

**Développement d'une antenne
microphonique intégrant
un système optique pour identifier
la position des sources sonores
les plus bruyantes en milieu
industriel**

Thomas Padois
Olivier Doutres
Franck Sgard
Alain Berry

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1038



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-035-2
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
mars 2019

Développement d'une antenne microphonique intégrant un système optique pour identifier la position des sources sonores les plus bruyantes en milieu industriel

Thomas Padois¹, Olivier Doutres¹,
Frank Sgard², Alain Berry³

¹École de technologie supérieure

²IRSST

³Université de Sherbrooke

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1038



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le personnel de soutien et les étudiants Katherine Dupré, Karim Hraki et Marc-Étienne Lahaie de l'École de technologie supérieure (ÉTS) pour leur précieuse aide lors de la fabrication du prototype d'antenne.

SOMMAIRE

Dans un contexte industriel, le bruit émis par des machines peut nuire à la santé des travailleurs et générer des problèmes de surdité ou de pertes auditives. Pour pallier ces problèmes, des solutions acoustiques efficaces doivent être mises en place en amont. La première étape d'une étude acoustique de réduction de bruit consiste à localiser la position des sources et à hiérarchiser leurs contributions. Dans un environnement industriel, les travailleurs sont répartis autour des machines et le nombre de celles-ci peut être important. Cela rend le champ acoustique complexe à cause des multiples réflexions sur les murs et objets; il est donc souvent difficile d'identifier les sources de bruit principales. La localisation des positions des sources peut être réalisée à l'aide d'un réseau de microphones appelé antenne acoustique. La performance des techniques de localisation de sources dépend du nombre de microphones, de leur répartition et du traitement du signal associé.

L'objectif de cette activité était de développer une antenne acoustique sphérique associée à une technique temporelle basée sur les intercorrélations des signaux microphoniques, appelée *Generalized Cross-Correlation* (GCC) dans la littérature anglo-saxonne, pour identifier la position des sources sonores les plus bruyantes en milieu industriel. La technique du GCC nécessite un segment temporel des signaux microphoniques pour générer une cartographie des sources; elle est reconnue comme étant robuste même dans des environnements acoustiques complexes où le champ réverbéré a une contribution significative (cas général des locaux industriels). Quant à l'antenne sphérique, elle permet une localisation des sources sonores dans la totalité de l'espace.

Dans cette étude, des critères permettant d'évaluer la qualité de la cartographie des sources sont présentés. Puis, un critère d'optimisation de la géométrie de l'antenne est proposé. L'antenne optimisée est ensuite fabriquée et une caméra panoramique (permettant de prendre des photos ou vidéos) est ajoutée pour pouvoir superposer la photographie du local à la cartographie des sources. Finalement, l'antenne sphérique développée, associée à la technique du GCC, est testée dans des conditions contrôlées (chambres héli-anéchoïque et réverbérante), puis dans un atelier où plusieurs opérateurs utilisent des machines. Les résultats montrent qu'il est possible de localiser la position des différentes machines malgré leurs contenus sonores différents et les multiples réflexions.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------|
| REMERCIEMENTS | I |
| SOMMAIRE | III |
| TABLE DES MATIÈRES | V |
| LISTE DES FIGURES..... | VII |
| LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS | XIII |
| 1. INTRODUCTION ET ÉTAT DES CONNAISSANCES | 1 |
| 2. OBJECTIFS DE RECHERCHE..... | 5 |
| 2.1 Objectif principal | 5 |
| 2.2 Objectifs spécifiques..... | 5 |
| 3. TECHNIQUE DE LOCALISATION DE SOURCES ACOUSTIQUES | 7 |
| 3.1 Signal acoustique capté par les microphones de l'antenne | 7 |
| 3.2 Intercorrélation généralisée des signaux microphoniques..... | 8 |
| 3.3 Génération de la cartographie des sources..... | 9 |
| 4. CRITÈRES POUR CARACTÉRISER LA CARTOGRAPHIE DES SOURCES..... | 11 |
| 4.1 Cartographie des sources obtenues avec une antenne sphérique à répartition linéaire de microphones..... | 11 |
| 4.2 Critères 1 et 2 : taille du lobe principal et amplitude des lobes secondaires | 12 |
| 4.3 Critère 3 : surface du lobe principal basée sur une ellipse de covariance | 13 |
| 5. CRITÈRE ET ALGORITHME D'OPTIMISATION DE LA GÉOMÉTRIE DE L'ANTENNE..... | 15 |
| 5.1 Influence des SLF dans la génération de la cartographie des sources..... | 15 |
| 5.2 Angle d'ouverture et SLF | 17 |
| 5.3 Critère d'optimisation de la géométrie d'antenne | 19 |
| 5.4 Comparaison des cartographies des sources obtenues avec l'antenne sphérique à répartition linéaire de microphones et celles obtenues avec l'antenne sphérique à répartition optimisée..... | 21 |
| 5.5 Convergence de l'algorithme d'optimisation..... | 25 |
| 6. PROTOTYPE FABRIQUÉ POUR SUPPORTER LES MICROPHONES | 29 |
| 6.1 Support sphérique | 29 |
| 6.2 Tige tenant les microphones..... | 30 |
| 6.3 Assemblage des éléments..... | 31 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.4 | Caméra panoramique pour capturer la scène acoustique | 32 |
| 7. | MESURES EXPÉRIMENTALES EN CHAMBRES CONTRÔLÉES ET EN ATELIER..... | 35 |
| 7.1 | Description du matériel utilisé pour les mesures | 35 |
| 7.2 | Comparaison des cartographies simulées et mesurées dans le cas d'une source placée devant l'antenne | 37 |
| 7.3 | Comparaison des cartographies simulées et mesurées dans le cas de deux sources espacées en azimut avec la même élévation et des niveaux acoustiques différents | 41 |
| 7.4 | Comparaison des cartographies simulées et mesurées dans le cas de deux sources espacées en azimut et en élévation avec des niveaux acoustiques différents..... | 47 |
| 7.5 | Précision de la localisation en fonction de la déformation créée par les objectifs de la caméra..... | 52 |
| 7.6 | Cartographies des sources acoustiques d'un atelier | 53 |
| 7.6.1 | Description de l'atelier et du scénario acoustique | 53 |
| 7.6.2 | Cartographie des sources acoustiques de la perceuse à colonne | 55 |
| 7.6.3 | Cartographie des sources acoustiques de la perceuse..... | 57 |
| 7.6.4 | Cartographie des sources acoustiques du marteau | 58 |
| 7.6.5 | Cartographie des sources acoustiques des machines opérées simultanément | 60 |
| 7.6.6 | Utilisation sur le terrain | 65 |
| 8. | CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 67 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 69 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 1. | Photographies d'antenne sphérique a) rigide, b) ouverte. | 3 |
| Figure 2. | Schéma de la source acoustique et des microphones..... | 7 |
| Figure 3. | a-b) SLF pour deux paires de microphones différentes, où l'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix rouge, c) somme des SLF. La source est à l'origine des coordonnées. | 10 |
| Figure 4. | a) Géométrie de l'antenne sphérique en 3D, les cercles de couleurs sont les positions des microphones, les traits gris dessinent la sphère et les pointillés sont les plans coupant les positions des microphones, b) Positions des microphones de la sphère déroulée en 2D..... | 11 |
| Figure 5. | Cartographie des sources. La source est un bruit gaussien se situant en $\phi = 0$ et $\theta = 0$. Les cercles noirs sont les positions des microphones. | 12 |
| Figure 6. | Coupes de la cartographie des sources selon a) l'azimut, b) l'élévation..... | 13 |
| Figure 7. | Cartographies des sources a) les points verts représentent les valeurs supérieures à -6 dB, b) le trait vert représente l'ellipse définissant les valeurs supérieures à -6 dB. | 14 |
| Figure 8. | Comparaison de la cartographie des sources pour a) l'antenne linéaire, b) l'antenne linéaire avec la position des microphones sur l'équateur, décalée de -30° | 14 |
| Figure 9. | Exemples de SLF dans le cas de deux configurations de microphones différentes a) les microphones sont proches, b) les microphones sont éloignés. L'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix rouge. | 15 |
| Figure 10. | Exemples de SLF pour différentes configurations dans les cas de microphones répartis sur une sphère a-b) SLF avec ligne fine, c-d) SLF avec ligne large. L'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix rouge. La source est placée en $\phi = 0$ et $\theta = 0$ | 16 |
| Figure 11. | Angle d'ouverture pour différentes paires de microphones correspondant aux SLF de la figure 10. L'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix blanche. | 17 |
| Figure 12. | Exemples de SLF pour la même paire de microphones (croix rouges) avec des positions de sources différentes (croix vertes)..... | 18 |
| Figure 13. | Évolution du critère global de symétrie en fonction du nombre de paires de microphones. | 19 |
| Figure 14. | Cartographies des sources a) avec toutes les paires de microphones, b) avec 32 paires de microphones en moins, c) avec 60 paires de microphones en moins..... | 20 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figure 15. | Représentation de la position des microphones (cercles), les lignes représentent les limites à l'intérieur desquelles les microphones peuvent être déplacés pendant l'optimisation. | 21 |
| Figure 16. | Cartographies des sources obtenues avec l'antenne a) linéaire, b) optimisée. Les petits cercles indiquent les positions des microphones et les lignes représentent les limites à l'intérieur desquelles les microphones peuvent être déplacés pendant l'optimisation..... | 22 |
| Figure 17. | a) ellipse et coupes selon b) l'azimut, c) l'élévation des cartographies des sources obtenues avec les antennes linéaire et optimisée..... | 23 |
| Figure 18. | Cartographies des sources obtenues avec la pondération PHAT avec les antennes a) linéaire, b) optimisée. | 23 |
| Figure 19. | a) ellipse et coupes selon b) l'azimut, c) l'élévation des cartographies des sources obtenues avec les antennes linéaire et optimisée et la pondération PHAT..... | 24 |
| Figure 20. | Cartographies des sources obtenues avec cinq antennes optimisées. Les antennes initiales sont a) antenne linéaire, b) antenne linéaire décalée de 10° en azimut, c) antenne linéaire décalée de -10° en azimut, d) antenne linéaire décalée de 20° en élévation, e) antenne linéaire décalée de -20° en élévation. Les ellipses et les coupes suivant les deux axes sont données en f), g) et h)..... | 26 |
| Figure 21. | Valeur du critère global en fonction du nombre de boîtes noires utilisées dans l'algorithme d'optimisation. | 27 |
| Figure 22. | Schéma conceptuel de l'antenne en 2D..... | 29 |
| Figure 23. | Dessin de la sphère support. | 30 |
| Figure 24. | Dessin de la tige sur laquelle sont fixés les microphones..... | 30 |
| Figure 25. | Assemblage du support pour microphones. | 31 |
| Figure 26. | Photographies du prototype fabriqué pour l'antenne sphérique : a) vue d'ensemble, b) vue rapprochée..... | 32 |
| Figure 27. | Caméra panoramique Vuze dotée de 8 objectifs..... | 33 |
| Figure 28. | Photographies a) antenne sphérique, b) module d'acquisition, c) ordinateur portable, d) carte de génération des signaux, e) haut-parleur actif, f) chambre héli-anéchoïque, g) chambre réverbérante..... | 36 |
| Figure 29. | Cartographies des sources obtenues par simulation (colonne de gauche), en chambre héli-anéchoïque (au centre) et en chambre réverbérante (colonne de droite). La source est placée devant l'antenne et génère un bruit blanc. Les octaves considérées sont 250 Hz (a, b, c), 500 Hz (d, e, f), 1000 Hz (g, h, i). | 39 |
| Figure 30. | Cartographies des sources obtenues par simulation (colonne de gauche), en chambre héli-anéchoïque (au centre) et en chambre réverbérante (colonne de droite). La source est placée devant l'antenne et génère un | |

| | | |
|------------|---|----|
| | bruit blanc. Les octaves considérées sont 2000 Hz (a, b, c), 4000 Hz (d, e, f), 8000 Hz (g, h, i). | 40 |
| Figure 31. | Cartographies des sources obtenues par simulation (colonne de gauche), en chambre héli-anéchoïque (au centre) et en chambre réverbérante (colonne de droite). La source est placée devant l'antenne et génère un bruit blanc. LB signifie large bande. | 41 |
| Figure 32. | Photographies de la position des sources dans a) la salle héli-anéchoïque, b) la chambre réverbérante. | 42 |
| Figure 33. | Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées de 45° en azimut génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 0 dB. | 43 |
| Figure 34. | Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées de 45° en azimut génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 3 dB. | 44 |
| Figure 35. | Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées de 45° en azimut génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 6 dB. | 45 |
| Figure 36. | Coupes selon l'azimut des cartographies de la figure 35 avec une différence de niveau de a) 0 dB, b) -3 dB, c) -6 dB. | 46 |
| Figure 37. | Photographies de la position des sources dans a) la salle héli-anéchoïque, b) la chambre réverbérante. | 47 |
| Figure 38. | Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées en azimut et en élévation génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 0 dB. | 48 |
| Figure 39. | Cartographie des sources obtenue a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées en azimut et en élévation génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 3 dB. | 49 |
| Figure 40. | Cartographie des sources obtenue a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées en azimut et en élévation génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 6 dB. | 50 |
| Figure 41. | Ellipses de covariance des cartographies de la figure 40, avec une différence de niveau de a) 0 dB, b) -3 dB, c) -6 dB. | 51 |
| Figure 42. | Cartographies des sources pour des positions aux extrémités du champ de vision de la caméra a) au sol, b-c) au plafond. | 53 |
| Figure 43. | a) Schéma de l'organisation des machines dans l'atelier, b) photographie de la scène acoustique. | 54 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figure 44. | Test avec perceuse à colonne : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 5000 Hz. | 56 |
| Figure 45. | Test avec perceuse à colonne : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 2000 et 5000 Hz. | 57 |
| Figure 46. | Test avec perceuse : a) Signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 2500 et 8000 Hz. | 58 |
| Figure 47. | Test avec marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 800 et 8000 Hz. | 59 |
| Figure 48. | Test avec marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 2000 et 8000 Hz. | 60 |
| Figure 49. | Test avec perceuse à colonne et perceuse : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 1500 Hz. | 61 |
| Figure 50. | Test avec perceuse à colonne et perceuse : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 8000 Hz. | 62 |
| Figure 51. | Test avec perceuses et marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers | |

| | | |
|------------|---|----|
| | d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 3000 et 6300 Hz. | 63 |
| Figure 52. | Test avec perceuses et marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal filtré entre 1000 et 3000 Hz. | 64 |
| Figure 53. | Test avec perceuses et marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 8000 Hz. | 65 |

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

GCC : *Generalized cross-correlation* (intercorrélations généralisées)

SLF : *Spatial likelihood function* (fonction de vraisemblance spatiale)

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

1. INTRODUCTION ET ÉTAT DES CONNAISSANCES

Au Québec, la surdité causée par l'exposition au bruit constitue, et de loin, la maladie professionnelle la plus importante. La surdité liée au bruit, en plus d'occuper le premier rang concernant le coût total ainsi que le coût par lésion, est la seule maladie professionnelle dont le nombre a augmenté entre 2007 et 2012 (Duguay, Boucher, & Busque, 2014; Lebeau, 2014). Le bruit est également un des principaux agents causaux des accidents du travail. Le risque de détérioration de l'appareil auditif des travailleurs est important au Québec; il est donc nécessaire de réduire leur exposition au bruit. La gestion des risques exige dans un premier temps, une analyse et celle-ci débute toujours par l'identification des sources de risques qui sont, dans le contexte de cette étude, les différentes sources de bruits émises dans l'environnement du travailleur. Après l'identification des risques, c.-à-d. des sources acoustiques localisées et hiérarchisées, il est possible de choisir les mesures les plus adéquates afin de réduire l'exposition.

