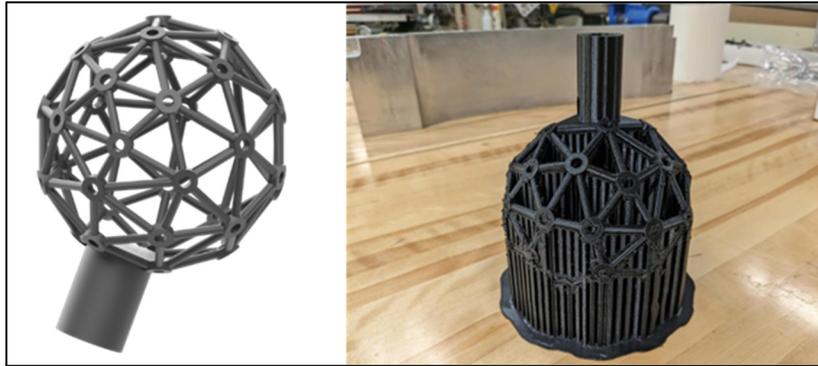


Figure 3.6 Rendu numérique de l'antenne ouverte à structure filaire de 36 microphones lors de la phase de conception et à la fin de l'impression 3D avec les supports d'impression

3.2.3 Antenne rigide

Pour l'antenne rigide, l'objectif de conception était de permettre une installation simple des microphones et la gestion du câblage par un seul orifice. Le concept d'antenne rigide (Figure3.7) est une sphère en deux parties permettant d'installer les microphones par l'intérieur. Les microphones sont maintenus affleurants à la surface extérieure de la sphère par serrage. La sphère creuse permet de dissimuler le câblage à l'intérieur. Un orifice dans lequel un mât tubulaire peut être inséré permet de diriger le câblage à l'intérieur de l'antenne. Le mât tubulaire est un support permettant d'installer l'antenne sur le trépied. Les antennes rigides de 36 et 50 microphones ont été fabriquées par impression 3D en ABS en deux morceaux (Figure3.7). Chaque antenne a été imprimée en 75 heures avec environ 850 g de plastique.

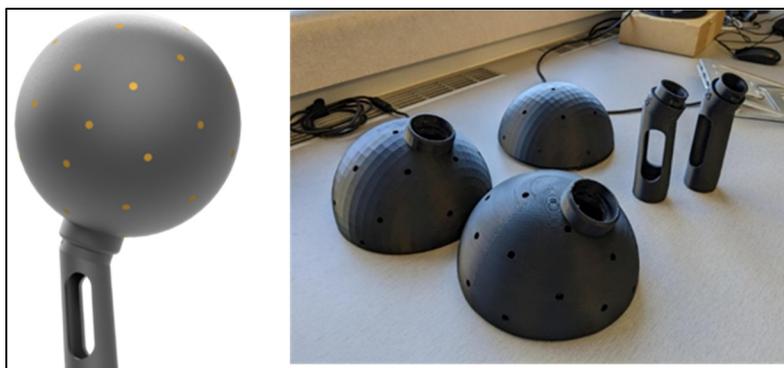


Figure3.7 Rendu numérique de l'antenne rigide de 36 microphones lors de la phase de conception et après l'impression 3D en trois pièces

CHAPITRE 4

INFLUENCE OF THE SCATTERING EFFECT ON ACOUSTIC IMAGE OBTAINED WITH A SPHERICAL MICROPHONE ARRAY AND BEAMFORMING ALGORITHMS

Julien St-Jacques^a, Kevin Rouard^a, Franck Sgard^b, Hugues Néliste^b, Alain Berry^c, Nicolas Quaegebeur^c, François Grondin^c, Loic Boileau^c, Olivier Doutres^a and Thomas Padois^b.

^aÉcole de technologie supérieure (ÉTS), 1100 Rue Notre Dame O.,
Montréal, QC, H3C 1K3, Canada.

^bInstitut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST),
505 Boulevard de Maisonneuve O., Montréal, QC, H3A 3C2, Canada.

^cUniversité de Sherbrooke (UdeS), 2500 Boulevard de l'université,
Sherbrooke, QC, J1K 2R1, Canada.

Article soumis pour publication, août 2023

4.1 Abstract

A spherical microphone array (SMA) is a valuable tool for characterizing an acoustic source in terms of its spatial location and acoustic level using beamforming algorithms. When the microphones are flush mounted onto a spherical support, the array is considered as rigid and can cause the scattering of incident acoustic waves, which may induce frequency dependent errors in the time delays between the microphone pairs. For an open SMA, the microphones are generally mounted on a wire frame structure or on thin rods and the scattering effect is neglected. The conventional beamforming in the frequency domain (CBF) is commonly used with open SMAs because it makes the assumption of free field propagation. However, the acoustic transparency condition of open SMA has not been explicitly investigated. Moreover, the CBF is rarely used with a rigid SMA due the scattering effect. In this study, the influence of the scattering effect on acoustic images is investigated numerically. The acoustic images obtained numerically with the CBF using a rigid SMA and two different open SMAs are compared to an idealized empty SMA (no structure or support). Three quality criteria are used to compare the acoustic images. Although, the CBF is not commonly used with a rigid SMA, the mainlobe surface is smaller than the mainlobe obtained with an idealized empty SMA.

Also, the influence of the scattering effect of two open SMA design was found to be minimal, and the acoustic transparency condition was validated.

4.2 Introduction

Long term exposure to noise in a workplace can cause hearing loss and psychosocial disorder such as stress and anxiety (Pretzsh & al., 2021). To mitigate workers' exposure to high noise levels, the noise sources can be eliminated, substituted, or modified. Actions applied directly at the source are considered more effective (CCOH, 2022). To do so efficiently, the source location and acoustic level should ideally be known. When there are multiple sources in the same environment, the localization can be achieved with acoustic imaging using a microphone array and beamforming. If a planar array is used, the acoustic sources have to be in front of the array such as for the case of pass-by or wind-tunnel measurements (Padois & Berry, 2017a) (Sijtsma, 2008). In a workplace, the sound comes from all the directions and a spherical microphone array (SMA) is preferred since planar arrays are not suitable to isolate sources that are in front from those behind the array (Chiariotti & al., 2019).

SMA are referred to as rigid when the microphones are flush-mounted to the surface of a closed sphere (Jacobsen & al., 2011) (Tiana-Roig & al., 2014). This type of SMA is commonly used since it is easier to manufacture, and its closed rigid surface allows for a sturdier structure which is practical for in situ applications. The scattering of the acoustic field around the rigid sphere may involve frequency dependent errors in the time delays measured by the microphones in the shadowed zone (Heilman & al., 2008). The scattering of the acoustic field can be accounted for using the spherical harmonic beamforming (SHB) algorithm in the frequency domain (Petersen, 2004). The SHB efficiency is limited by the spherical harmonics order which requires numerous microphones to reach higher order levels (Battista & al., 2018). In addition, the microphones must be located along a specific quadrature on the sphere to achieve the orthogonality of the spherical harmonics (Haddad & Hald, 2008).

When the microphones are held on a wire frame structure (Legg & Bradely, 2013) (Merimaa, 2002) or on thin rods (Gover & al., 2003) (Padois & al., 2017), the SMA is referred to as open. With open SMA, the conventional beamforming in the frequency domain (CBF) is often used since it is known to be a robust algorithm (Padois & al., 2021). The CBF formulation is based on free field propagation and does not account for the scattering of the acoustic field by the SMA (Padois & al., 2023). The CBF performance depends on the SMA's radius and the source frequency content and usually requires less microphones than the SHB. At low frequencies, a larger mainlobe width is expected, while at high frequencies, significant side lobe levels are anticipated (Cigada & al., 2008). For open SMAs, the scattering effects are usually neglected since the SMA dimensions are small when compared to the source wavelength, although it has not been explicitly validated.

In this paper, the scattering effect induced by a SMA on acoustic images of a single point source in free field obtained with the CBF is investigated numerically. The acoustic images obtained with the CBF and several types of SMA are compared. The images are compared using three quality criteria, i.e., the mainlobe width and level and side lobe level. A Finite Element (FE) model is used to simulate the propagation of an acoustic wave emitted from a point source in free field to obtain the microphone signals. The model is first verified using an analytical formulation of a rigid SMA to compute the acoustic pressure on its surface and then validated with experimental measurements. The theoretical background is introduced in section 4.3. Microphone array designs, numerical simulation parameters, experimental set-up and image quality criteria are described in section 4.4. In section 4.5, the results are presented and the influence of scattering effect on acoustic images is discussed.

4.3 Theoretical background

4.3.1 Conventional beamforming

Using a SMA with Q microphones, a source is localized by scanning a spherical grid with L points characterized by their elevation θ_l and azimuthal φ_l coordinates with $l = 1, \dots, L$. In the frequency domain, the acoustic image $\mathbf{A}(\omega)$ is given by

$$\mathbf{A}(\omega) = \mathbf{W}^*(\omega)\mathbf{C}(\omega)\mathbf{W}(\omega), \quad (4.1)$$

where ω is the angular frequency, $\mathbf{W}(\omega)$ is the steering matrix, $\mathbf{C}(\omega)$ is the cross-spectral matrix of the acoustic pressure and $(\cdot)^*$ is the complex conjugate transpose operator also referred to as the Hermitian operator (Leclere & al., 2016). Matrix and vector terms are denoted in bold. For the CBF, which does not take into account the scattering effects caused by the SMA body, the matrix $\mathbf{W}(\omega)$ and $\mathbf{C}(\omega)$ are of dimensions $[Q \times L]$ and $[Q \times Q]$ respectively. The cross-spectral matrix $\mathbf{C}(\omega)$ is obtained with the product of the microphone signals vector $\mathbf{p}(\omega)$ and its complex conjugate transpose

$$\mathbf{C}(\omega) = \mathbf{p}(\omega)\mathbf{p}^*(\omega), \quad (4.2)$$

where $\mathbf{p}(\omega)$ is of dimension $[Q \times 1]$. The steering matrix $\mathbf{W}(\omega)$ can be expressed as

$$\mathbf{W}(\omega) = \frac{\mathbf{g}(\omega)}{\sqrt{Q}\mathbf{g}(\omega)\mathbf{g}^*(\omega)}. \quad (4.3)$$

The element $g_{lq}(\omega)$ from the steering matrix given by the Green's free field function between a grid point l and a microphone q is given by

$$g_{lq} = \frac{1}{r_{lq}} e^{\frac{-i\omega r_{lq}}{c_0}}, \quad (4.4)$$

where c_0 is the speed of sound, i is the imaginary number, r_{lq} is the distance between a grid point l and a microphone q (Padois et al., 2021).

4.3.2 Acoustic pressure on a rigid sphere surface

The analytical formulation of the acoustic pressure on a rigid sphere surface is used to verify the FE model (Rafaely, 2019). For the case of a rigid sphere of radius r_a , the acoustic pressure $p(k, r_a)$ measured on its surface can be obtained with

$$p(k, r_a) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n b_n(kr_a) Y_n^m(\theta, \varphi) [Y_n^m(\theta_k, \varphi_k)]^*, \quad (4.5)$$

where k is the wave number, (θ_k, φ_k) is the source direction of arrival and $Y_n^m(\theta, \varphi)$ is an element of the spherical harmonic matrix given by the spherical harmonic function

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) e^{im\varphi}. \quad (4.6)$$

The terms $n = 0, \dots, N$ is the degree, $m = -n, \dots, n$ is the mode index and $P_n^m(\cos \theta)$ is the associated Legendre polynomial function (Rouard & al., 2022). The scattering of the rigid sphere is accounted for with the term $b_n(kr_a)$, which is given by

$$b_n(kr_a) = 4\pi(-i)kh_n^{(2)}(kr_s) \left[j_n(kr_a) - \frac{j_n'(kr_a)}{h_n^{(2)'}(kr_a)} h_n^{(2)}(kr_a) \right]. \quad (4.7)$$

The $(.)'$ operator is the first derivative with respect to r , r_s is the distance between the source and the center of the sphere, j_n is the spherical Bessel function of first kind and $h_n^{(2)}$ is the spherical Hankel function of second kind.

4.4 Methodology

The scattering effect on the acoustic image is investigated numerically with a FE model. Four types of SMAs are investigated namely:

- an idealized empty SMA which is acoustically transparent,
- a rigid SMA which can cause the scattering of incident acoustic waves (Jacobsen & al., 2011) (Tiana-Roig & al., 2014) (Petersen, 2004),
- a wire frame open SMA used in the literature (Heilman & al., 2008) (Legg & Bradley, 2013) (Merimaa, 2002),
- an open with rods SMA used in the literature (Padois & al., 2017) (Noel & al., 2006)

For each SMA, the acoustic images are obtained using the CBF. Criteria are used to assess the quality of the acoustic images and therefore the influence of the scattering effect.

4.4.1 Microphone array design

An empty domain is used as an idealized reference for an acoustically transparent SMA (Figure 4.1). Three SMA were designed, i.e., a rigid (Figure 4.1), an open wire frame (called open-wrf) (Figure 4.1) and an open with rods (called open-rod) (Figure 4.1). The open SMAs were designed in an effort to reduce their acoustic footprint and they are used as a representative practical cases of acoustically transparent SMAs. For each array, two microphone geometries are considered 36 and 50 microphones and are based on commercial SMAs commonly used in the literature (Chu & al., 2019) (Moreno, 2008) (Figure 4.2). The radius for each SMA is 9.75 cm.