Il existe trois types d'action permettant une réduction du bruit : (1) la modification interne de la source de bruit, (2) la modification de l'environnement dans lequel s'effectue la propagation sonore (ex. encoffrement des machines), (3) le port d'équipements de protection individuelle. La première action est difficile à mettre en œuvre, car elle nécessite une modification du produit par le fabricant, ce qui n'est pas toujours réalisable. La seconde action exige de localiser la position des sources acoustiques afin de proposer une solution adéquate (p. ex. : encoffrements, écrans acoustiques, matériaux absorbants sur les surfaces réfléchissantes). Finalement, le port de protecteurs auditifs est la solution la plus simple et la moins coûteuse, mais elle ne garantit pas une protection optimale. En effet, l'inconfort qu'ils provoquent peut inciter les travailleurs à les porter de façon intermittente. Cette étude s'inscrit dans le contexte de l'analyse des risques liés à l'exposition au bruit et a pour but de développer un prototype permettant de localiser les sources de bruit autour du travailleur et ainsi aider à la prise de décision au regard des mesures correctrices à appliquer.

Afin de pouvoir cibler l'endroit approprié sur lequel agir, le diagnostic acoustique usuel consiste à se déplacer aux différents postes de travail et à déterminer le niveau d'exposition sonore à l'aide d'un dosimètre (ou d'un sonomètre). Cet appareil est composé d'un seul et unique microphone et d'un boîtier intégrateur qui exprime, entre autres, le niveau de pression acoustique en décibel. Cet appareil indique uniquement si le travailleur est dans un environnement à risque, c'est-à-dire exposé à un niveau acoustique trop élevé, mais il ne fournit aucune information sur la position réelle des sources sonores, car le microphone mesure uniquement le niveau de bruit. Il est ainsi difficile d'entreprendre la mise en place de solutions acoustiques efficaces puisque la position des sources n'est pas connue.

En utilisant deux microphones, il est possible de mesurer la différence de pression acoustique, mais aussi la vitesse particulière acoustique et le retard de propagation entre les deux microphones. Grâce à ces nouvelles quantités estimées, il est possible de définir le niveau de pression acoustique, mais aussi une direction de propagation. Ces techniques sont souvent connues sous le nom d'antenne de microphones, celle-ci étant composée de deux à plusieurs centaines de microphones. Selon le scénario acoustique, le nombre de microphones, leur répartition et le traitement du signal associé varient. Les techniques de traitement du signal les plus couramment utilisées sur le terrain sont l'intensimétrie, l'holographie et la formation de

voies (*beamforming*) (Lanslots & Deblauwe, 2010). L'objectif de ces méthodes est de superposer une image acoustique indiquant les zones les plus bruyantes à une photographie de l'objet étudié. Cette image acoustique est appelée cartographie des sources et est constituée d'un code couleur représentant les sources, en allant de la plus bruyante vers la moins bruyante.

L'intensimétrie acoustique utilise un doublet microphonique permettant de déterminer la pression acoustique moyenne entre les deux microphones ainsi que la vitesse particulière acoustique et, par conséquent, l'intensité acoustique (Jacobsen & de Bree, 2005; Oshino & Tachibana, 1991). L'appareil de mesure associé est appelé sonde intensimétrique et sa taille est similaire à celle d'une raquette de badminton. La distance intermicrophone ne dépasse généralement pas les 10 cm. L'opérateur utilise la sonde pour balayer le devant des machines potentiellement bruyantes afin d'obtenir une cartographie de la position des sources acoustiques liée à ces machines. Cette technique suppose que la machine la plus bruyante soit au préalable localisée; elle permet d'identifier quelles parties de cette machine sont à l'origine du bruit. Il est aisé de comprendre que cette technique ne permet pas de localiser et de hiérarchiser les machines les plus bruyantes dans un local industriel qui en regroupe plusieurs dizaines. De par son fonctionnement, elle requiert une expertise acoustique. De plus, y recourir peut se révéler fastidieux, voire irréalisable, dans le cas de machines de très grandes dimensions.

L'holographie acoustique consiste à mesurer le champ de pression acoustique avec une antenne de microphones, puis de le rétropropager vers la source acoustique afin d'obtenir le champ de pression rayonné par celle-ci (Maynard, Williams, & Lee, 1985). Cette technique est plus efficace lorsque les ondes évanescentes sont mesurées, c'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'être proche de la source, comme son nom l'indique *nearfield acoustical holography* (NAH). Les antennes de microphones couramment utilisées avec la technique NAH sont planes et régulières (c'est-à-dire que l'espacement intermicrophones est constant). Comme pour la sonde intensimétrique, l'espacement intermicrophones délimite la fréquence maximale qui peut être analysée. Ainsi, si la source rayonne un bruit à hautes fréquences, il sera nécessaire d'avoir un petit espacement intermicrophone. De plus, si les dimensions de la source sont grandes, cela augmente considérablement le nombre total de microphones. Il est donc nécessaire de trouver une solution alternative. Récemment, il a été démontré qu'une formulation parcimonieuse pouvait permettre de réduire le nombre de microphones (Chardon et al., 2012). La technique de NAH est également utilisée avec des antennes sphériques (Jacobsen, Moreno-Pescador, Fernandez-Grande, et Hald, 2011). Après avoir décomposé le champ de pression provenant de la source en harmoniques sphériques, il est possible de le reconstruire. Avec des antennes rigides (figure 1a) et des microphones affleurant à la surface de la sphère, il est possible de corriger les effets liés à la diffraction du champ acoustique par la sphère. Cependant, pour donner un résultat précis, cette méthode requiert un grand nombre de microphones.

La technique de formation de voies (*beamforming*) est basée sur le déphasage entre deux signaux microphoniques. Le but est de compenser ce déphasage pour une direction supposée et de sommer les signaux microphoniques. Quand la direction supposée est celle de la source, la somme est maximale et la position de la source est localisée. Les premières antennes utilisées avec la technique de formation de voies étaient linéaires. L'amélioration des performances des systèmes informatiques a permis l'utilisation d'antennes planes. Comme pour les techniques précédentes, la répartition des microphones influe sur le résultat. Il est courant d'utiliser une antenne dont la position des microphones suit des bras de spirale (Prime et Doolan, 2013). La technique de formation de voies est également utilisée avec des antennes sphériques rigides (figure 1a) et une décomposition en harmoniques sphériques (Rafaely, 2015). La qualité du résultat est également dépendante du nombre de microphones.



Figure 1. Photographies d'antenne sphérique a) rigide, b) ouverte.

Chaque technique de localisation précédemment citée possède des avantages et des inconvénients. Selon la situation, une technique sera plus efficace qu'une autre. Il est donc important de préciser le contexte de cette étude qui est la localisation des sources acoustiques dans un local industriel. Dans ce cas, les sources acoustiques peuvent être réparties devant/derrière, à droite ou à gauche et en haut ou en bas par rapport au travailleur. Il est donc nécessaire d'enregistrer le champ acoustique de manière omnidirectionnelle en utilisant une antenne sphérique. Cela élimine donc l'utilisation d'une sonde intensimétrique à deux microphones. Les techniques de formation de voies et de NAH peuvent s'appliquer avec une antenne sphérique en décomposant le champ de pression en harmoniques sphériques. Cependant, la qualité de l'image acoustique est dépendante de l'ordre des harmoniques sphériques et nécessite donc un grand nombre de microphones. De plus, le post-traitement est effectué dans le domaine fréquentiel, c'est-à-dire qu'une image acoustique est créée pour chaque fréquence. Le grand nombre de microphones et la création d'une image par fréquence augmente le temps de calcul. Finalement, les sources acoustiques étant situées dans un local industriel, la technique utilisée doit être peu sensible à la réverbération ce qui élimine les

techniques précédemment citées. La technique temporelle basée sur les intercorrélations généralisées, appelée *generalized cross-correlation* (GCC) dans la littérature anglo-saxonne (Knapp & Carter, 1976), a été sélectionnée, car celle-ci a montré de bonnes performances en présence de réverbération, ne nécessite pas un grand nombre de microphones et génère une seule cartographie par segment temporel sélectionné (Padois, 2018 ; Padois, Doutres, Sgard, & Berry, 2016a; Padois, Sgard, Doutres, & Berry, 2017).

En 2006, une équipe de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS France) a développé une antenne sphérique composée de 15 microphones afin de localiser les sources acoustiques dans un local industriel (Noël, Planeau, & Habault, 2006). L'antenne, dont le diamètre est de 50 cm, s'installe rapidement à l'endroit où sont positionnés les travailleurs. La méthode utilisée pour obtenir la cartographie des sources acoustiques est basée sur la technique du GCC et la résolution d'un problème inverse. Malgré des résultats prometteurs en milieu réel, cette technique comporte des limites induites par le temps de calcul nécessaire (qui peut excéder une heure) pour résoudre le problème inverse afin d'obtenir une cartographie et par la complexité du calcul qui limite la résolution de l'image acoustique et donc la précision de la localisation. De plus, le système optique n'est pas intégré à l'antenne de microphones. La mesure est donc divisée en deux étapes : la prise de photographie puis la mesure acoustique. Cette non-synchronisation des étapes peut entraîner un décalage entre la photographie et l'image acoustique, et conduire à une mauvaise interprétation de la position des sources acoustiques. En 2015, ces travaux ont été repris lors d'un projet postdoctoral auquel sont associés l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et l'École de technologie supérieure (ÉTS). Une antenne similaire à celle de l'INRS (figure 1b) a été développée ainsi que la technique de localisation de sources basée sur la technique du GCC (Padois, Doutres, Sgard, & Berry, 2016b, 2017; Padois, Sgard, Doutres, & Berry, 2015). Cette étude a montré qu'il fallait optimiser la répartition des microphones sur la sphère afin d'améliorer la cartographie des sources et donc les performances de localisation. De plus, les images acoustiques obtenues ne prenaient pas en compte la photographie du lieu, il était donc difficile d'associer une source acoustique à un endroit précis du local. Ainsi, il est nécessaire d'intégrer un système optique à la sphère de microphones afin de pouvoir superposer la cartographie des sources à une photographie du local. Ce rapport présente la technique d'optimisation de la géométrie de l'antenne ainsi que l'intégration du système optique.

La section 2 présente plus précisément l'objectif de cette activité de recherche tandis que la section 3 décrit les fondements théoriques de la technique du GCC. Puis, des critères pour évaluer la qualité d'une cartographie acoustique sont présentés dans la section 4. L'algorithme et le critère d'optimisation sont discutés dans la section 5 alors que la section 6 comporte la description du prototype fabriqué ainsi que la caméra panoramique retenue. Finalement, dans la section 7, l'antenne développée associée à la technique du GCC est éprouvée dans des chambres où l'environnement acoustique est contrôlé puis dans un atelier où des opérateurs utilisent des machines. Les conclusions et les perspectives de cette étude sont présentées à la section 8.

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

2.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser la géométrie d'une antenne sphérique de microphones par l'intermédiaire de simulations numériques, puis de fabriquer un prototype de l'antenne optimale en y intégrant une caméra afin de l'utiliser en milieu industriel. L'antenne doit être de petite taille pour pouvoir être déplacée d'un poste de travail à l'autre. De plus, le nombre de microphones ne doit pas être élevé afin de garder un temps de calcul raisonnable. Finalement, la technique de localisation doit être peu sensible aux effets de la réverbération.

2.2 Objectifs spécifiques

- Définir des critères pour qualifier la cartographie des sources;
- Optimiser la répartition des microphones sur la sphère;
- Développer un support intégrant les microphones et la caméra;
- Tester l'antenne de microphones en chambre héli-anéchoïque et réverbérante;
- Expérimenter l'antenne de microphones dans un atelier avec des opérateurs utilisant des machines.

3. TECHNIQUE DE LOCALISATION DE SOURCES ACOUSTIQUES

3.1 Signal acoustique capté par les microphones de l'antenne

Une source acoustique placée à la position r_s génère un signal $s(r_s, t)$ qui est enregistré par un réseau de M microphones placés aux positions r_m avec $m = 1, \dots, M$ (figure 2).

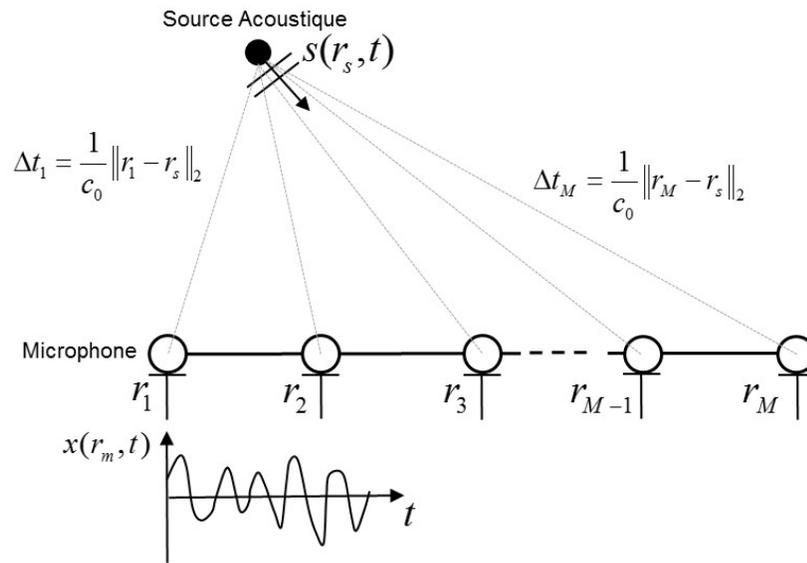


Figure 2. Schéma de la source acoustique et des microphones.

Le signal $x(r_m, t)$ reçu par le microphone m peut s'écrire

$$x(r_m, t) = s(r_s, t - \Delta t_m) + v_m(t), \quad (1)$$

où $v_m(t)$ est un bruit décorréolé additionnel provenant du bruit électrique des capteurs ou du bruit de fond. Le terme Δt_m est le temps de propagation de l'onde acoustique pour aller de la source au microphone; il est défini par la distance euclidienne comme suit :

$$\Delta t_m = \frac{1}{c_0} \|r_m - r_s\|_2, \quad (2)$$

avec c_0 la vitesse du son et $\|\cdot\|_p$ la norme p d'un vecteur. La position de la source est une variable de ce temps de propagation. Ainsi, si la position des microphones et la vitesse du son sont connues, il ne reste que le temps de propagation à estimer pour obtenir la position de la

source. Dans le cas de deux microphones placés à des positions différentes, deux temps de propagation différents existent et un retard de propagation entre les deux signaux microphoniques en résulte. Si ce retard peut être mesuré, il est possible d'estimer un ensemble de positions de sources. En considérant plusieurs paires de microphones, il est possible d'estimer plusieurs retards de propagation et donc de converger vers la position de la source. Un moyen pour définir le retard de propagation entre deux signaux microphoniques est d'utiliser la fonction d'intercorrélation. En imagerie acoustique, une méthode couramment utilisée est l'intercorrélation généralisée qui permet l'utilisation d'un préfiltrage pendant le calcul.