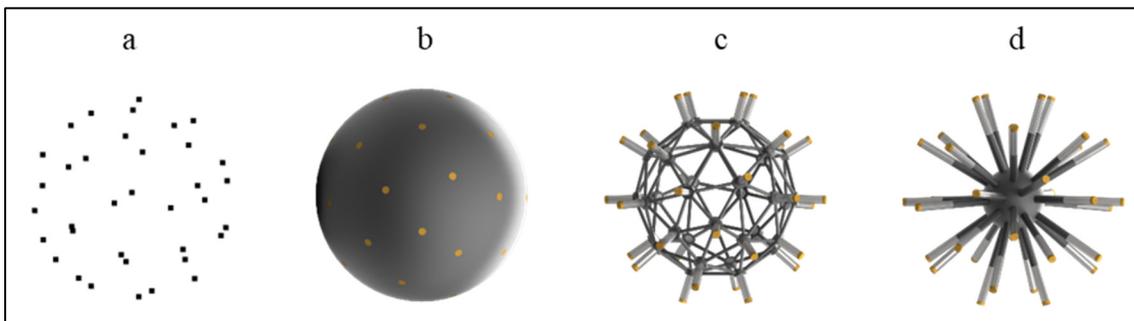


Figure 4.1 Rendered images of the 36-microphone SMA design for the a) empty SMA b) rigid SMA c) open wire frame SMA and d) open with rods SMA

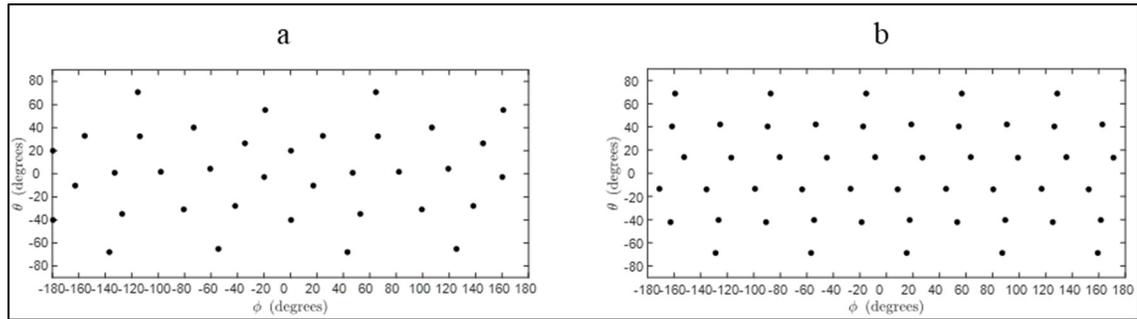


Figure 4.2 Azimuthal and elevation coordinates for the a) 36-microphone geometry and b) 50-microphone geometry

4.4.2 Numerical simulation

A FE model has been developed with COMSOL Multiphysics® 6.1 to simulate the propagation in free field of an acoustic wave emitted from a point source to obtain the microphone signals (see ANNEXE I). The propagation domain is a sphere of 1 m in diameter. The outer layer (0.1 m) of the propagation domain is a perfectly match layer (PML) to ensure there is no reflection. The SMA is positioned at the centre of the propagation domain. To simulate the propagation of a spherical wave coming from a point source located at 1 m in front of the SMA ($\phi_s = 0^\circ$, $\theta_s = 90^\circ$), a background pressure field is used. The reference amplitude of the source is 10 Pa measured at 1 m from the centre of the SMA. The simulation is done for frequencies ranging from 50 to 4000 Hz using a 1/12 octave band step and the results are integrated into 1/3 octave bands. The body of each SMA is considered acoustically rigid. To achieve this condition, the model of the studied SMA is subtracted from the propagation domain using a Boolean operation. The result is a spherical air domain of density $\rho_0 = 1.204 \text{ kg/m}^3$ and sound speed $c_0 = 343 \text{ m/s}$ with an empty core of the SMA footprint. The acoustic domain is meshed using 6 tetrahedral elements per wavelength. The PML is meshed using 8 structured prismatic elements. Figure 4.3 shows an example of FE meshes for the 36-microphone geometry SMAs.

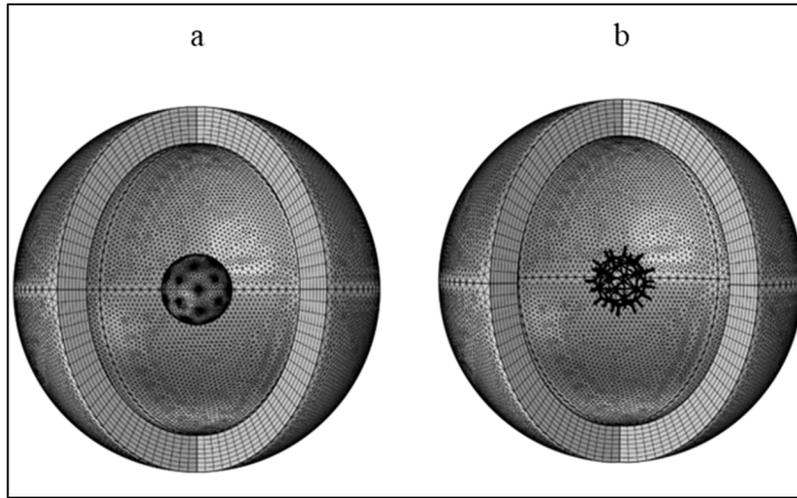


Figure 4.3 FE model of the spherical propagation domain of 1 m in diameter with the a) rigid 36-microphone SMA and the b) open wire frame 36-microphone SMA

4.4.3 Experimental set-up

An experimental set-up was implemented to validate the FE model (see ANNEXE II). The tests were done in a hemi-anechoic chamber with dimensions 5.56 m x 6.8 m x 2.16 m. Fibreglass mats were placed on the ground surface to attenuate reflections. Throughout the tests, the average temperature was 22.3 °C. An omnidirectional source (Siemens LMS Qsource Mid High Frequency Volume Source) was used to generate a white noise ranging from 100 Hz to 4000 Hz. The chosen source has an internal sensor which measures the volume acceleration in order to monitor the source level. The rigid and open wire frame SMA, which were 3D printed for both the 36 and 50-microphone geometries, were placed at 1 m in front of the source. Figure 4.4 shows pictures of both the rigid and open 36-microphone SMA. The microphones used were 1/4 inch omnidirectional microphone (B&K type 4957) and were calibrated at 1 kHz for 94 dB. The measurements were done using a 72-channel acquisition system (Siemens Simcenter SCADAS Mobile) with a sampling frequency of 51200 Hz.



Figure 4.4 Picture of the a) rigid 36-microphone SMA and the b) open wire frame 36-microphone SMA during the experimental measurements

4.4.4 Acoustic image quality criteria

The acoustic images obtained numerically and experimentally using the CBF are compared using three image quality criteria, i.e, the Ellipse Area Ratio (EAR) at -3 dB, the Mainlobe-to-Sidelobe Ratio (MSR) and the Mainlobe Level Difference (MLD). The images are computed using the CBF with a scan grid composed of 180 by 180 scan points at a distance of 1 m. The EAR criterion is used to characterize the size of the mainlobe. Using the peak value of the acoustic image as a reference, an ellipse can be drawn at the threshold value of -3 dB using the covariance method (Padois & al., 2021). The area is then obtained by multiplying the radii of the ellipse. The results are normalized by the largest possible radii of the acoustic image which are 90° by 180° (Rouard & al., 2022). The ellipse area is presented as a percentage of the acoustic image. For an EAR value higher than the 30 % threshold, the source is considered not localized. For the case where two sources were to be localized, an EAR value higher than 30% would represent a large portion of the image, thus making the localization rather difficult. Ideally, the ellipse area should be small ($EAR \leq 30\%$) to allow for a better resolution and easier source localization.

The MSR is commonly used as a quality criterion in acoustic imaging. The acoustic image of a point source is characterized by its mainlobe, which can be surrounded by sidelobes. Sidelobes are spurious sources due to the SMA geometry. Ideally, the sidelobes level should

be low when compared to the mainlobe level. The MSR is calculated with the level difference between the value of the mainlobe and the value of the highest sidelobe (Chiariotti & al., 2019). When the MSR is below the -6 dB threshold value, it is considered acceptable for a clean acoustic image.

The MLD criterion is used to assess the influence of the scattering effect on the mainlobe level. For the FE model, the mainlobe level obtained with the empty SMA is considered as the reference value. The MLD is provided by the difference between this reference value and the mainlobe level obtained with a rigid or open SMA. Since it is not possible to replicate the empty SMA in experimental conditions, the reference value is provided by the source internal sensor which measures the source volume acceleration.

4.5 Results

4.5.1 Evaluation of the FE model

In this section, the FE model is verified against the analytical formulation and experimentally validated. For the verification of the FE model in section 4.5.1.1, the acoustic pressure on the surface of a sphere obtained numerically is compared to the acoustic pressure obtained with the analytical formulation ((4.5)). For the validation of the FE model in section, the acoustic images generated numerically from the FE model are compared to those obtained from the experimental measurements. The images are compared using the three image quality criteria (EAR, MSR and MLD).

4.5.1.1 Verification of the FE model

The FE results and analytical formulation for the absolute value of the acoustic pressure measured on the surface of a rigid sphere around its azimuth are compared at the 1/12 octave band center frequency of 2000 Hz in Figure 4.5. The grey area delimits the rear of the sphere, and the horizontal grey dashed line is the undisturbed field acoustic pressure value of 10 Pa. Overall, the FE results are overlaid with the analytical results, therefore the numerical model

is considered as verified. The total acoustic pressure in front of the sphere is made of the incident field and the scattered field. The maximum value of 20 Pa is obtained at the centre of the sphere $\phi = 0^\circ$. There is a shadow zone in the rear of the sphere where the amplitude is lower than the undisturbed sound field value of 10 Pa. The minimum of 4.3 Pa is obtained at azimuthal coordinates $\phi = -150^\circ$ and $\phi = 150^\circ$. Similar results are obtained at other frequencies.

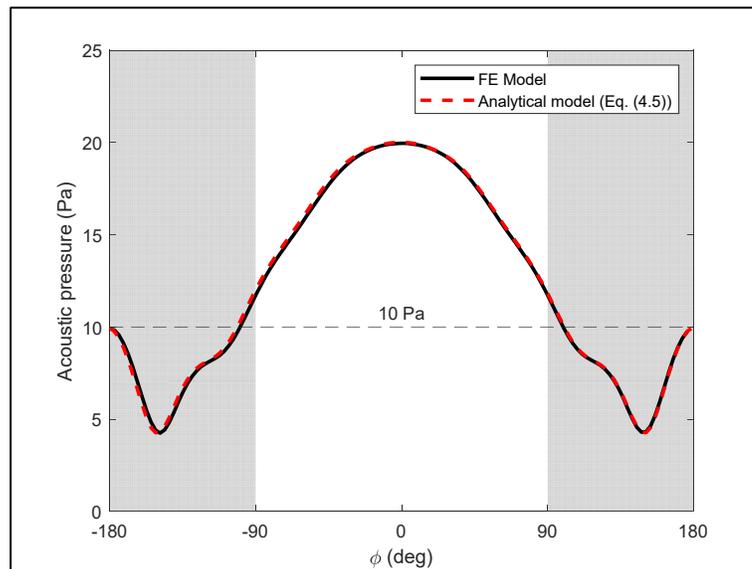


Figure 4.5 Absolute value of the acoustic pressure ($\text{abs}(\text{Pa})$) on the surface of a rigid sphere around the azimuth for a single point source located at 1 m in front of the sphere ($\phi_s=0^\circ$, $\theta_s=90^\circ$) for a frequency of 2000 Hz, obtained FE model (solid black line), analytical results (red dashed lines), greyed area delimiting the rear of the sphere and the grey dashed line the undisturbed field acoustic pressure value of 10 Pa

4.5.1.2 Validation of the FE model

The EAR, MSR and MLD experimentally and numerically obtained with the rigid SMA using the CBF are compared in Figure 4.6. Overall, the EAR results are similar. Both the FE and experimental EAR lower than the 30% threshold values are obtained at approximately 700 Hz. A slight difference is visible at high frequencies but only represents a difference of less than 1%. The EAR at low frequencies is larger than 100% since the mainlobe is very large and the radii are larger than image itself. Overall, the MSRs are similar with minor differences between 2000 and 2500 Hz. The experimental MSR results show a maximum difference of 2.2 dB at

2000 Hz which could be attributed to the reflection from the hemi-anechoic chamber's floor. The greyed zone delimits the frequencies where no sidelobes can be measured since the mainlobe is too large. For those frequencies, the source is not considered localized. The experimental MLD tends towards the FE results for frequencies above 800 Hz at which the source is first considered localized. For frequencies higher than 2000 Hz, the results are overlaid. Using the 50-microphone geometry, the EAR, MSR and MLD results are similar to the less populated geometry (see ANNEXE III).

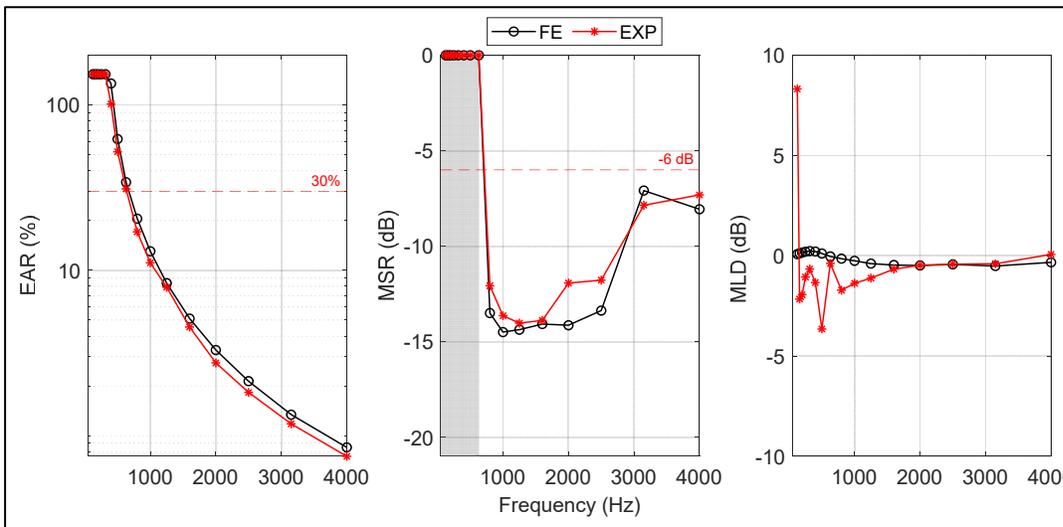


Figure 4.6 Comparison between the FE and experimental results for the EAR, MSR and MLD for the rigid SMA with the 36-microphone geometry for a point source located at 1m in front of the SMA

FE and experimental results for the 36-microphone open-wrf SMA are compared in Figure 4.7. Overall, the EAR, MSR and MLD results are similar. Both the FE and experimental EAR results lower than the 30% threshold value are measured above 800 Hz. The maximum MSR and MLD difference is of 1 dB and 1.7 dB respectively. Despite the experimental conditions (floor reflections, cables and fixtures), there is an excellent agreement between the measurements and the FE results. Therefore, the FE model is validated.

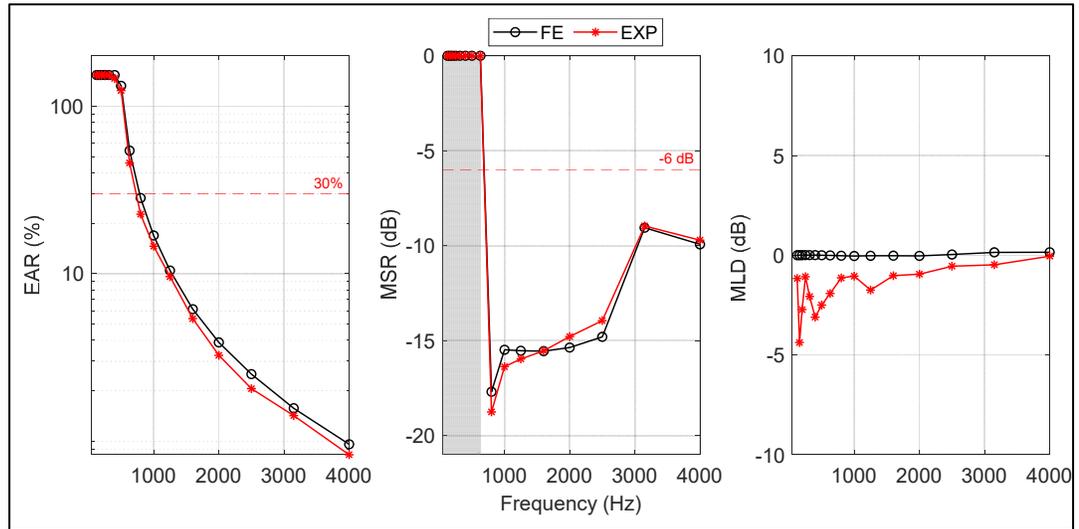


Figure 4.7 Comparison between the FE and experimental results for the EAR, MSR and MLD for the open wire frame SMA with the 36-microphone geometry for a point source located at 1m in front of the SMA

4.5.2 Influence of the scattering by a SMA on acoustic images

Only acoustic images generated from the numerical microphone signals obtained from the FE model are now considered. The images are compared using the image quality criteria (EAR, MSR and MLD). Only the 36-microphone SMA are considered here for the sake of conciseness. Similar results are obtained for the 50-microphone geometry SMA and are presented in ANNEXE III.

4.5.2.1 Rigid SMA

The influence of the unaccounted scattering effect of a rigid SMA is investigated. The EAR, MSR and MLD results for both the rigid SMA and the empty SMA for the 36-microphone geometry are shown in Figure 4.8. Overall, the rigid SMA provides a lower EAR than the empty SMA for the full frequency range. For the rigid SMA, the source is first considered localized with an EAR lower than 30% above 700 Hz while the empty SMA does the same above 800 Hz. The smaller EAR obtained with the rigid SMA could be explained by larger phase differences measured by the microphones. For the empty SMA, the incident acoustic wave travels through the SMA, thus the longest distance is the diameter. For the rigid SMA,

the acoustic wave is scattered along the surface of the sphere, therefore the longest distance is half the perimeter (Parkins & al., 2000). Since the EAR obtained using the CBF is frequency and radius dependent, the larger phase delay measured by the microphones with the rigid SMA could be similar to the results obtained with a larger empty SMA. It is important to note that at 630 Hz, the EAR obtained with the rigid SMA is nearly half the size (35%) as of the EAR obtained with the empty SMA (60%). At 800 Hz, the EAR with the rigid SMA is two third (20%) the EAR with the empty SMA (30%). Therefore, the scattering effect improves the acoustic image quality for those frequencies. Overall, the MSR results obtained with the rigid SMA are slightly higher than those obtained with the empty SMA, but is still acceptable compared to the threshold except after 3000 Hz. The highest MSR measured with the rigid SMA is of -7 dB at 3000 Hz with a difference of 2.5 dB compared to the empty SMA. Therefore, the scattering effect on the acoustic images is weak for low frequencies. Overall, the influence of the unaccounted scattered acoustic wave on the MLD is low. For frequencies lower than 630 Hz, the MLD is overestimated by a maximum of 0.2 dB, although the source is not considered correctly localized. For frequencies higher than 800 Hz, for which the source is localized, the MLD is underestimated by a maximum of 0.5 dB.

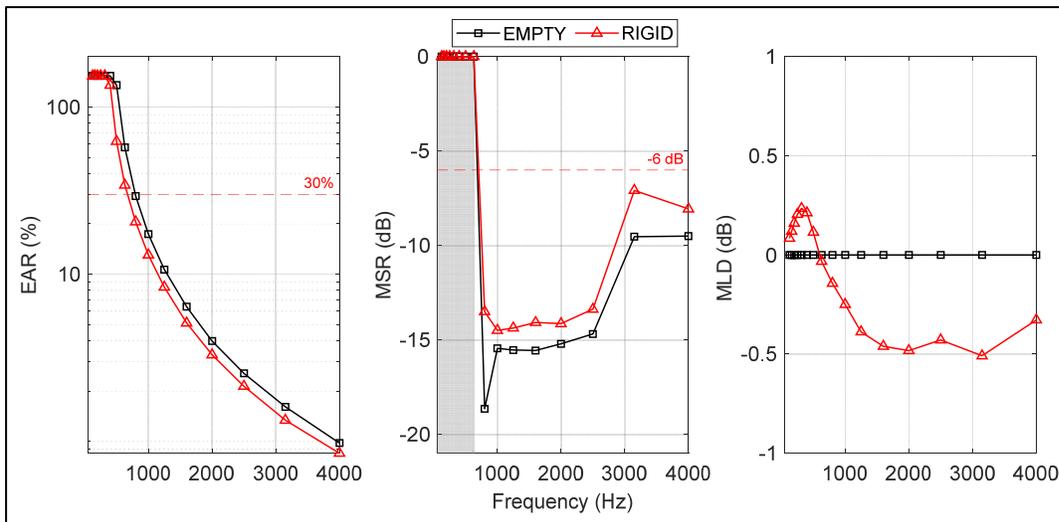


Figure 4.8 Comparison between the 36-microphone empty SMA and the rigid SMA results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA

4.5.2.2 Open SMA designs

The influence of the unaccounted scattering effect of two open SMAs design is investigated. Using the CBF algorithm, the acoustic images obtained with the open-wrf SMA and the open-rod SMA are compared to the empty SMA results for the 36-microphone geometry. The EAR, MSR and MLD results for both open design and the empty SMA are presented in Figure 4.9. Overall, the EAR obtained with both open SMA design are overlaid with the empty SMA which indicates the scattering caused by the SMA structure is negligible regarding the mainlobe width. All three SMAs lead to an EAR result lower than the 30% threshold value at 800 Hz. Overall, the MSR obtained with the open-wrf and the open-rod SMA are similar to the empty SMA. A maximum difference of 0.5 dB (respectively 1.3 dB) at 3150 Hz (respectively 2000 Hz) is obtained with the open-wrf (respectively with open-rod SMA). The MLD measured with both open SMA design shows little difference when compared to the empty SMA. The results for both the open-wrf and open-rod design show excellent agreement with the empty SMA, therefore the acoustic transparency condition is validated. Although both designs remain valid, the open-wrf SMA leads to slightly superior MSR and MLD, despite a more complex design.

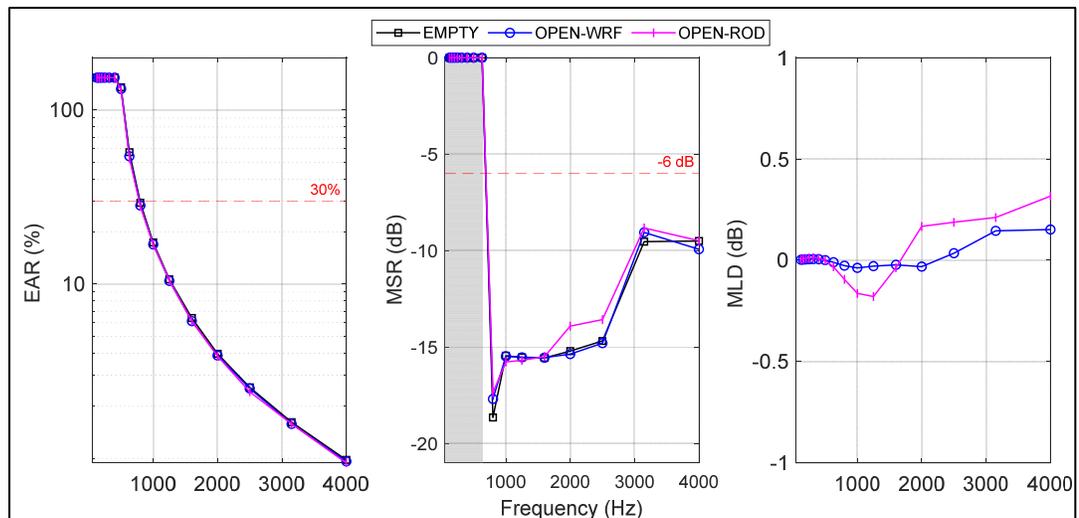


Figure 4.9 Comparison between the 36-microphone empty, open wire frame and open with rods SMA results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA

4.6 Conclusion

A spherical microphone array (SMA) can be used to characterize a source by its spatial location and acoustic level in a closed environment. A rigid SMA may cause the scattering of incident acoustic waves. The scattering effect of a rigid SMA, if not accounted for with the conventional beamforming (CBF), can lead to errors in the time delays measured by the microphone pairs. The CBF, commonly used with open SMAs, considers a free field propagation. In this study, the influence of the scattering effect on acoustic images obtained with either a rigid or an open SMA was investigated numerically. The acoustic images were generated with microphone signals obtained numerically from a finite element model. The numerical model was first verified with the analytical formulation of the acoustic pressure measured on the surface of a rigid sphere and was then validated against experimental measurements. The acoustic images of a single point source were compared using three quality criteria, which are the mainlobe area, the level difference between mainlobe and side lobes and the level difference with and without scattering effect. First, the unaccounted scattering effect was assessed by comparing acoustic images obtained with a rigid SMA and the CBF to those obtained with an idealized empty SMA. Then, the results obtained with two open SMA were compared to verify the assumption of acoustic transparency condition. Results show that the unaccounted scattering effect of a rigid SMA (with the CBF) provides a smaller EAR and slightly increases the MSR. The scattering effect on the MLD is negligible. The acoustic transparency condition of two open SMA designs was validated, a task that was not previously accomplished in the literature. It is worth noting that although the spherical harmonic beamforming (SHB) is the common choice when using a rigid SMA, the CBF was successfully applied. The rigid SMA with the CBF provides better results than those of an ideal open SMA at low frequencies. This highlights the possibility to use a rigid SMA with a fusion of both the CBF and the SHB in order to improve the performances and for a broader frequency range.

CONCLUSION

Les performances d'un AFF sont influencées par le type d'antenne, le diamètre, le nombre de et la répartition des microphones. Lors d'une période de développement d'un AFF, il est nécessaire d'évaluer différentes géométries. Idéalement, une variété importante d'antennes différentes doit être considérée. Autre que la géométrie de l'antenne, l'effet de diffraction acoustique causée par la structure de l'antenne peut influencer les performances de l'AFF. Généralement, l'effet de diffraction des antennes rigides est pris en compte avec un AFF utilisant la décomposition en harmoniques sphériques tel que le SHB. Récemment, une antenne rigide a été utilisée avec le CBF, un AFF qui pose l'hypothèse de propagation en champ libre. Pour le cas d'une antenne rigide, la solution analytique permettant de calculer la pression acoustique du champ incident et diffracté est connue. Pour le cas d'une antenne ouverte, la structure est complexe et un modèle par éléments finis est nécessaire.

Les objectifs de ce travail de recherche étaient de concevoir deux antennes sphériques de microphones modulaires permettant d'installer un grand nombre de microphones selon plusieurs géométries. Le second objectif était de faire l'étude de l'influence des effets de diffraction d'une antenne rigide ou ouverte sur les images acoustiques obtenues avec un AFF.

Une première antenne sphérique ouverte modulaire à structure filaire a été conçue. L'avantage de cette antenne est qu'elle permet un grand nombre de positions pour l'installation de microphones. De plus, la grille de positions est uniforme avec un espacement constant en azimut et en élévation. Cette antenne à structure filaire est robuste et permet une utilisation à répétition. Une seconde antenne sphérique ouverte modulaire avec tiges a été conçue. Cette antenne permet également un grand nombre de microphones, mais la grille de positions possibles n'est pas constante. L'avantage de cette antenne est qu'il est possible de fabriquer des tiges de longueur différentes pour faire varier le diamètre de l'antenne. Les antennes ouvertes modulaires ont certaines limitations. La position réelle d'un microphone d'une géométrie peut être arrondis à 10° près. Aussi, les antennes sont adaptées pour des microphones de type $\frac{1}{4}$ ".

Un modèle numérique par éléments finis permettant de simuler l'interaction entre une onde acoustique et la structure d'une antenne a été développé. Les signaux des microphones numériques peuvent être obtenus à la fois pour une antenne rigide ou une antenne ouverte. Les résultats numériques pour une antenne rigide ont été vérifiés avec la théorie. Les résultats numériques pour une antenne rigide et une antenne ouverte filaire ont été validés par mesures en chambre anéchoïque. Une étude numérique sur l'influence des effets de diffraction d'une antenne rigide et d'une antenne ouverte a été réalisée. Les images acoustiques obtenues avec une antenne rigide et le CBF ont été comparées à celles obtenues avec une antenne théorique parfaitement transparente. Les résultats montrent que l'effet de diffraction d'une antenne rigide non prise en compte a pour effet de réduire la taille du lobe principal et d'augmenter le niveau des lobes secondaires. Les images obtenues avec deux conceptions d'antennes ouvertes et le CBF ont été comparés avec celles de l'antenne théorique parfaitement transparente. Les résultats obtenus avec les deux antennes sont similaires à celle théorique. La condition de transparence acoustique des antennes ouvertes a été validée. L'étude sur l'influence des effets de diffraction est limitée à une seule source ponctuelle située au même niveau devant l'antenne a été considérée et ce pour des fréquences inférieures à 4000 Hz. Pour le cas de plusieurs sources, les résultats pourraient différer.