3.2 Intercorrélation généralisée des signaux microphoniques

Dans la littérature anglo-saxonne, le terme intercorrélation généralisée $R_{mn}(\tau)$ est appelé *generalized cross-correlation* (GCC) (Knapp et Carter, 1976). Le retard de propagation entre deux signaux microphoniques est estimé par la technique du GCC dans laquelle $R_{mn}(\tau)$ est généralement calculé grâce à la transformée de Fourier (FFT) inverse de l'interspectre des signaux microphoniques C_{mn} :

$$R_{mn}(\tau) = \sum_{k=0}^{Nf-1} W(k)C_{mn}(k) \exp(j2\pi \frac{k}{Nf} \tau), \quad (3)$$

avec k l'indice fréquentiel, Nf le nombre de points de la FFT, $j = \sqrt{-1}$ et $W(k)$ une fonction permettant d'effectuer un préfiltrage des signaux microphoniques. La technique la plus utilisée pour effectuer le préfiltrage est appelée *phase transform* (PHAT) (Knapp & Carter, 1976). Ce préfiltrage permet d'enlever l'amplitude de l'interspectre tout en gardant l'information de phase (donc le déphasage), ce qui améliore la cartographie des sources dans certains cas. Par la suite, il sera mentionné GCC-PHAT quand ce préfiltrage est utilisé et GCC quand celui-ci ne l'est pas.

En considérant un nombre total de microphones M , il est possible de définir une matrice de $(M \times M)$ paires de microphones. Cependant, les termes diagonaux de cette matrice réfèrent aux autocorrélations qui ont une valeur maximale pour un retard nul (pas de retard entre le même signal microphonique). Ces termes n'apportent donc aucune information sur le retard de propagation et sont, par conséquent, ignorés pendant le calcul. D'autre part, les termes symétriques par rapport à la diagonale de cette matrice, par exemple les microphones (1,2) et les microphones (2,1) fournissent la même information. Ces paires redondantes ne sont donc pas considérées. Finalement, seules les paires uniques de microphones sont utilisées pour le calcul de la technique du GCC, ce qui donne un nombre de paires de microphones égal à $M_p = (M \times (M - 1)) / 2$.

3.3 Génération de la cartographie des sources

L'étape suivante consiste à déterminer une zone de scan où la position de la source va être recherchée. Cela revient à discrétiser spatialement une partie de l'espace devant l'antenne de microphones. Pour chaque point de la zone de scan r_i et une paire de microphones, il est possible de définir un retard de propagation τ_{r_i} . Ainsi, le but est d'associer une valeur issue de la technique du GCC à chaque point de la zone de scan. Le résultat obtenu pour une paire de microphones est appelé *spatial likelihood function* dans la littérature anglo-saxonne (fonction de vraisemblance spatiale), notée SLF dans cette étude (Aarabi, 2003; Velasco, Pizarro, & Macias-Guarasa, 2012). Ainsi, chaque paire de microphones crée un motif différent. La sortie du signal de l'antenne $y(r_i)$ s'écrit

$$y(r_i) = \frac{1}{M_p} \sum_{p=1}^{M_p} R_p(\tau_{r_i}), \quad (4)$$

avec R_p une SLF projetée sur la zone de scan pour la paire de microphones p . La somme des M_p SLF (pour M_p paires de microphones) est appelée cartographie des sources. Le maximum de la cartographie indique la position de la source. Cette technique est dite du domaine temporel, car elle n'est pas basée sur la matrice des interspectres comme le *beamforming* fréquentiel.

Finalement, cette technique d'imagerie acoustique peut être résumée comme suit :

- Sélectionner un segment temporel des signaux microphoniques, la durée de ce segment peut varier de quelques millisecondes à plusieurs secondes;
- Filtrer le signal dans la bande de fréquences choisie si nécessaire;
- Calculer les fonctions d'intercorrélation avec l'Éq. (3);
- Projeter la fonction d'intercorrélation sur la zone de scan pour obtenir une SLF (figures 3a et 3b);
- Sommer toutes les SLF pour obtenir la cartographie des sources (figure 3c).

Il est à noter que plus le résultat de la fonction d'intercorrélation sera un pic étroit (type Dirac), plus la largeur du motif sur la SLF sera étroite et plus la localisation sera précise.

Deux exemples de SLF sont donnés aux figures 3a et 3b avec deux paires de microphones différentes. La source est placée à l'origine des coordonnées et est considérée à l'infini. Dans le premier cas, les microphones ont le même azimut et des élévations différentes (figure 3a). La SLF obtenue est une ligne passant entre les deux microphones. Les valeurs de la SLF sont divisées par le maximum et exprimées en dB. La ligne ayant la valeur de 0 dB représente les différentes positions de sources possibles créant le même retard de propagation que celui

mesuré par la paire de microphones. Pour la seconde paire, les microphones ont la même élévation, mais un azimut différent (figure 3b). La SLF obtenue a une forme circulaire. La somme des deux SLF donne la cartographie des sources (figure 3c).

Dans ce cas, il est difficile d'estimer la position de la source, car les SLF se croisent à deux endroits différents, c'est la raison pour laquelle plusieurs SLF et donc plusieurs microphones sont nécessaires.

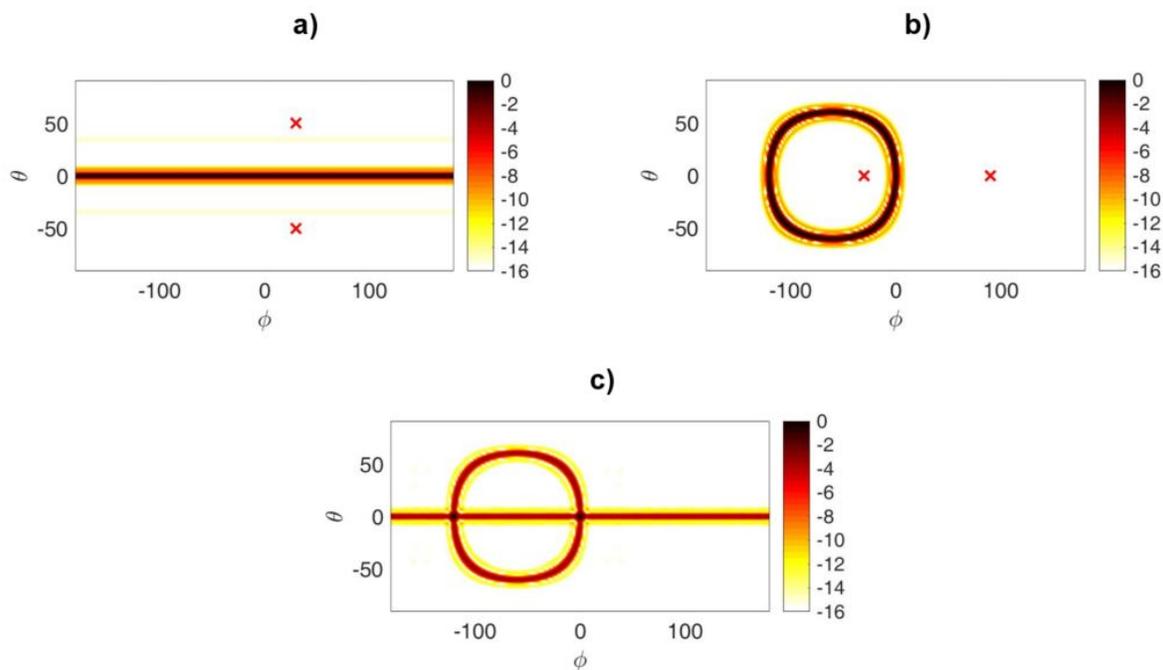


Figure 3. a-b) SLF pour deux paires de microphones différentes, où l'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix rouge, c) somme des SLF. La source est à l'origine des coordonnées.

4. CRITÈRES POUR CARACTÉRISER LA CARTOGRAPHIE DES SOURCES

Dans cette section, des simulations numériques réalisées avec le logiciel MATLAB sont utilisées pour étudier la cartographie des sources acoustiques obtenue par la technique du GCC. Le but est d'évaluer la qualité de la cartographie établie avec une antenne à répartition linéaire de microphones. Trois critères sont proposés à cette fin : la taille et la surface du lobe principal, ainsi que l'amplitude des lobes secondaires.

4.1 Cartographie des sources obtenues avec une antenne sphérique à répartition linéaire de microphones

Dans un premier temps, une source en champ lointain est placée dans un environnement anéchoïque. Les ondes acoustiques rayonnées par cette source sont planes et captées par une antenne sphérique. Puis, la technique du GCC est utilisée pour générer la cartographie des sources. Les microphones sont répartis sur une sphère, leurs coordonnées sont appelées azimut ϕ (latitude en géographie terrestre) et élévation θ (longitude). L'antenne comporte 18 microphones répartis sur une sphère de 40 cm de diamètre. Ce nombre de microphones, similaire à celui d'études précédentes (Noël et al., 2006), permet de conserver un temps de calcul en dessous d'une seconde pour générer une cartographie des sources (Padois et al., 2017); le but étant d'avoir trois cercles à des élévations différentes comme l'antenne de l'INRS. Six microphones sont répartis sur chaque cercle, car le système d'acquisition dispose de cartes de six voies. Six microphones sont répartis sur l'équateur de la sphère. Puis, deux autres groupes de six microphones sont répartis à deux élévations différentes (une vers le pôle nord et l'autre vers le pôle sud). La répartition est dite linéaire, car les trois groupes de six microphones possèdent les mêmes azimuts. La géométrie de l'antenne est présentée en 3D et en 2D dans la figure 4.

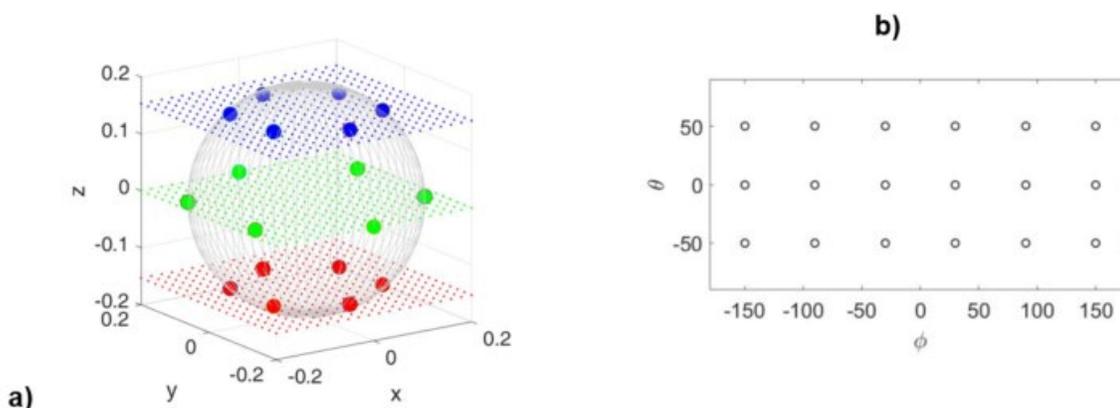


Figure 4. a) Géométrie de l'antenne sphérique en 3D, les cercles de couleurs sont les positions des microphones, les traits gris dessinent la sphère et les pointillés sont les plans coupant les positions des microphones, b) Positions des microphones de la sphère déroulée en 2D.

La source placée en $\phi = 0$ et $\theta = 0$ rayonne un bruit blanc gaussien. Les signaux microphoniques sont échantillonnés à 44 kHz pendant deux secondes. Un filtre passe-bande de type *Butterworth* du second ordre qui coupe entre 100 et 8000 Hz est utilisé. Puis, les signaux microphoniques filtrés sont utilisés comme variables d'entrée de la technique du GCC. La cartographie des sources obtenues est présentée dans la figure 5. Le maximum de la cartographie des sources indique la position de la source. Ainsi, dans ce cas, la position de la source qui était $\phi = 0$ et $\theta = 0$ est bien localisée. La tâche, qui se trouve à la position de la source, est appelée lobe principal et les taches l'entourant sont les lobes secondaires. La dynamique de la cartographie est de 16 dB ce qui signifie que les valeurs au-delà de ce seuil ne sont pas représentées. Il est commun en imagerie acoustique d'avoir ce type de dynamique, car les techniques classiques ne peuvent pas localiser deux sources dont les niveaux diffèrent de façon importante.

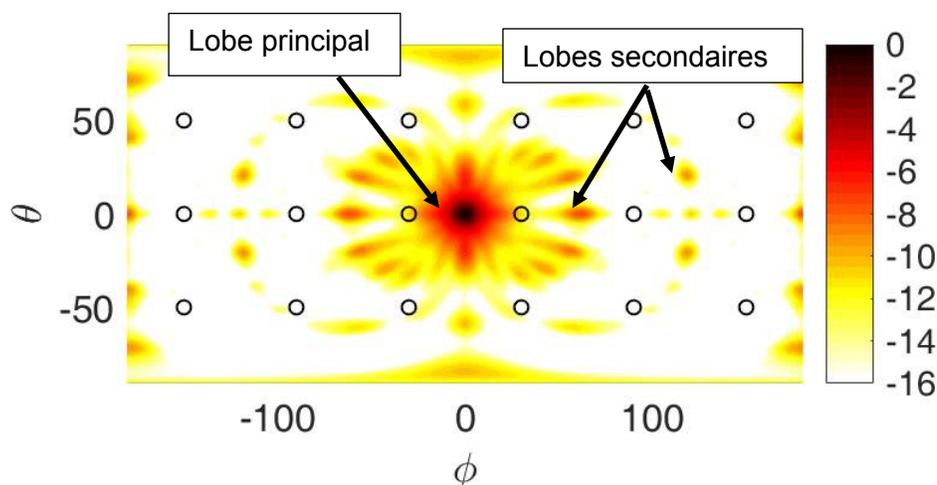


Figure 5. Cartographie des sources. La source est un bruit gaussien se situant en $\phi = 0$ et $\theta = 0$. Les cercles noirs sont les positions des microphones.

4.2 Critères 1 et 2 : taille du lobe principal et amplitude des lobes secondaires

La figure 5 montre que de nombreux artefacts sont présents autour du lobe principal. Ces artefacts sont appelés lobes secondaires et sont liés à la géométrie finie de l'antenne et à la répartition géométrique des microphones. Si l'amplitude des lobes secondaires est trop grande, ils peuvent empêcher la localisation ou être considérés à tort comme des sources de plus faible amplitude. Ainsi, l'idéal est d'obtenir une cartographie des sources sans lobes secondaires. Une seconde caractéristique de la cartographie des sources est la largeur du lobe principal. Un lobe principal trop large peut empêcher la localisation de sources à proximité. Ainsi, l'idéal est d'avoir un lobe principal le moins large possible.

Ces deux caractéristiques peuvent être déterminées en prenant une coupe à la position de la source selon les deux directions (ϕ, θ) (figure 6). La largeur du lobe principal est généralement calculée à -6 dB par rapport au maximum de la cartographie des sources, ce qui donne, dans ce cas, 28° dans les deux directions. Le niveau des lobes secondaires est déterminé par la différence entre l'amplitude du lobe principal et celle des lobes secondaires. Pour $\theta = 0$, le

niveau des lobes secondaires est de 7,5 dB et pour $\phi=0$ il est de -10,2 dB. Ces deux mesures, largeur du lobe principal et amplitude des lobes secondaires, donnent une bonne idée de la qualité de la cartographie des sources, mais elles ne reflètent pas l'aspect bidimensionnel de la cartographie des sources.