Au cours des deux dernières années, j'ai eu la chance de prendre part à un projet innovant impliquant deux établissements universitaires ainsi qu'un institut de recherche. Mon engagement actif au sein des réunions bimensuelles m'a permis d'échanger avec des experts en acoustique. Grâce à cette expérience enrichissante, j'ai pu développer des compétences essentielles en conception, en simulation numérique et pour la prise de mesures expérimentales. Ces compétences techniques me permettront d'amorcer ma carrière en acoustique industrielle avec assurance.

ANNEXE I

MODÈLE D'ÉLÉMENTS FINIS

Cette annexe présente sommairement la méthodologie pour le développement du modèle numérique. L'objectif est de simuler l'interaction d'une onde provenant d'une source ponctuelle et la structure d'une antenne pour en obtenir des signaux numériques de microphones. Un modèle par la méthode des éléments finis permet d'importer une structure complexe et de simuler la propagation d'une onde provenant d'une source ponctuelle. La pression acoustique peut ensuite être mesurée à chaque microphone.

Le domaine de propagation est une sphère de 1 m de diamètre dans laquelle la structure de l'antenne est importée et placée en son centre. La couche extérieure du domaine sphérique, de 10 cm d'épaisseur, est une couche absorbante (Figure-A I-1) pour éviter les réflexions dans le domaine. La propagation d'une onde acoustique provenant d'une source ponctuelle est simulée dans le domaine avec un champ acoustique d'arrière-plan à front d'onde sphérique. Cette fonction permet de simuler la propagation d'une onde provenant d'une source se trouvant à l'extérieur du domaine sans devoir mailler un environnement de grande envergure.

Le maillage pour le domaine de propagation est de forme tétraédrique et comprend un minimum de 6 éléments par longueur d'onde. Le maillage pour la couche absorbante comprend 8 éléments de forme quadrilatère (Figure-A I-2).

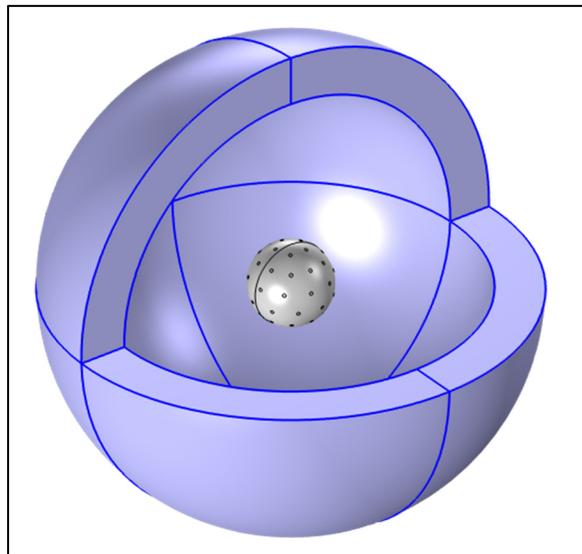


Figure-A I-1 Modèle d'éléments finis permettant de simuler l'interaction entre une onde acoustique et la structure d'une antenne de microphone pour l'antenne de 36 microphones rigide

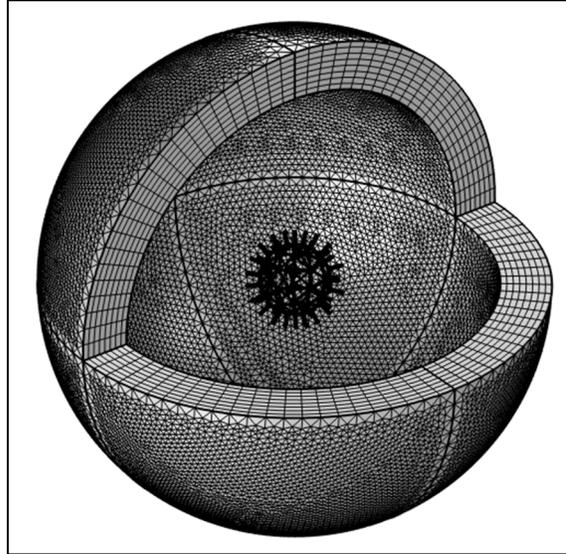


Figure-A I-2 Maillage du domaine avec 6 éléments par longueur d'onde de forme tétraédrique et maillage de la couche absorbante avec 8 éléments de forme quadrilatère pour l'antenne de 36 microphones ouverte

ANNEXE II

MONTAGE POUR MESURES EN CHAMBRE SEMI-ANÉCHOÏQUE

Cette annexe présente la méthodologie lors des mesures en chambre semi-anéchoïque. L'objectif des mesures est de répliquer l'interaction d'une onde acoustique provenant d'une source ponctuelle dans un environnement absent de réflexions dans le but de valider les résultats du modèle numérique.

Pour répliquer les conditions, une source monopolaire (Figure-A II-1) est utilisée pour générer un bruit blanc dans une salle semi-anéchoïque. Au total, deux antennes ouvertes et deux antennes rigides de 36 et 50 microphones sont utilisées pour les mesures. La source est placée à une distance de 1 m devant l'antenne.



Figure-A II-1 Source volumique moyennes hautes fréquences LMS Qsource (Q-MHF, Q-MHF-ICP)



Figure-A II-2 Montage en chambre semi-anéchoïque avec la source ponctuelle LMS devant l'antenne rigide de 36 microphones. Pour cette configuration, la source n'est pas à 1m de l'antenne. Des matelas de fibre de verre sont placés au sol pour atténuer les réflexions

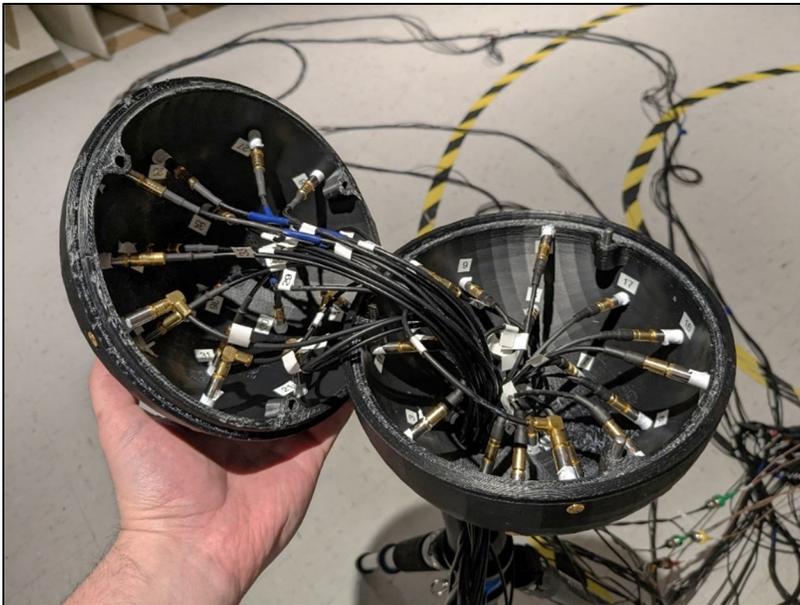


Figure-A II-3 Intérieur de l'antenne rigide avec les 36 microphones maintenu affleurant à la surface par serrage. Le câblage est dirigé au centre de l'antenne pour en sortir par le mât tubulaire

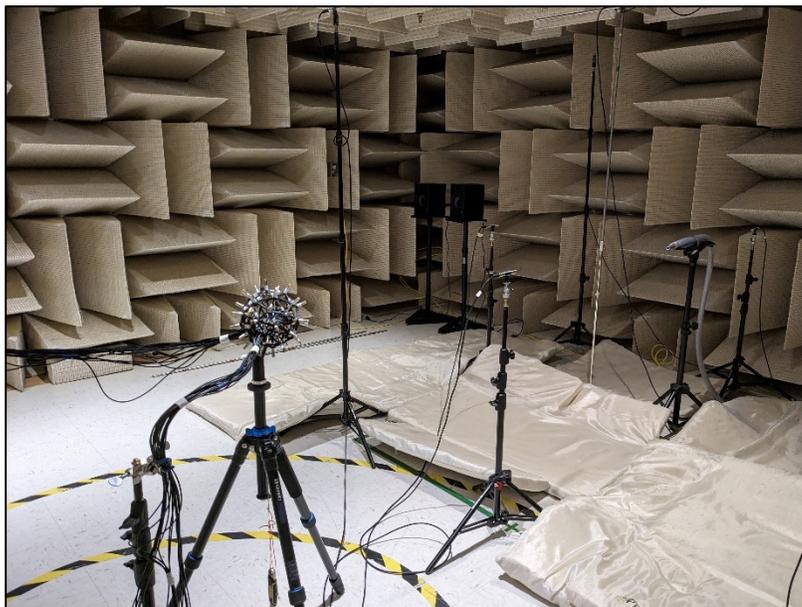


Figure-A II-4 Montage en chambre semi-anéchoïque avec la source ponctuelle LMS devant l'antenne ouverte à structure filaire de 36 microphones

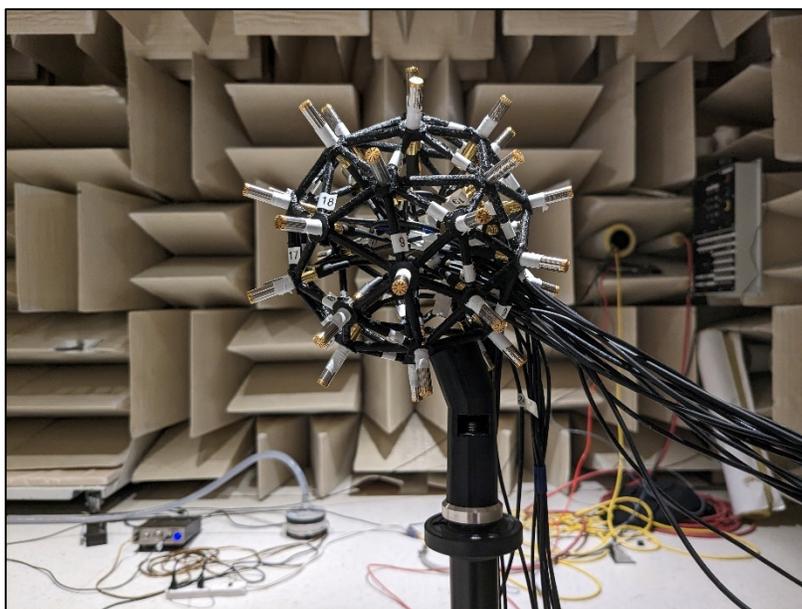


Figure-A II-5 Antenne ouverte à structure filaire avec les 36 microphones maintenus en place dans les bagues par serrage. Le câblage est dirigé vers l'arrière de l'antenne par un orifice de la structure

ANNEXE III

RÉSULTATS 50 MICROPHONES

Images and results regarding the SMAs with the 50-microphone geometry are presented in this section. The 50-microphone SMAs design for the empty SMA, the rigid SMA, the open-wrf and the open-rod SMA are shown in Figure-A III-1, Figure-A III-2, Figure-A III-3 and Figure-A III-4. Images of the rigid SMA and the OPEN-WRF with the 50-microphones geometry during the experimental measurements are shown in Figure-A III-5.

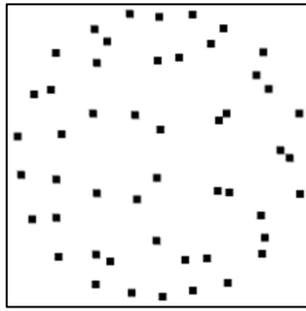


Figure-A III-1 Rendered image of the EMPTY 50-microphone SMA

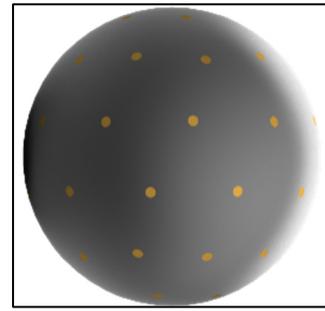


Figure-A III-2 Rendered image of the RIGID 50-microphone SMA

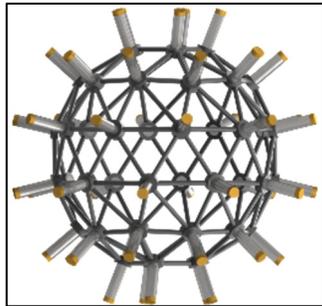


Figure-A III-3 Rendered image of the OPEN-WRF 50-microphone SMA

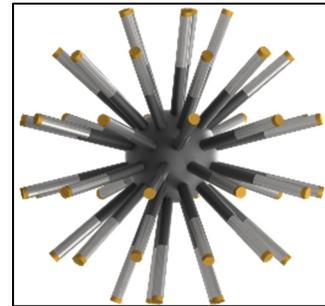


Figure-A III-4 Rendered image of the OPEN-ROD 50-microphone SMA

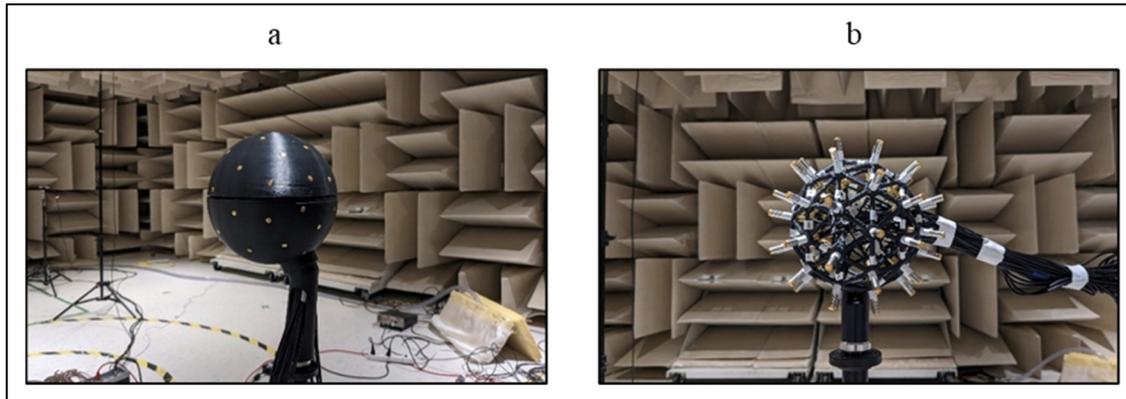


Figure-A III-5 Picture the of the a) rigid 50-microphone SMA and the b) open wire frame 50-microphone SMA during the experimental measurements

The EAR, MSR and MLD for the acoustic images obtained with the rigid SMA and the CBF for the 50-microphone geometry are shown in Figure-A III-6. Overall, the EAR results are similar with a slight difference in the higher frequencies which is less than 1%. The experimental MSR results are also similar to the FE results with a small difference in the lower frequencies. The MLD measured experimentally tends towards the FE results in the higher frequencies. In the lower frequencies, for which the source is not considered localized, the MLD oscillates with a maximum difference 6 dB.