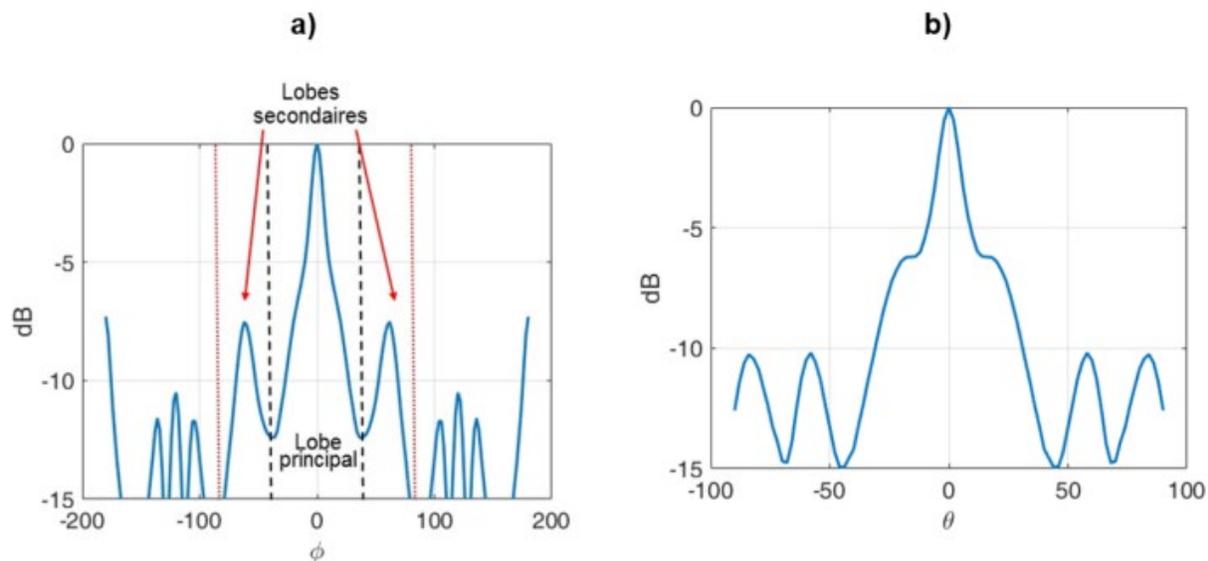


Figure 6. Coupes de la cartographie des sources selon a) l'azimut, b) l'élévation.

4.3 Critère 3 : surface du lobe principal basée sur une ellipse de covariance

Un autre critère pour étudier la qualité de la cartographie des sources est de considérer la taille du lobe principal, mais cette fois-ci d'un point de vue bidimensionnel. Le but est de définir une géométrie qui délimite la surface du lobe principal. En considérant que ce dernier suit une loi normale, il est possible de définir une ellipse de confiance entourant le lobe principal. Pour réaliser cette ellipse, seulement les valeurs supérieures à -6 dB sont conservées sur la cartographie des sources. Ces valeurs sont représentées par des points verts que l'on peut voir à la figure 7a. Le but maintenant est de définir l'ellipse qui entoure ce nuage de points. Celle-ci peut être définie par la matrice de covariance des points supérieurs à -6 dB. En effet, les axes mineur et majeur de l'ellipse sont donnés par les vecteurs propres de cette matrice et les rayons par les valeurs propres (Johnson & Wichern, 2007). L'ellipse de confiance à 95 %, obtenue avec la cartographie des sources, est illustrée à la figure 7b. Basée sur cette ellipse, la surface du lobe principal peut être calculée. En conclusion, deux cartographies des sources peuvent être comparées par la surface du lobe principal, la largeur suivant les deux directions et l'amplitude des lobes secondaires. Celle ayant la plus petite surface de lobe principal ou le lobe principal le moins large ainsi que des lobes secondaires avec la plus petite amplitude sera la meilleure.

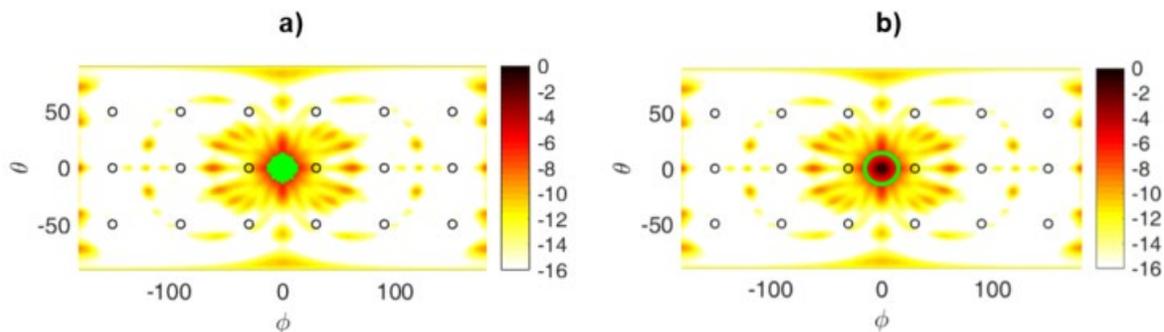


Figure 7. Cartographies des sources a) les points verts représentent les valeurs supérieures à -6 dB, b) le trait vert représente l'ellipse définissant les valeurs supérieures à -6 dB.

Ces caractéristiques sont intrinsèques à la géométrie de l'antenne. La figure 8 présente la cartographie des sources obtenue avec une antenne similaire dont la position des microphones sur l'équateur a été décalée de -30° . Tous les autres paramètres sont identiques. En décalant seulement les microphones sur l'équateur, il est possible de changer la cartographie des sources. Dans ce cas, les lobes secondaires aux élévations extrêmes ($\theta = \pm 90^\circ$) ont disparu. De plus, les lobes secondaires ne sont pas exactement aux mêmes positions et l'amplitude a également été modifiée. Il est ainsi nécessaire d'optimiser la géométrie de l'antenne pour minimiser l'influence de ces différents paramètres sur la cartographie des sources.

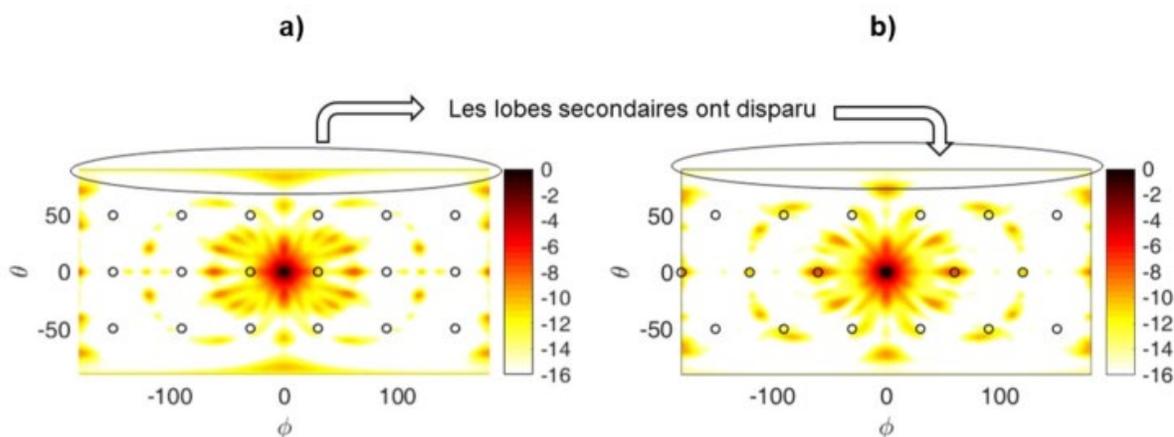


Figure 8. Comparaison de la cartographie des sources pour a) l'antenne linéaire, b) l'antenne linéaire avec la position des microphones sur l'équateur, décalée de -30° .

5. CRITÈRE ET ALGORITHME D'OPTIMISATION DE LA GÉOMÉTRIE DE L'ANTENNE

5.1 Influence des SLF dans la génération de la cartographie des sources

La cartographie des sources est obtenue en sommant toutes les SLF. Dans le cas précédent, il y avait 18 microphones, ce qui donne 153 paires de microphones et donc 153 SLF à sommer. Chaque SLF représente un motif qui passe par la position de la source. Si le résultat de la fonction d'intercorrélation était parfait, celui-ci serait de type Dirac et le motif de la SLF serait une ligne fine.

Cependant à cause de la longueur finie des signaux microphoniques, du contenu fréquentiel de la source et du bruit de fond (acoustique ou électrique), le résultat de la fonction d'intercorrélation n'est pas de type Dirac. Elle ressemble à un sinus cardinal avec un lobe principal ayant une certaine largeur et des lobes secondaires. Ainsi, quand la fonction d'intercorrélation est projetée sur la zone de scan, à la place d'avoir une ligne fine, la SLF possède une certaine largeur liée à la taille du lobe principal de la fonction d'intercorrélation.

Par la suite, par abus de langage, la présente étude fera référence à l'épaisseur du motif ou ligne de la SLF. En fonction de la position des microphones, ce motif peut être d'épaisseur fine ou large.

L'exemple montré à la figure 9 met en exergue ce point. Si les deux microphones sont proches (figure 9a), l'épaisseur du motif est large (figure 9a), alors que le motif est plus fin si les microphones sont espacés (figure 9b).

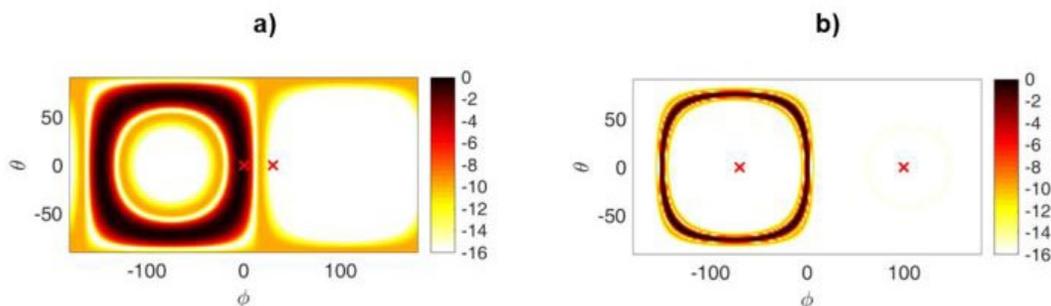


Figure 9. Exemples de SLF dans le cas de deux configurations de microphones différentes a) les microphones sont proches, b) les microphones sont éloignés. L'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix rouge.

Dans un premier temps, les SLF données par l'antenne sphérique à répartition linéaire précédemment utilisée sont étudiées. Le nombre de SLF étant trop grand (153 au total), quatre SLF avec des motifs différents sont présentées à la figure 10. Chaque SLF montre une ligne principale (celle avec la plus grande amplitude) qui passe par la position de la source. Cette ligne est accompagnée d'une seconde ligne de plus faible amplitude associée aux lobes secondaires de l'intercorrélation.

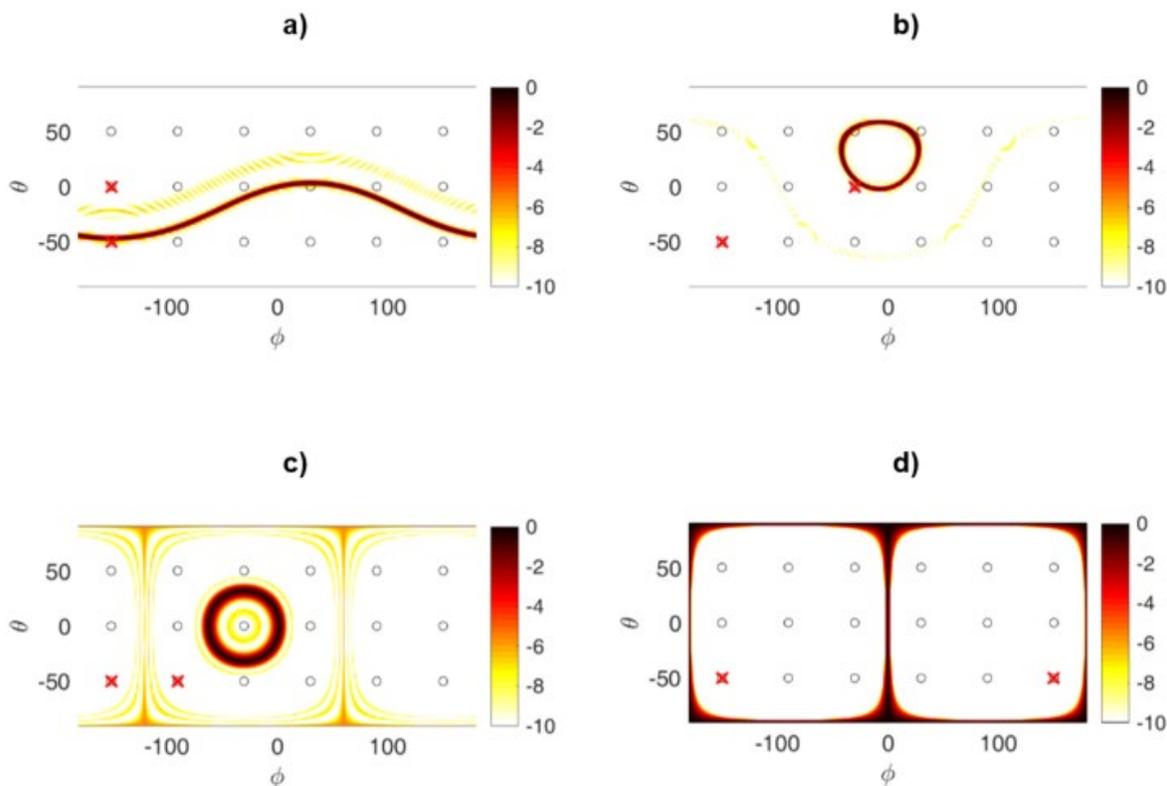


Figure 10. Exemples de SLF pour différentes configurations dans les cas de microphones répartis sur une sphère a-b) SLF avec ligne fine, c-d) SLF avec ligne large. L'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix rouge. La source est placée en $\phi = 0$ et $\theta = 0$.

Les figures 10a et 10b ont une ligne fine soit fermée soit ouverte alors que les figures 10c et 10d ont une ligne dont l'épaisseur est beaucoup plus large, surtout à la figure 10d, qui a une forte amplitude sur le pourtour de la cartographie.

En se basant sur ces observations, il est aisé de comprendre que les figures 10c et 10d apportent de l'information inutile lors du processus de sommation des SLF. Le but est donc de s'affranchir de ces SLF. Cependant, celles-ci sont dépendantes de la position des microphones et de la source. Ainsi, si la source est à une autre position, les SLF seront différentes. Elles ne peuvent donc pas être sélectionnées en fonction du motif qu'elles génèrent et il est nécessaire de définir un critère qui ne dépend pas de la position de la source.

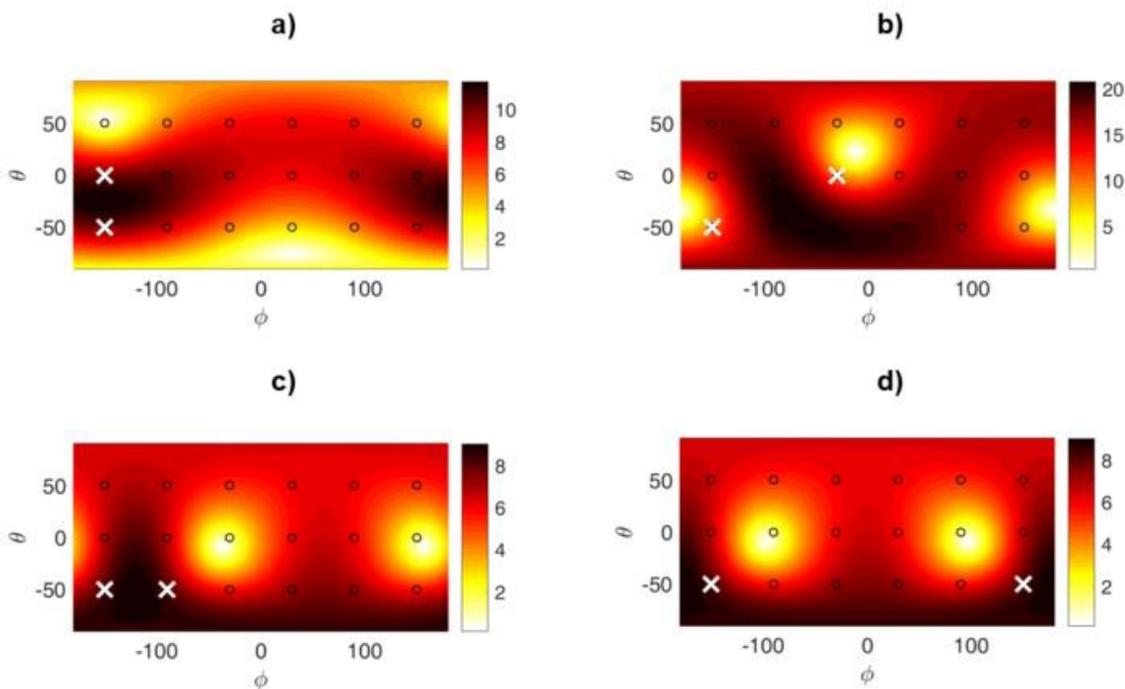
5.2 Angle d'ouverture et SLF

Quaegebeur *et al.* (Quaegebeur, Padois, Gauthier, & Masson, 2016) ont proposé un critère qui permet d'améliorer la cartographie des sources. Ce critère est basé sur l'angle d'ouverture α entre un point de la zone de scan et une paire de microphones :

$$\sin(\alpha) = \frac{\| \vec{r}_m - \vec{r}_l \times \vec{r}_n - \vec{r}_l \|_2}{\| \vec{r}_m - \vec{r}_l \|_2 \| \vec{r}_n - \vec{r}_l \|_2} \quad (5)$$

Si la valeur de l'angle d'ouverture est inférieure à un seuil, ce point de la zone de scan n'est pas considéré et inversement. De telle sorte que, pour chaque SLF, seulement une partie des points de la zone de scan est conservée, ce qui permet d'améliorer la cartographie des sources. L'avantage de ce critère est que la position de la source n'est pas considérée, seul l'agencement entre les points de la zone de scan et les microphones sont pris en compte.

Pour chaque SLF, il est alors possible de calculer la valeur de ce critère, c'est-à-dire la valeur



de l'angle d'ouverture entre un point de la zone de scan et une paire de microphones. La figure 11 montre les valeurs de l'angle d'ouverture obtenues pour les SLF précédemment utilisées. Il est aisé de voir qu'un motif similaire se dégage entre les SLF précédentes et les valeurs de l'angle d'ouverture. Les lignes des SLF suivent un motif similaire aux valeurs d'angle d'ouverture.

Figure 11. Angle d'ouverture pour différentes paires de microphones correspondant aux SLF de la figure 10. L'emplacement des microphones utilisés est marqué d'une croix blanche.

Dans l'exemple suivant, trois SLF sont obtenues pour la même paire de microphones, mais pour des positions de sources différentes (figure 12). Ces trois SLF sont à comparer avec la figure 11c. Pour chaque position de source, la ligne de la SLF suit bien la géométrie décrite par la valeur de l'angle d'ouverture. Ainsi, l'angle d'ouverture est un bon moyen pour estimer une SLF sans prérequis sur la position de la source.

La SLF présentant le moins bon résultat est donnée à la figure 10d. L'angle d'ouverture associée est illustré à la figure 11d. La SLF présentant le meilleur résultat est montrée à la figure 10a et la cartographie associée à la figure 11a. La principale différence entre les figures 11a et 11d est la « quantité de symétrie » présente dans la cartographie des valeurs de l'angle d'ouverture. Alors que la figure 11a ne semble pas présenter de symétrie selon les axes $\phi=0$ et $\theta=0$, la figure 11d est quant à elle très symétrique. Ainsi, un moyen de présélectionner les SLF pourrait être la quantité de symétrie des cartographies des angles d'ouverture.

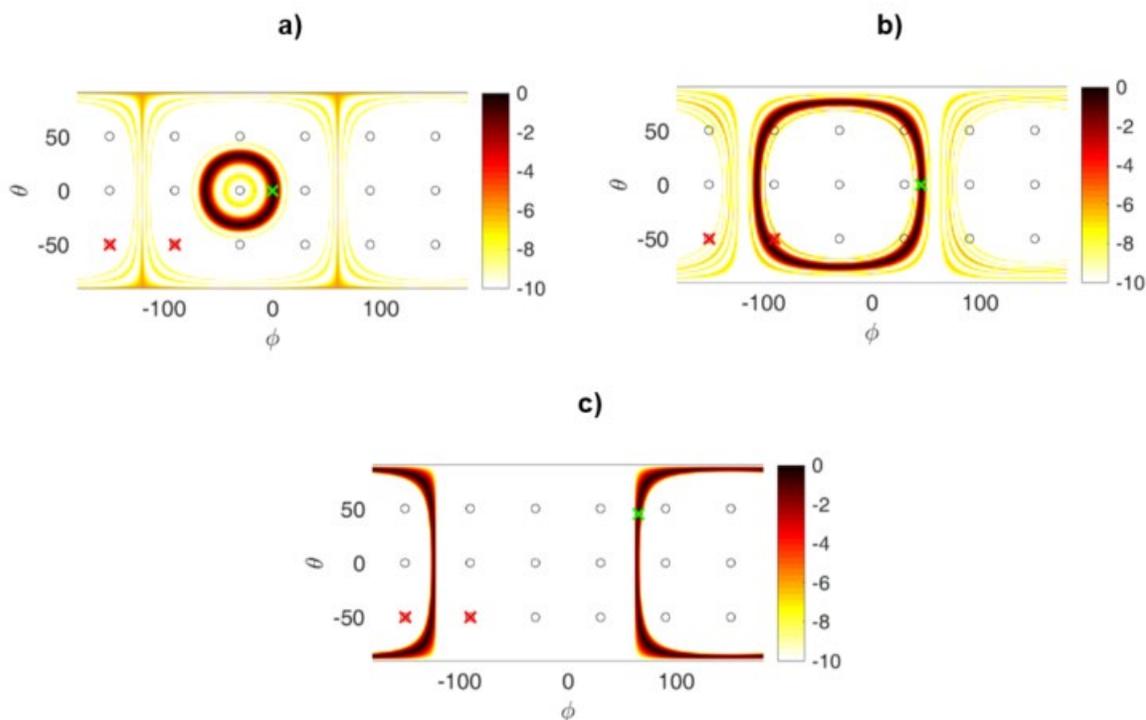


Figure 12. Exemples de SLF pour la même paire de microphones (croix rouges) avec des positions de sources différentes (croix vertes).

5.3 Critère d'optimisation de la géométrie d'antenne

Pour estimer les symétries horizontale J_h et verticale J_v de la cartographie des angles d'ouverture $\alpha(\phi, \theta)$, il est possible d'utiliser les deux critères suivants :

$$J_h = \alpha(\phi, \theta) - \alpha(\phi, -\theta), \tag{6}$$

$$J_v = \alpha(\phi, \theta) - \alpha(-\phi, \theta). \tag{7}$$

Ces critères sont simplement une comparaison entre la cartographie des angles d'ouverture et la même cartographie retournée par rapport à l'axe vertical ou horizontal. Pour obtenir une valeur unique par cartographie des angles d'ouverture, le critère global suivant est utilisé :

$$J = \sum_{\theta} |J_h| + \sum_{\phi} |J_v|. \tag{8}$$

La valeur du critère global de symétrie est donnée à la figure 13 pour l'antenne linéaire précédemment utilisée.

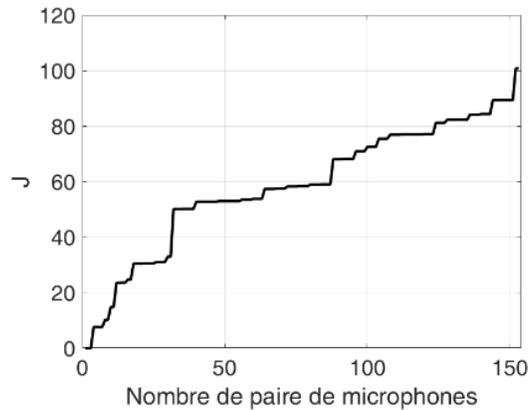


Figure 13. Évolution du critère global de symétrie en fonction du nombre de paires de microphones.

Pour une meilleure lecture, les valeurs de J ont été triées par ordre croissant. La valeur du critère de symétrie croit de 0 à 100. Si le critère est égal à 0 cela signifie que la cartographie est totalement symétrique et inversement. Pour les quatre configurations présentées précédemment (figures 9a, 9b, 9c et 9d), les valeurs sont respectivement de 58, 50, 52 et 23. Maintenant, la cartographie des sources est tracée uniquement avec les paires de microphones ayant un critère global J supérieur à 50, ce qui revient à enlever 32 paires de microphones. Le résultat est comparé avec la cartographie initiale à la figure 14. En enlevant les paires de microphones avec une valeur de J faible, c'est-à-dire avec beaucoup de symétrie, les lobes secondaires sur les côtés de la cartographie ont été retirés (figure 12b). À la figure 14c, 60 paires de microphones ont été retirées du processus de sommation. Bien que de nombreux lobes secondaires aient été enlevés, de nouveaux apparaissent en raison du nombre réduit de paires de microphones. Pour conclure, le critère proposé nettoie la cartographie en permettant d'enlever des lobes secondaires. Le but est maintenant de trouver la géométrie qui optimise la valeur de ce critère.

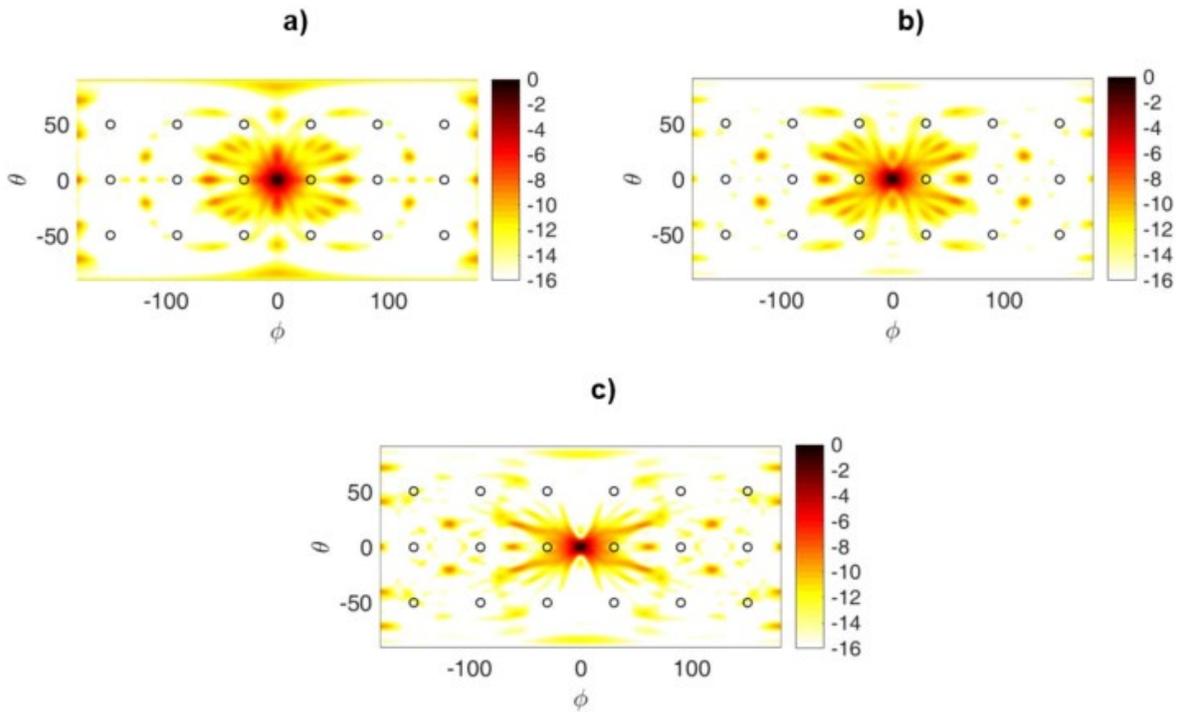


Figure 14. Cartographies des sources a) avec toutes les paires de microphones, b) avec 32 paires de microphones en moins, c) avec 60 paires de microphones en moins.

Le problème d'optimisation a pour but de maximiser la valeur du critère de symétrie J ,

$$\text{Maximiser } J(r_m) \tag{9}$$

avec r_m les positions de microphones. Le rayon de la sphère étant fixé à 20 cm, seuls les angles en azimut r_ϕ et élévation r_θ peuvent varier. Par la suite, l'antenne de microphones va être fabriquée et une précision en dessous de 1 degré n'est donc pas nécessaire. Par conséquent, les valeurs du problème d'optimisation sont des nombres entiers. La fonction coût à maximiser nécessite de calculer l'angle d'ouverture pour chaque point de la zone de scan et paires de microphones puis les critères de symétrie. Les dérivées de la fonction coût sont par conséquent incalculables et celle-ci peut être vue comme une boîte noire à optimiser. Un algorithme qui optimise les boîtes noires est la *nonlinear optimization* by Mesh Adaptive Direct Search (NOMAD) (Le Digabel, 2011). Cet algorithme est disponible dans la boîte à outils OPTI de MATLAB. Des limites doivent également être imposées pour éviter que l'algorithme cherche des positions de microphones inatteignables (par exemple, $r_\phi > 180$). De plus, pour éviter que les microphones ne se retrouvent au même endroit, chacun d'eux peut évoluer dans une zone restreinte. Cette zone est définie par les rectangles illustrés à la figure 15.

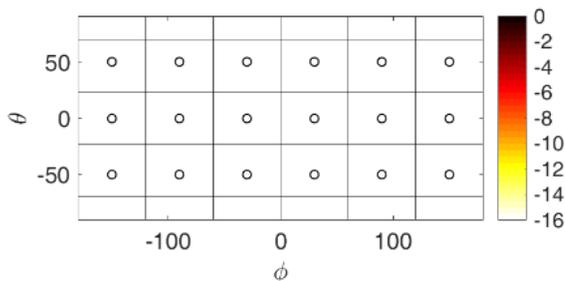


Figure 15. Représentation de la position des microphones (cercles), les lignes représentent les limites à l'intérieur desquelles les microphones peuvent être déplacés pendant l'optimisation.