The EAR, MSR and MLD for the acoustic images obtained with the open-wrf SMA and the CBF for the 50-microphone geometry are shown in Figure-A III-7. Overall, the experimental EAR and the MSR results are similar to the FE results with minor differences in the higher and lower frequencies respectively. The EAR results difference is of less than 1% and a maximum MSR difference of 2.4 dB. The MLD obtained with the experimental measurements tends towards the FE results with a 1 dB gap for the higher frequencies.

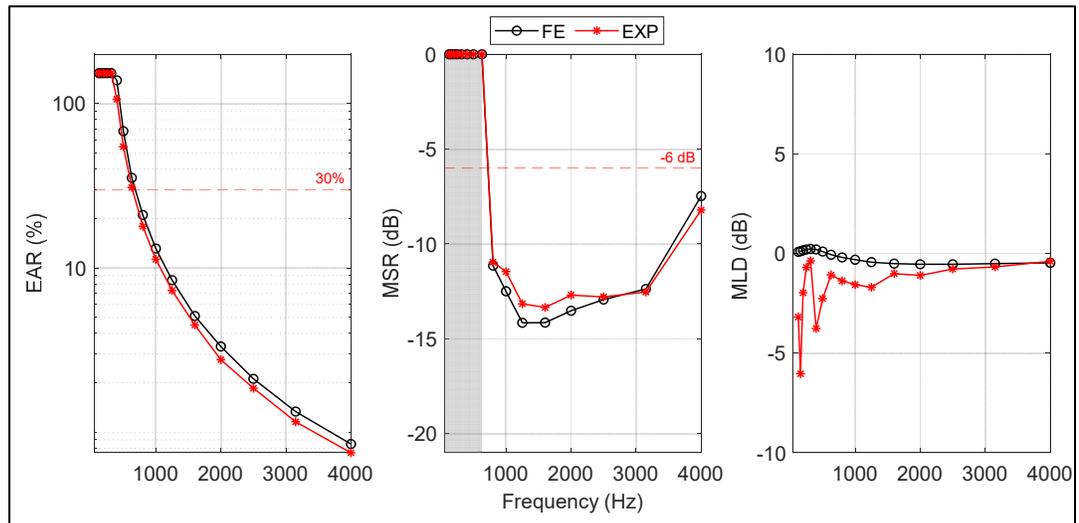


Figure-A III-6 Comparison between the FE and experimental results for the EAR, MSR and MLD for the rigid 50-microphone SMA for a point source located at 1m in front of the SMA

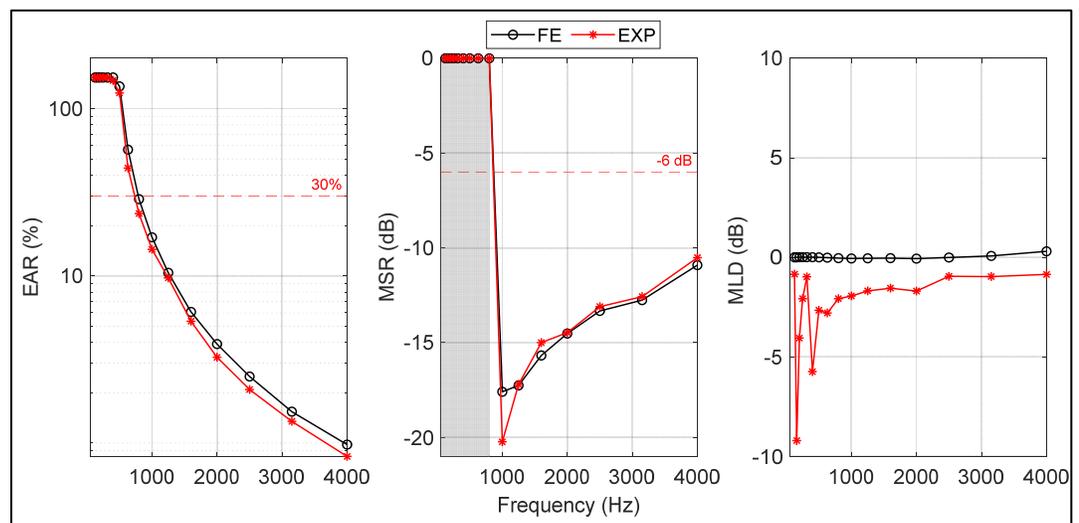


Figure-A III-7 Comparison between the FE and experimental results for the EAR, MSR and MLD for the open wireframe 50-microphone SMA for a point source located at 1m in front of the SMA

The EAR, MSR and MLD results for both the rigid SMA and the empty SMA for the 50-microphone geometry are shown in Figure-A III-8. Overall, the EAR obtained with the rigid SMA is smaller than the EAR obtained with the empty SMA for the full frequency range. Similarly, to the less populated SMA, the rigid SMA with the 50-microphone first localizes the source at approximately 700 Hz with an EAR lower than 30% while the empty SMA does so at 800 Hz. The MSR obtained with the rigid SMA is higher for the lower and the higher frequencies. Between 2000 and 3250 Hz, the MSR is similar to the results obtained with the empty SMA. The MLD obtained with the rigid SMA is first overestimated with a 0.25 dB gap and tends towards a 0.5 dB underestimation. Since the maximum MLD difference is less than a 1 dB, the scattering effect on the source level estimation could be neglected.

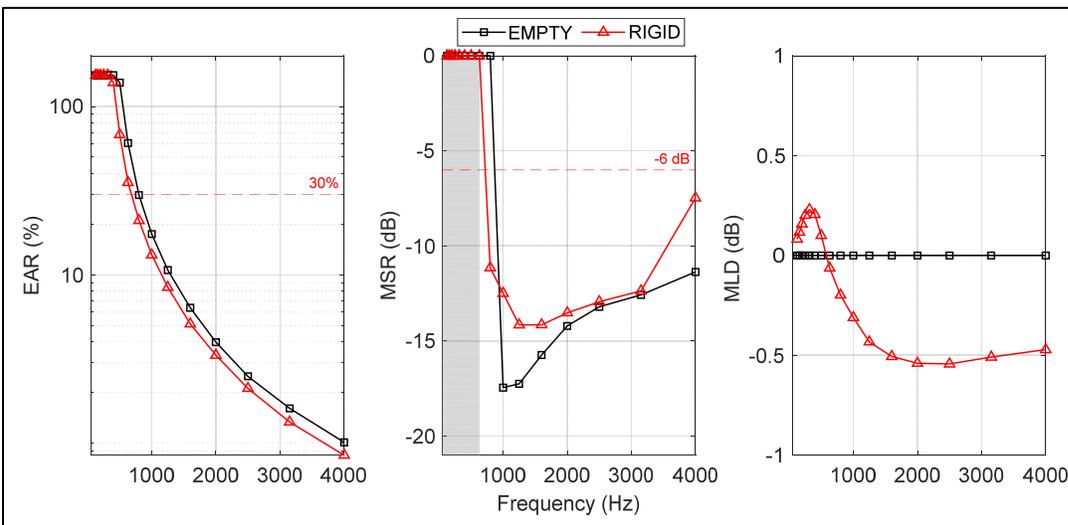


Figure-A III-8 Comparison between the 50-microphone empty SMA and the rigid SMA results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA

Using the CBF algorithm, the acoustic images obtained with the open-wrf SMA and the open-rod SMA are compared to the empty SMA results for the 50-microphone geometry. The EAR, MSR and MLD results for both open design and the empty SMA are presented in Figure-A III-9. Overall, the EAR obtained with both open SMA are overlaid to the empty SMA results. The MSR obtained with the open-wrf is similar to the empty SMA for the full frequency range, while the open-rod shows a slight difference for frequencies between 1500 Hz and 3000 Hz. Both open SMA obtained a similar maximum MLD difference of approximately 0.3 dB. However, the open-wrf was more accurate for the full frequency range.

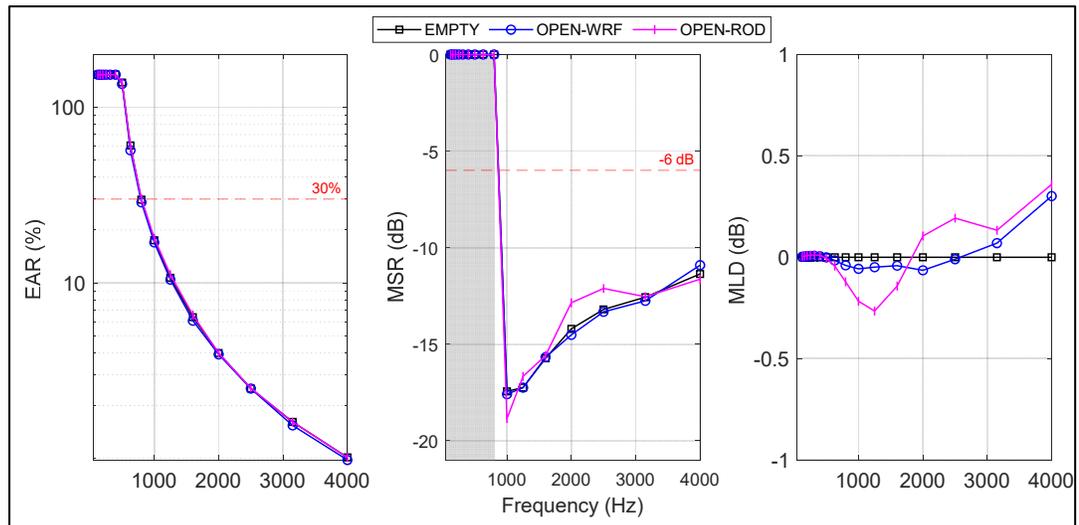


Figure-A III-9 Comparison between the 50-microphone empty, open wire frame and open with rods SMA results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA

APPENDICE I

EFFECT OF THE ERROR ON THE SOUND SPEED AND MICROPHONE POSITION ON ACOUSTIC IMAGE OBTAINED WITH A SPHERICAL MICROPHONE ARRAY

Julien St-Jacques^a, Kevin Rouard^a, Franck Sgard^b, Hugues Néglise^b, Alain Berry^c, Nicolas Quaegebeur^c, François Grondin^c, Olivier Doutres^a and Thomas Padois^b.

^a École de technologie supérieure (ÉTS), 1100 Rue Notre Dame O.,
Montréal, QC, H3C 1K3, Canada.

^b Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST),
505 Boulevard de Maisonneuve O., Montréal, QC, H3A 3C2, Canada.

^c Université de Sherbrooke (UdeS), 2500 Boulevard de l'université,
Sherbrooke, QC, J1K 2R1, Canada.

Article publié dans « *Acoustic Week in Canada 2022* », Septembre 2022, Vol 50, No 3

1 Introduction

In order to reduce the noise level in a workplace, the main sources have to be localized. This task can be done with a spherical microphone array (SMA). When the microphones are flush mounted to a rigid sphere surface, the SMA is referred to as rigid. In this case, the Spherical Harmonic Beamforming (SHB) algorithm is preferred since it allows to account for the scattering effect of the acoustic waves on the rigid sphere (Petersen, 2004) (Rouard & al., 2022). When the microphones are fixed on an open wire frame, i.e., transparent with respect to the acoustic waves, the SMA is referred to as open and the Generalized Cross-Correlation (GCC) algorithm in the time domain can be used (Rouard & al., 2022). Both algorithms require the knowledge of the sound speed and the microphones position. In this study, the effect on the acoustic image of an error committed on these parameters is investigated numerically. The error is introduced by using a reference value for both parameters which is different from the one used to generate the microphones signals. More specifically, the microphones signals captured by a rigid or an open SMA placed in a room are obtained numerically using a sampled range of sound speed values and degrees of precision of microphone position. Then these signals are used as input to the SHB and GCC algorithms to calculate the acoustic image but with the reference value for the sound speed and the microphone position instead of those used to generate the input signals. The main lobe area is the criterion used to evaluate the parameters influence on the acoustic image.