Finalement, une dernière contrainte est ajoutée pour éviter que deux microphones ne se retrouvent à la même position (c'est-à-dire sur la frontière d'un rectangle). Cette contrainte impose un écart d'au moins 35° entre chaque microphone. L'antenne linéaire est donnée comme solution initiale au problème d'optimisation.

5.4 Comparaison des cartographies des sources obtenues avec l'antenne sphérique à répartition linéaire de microphones et celles obtenues avec l'antenne sphérique à répartition optimisée

La cartographie des sources obtenue avec l'antenne de 18 microphones optimisée est comparée avec la cartographie obtenue avec l'antenne linéaire (figure 16). La nouvelle cartographie obtenue avec l'antenne optimisée ne comporte pas de lobes secondaires sur les côtés ni proches de la source. Ainsi, la géométrie optimisée a permis de nettoyer la cartographie. Pour évaluer les performances de la nouvelle antenne, les critères précédemment

définis (voir section 4 : surface du lobe principal et coupes horizontale et verticale), sont comparés.

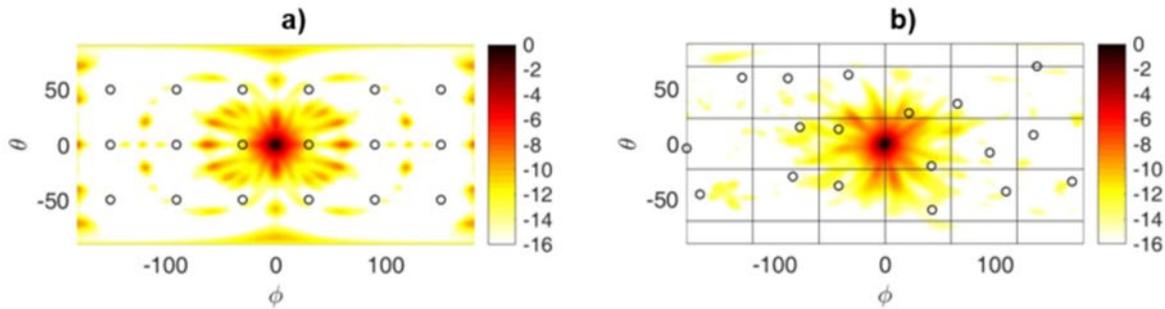


Figure 16. Cartographies des sources obtenues avec l'antenne a) linéaire, b) optimisée. Les petits cercles indiquent les positions des microphones et les lignes représentent les limites à l'intérieur desquelles les microphones peuvent être déplacés pendant l'optimisation.

Les ellipses représentant la surface du lobe principal sont montrées à la figure 17a. L'ellipse obtenue avec l'antenne optimisée est légèrement plus grande que celle obtenue avec l'antenne linéaire. Le ratio de surface entre les deux est de 1,015, ce qui signifie une augmentation de 1,5 % de la surface de l'ellipse. Les coupes selon les axes ϕ et θ sont illustrées aux figures 17b et 17c. La coupe selon $\theta=0$ avec l'antenne linéaire a des lobes secondaires de grande amplitude (-7 dB) et présente de multiples oscillations entre -10 dB et -15 dB. La coupe selon $\phi=0$ avec l'antenne linéaire suit la même tendance. L'antenne optimisée enlève tous les lobes secondaires suivant les deux directions. Ainsi, l'antenne optimisée permet de conserver la largeur du lobe principal et d'enlever les lobes secondaires, ce qui permet de détecter seulement la position de la source sans artefacts.

L'utilisation de la pondération PHAT permet d'améliorer la cartographie des sources dans certains cas. La cartographie des sources obtenue avec l'antenne optimisée est maintenant comparée à la cartographie obtenue avec l'antenne linéaire dans le cas de la technique du GCC-PHAT. La figure 18 montre les deux cartographies obtenues. L'utilisation du GCC-PHAT permet de réduire la taille du lobe principal, mais n'enlève pas les lobes secondaires. L'antenne optimisée permet d'avoir un seul et unique lobe à la position de la source sans lobes secondaires. Les trois critères d'évaluation de la cartographie sont maintenant comparés.

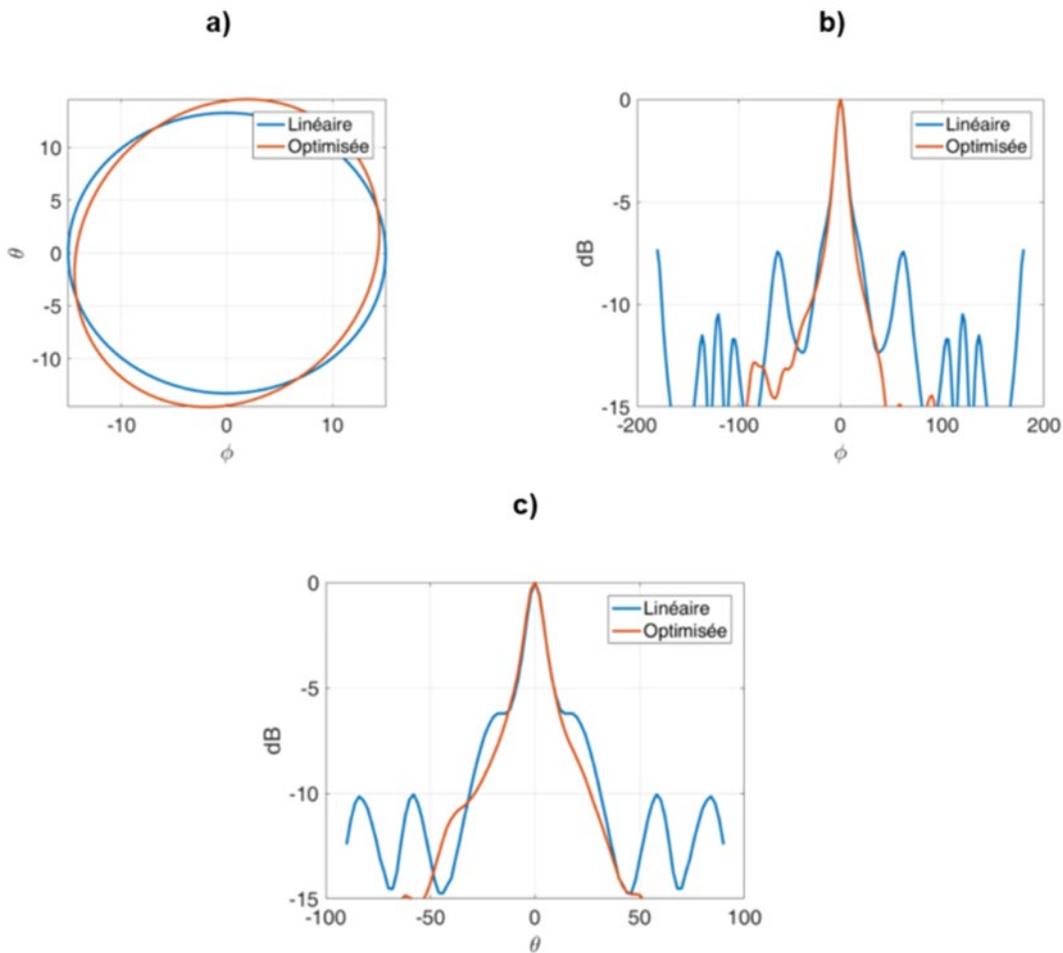


Figure 17. a) ellipse et coupes selon b) l'azimut, c) l'élévation des cartographies des sources obtenues avec les antennes linéaire et optimisée.

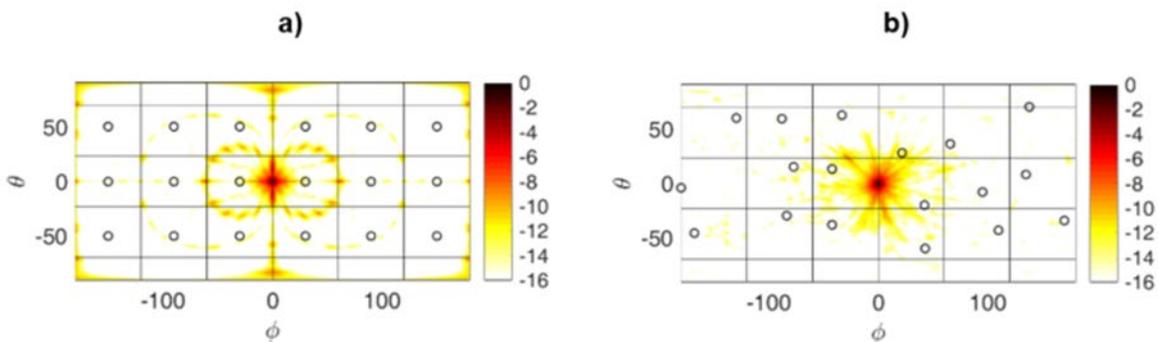


Figure 18. Cartographies des sources obtenues avec la pondération PHAT avec les antennes a) linéaire, b) optimisée.

Avec l'antenne linéaire, l'amplitude des lobes secondaires croît sur les côtés de la cartographie. L'amplitude de ces lobes est maintenant supérieure à -6 dB, ce qui donne une ellipse étendue le long de l'azimut (figure 19). L'ellipse obtenue avec l'antenne optimisée est quant à elle de petite taille comme précédemment. Il est possible de voir sur la coupe, selon $\theta = 0$, les lobes secondaires avec une forte amplitude. Encore une fois, l'antenne optimisée enlève les lobes secondaires. Il est même possible de voir que la largeur du lobe principal est réduite. La coupe selon $\phi = 0$ donne le même résultat. Pour conclure, l'antenne optimisée permet d'obtenir de meilleures cartographies, que ce soit avec ou sans la pondération PHAT, comparée à l'antenne linéaire.

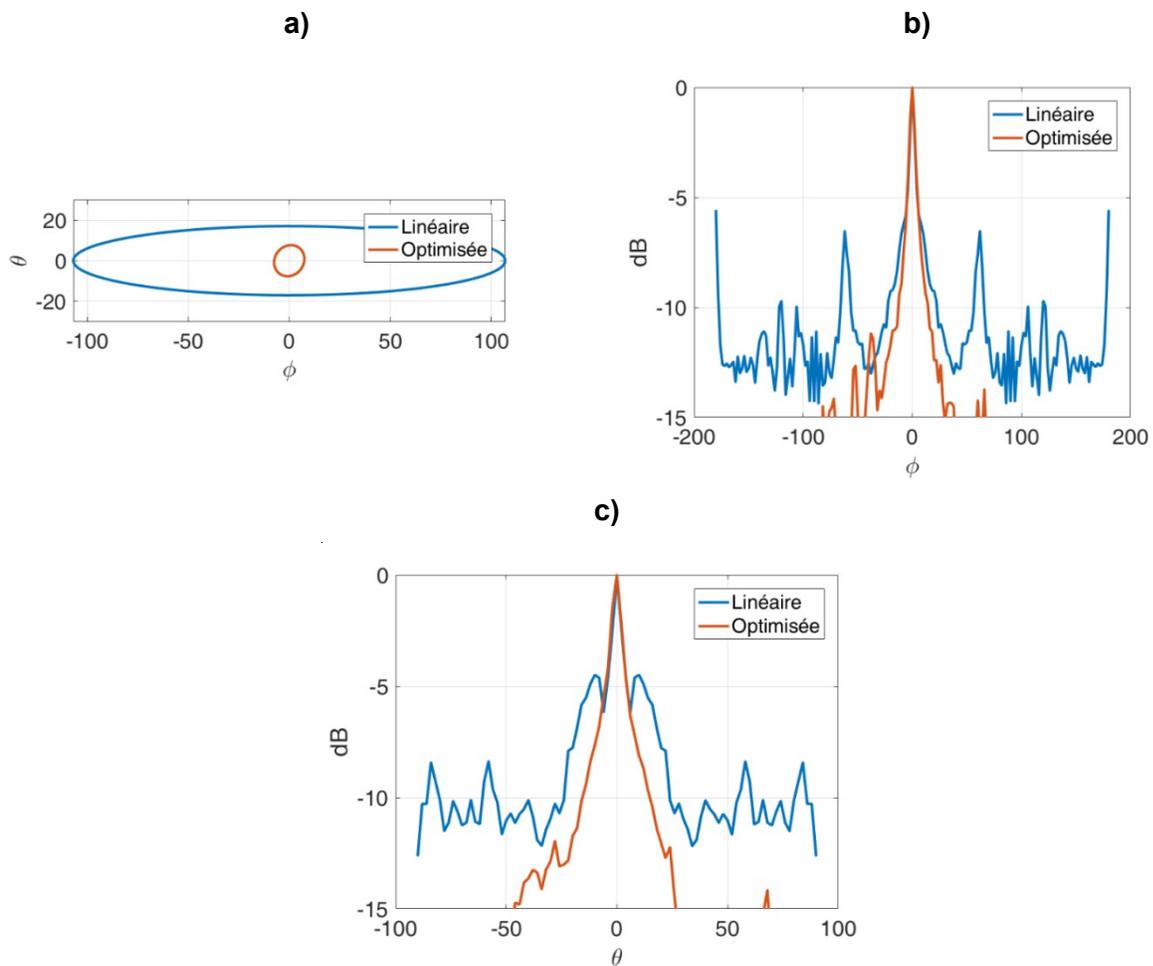


Figure 19. a) ellipse et coupes selon b) l'azimut, c) l'élévation des cartographies des sources obtenues avec les antennes linéaire et optimisée et la pondération PHAT.

5.5 Convergence de l'algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation nécessite une solution initiale pour la première itération. Afin de comparer les solutions obtenues, cinq antennes initiales différentes sont utilisées avec l'algorithme d'optimisation. Les cinq antennes initiales sont les suivantes :

- Antenne 1 : linéaire,
- Antenne 2 : linéaire décalée de 10° en azimut,
- Antenne 3 : linéaire décalée de -10° en azimut,
- Antenne 4 : linéaire décalée de 20° en élévation,
- Antenne 5 : linéaire décalée de -20° en élévation.

Les cartographies obtenues avec le GCC-PHAT et les cinq antennes optimisées sont présentées à la figure 20. Premièrement, les cinq géométries obtenues sont différentes. Cependant, toutes les antennes optimisées ont réussi à enlever les lobes secondaires. L'orientation du lobe principal est légèrement différente pour chaque antenne en raison des différentes positions de microphones, mais le motif reste semblable. Ainsi, malgré des solutions initiales différentes, l'algorithme d'optimisation permet d'obtenir des géométries d'antenne qui sont plus performantes que celles que l'on obtient avec l'antenne linéaire.

La valeur du critère d'optimisation est présentée en fonction du nombre de boîtes noires évaluées (figure 21). Pour chaque antenne, la valeur initiale est très proche de zéro et évolue rapidement pour le premier quart des itérations, puis se stabilise. La valeur finale obtenue est différente pour chaque antenne, ce qui confirme que l'algorithme est dépendant de la solution initiale. Cependant, l'ordre de grandeur des valeurs finales est similaire. Pour conclure, la solution donnée par l'algorithme d'optimisation n'est pas globale, mais locale, c'est-à-dire dépendante de la solution initiale. Mais, pour chaque optimisation, la solution obtenue permet d'avoir une cartographie meilleure que celle donnée par l'antenne linéaire, ce qui est suffisant dans le cas de cette étude. La géométrie optimisée avec l'antenne linéaire comme solution initiale est donc utilisée dans la suite du rapport.