2 Algorithms

2.1 Spherical Harmonic Beamforming

The SHB algorithm principle is the decomposition of the acoustic wave field measured on the surface of a sphere into spherical harmonics. The modal matrix of weights is given by

$$\mathbf{w}_{nm}^*(kr_a, \theta_l, \varphi_l) = \mathbf{Y}_n^m(\theta_l, \varphi_l) \frac{d_n}{\mathbf{b}_n(kr_a)} \quad (\text{AI-2.1})$$

with k the wavenumber, r_a the SMA radius and (θ_l, φ_l) respectively the elevation and azimuthal coordinates of the scan grid points. In Eq. (2.1), \mathbf{Y}_n^m is the spherical harmonic matrix, \mathbf{b}_n is the contribution of plane waves amplitude on the sphere and d_n is a weight parameter used to optimize the directivity. The modal pressure is given by

$$\mathbf{p}_{nm}(kr_a, \theta_q, \varphi_q) = \alpha_q \mathbf{Y}_n^{m*}(\theta_q, \varphi_q) \mathbf{p}(kr_a, \theta_q, \varphi_q) \quad (\text{AI-2.2})$$

with α_q a weight parameter and \mathbf{p} the acoustic pressure measured at the microphone located at (θ_q, φ_q) . The spherical harmonic function is then given by

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) e^{im\varphi} \quad (\text{AI-2.3})$$

2.2 Generalized Cross-Correlation

The GCC algorithm employs the inverse Fast Fourier Transform of the cross spectrum C_{uv} to estimate the cross-correlation $R_{uv}(\tau)$ between two microphones signals (u, v)

$$R_{uv}(\tau) = \sum_{j=0}^{N_f-1} C_{uv}(\omega_j) e^{i\omega_j \tau / N_f}, \quad (\text{AI-2.4})$$

with the time lag τ , discrete frequency j and number of elements of the frequency vector N_f . The acoustic image $\mathbf{A}(\theta_l, \varphi_l)$ is then obtained with the arithmetic mean of the projected cross-correlations

$$\mathbf{A}(\theta_l, \varphi_l) = \frac{1}{Q_p} \sum_{p=1}^{Q_p} R_{uv}(\tau_{uvl}), \quad (\text{AI-2.5})$$

where Q_p is the number of microphone pairs included in an array composed of Q microphones and τ_{uvl} is the time difference of the time delays of two microphones (u, v) .

3 Methodology

3.1 Simulation parameters

The simulated environment is a room of 18 m in length, 12 m in width and 5 m in height. The room reflection coefficient β is 1%. The SMA is in the center of the room. The source is a monopole located at 4 m, $\varphi = 0^\circ$ and $\theta = 90^\circ$, relative to the SMA. The source signal is a sine wave with frequencies ranging from 250 Hz to 2000 Hz. The microphones signals are provided by the convolution of a source signal with the room impulse response. One rigid and one open SMA are considered. Both SMA have a radius of 20 cm and include 48 microphones following a t-design geometry.

3.2 Sound speed parameter

Speed of sound at atmospheric pressure depends on the temperature and humidity. The range used for the sound speed is based on the value of the sound speed between -40°C to 50°C . Different sound speed values are considered for the calculation of the microphones signals (as described in sec. 3.1) ranging from 306 to 360 m/s. To simulate the error on the sound speed, the reference value of 343 m/s (20°C) is used to obtain the acoustic image using the SHB and GCC algorithms for each set of microphones signals instead of the actual sound speed used to generate the microphones signals.

3.3 Microphone position parameter

This study considers multiple degrees of precision of microphone position on the SMA. First, the microphones signals are computed by each SMA with microphones coordinates rounded to 0.001° , 0.01° , 0.1° , 1° , 2° , the nearest factor of 5° and finally the nearest factor of 10° . To simulate the error on the microphones position, the computation of the acoustic image using the SHB and GCC is done using the coordinates rounded to 0.001° for each set of microphones signals instead of the actual positions used to generate the microphones signals.

3.4 Ellipse area at -3 dB

The quality of an acoustic image can be defined by the width of its main lobe. On a 2D map, an ellipse can be drawn at -3 dB from the maximum of the main lobe. The area of this ellipse is then used as a criterion for the acoustic image. A smaller ellipse area translates to a more precise acoustic image. The ellipse area for the sound speed assessment is normalized by the value measured at 343 m/s. For the microphone position, the ellipse area is normalized by the value measured with positions rounded to 0.001° . The normalized ellipse area is denoted NEA in the following.

4 Results

4.1 Sound speed

Figure-AA I-1 compares the NEA for both the SHB algorithm with a rigid SMA and the GCC with an open SMA for frequencies ranging from 200 to 2000 Hz and sound speed values ranging from 306 to 360 m/s. The sound speed has a low impact on the NEA for both the SHB and the GCC. The NEA is either increased or decreased by less than 15% which is not visible on the acoustic image. For the SHB, the NEA increases as the sound speed value grows for the frequencies lower than 1000 Hz and close to 2000 Hz. For the GCC, the NEA increases as the sound speed value grows for the full frequency range.

4.2 Microphone position

Figure-AA I-2 compares the NEA for both SMA's. The frequencies range from 200 to 2000 Hz and the precision of the microphone positions range from 0.001° to 10° . For the GCC, the microphone position has close to no impact on the NEA for the full frequency range. When the microphone position is rounded to 1° and higher, the SHB is not able to localize the acoustic source at the lower frequencies. In this case, the NEA values are meaningless.

5 Conclusion

This paper investigated separately the effect of an error on the sound speed and microphones position on the acoustic image obtained using the SHB algorithm (rigid SMA) and the GCC algorithm (open SMA). The microphones signals captured by a rigid and an open SMA were numerically generated beforehand using a sampled range of sound speed values and degrees of precision of microphones position. Then, the computation of the acoustic image was done using the reference values (343 m/s, 0.001°) instead of the actual value for each set of microphones signals. The ellipse area at -3 dB is the criterion used to evaluate the influence of both parameters. Results have shown that an error on the sound speed has a low impact on the SHB and GCC. It has been observed that the SHB is sensitive to an error committed on the microphones position, while the GCC is more robust. This can be explained by the dependency of the SHB on the orthogonality property which depends on the microphone position on the spherical array.

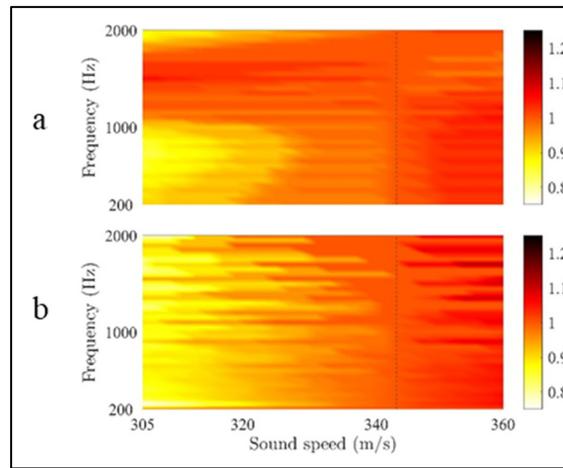


Figure-AA I-1 Normalized ellipse area per value of sound speed for the a) rigid SMA with the SHB and the b) open SMA with the GCC, dashed line at sound speed reference value (343 m/s)

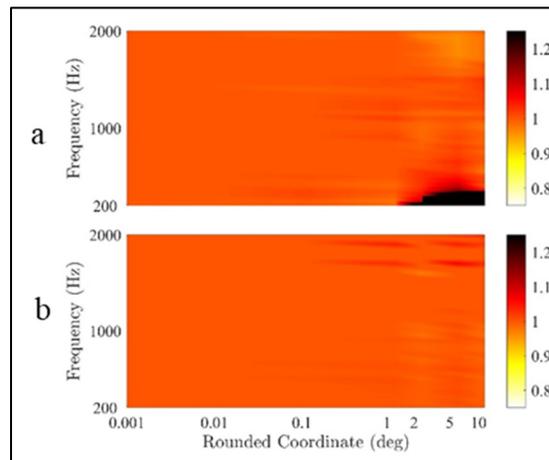


Figure-AA I-2 Normalized ellipse area per rounded coordinates of microphone position for the a) rigid SMA with the SHB and the b) open SMA with the GCC

APPENDICE II

INFLUENCE OF THE SCATTERING EFFECT ON ACOUSTIC IMAGE OBTAINED WITH A SPHERICAL MICROPHONE ARRAY

Julien St-Jacques^a, Kevin Rouard^a, Franck Sgard^b, Hugues Nélisse^b, Alain Berry^c, Nicolas Quaegebeur^c, François Grondin^c, Loïc Boileau^c, Olivier Doutres^a and Thomas Padois^b.

^aÉcole de technologie supérieure (ÉTS), 1100 Rue Notre Dame O.,
Montréal, QC, H3C 1K3, Canada.

^bInstitut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST),
505 Boulevard de Maisonneuve O., Montréal, QC, H3A 3C2, Canada.

^cUniversité de Sherbrooke (UdeS), 2500 Boulevard de l'université,
Sherbrooke, QC, J1K 2R1, Canada.

Article publié dans « *Acoustic Week in Canada 2023* », septembre 2023, Vol 51, No 3

1 Introduction

In Quebec, occupational deafness was the most identified work-related disease representing 89% of the cases from 2015 to 2016 (Busque & al., 2022). The most efficient solution is to reduce the noise emitted by the source. To do so, each source must be characterized by their spatial location and contribution. In a workplace, a Spherical Microphone Array (SMA) can be used. When the microphones are held on a wireframe structure or on thin rods, the SMA is considered acoustically transparent and is referred to as open. For open SMAs, the Conventional Beamforming in the Frequency domain (CBF) can be used and does not account for the scattering effect. When the microphones are flush mounted to a rigid sphere, the SMA is referred to as rigid. Rigid SMAs may cause the scattering of the sound field around the sphere. Consequently, frequency dependent errors in the time delays measured by the microphone pairs in the shadowed zone are expected (Heilman & al., 2008). The aim of this study is to assess the influence of the scattering effect on acoustic images obtained with a rigid SMA using the CBF. First, the microphone signals are obtained numerically and then the acoustic images are generated using the CBF algorithm for the case of a rigid and a transparent SMA. Then, the influence of the scattering effect is assessed using two image quality criteria. Section 2 presents the formulation of the CBF. Section 3 details the SMA design, the simulation parameters, and the image quality criteria. Section 4 presents the numerical results.

2 Conventional Beamforming

In the frequency domain, the acoustic image $A(\omega)$ is provided by

$$A(\omega) = W^*(\omega)C(\omega)W(\omega), \quad (\text{AII-2.1})$$

where $\mathbf{W}(\omega)$ is the steering matrix, $\mathbf{C}(\omega)$ is the cross-spectral matrix and $(.)^*$ denotes the complex conjugate transpose operator (Padois & al., 2023). Using an SMA of Q microphones and a scan grid of L points, the dimensions of $\mathbf{W}(\omega)$ and $\mathbf{C}(\omega)$ are $[Q \times L]$ and $[Q \times Q]$ respectively. For the CBF, the steering matrix is obtained using the free-field Green's function with

$$\mathbf{W}(\omega) = \frac{1}{Q} \frac{\mathbf{g}(\omega)}{\mathbf{g}^*(\omega)\mathbf{g}(\omega)}, \quad (\text{AII-2.2})$$

where one element of the Green's free-field matrix $\mathbf{g}(\omega)$ is given by

$$g_{ql} = \frac{1}{4\pi r_{ql}} e^{\frac{i\omega r_{ql}}{c_0}}. \quad (\text{AII-2.3})$$

In equation 2.3, c_0 is the sound speed, i is the complex imaginary number and r_{ql} is the distance between the q^{th} microphone and the l^{th} grid point. The cross-spectral matrix is obtained with

$$\mathbf{C}(\omega) = \mathbf{p}(\omega)\mathbf{p}^*(\omega), \quad (\text{AII-2.4})$$

where $\mathbf{p}(\omega)$ is the microphone signal vector of dimension $[Q \times 1]$.

3 Methodology

3.1 Array Design

To assess the influence of the scattering effect, two types of SMA are considered. A rigid array (Figure-AA II-1) is compared to a theoretical perfectly transparent array (Figure-AA II-1) referred as the empty SMA. The chosen microphone geometry is based on a commercial SMA commonly used in the literature (Chu & al., 2019). The SMA radius is 9.75 cm and has 36 microphones.

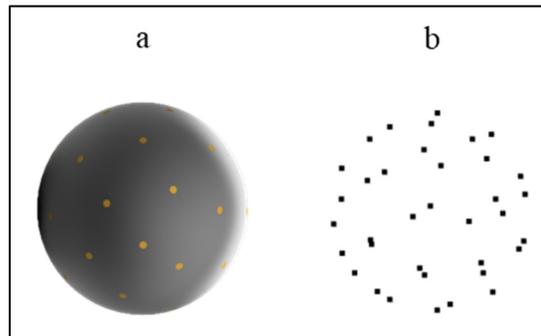


Figure-AA II-1 a) Rigid array and b) Empty array for the 36 microphones geometry and 9.75 cm radius

3.2 Simulation Parameters

The microphone signals are obtained using a Finite Element Analysis (FEA) model to simulate a point source located at 1 m in front of the SMA. The model is a spherical domain of 1 m in diameter with a perfectly matched layer of 0.1 m to mimic an open infinite domain and avoid reflections. The simulation was done for frequencies ranging from 50 to 4000 Hz.

3.3 Image Quality Criteria

To assess the influence of the scattering effect on the acoustic image, two criteria are used, *i.e.*, the Ellipse Area Ratio (EAR) and the Mainlobe-to-Sidelobe Ratio (MSR). The EAR is the mainlobe area at -3 dB from the maximum value normalized by the total image area expressed in (%). The mainlobe area is surrounded by an ellipse using the covariance method (Padois & al., 2021). A small EAR is preferred to allow for a better localization. The MSR is the level difference between the mainlobe and the highest sidelobe. Since sidelobes are spurious sources, an ideal MSR should be high.

4 Numerical Results

4.1 Ellipse Area Ratio

The EAR results for the rigid and the empty arrays using the CBF algorithm, and the 36-microphones geometry are presented in Figure-AA II-2. When the EAR criterion is greater than 30%, the image is considered of poor quality, as the mainlobe is too wide (red dashed line). If two sources are to be localized, a mainlobe greater than 30% for both sources would represent more than half of the image, making the localization difficult. The EAR assessed with the rigid array and the CBF is smaller than the ones obtained with the empty SMA for the full frequency range. With the rigid SMA, the source is first considered localized at 670 Hz, while the same result is observed with the empty SMA at 800 Hz. This result could be explained by the time delay between two microphones since the EAR is dependent of the frequency and the SMA radius. Using the CBF, a larger SMA radius will result a smaller mainlobe width for a given frequency. For the empty SMA, the acoustic wave travels through the sphere, therefore the largest distance is the SMA diameter. On the other hand, for the rigid SMA, the acoustic wave is diffracted and travels along the surface of the sphere thus the largest distance is half the perimeter (Parkins & al., 2000).