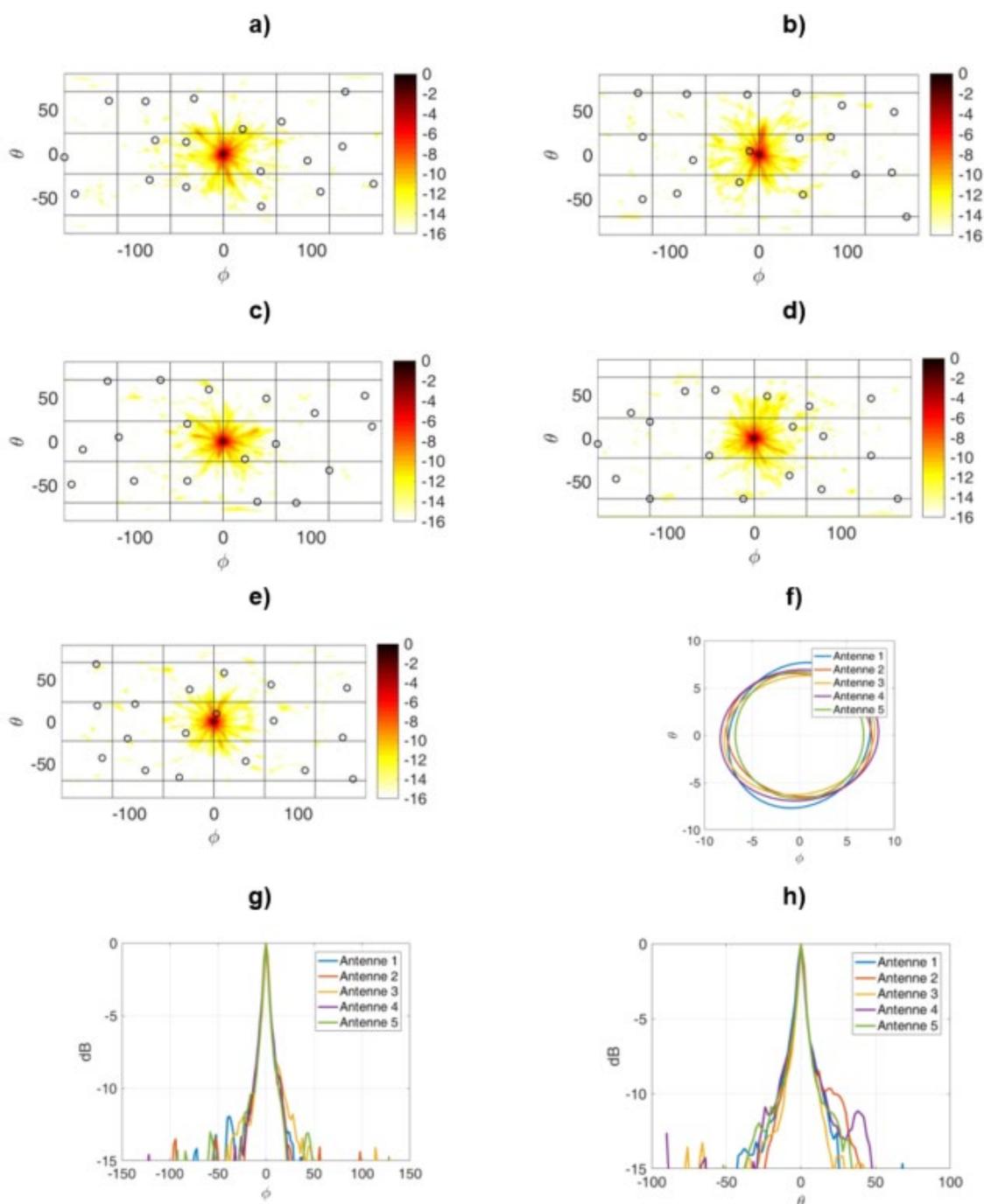


Figure 20. Cartographies des sources obtenues avec cinq antennes optimisées. Les antennes initiales sont a) antenne linéaire, b) antenne linéaire décalée de 10° en azimut, c) antenne linéaire décalée de -10° en azimut, d) antenne linéaire décalée de 20° en élévation, e) antenne linéaire décalée de -20° en élévation. Les ellipses et les coupes suivant les deux axes sont données en f), g) et h).

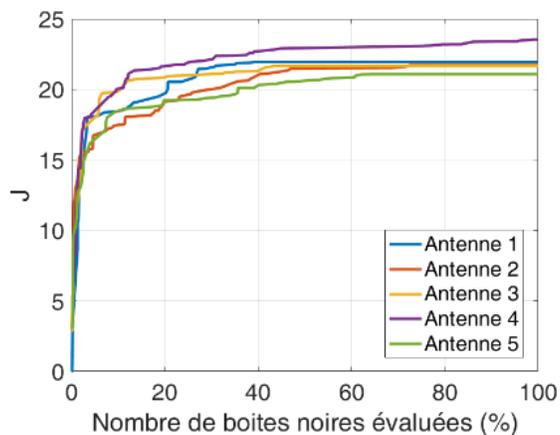


Figure 21. Valeur du critère global en fonction du nombre de boîtes noires utilisées dans l'algorithme d'optimisation.

6. PROTOTYPE FABRIQUÉ POUR SUPPORTER LES MICROPHONES

6.1 Support sphérique

Maintenant que la géométrie de l'antenne a été déterminée, le but est de fabriquer un prototype permettant d'y fixer les microphones. Deux choix sont possibles : 1) soit les microphones sont répartis sur la surface de la sphère et affleurent à sa surface, on parle alors de sphère rigide (figure 1a), 2) soit les microphones sont au bout de tiges qui sont fixées sur une petite sphère, on parle alors de sphère ouverte (figure 1b). La sphère rigide est couramment utilisée avec le *beamforming* fréquentiel ou l'holographie, car elle permet d'utiliser la décomposition en harmoniques sphériques à la surface de la sphère et de tenir compte de la diffraction. Dans la présente étude, la technique du GCC est utilisée et il n'y a pas de décomposition en harmoniques sphériques. Ainsi une antenne ouverte de petite taille est préférée pour limiter les phénomènes de diffraction.

Le but est donc de créer un support permettant de fixer les tiges qui tiendront les microphones. Ce support peut prendre n'importe quelle forme, mais pour simplifier, la sphère a été choisie. Par souci de polyvalence, les auteurs de la présente étude ont choisi de créer une sphère avec le plus grand nombre de trous possibles pour 1) pouvoir réaliser plusieurs géométries avec la même sphère, 2) pouvoir réaliser des antennes avec un nombre variable de microphones.

Afin de pouvoir utiliser l'antenne dans un local industriel, à la place du travailleur, son rayon a été fixé (là où sont situés les microphones) à 20 cm, ce qui permet d'avoir une antenne peu encombrante. Un rayon extérieur de 20 cm permet d'avoir une sphère support de 7,5 cm de rayon, une tige de 9,5 cm de longueur et un microphone dépassant de 3 cm (figure 22). Un rayon plus grand de la sphère support augmenterait le phénomène de diffraction alors que s'il était plus petit, il restreindrait le nombre de positions accessibles sur la sphère.

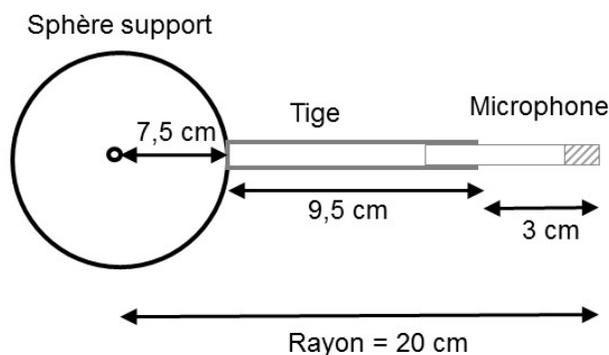


Figure 22. Schéma conceptuel de l'antenne en 2D.

Un dessin de la sphère support est illustré à la figure 23. La sphère a un rayon de 7,5 cm et possède 252 trous filetés dans lesquels les tiges peuvent s'insérer. Sur l'équateur, l'espacement en azimut est de 10° . Puis, l'espacement est de 20° pour $\theta = [10-50]^\circ$ et $\theta = -[10-50]^\circ$. Finalement, l'espacement est de 40° pour $\theta = [50-70]^\circ$ et $\theta = -[50-70]^\circ$. Il ne peut y avoir de trous au-delà de $\theta = 70^\circ$, car il fallait garder de la matière pour installer la caméra, de même pour $\theta = -70^\circ$, où se situe le pied qui tient la sphère. L'espacement en élévation est de 10° .

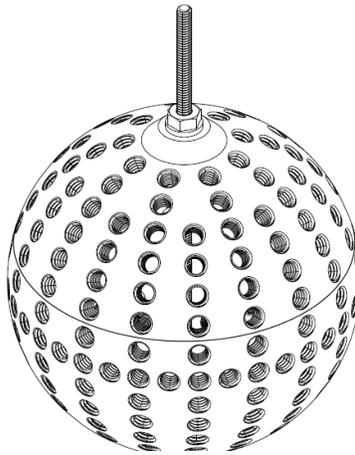


Figure 23. Dessin de la sphère support.

6.2 Tige tenant les microphones

La tige qui supporte le microphone est filetée à son extrémité, ce qui permet de la fixer rigidement à la sphère support (figure 24). Une rainure permet de passer le câble du microphone à l'intérieur de la sphère. Cependant, l'espace à l'intérieur de la sphère étant limité, il ne peut contenir plus de 20 câbles de microphones. Le trou oblong permet d'insérer le microphone dans le tube. Un petit trou transverse permet de fixer rigidement le microphone à la bonne position et évite qu'il ne bouge dans la tige. Le diamètre intérieur est de $\frac{1}{4}$ po et le diamètre extérieur est de 12,5 mm.

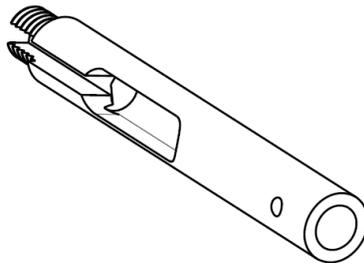


Figure 24. Dessin de la tige sur laquelle sont fixés les microphones.

6.3 Assemblage des éléments

Une tige de support permettant de fixer la sphère support sur un pied de haut-parleur a également été dessinée. Le montage final désassemblé est montré à la figure 25.

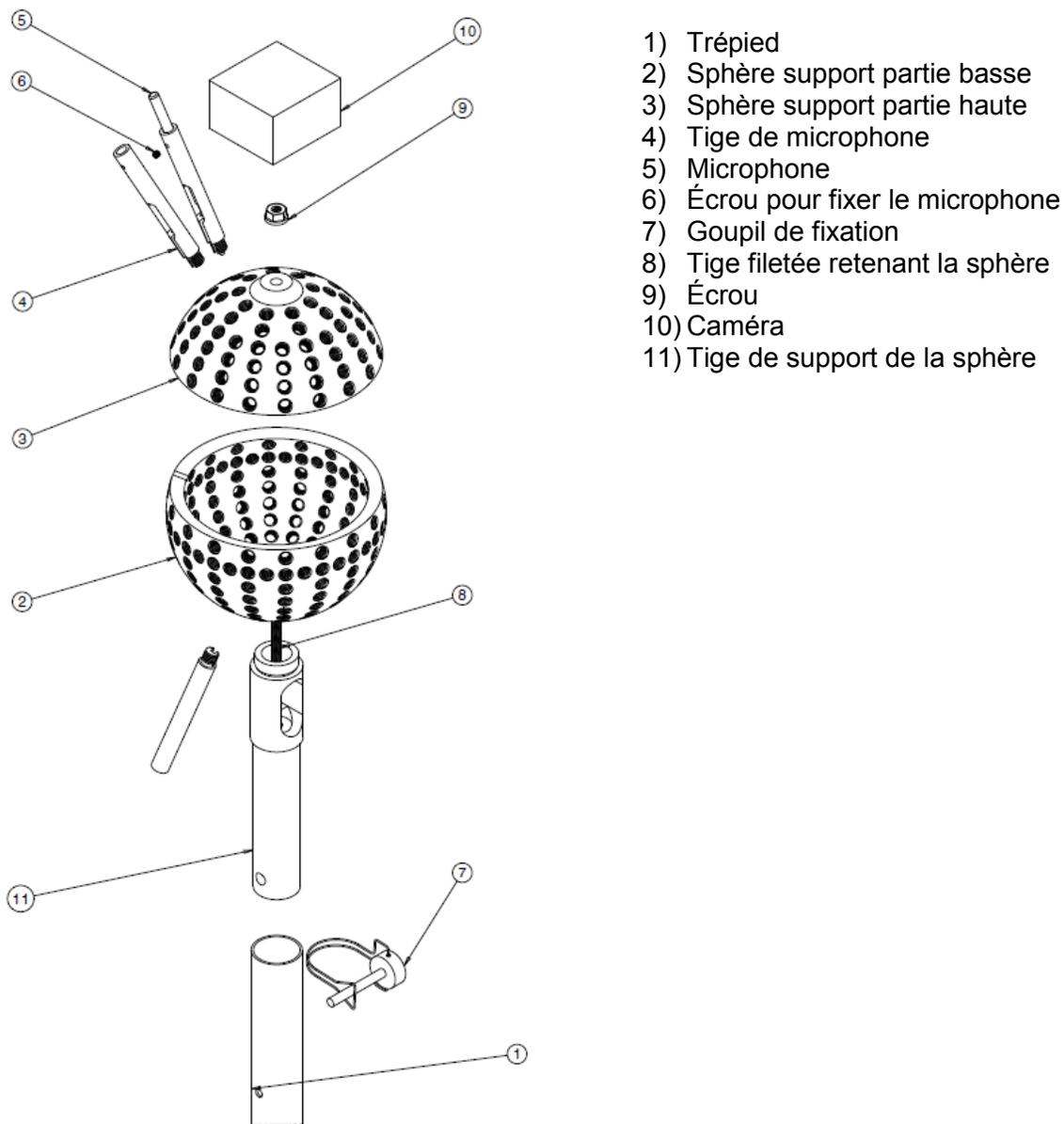


Figure 25. Assemblage du support pour microphones.

La sphère a été imprimée en 3D ainsi que la tige de support. Les tiges des microphones ont été usinées en aluminium. Deux photographies du prototype sont montrées à la figure 26. Avec ce prototype, il est ainsi possible de créer des antennes pouvant soutenir un petit nombre ou plusieurs dizaines de microphones. De plus, le nombre de positions accessibles en azimuth et en élévation est supérieur à 250, ce qui rend ce prototype polyvalent.