4.2 Mainlobe-to-Sidelobe Ratio

Figure-AA II-2 presents the MSR measured with the rigid and empty SMA using the CBF for the 36-microphones geometry. The red dashed line represents a -6 dB threshold where the sidelobes are considered too high to properly localize the source. The grey zone delimits the frequency range where no sidelobe are measurable for the rigid SMA since the mainlobe is very large. The MSR assessed with the rigid SMA is higher when compared to the empty SMA for the full frequency range with a maximum difference of 4.75 dB at 2800 Hz. At 3550 Hz, the MSR measured with the rigid SMA reaches a maximum of -6.15 dB, which is barely inside the permitted zone by the threshold. Therefore, the empty SMA provides a better MSR since there is no scattering effect.

5 Conclusion

The aim of this study was to assess the influence of the scattering effect on the acoustic images obtained with a SMA using the CBF. A rigid and an empty SMA with a radius of 9.75 cm and a 36-microphones geometry were considered. The microphone signals were obtained numerically with an FEA model for the case of a single point source in front of the SMA. The acoustic images were generated using the CBF algorithm, which does not account for the scattering of the acoustic waves, for both SMAs. The EAR and the MSR criteria were used to assess the influence of the scattering effect on the image. Results show that the uncorrected scattering effect will provide a smaller mainlobe width. This effect could be related to the time delay between microphone pairs. Also, the scattering effect increases the sidelobes levels, especially in the higher frequencies. The results of this study are valid for the case of a single point source located in front of the SMA. For the case of multiple point sources, different MSR values are expected.

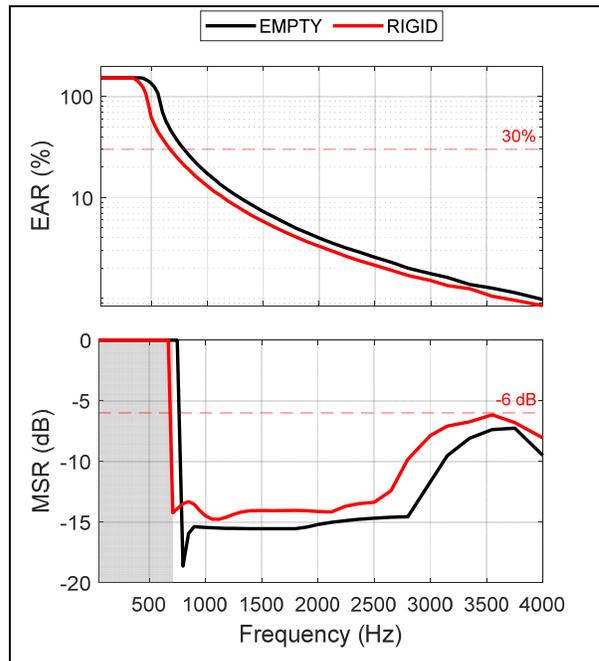


Figure-AA II-2 Acoustic images obtained with the CBF algorithm for the rigid and empty SMA of 9.75 cm radius for a point source located at 1 m, ellipse Area Ratio, Mainlobe-to-Sidelobe Ratio, grey zone delimiting the frequency range for which no sidelobe can be measured for the rigid SMA since the mainlobe is too large

APPENDICE III

COMPARISON BETWEEN ACOUSTIC IMAGES OBTAINED WITH A RIGID SMA AND THE SHB AND AN OPEN SMA WITH THE CBF

For the SHB, Eq(4.2) is transformed in the spherical harmonic domain with the modal pressure vector $\mathbf{p}_{nm}^{SH}(\omega)$ of dimension $[(N + 1)^2 \times 1]$ where $n = 0, \dots, N$ is the degree and $m = -n, \dots, n$ is the mode (Rouard & al., 2022). An element of the modal pressure vector is

$$p_{nm}^{SH}(\omega) = \sum_{q=1}^Q \alpha_q p_q(\omega) Y_n^{m*}(\theta_q, \varphi_q), \quad (\text{AIII-1.1})$$

where $p_q(\omega)$ is the pressure measured by the microphone q , α_q is a weighting factor related to the array geometry and $Y_n^{m*}(\theta_q, \varphi_q)$ is an element of the spherical harmonic matrix given by the spherical harmonic function

$$Y_n^m(\theta_q, \varphi_q) = \sqrt{\frac{2n + 1}{4\pi} \frac{(n - m)!}{(n + m)!}} P_n^m(\cos \theta_q) e^{im\varphi_q}. \quad (\text{AIII-1.2})$$

The spherical harmonic matrix $\mathbf{Y}_n^{m*}(\theta_q, \varphi_q)$ is of dimension $[(N + 1)^2 \times Q]$. In Eq. (6), $P_n^m(\cos \theta_q)$ is the associated Legendre polynomial function. The modal steering matrix of weights $\mathbf{W}_{nm}^{SH*}(\omega)$ is of dimension $[(N + 1)^2 \times L]$ and one element is given by

$$w_{nm}^{SH*}(\omega) = Y_n^m(\theta_l, \varphi_l) \frac{d_n}{b_n(kr_a)}, \quad (\text{AIII-1.3})$$

where k is the wave number, r_a is the SMA radius and $d_n = 4\pi/(N + 1)^2$ a weight parameter for maximum directivity (Rafaely, 2005a). For a rigid SMA, the scattering effect is accounted for with the term $b_n(kr_a)$, obtained with

$$b_n(kr_q) = 4\pi(-i)kh_n^{(2)}(kr_l) \left[j_n(kr_q) - \frac{j_n'(kr_a)}{h_n^{(2)'}(kr_a)} h_n^{(2)}(kr_q) \right], \quad (\text{AIII-1.4})$$

where the $(.)'$ operator is the first derivative with respect to r , J_n is the Bessel function of first kind and $h_n^{(2)}$ is the Henkel function of second kind.

The results obtained using the rigid SMA with the SHB and the open wireframe SMA with the CBF for the 36-microphones are compared. The EAR, MSR and MLD results for the rigid SMA and the open SMA are shown in Figure-AA III-1. Overall, the rigid SMA with the SHB provides a lower EAR than the OPEN-WRF SMA with the CBF for frequencies lower than 2500 Hz. The EAR results for the SHB depend on the spherical harmonic order which varies from 1 to 5. The source is considered localized for the full frequency range with the rigid SMA, while the open wireframe SMA obtains an EAR lower than the 30% threshold at 800 Hz. However, after 2500 Hz, the results obtained with the open wireframe SMA surpass those obtained with the rigid SMA. The EAR results with the SHB are dependant on the order of the spherical harmonic, thus the stair like appearance of the tendency curve.

Overall, the MSR obtained with the rigid SMA using the SHB is higher which indicates a poorer image quality than the OPEN-WRF SMA using the CBF. While the rigid SMA using the SHB allows for a better resolution in the lower frequencies, the MSR obtained between 50 and 800 Hz is close to the -6 dB threshold. Then, the MSR with the rigid SMA decreases to reach a minimum of -13 dB at 2000 Hz and increases after 3150 Hz. The MSR obtained with the open wireframe SMA is superior for the full frequency range, except for the 3150 Hz frequency.

The MLD results shows the rigid SMA using the SHB is less accurate than the OPEN-WRF with the CBF. The MLD obtained with the rigid SMA is dependent on the order of the spherical harmonic order as for the EAR and MSR, thus the results are unstable. The maximum MLD difference measured with the rigid SMA is 1.2 dB at 3150 Hz. the open wireframe SMA is more precise and stable with a maximum difference of 0.15 dB.

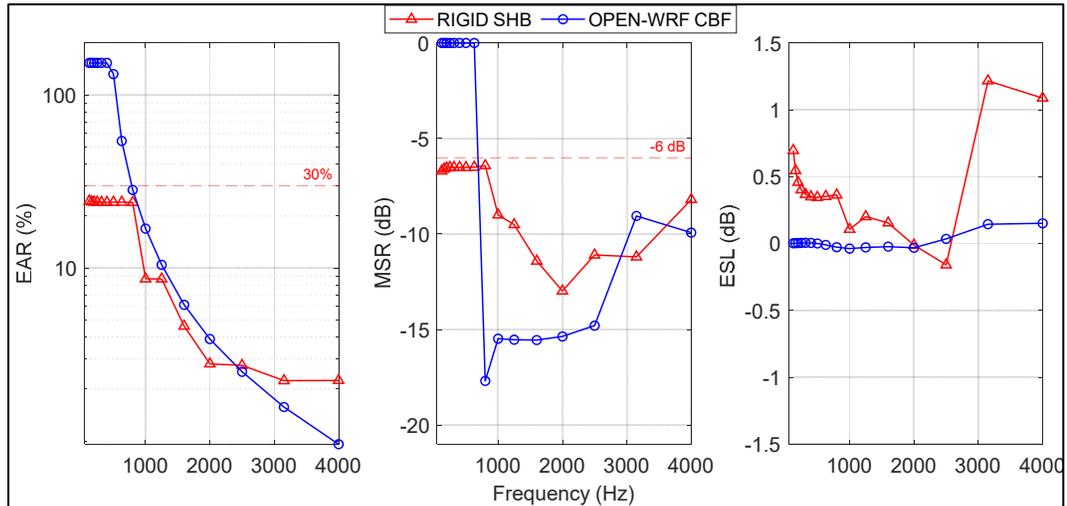


Figure-AA III-1 Comparison between the 36 microphones rigid SMA using the SHB and the OPEN-WRF SMA using the CBF results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA

The results obtained using the rigid SMA with the SHB and the open wireframe SMA with the CBF for the 50-microphones are compared. The EAR, MSR and MLD results for the rigid SMA and the open SMA are shown in Figure-AA III-2. Overall, the SHB provides a smaller EAR in the lower frequencies. The CBF obtained a smaller EAR than the SHB for frequencies higher than 2500 Hz. The MSR obtained with the SHB is higher for frequencies lower than 2000 Hz. In the higher frequencies, the MSR obtained with the SHB is similar to the results obtained with the CBF. The MLD obtained with the MLD is less accurate with a maximum difference of 1 dB, while the CBF maximum difference was of 0.3 dB.

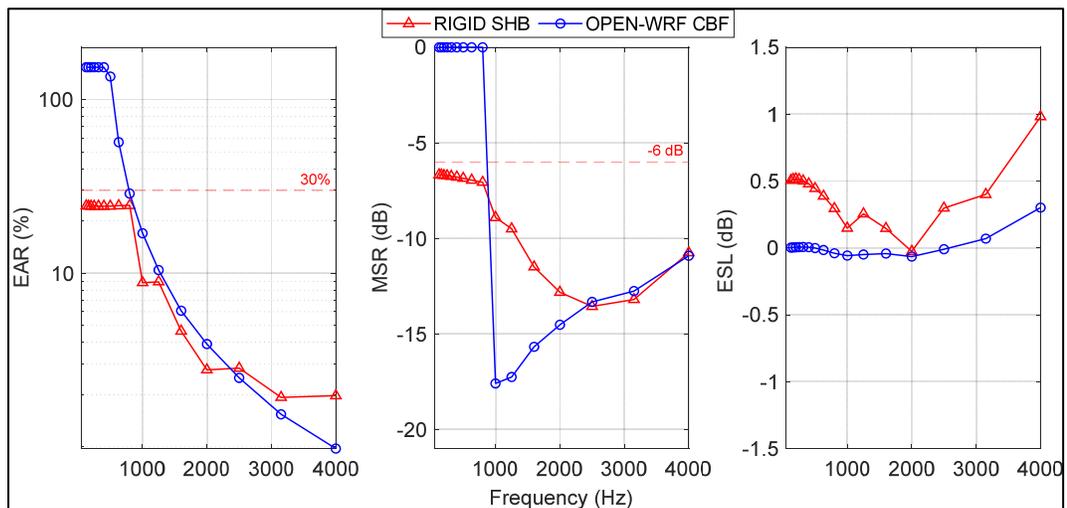


Figure-AA III-2 Comparison between the 50 microphones rigid SMA using the SHB and the OPEN-WRF SMA using the CBF results for the EAR, MSR and MLD for a point source located at 1m in front of the SMA

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed, S.S., & Gadelmoula, A.M. (2022). Industrial noise monitoring using noise mapping technique: a case study on a concrete block-making factory. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 851–862. doi: 10.1007/s13762-020-02982-9
- Araujo, F.H. & Pinto, F.A. (2016), Comparison Between the Spherical Harmonic Beamforming and the Delay-and-Sum Beamforming. Dans INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 253, 1007-1017.
- Bai, M. R., Yao, Y. H., Lai, C. S., & Lo, Y.Y. (2016). Design and implementation of a space domain spherical microphone array with application to source localization and separation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139 (3), 1058–1070. doi: 10.1121/1.4942639
- 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
- Beentjes, C. H. (2015). Quadrature on a spherical surface. *Working note available on the website <http://people.maths.ox.ac.uk/beentjes/Essays>*.
- Brüel & Kjaer. (2016). Spherical Beamforming Systems Based on Spherical Beamforming Type 8606. Repéré à <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bn0690.ashx>
- Busque, M., Lebeau, M., Tremblay, M., Boucher, A. & Duguay, P. (2022). Portrait statistique des lésions professionnelles indemnisées au Québec en 2015-2016. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.
- Canadian Center for Occupational Health and Safety. (2022). Hazard and Risk – Hierarchy of Controls. Repéré à https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/hazard/hierarchy_controls.html
- Canetto, P. (2019). Techniques de réduction du bruit en entreprise: quelles solutions, comment choisir. Paris, Insitut National de Recherche et de Sécurité, 123 p.
- Carneiro, L., & Berry, A. (2023). Three-dimensional sound source diagnostic using a spherical microphone array from multiple capture positions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 199, 110455. doi: 10.1016/j.ymsp.2023.110455

- Chiariotti, P., Martarelli, M., & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise localization – Reviews, methodology and applications. *Mechanical System and Signal Processing*, 120, 422-448. doi: 10.1016/j.ymssp.2018.09.019
- 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. doi: 10.1016/j.jsv.2018.10.030
- Cigada, A., Lurati, M., Ripamonti, F. & Vanali, M. (2008). Beamforming method: Suppression of spatial aliasing using moving arrays. *2nd Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*.
- CNESST. (2016). Statistiques annuelles 2015 (DC200-1046-23). Repéré à https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932065?docref=mVrmPJXry6IX_gBNP7laXg
- CNESST. (2017). Statistiques annuelles 2016 (DC200-1046-24). Repéré à https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932065?docref=7kVkUN6tx0K_MxmUhqRvQ
- CNESST. (2018). Statistiques annuelles 2017 (DC200-1046-25). Repéré à <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932065?docref=AZmEcTLIcX99drXqTvk7w>
- CNESST. (2019). Statistiques annuelles 2018 (DC200-1046-26). Repéré à <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932065?docref=ULAJhCL7qgBhJjJfuzYGMw>
- CNESST. (2020). Statistiques annuelles 2019 (DC200-1046-28). Repéré à <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932065?docref=B9Egsj63ZT7wSXHqt9pIA>
- CNESST. (2021). Statistiques annuelles 2020 (DC200-1046-29). Repéré à <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2932065?docref=kVOcQ3dXsJIPHu71qVVN1A>
- CNESST. (2022). Statistiques annuelles 2021 – Version finale (DC200-1046-31). Repéré à <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/organisation/documentation/formulaires-publications/statistiques-annuelles>
- 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. Repéré à <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/organisation/documentation/formulaires-publications/reduire-bruit-en-milieu-travail>

- Djordjevic, A. & Ciric, D. (2016). Construction, calibration, evaluation of spherical microphone array and its application for beamforming. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 253 (4), 4598-4609.
- Dougherty, R. P. (2008). What is Beamforming. *2nd. Berlin Beamforming Conference*.
- Du, C., Leclere, Q. & Li., B. (2017). Design and Evaluation of Open Spherical Microphone Arrays. *24th International Congress on Sound and Vibration*. London. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01595873>.
- Duguay, P., Boucher, A., & Busque, M.A. (2014). Statistiques sur les maladies professionnelles au Québec, 17p.
- Duraiswami, R., Zotkin, D., Li, Z., Grassi, E., Gumerov, N. & Davis, L. (2005). High-order spatial audio capture and its binaural head-tracked playback over headphones with HRTF cues. *The 119th Convention of Audio Engineering Society*. 3.
- Durga Rajesh, K.V, Ganesh, N., Yaswanth Kalyan Reddy, S., Mishra, H. & Naidu, T.M.V.P.S.T. (2023). Experimental research on the mechanical characteristics of fused deposition modelled ABS, PLA and PETG specimens printed in 3D. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.343.
- Farahikia, M., & Su, Q. T. (2018). Effects of geometry dependent diffraction on the performance of object-mounted Linear Differential Microphone Arrays. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144 (3). 1123–1136. doi: 10.1121/1.5052180
- Fischer, J., & Doolan, C. (2017). Improving acoustic beamforming maps in a reverberant environment by modifying the cross-correlation matrix. *Journal of Sound and Vibration*, 411, 129-147. doi : 10.1016/j.jsv.2017.09.006
- 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
- Gamper, H., Corbin, L., Johnston D. & Tashev, I. J. (2016). Synthesis of device-independent noise corpora for speech quality assessment. *IEEE International Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC), Xi'an, China, 1-5*, doi: 10.1109/IWAENC.2016.7602956.
- GFal Tech. (2023). Acoustic Camera Array Sphere48 AC Pro: 48 Channel System for Acoustic Measurement in 2D and 3D. Repéré à https://www.gfaitech.com/fileadmin/gfaitech/documents/datasheets_komprimiert/acoustic-camera-sphere48-01-2023.pdf

- GFaI Tech. (2023a). Acoustic Camera Array Sphere120 AC Pro: 120 Channel System for 3D Measurements. Repéré à https://www.gfaitech.com/fileadmin/gfaitech/documents/datasheets_komprimiert/acoustic-camera-sphere120-01-2023.pdf
- Gillett, P. W. (2009). *Head mounted microphone arrays* (Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia). Repéré à <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/28867>
- González, R., Pearce, J. & Lokki, T. (2018). Modular Design for Spherical Microphone Arrays. *In Audio Engineering Society Conference: 2018 AES International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality*. 3-10.
- Gover, B., Ryan, J. & Stinson, M. (2003). Designing a spherical microphone array for the directional analysis of reflections and reverberation. *Audio Engineering Society 115th Convention, New York, USA*, 10-13.
- Groenewold, M. R., Masterson, E. A., Themann, C. L., & Davis, R. R. (2014). Do hearing protectors protect hearing? *American Journal of Industrial Medicine*, 57(9), p. 1001-1010, doi: 10.1002/ajim.22323
- Haddad, K., & Hald, J. (2008). 3D localization of acoustic sources with a spherical array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123, 3311. doi: 10.1121/1.2933754
- Hald, J., Morkholt, J. & Gomes, J. (2007). Efficient Interior NSI Based on Various Beamforming Methods for Overview and Conformal Mapping using SONAH Holography for Details on Selected Panels. *SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition*.
- 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, 429–441. doi: 10.1007/BF02711518
- Heilmann, G., Meyer, A. & Döbler, D. (2008). Time-domain beamforming using 3D-microphone arrays. *2nd. Berlin Beamforming Conference*.
- Jacobsen, F., Moreno-Pescador, G., Fernandez-Grande, E., & Hald, J. (2011). Near field acoustic holography with microphone on a rigid sphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), 3461-3463. doi: 10.1121/1.3575603
- Jarosińska, D., Héroux, M-È., Wilkhu, P., Creswick, J., Verbeek, J., Wothge, J., & Paunović, E. (2018). Development of the WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: An Introduction. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 813p. doi : 10.3390/ijerph15040813

- Jarrett, D.P., Habets, E. A. P., Thomas, M. R. P., & Naylor, P. A. (2012). Rigid sphere room impulse response simulation: Algorithm and applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (3), 1462–1472. doi: 10.1121/1.4740497
- Jung, I-J., & Ih, J-G. (2022). Design of a compact omnidirectional sound camera using the three-dimensional acoustic intensimetry. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 172, 108970. doi: 10.1016/j.ymssp.2022.108970.
- Lai, C. C., Nordholm, S. E., & Leung, Y. H. (2017). *A Study into the Design of Steerable Microphone Arrays*. [Version Springer Link]. doi: 10.1007/978-981-10-1691-2
- Lebedev, V. I., & Laikov, D. N. (1999). A quadrature formula for the sphere of the 131st algebraic order of accuracy. *Doklady Mathematics*, 59(3), 477-481.
- Leclere, Q., Pereira, A., Baily, C., Antoni, J. & Picard, C. (2016). A unified formalism for acoustic imaging technique: illustration in the frame of a didactic numerical benchmark, *6th Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*.
- 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
- Ledoux, E., & Denis, D. (2011). Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et de sécurité du travail (EQCOTESST), 13(2), doi: 10.4000/pistes.1831.
- Legg, Mathew. (2012). *Microphone Phased Array 3D Beamforming and Deconvolution*. [Thèse de doctorat, University of Auckland, New Zealand]. doi: 10.13140/RG.2.1.2395.5049.
- Legg, M., & Bradley, S. (2013). A Combined Microphone and Camera Calibration Technique With Application to Acoustic Imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(10), 4028-4039. doi: 10.1109/TIP.2013.2268974.
- Lehmann, M., Ernst, D., Schneider, M., Spehr, C., & Lummer, M. (2022). Beamforming for measurements under disturbed propagation conditions using numerically calculated Green's functions. *Journal of Sound and Vibration*, 520, 116638, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116638.
- Logan, N. A., (1965). Survey of some early studies of the scattering of plane waves by a sphere. *Proceedings of the IEEE*, 53(8), 773-785. doi: 10.1109/PROC.1965.4055.
- Merimaa, J. (2002). Applications of a 3-D microphone array. *Audio Engineering Society Convention 112*.

- Merino-Martinez, R., Sijtsma, P., Snellen, M., & al. (2019). A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays. *CEAS Aeronautical Journal*, 10, 197–230. doi: 10.1007/s13272-019-00383-4
- Meyer, A. & Döbler, D. (2006). Noise Source Localization Within a Car Interior Using 3D-Microphone Arrays. *1st. Berlin Beamforming Conference*.
- Meyer, J. & Elko, G.W. (2008). Handling Spatial Aliasing in Spherical Array Applications. *Hands-Free Speech Communication and Microphone Arrays*, Trento, Italy, 1-4, doi: 10.1109/HSCMA.2008.4538672.
- MHacoustics. (2023). Eigenmike microphone. Repéré à <https://mhacoustics.com/products>
- Moreno Pescador, G. (2008). *Spherical Nearfield Acoustical Holography*. (Mémoire de maîtrise, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby).
- Nakadai, T., Nakayama, T., Taguchi, T., Egusa, R., & Namatame, M. (2014). Sound-Separation System using Spherical Microphone Array with Three-Dimensional Directivity—KIKIWAKE 3D: Language Game for Children. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 7(4), 1908. doi: 10.21307/ijssis-2017-739
- Nelson, D. I., Nelson, R. Y., Concha-Barrientos, M., & Fingerhut, M. (2005). The global burden of occupational noise-induced hearing loss. *American Journal of Industrial Medicine*, 48(6), p. 446-458, doi: 10.1002/ajim.20223.
- 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
- Padois, T., Doutres, O., Sgard, F., & Berry, A. (2017). Time domain localization technique with sparsity constraint for imaging acoustic sources. *Mechanical and Signal Processing*, 94, 85-93. doi: 10.1016/j.ymsp.2017.02.035
- Padois, T., & Berry, A., (2017a). Application of acoustic imaging techniques on snowmobile pass-by noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(2), 134-139. doi: 10.1121/1.4976138
- Padois, T., Doutres, O., Sgard, F., & Berry, A. (2019). 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.ymsp.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., & Doutre, O. (2022). What if Noise Could Be Seen? Substance ÉTS. Repéré à <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/24085/>
- 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. *The Journal of the Acoustical Society of America Express Letter*, 3(4), 042801. doi: 10.1121/10.0017790
- Parkins, J.W., Sommerfeldt, S. D., & Tichy, J. (2000). Error analysis of a practical energy density sensor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(1), 211–222. doi: 10.1121/1.429458
- Peltonen, T., Lokki, T., Gouatarbès, B., Merimaa, J., & Karjalainen, M. (2001). A system for multi-channel and binaural room response measurements. *Audio Engineering Society Convention 110*, 5289.
- Petersen, S. O. (2004). *Localization of Sound Sources using 3D Microphone Array* (Mémoire de maîtrise, University of Southern Denmark). Repéré à <http://www.oscarnpetersen.dk/speciale/Thesis.pdf>
- Pretzsch, A., Seidler, A., & Hegewald, J. (2021). Health Effects of Occupational Noise. *Current Pollution Report*, 7, 344–358. doi: 10.1007/s40726-021-00194-4
- Rayleigh, J. W. S. (1896). *The Theory of Sound, Volume 2*. United Kingdom: Macmillan.
- Rafaely, B. (2005). 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. (2019). *Fundamentals of Spherical Array Processing*, (2e éd). [Version Springer]. Repéré à <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99561-8>
- Rouard, K., St-Jacques, J., Sgard, F., Nélisse, H., Berry, A., Quaegebeur, N., Grondin, F., Doutres, O. & Padois, T. (2022). Numerical comparison of acoustic imaging algorithms for a spherical microphone array. *9th Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*.
- Sasaki, Y., Kabasawa, M., Thompson, S., Kagami, S. & Oro, K. (2012). Spherical microphone array for spatial sound localization for a mobile robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal*, 713-718, doi: 10.1109/IROS.2012.6385877.
- Siemens. (2018). Simcenter Testlab 3D Acoustic Camera Advanced. Repéré à <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/simulation-test/acoustic-testing/sound-source-localization/>

- Sijtsma, P. (2008). Acoustic array corrections for coherence loss due to the wind tunnel shear layer. *2nd. Berlin Beamforming Conference*
- Soft dB. (2023). MEZZO Intensity Probe. Repéré à https://www.softdb.com/_files/_acoustic-division/Mezzo/Mezzo_INT_SpecSheet.pdf
- Soft dB. (2023a). Piccolo-I, Integrating Averaging Sound Level Meter. Repéré à https://www.softdb.com/_files/_acoustic-division/Piccolo-II/SpecSheet_Piccolo2.pdf
- Sommerfeld, A. (2004). *Mathematical Theory of Diffraction*, (1ère éd). [Version Spring Link]. Repéré à <https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8196-8>
- Tiana-Roig, E., Torras-Rosell, A., Fernandez-Grande, E., Jeong, C. & Agerkvist, F. (2014). Enhancing the beamforming map of spherical arrays at low frequencies using acoustic holography. *5th. Berlin Beamforming Conference*.
- Tontiwattanakul, K. (2016). *Signal processing for microphone arrays with novel geometrical design*. (Thèse de doctorat, University of Southampton). Repéré à <https://eprints.soton.ac.uk/400599/>
- Truax, B., & SFU Faculty publication. (1978). *The World Soundscape Project's Handbook for acoustic ecology*, (1ère éd.). [Version SFU]. Repéré à https://primo-pmtca01.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay/01SFUL_ALMA21134923670003611/SFUL
- VisiSonics. (2023). 5/64 Audio Visual Camera. Repéré <https://visisonics.com/wp-content/uploads/2021/09/5-64-Audio-Visual-Camera-Brochure.pdf>
- Wang, Y., & Chen, K. (2018). Sparse plane wave decomposition of a low frequency sound field within a cylindrical cavity using spherical microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 431, 150-162. doi: 10.1016/j.jsv.2018.06.014.
- Wiederhold, C. P., Gee, K. L., Blotter, J. D., Sommerfeldt, S. D., & Giraud, J. H. (2014). Comparison of multimicrophone probe design and processing methods in measuring acoustic intensity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(5), 2797–2807. doi: 10.1121/1.4871180
- Xiang, N., & Landschoot, C. (2019). Bayesian Inference for Acoustic Direction of Arrival Analysis Using Spherical Harmonics. *Entropy*. 21(6), 579. doi: 10.3390/e21060579.
- Zedel, L., & Zedel, B. (2022). Acoustics Week in Canada 2022. *Canadian Acoustics*, 50(3), 1–5. Repéré à from <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/3545>