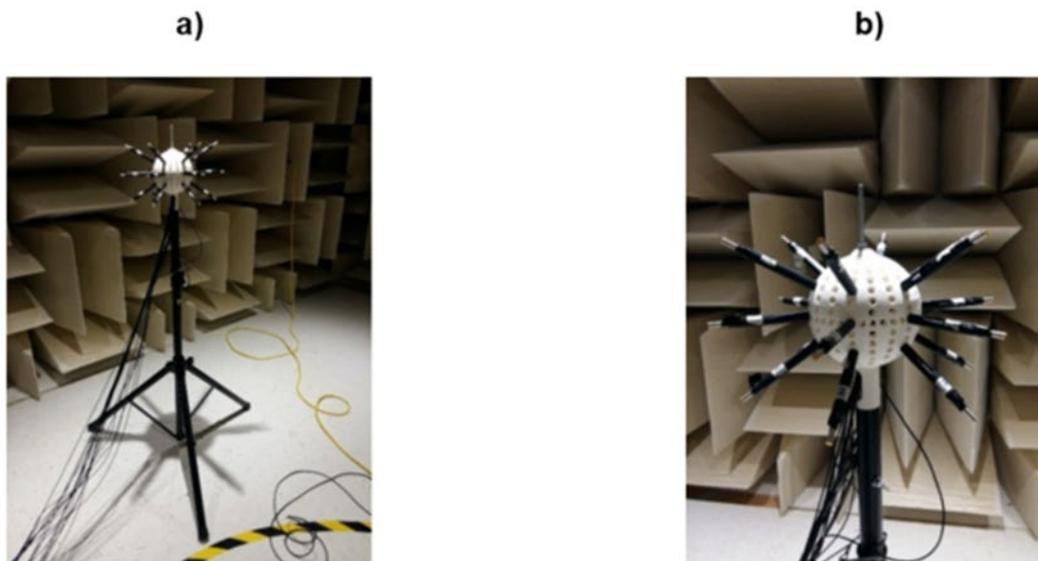


Figure 26. Photographies du prototype fabriqué pour l'antenne sphérique : a) vue d'ensemble, b) vue rapprochée.

6.4 Caméra panoramique pour capturer la scène acoustique

Maintenant que le support pour les microphones a été conçu, il reste le choix de la caméra à déterminer. L'objectif est de pouvoir obtenir une vue panoramique de la scène acoustique. L'utilisation d'un objectif grand-angulaire de type *fish-eye* monté sur une caméra normale permet de couvrir un champ de 180 degrés, mais ne montre pas la scène au complet. L'utilisation de deux caméras n'est pas possible, car l'espace sur la sphère est limité. Plusieurs caméras panoramiques sont disponibles sur le marché à des prix allant d'une centaine de dollars à plusieurs dizaines de milliers de dollars. Le modèle Vuze a été retenu (figure 27). Cette caméra possède huit objectifs répartis sur les côtés d'un carré permettant de capturer toute la scène acoustique avec une résolution de 4K. De plus, cette caméra est compacte, sa taille étant équivalente à celle d'une main, ce qui permet de la fixer sur le haut de la sphère et elle n'est pas trop chère. L'acquisition de l'image se fait à l'aide d'un téléphone intelligent. Une connexion Wi-Fi entre la caméra et le téléphone intelligent permet de la contrôler. Pour récupérer la photographie, il faut brancher la caméra à un ordinateur portable à l'aide d'une connexion USB. Un logiciel intégré à la caméra permet de retoucher et de sauvegarder la photographie en format JPEG.

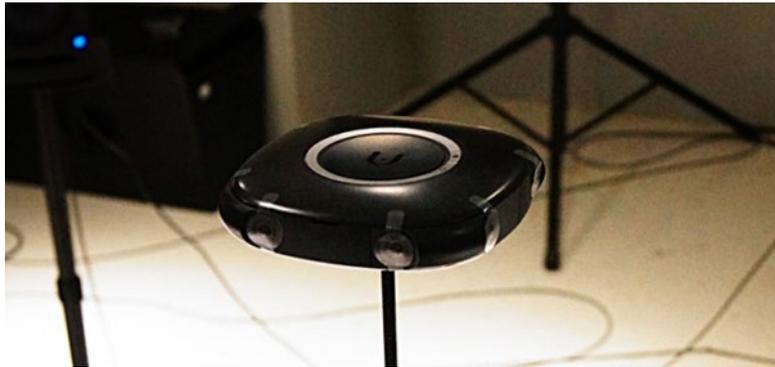


Figure 27. Caméra panoramique Vuze dotée de 8 objectifs.

7. MESURES EXPÉRIMENTALES EN CHAMBRES CONTRÔLÉES ET EN ATELIER

Dans cette section, les cartographies des sources obtenues expérimentalement avec l'antenne optimisée précédemment décrite sont présentées. L'antenne a été placée dans une chambre héli-anéchoïque, une salle réverbérante et un atelier. Pour les mesures en chambres, deux sources de bruit ont été positionnées devant l'antenne. Dans l'atelier, le bruit généré par différentes machines a été mesuré.

7.1 Description du matériel utilisé pour les mesures

L'antenne est composée de 18 microphones $\frac{1}{4}$ po Brüel & Kjær de type 4935. Chaque microphone est fixé au bout d'une tige de la sphère. La caméra est placée 30 cm au-dessus du zénith de la sphère. Un câble SMB vers BNC relie le microphone à un connecteur LEMMO 6 voies qui se branche au module d'acquisition de type 3038B de Brüel & Kjær par un port SUB-D. Le module d'acquisition est relié à un ordinateur par l'intermédiaire d'une connexion Ethernet. Le logiciel Time Data Recorder de Brüel & Kjær est utilisé pour faire l'acquisition. La fréquence d'échantillonnage est de 65 536 Hz, codée sur 24 bits. Les sources acoustiques sont des haut-parleurs actifs de type PreSonus E5 et le signal d'excitation est un bruit blanc produit avec une carte NI 4461 permettant la génération de deux signaux décorrélés. Le matériel utilisé est présenté à figure 28a-e. Les mesures ont été réalisées dans la chambre héli-anéchoïque dont les dimensions sont 6,2 m x 7,4 m x 2,2 m (figure 28f). Mesuré selon la norme ISO Standard 3745-2003, le niveau de bruit de fond dans la chambre héli-anéchoïque est en dessous de NC-15. La chambre héli-anéchoïque simule des conditions extérieures avec peu de réflexion, mise à part celle au sol, dans laquelle le champ direct est prédominant. Les mesures effectuées dans cette chambre se rapproche donc le plus des conditions des simulations qui sont en champ libre. À l'opposé, la chambre réverbérante (figure 28g) simule des conditions intérieures ou de multiples réflexions sont présentes. La chambre réverbérante dont les dimensions sont 7 m x 9 m x 3,5 m a un temps de réverbération supérieur à 3 s entre 200 et 2500 Hz. Dans cette chambre, le champ acoustique est dit diffus, car les ondes se réfléchissent de nombreuses fois sur les murs, le sol et le plafond. Les microphones enregistrent donc le champ direct et les multiples réflexions.

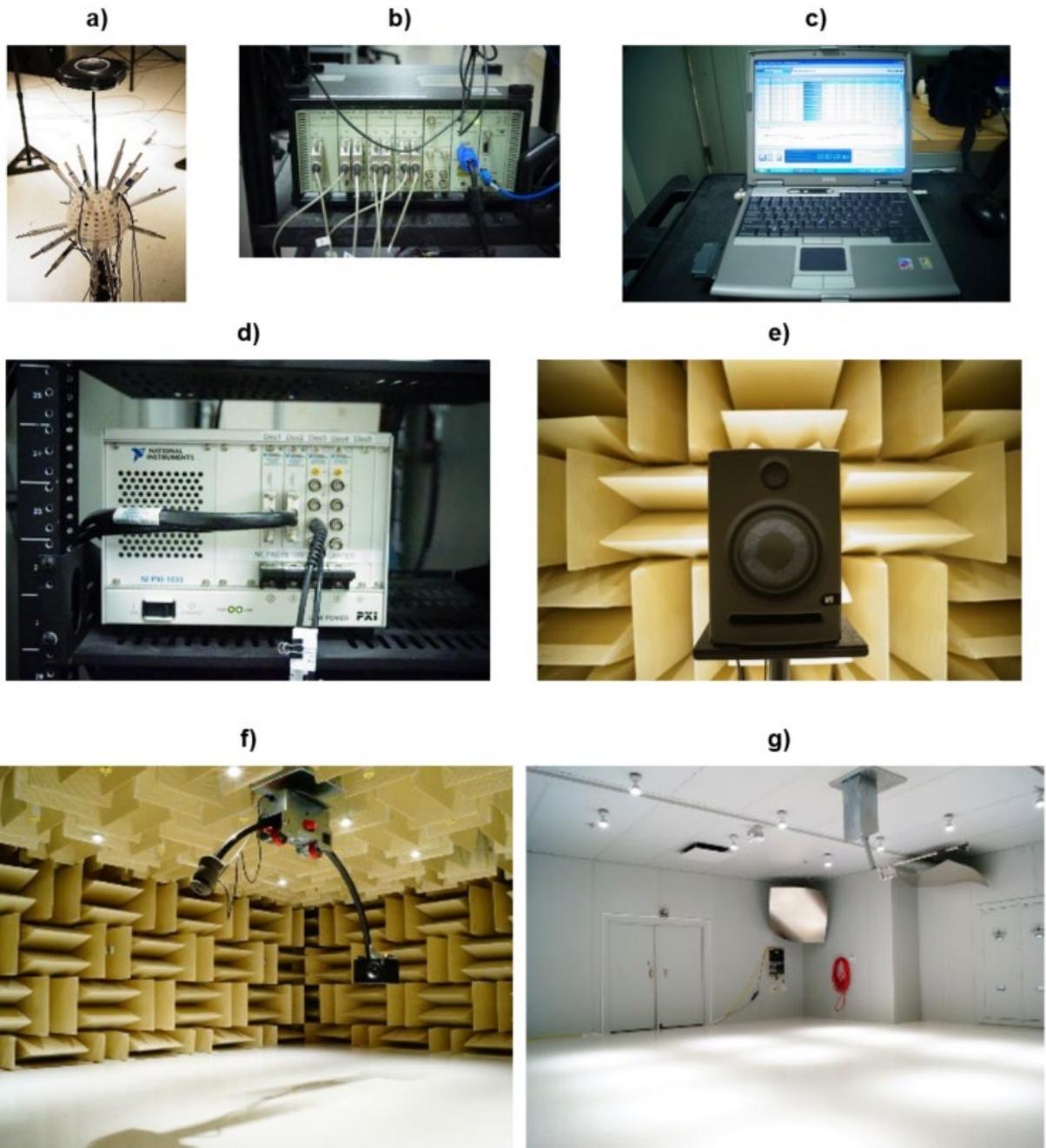


Figure 28. Photographies a) antenne sphérique, b) module d'acquisition, c) ordinateur portable, d) carte de génération des signaux, e) haut-parleur actif, f) chambre hémianéchoïque, g) chambre réverbérante.

7.2 Comparaison des cartographies simulées et mesurées dans le cas d'une source placée devant l'antenne

Dans un premier temps, les cartographies des sources obtenues avec la simulation sont comparées avec celles obtenues expérimentalement dans les chambres héli-anéchoïque et réverbérante. La simulation est réalisée en champ libre avec une source ponctuelle. Bien que les haut-parleurs aient leurs propres directivités et ne soient pas parfaitement ponctuels, la comparaison des cartographies obtenues par simulation et en chambre héli-anéchoïque permet de valider le code numérique de localisation. De plus, la comparaison avec les cartographies obtenues en chambre réverbérante permet d'évaluer l'influence de la réverbération.

Une source générant un bruit blanc est positionnée en face de l'antenne. Une seconde (1 s) de signal temporel est utilisée pour calculer la cartographie des sources. Il est commun en acoustique industrielle de présenter les résultats par octave ou tiers d'octave. Pour limiter le nombre de figures, seules les octaves sont considérées par la suite. La zone de scan dans laquelle les sources sont cherchées s'étend de -180° à 180° par pas de 2° suivant l'azimut et de -90° à 90° par pas de 2° suivant l'élévation. Ainsi, le nombre total de points sur la zone de scan est de 16 471. Les signaux microphoniques sont filtrés par un filtre passe-bande Butterworth du 2^d ordre entre les fréquences délimitant une octave. Les octaves considérées sont 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz. Un cas, appelé large bande (LB), est ajouté pour lequel les fréquences limites du filtre passe-bande sont 250 et 8000 Hz. Puis, la cartographie des sources est calculée pour chaque cas, simulation, dans les chambres anéchoïque et réverbérante. La pondération PHAT n'est pas utilisée dans ce cas. La dynamique de la cartographie est fixée à 10 dB. La photographie prise avec la caméra n'est pas présentée dans ce cas, car l'accent est mis sur la comparaison entre la simulation et les expériences.

Les résultats sont présentés sous forme de tableau dans les figures 29 à 31. Les colonnes contiennent respectivement de gauche à droite les cartographies des sources découlant de la simulation, des mesures prises en chambre héli-anéchoïque et des mesures prises en chambre réverbérante. Pour les octaves 250 et 500 Hz, les cartographies obtenues à partir de la simulation et des mesures en chambre héli-anéchoïque sont similaires. Un grand lobe principal est localisé à la position de la source. Dans ces cas, même si la source est localisée, la taille du lobe principal empêche une localisation précise. Si une autre source était présente, la localisation de celle-ci serait complexe. Ainsi, l'antenne associée à la technique du GCC ne permet pas une localisation précise de sources ayant un contenu uniquement basses fréquences. Dans la chambre réverbérante, la qualité des cartographies est dégradée à cause des réflexions multiples. Pour l'octave 250 Hz, il est impossible de localiser la source alors que pour l'octave 500 Hz, un lobe principal est localisé à la position de la source. Cependant le niveau des lobes secondaires est très élevé, ce qui empêche une localisation précise. Au-delà de l'octave 500 Hz, la source est bien localisée pour chaque cas. Pour l'octave 1000 Hz, il est intéressant de noter que la cartographie obtenue par simulation ne présente pas de lobes secondaires, seul un lobe principal est présent à la position de la source.

Dans la chambre héli-anéchoïque, un lobe secondaire est présent sous la position de la source. La taille et l'amplitude de ce lobe sont amplifiées dans la chambre réverbérante. Par conséquent, ce lobe n'existant pas dans des conditions parfaites de champ libre (c'est-à-dire la

simulation), il peut être associé à la réflexion qui se produit sur le sol entre la source et l'antenne. Un simple calcul basé sur l'arc tangente de la hauteur du haut-parleur (110 cm) sur la distance haut-parleur/antenne (150 cm) permet de déterminer que le pied du haut-parleur, et donc le sol, se trouve à 36° . Ainsi, si une réflexion spéculaire (théorie source-image) existe, la source réfléchie devrait se trouver à deux fois la valeur de l'angle c'est-à-dire 72° . Or, le lobe secondaire se trouve à 66° sur la cartographie, ce qui est très proche. Ainsi, il semblerait que ce lobe soit lié à une réflexion sur le sol. Pour l'octave 2000 Hz, les résultats sont similaires à ceux de l'octave 1000 Hz, seule la taille du lobe principal diminue. Pour les octaves supérieures à 2000 Hz, un lobe de petite taille est présent pour chaque cas tandis qu'on trouve très peu de lobes secondaires. Pour le cas large bande (de 250 à 8000 Hz), un lobe principal est présent à la position de la source. La réflexion existe dans les deux cas expérimentaux notamment pour la mesure dans la chambre réverbérante. Cette première étude a permis de clarifier les points suivants :

- Les cartographies obtenues par simulation et dans la chambre héli-anéchoïque sont similaires, ce qui valide le code de simulation;
- Au-delà de l'octave 500 Hz, il est possible de localiser la source pour chaque cas ainsi que les réflexions sur le sol;
- En dessous de l'octave 1000 Hz, il est impossible de localiser correctement la source. En effet, dans ces cas, la longueur d'onde est plus grande que le diamètre de la sphère. Cela constitue une limite de l'antenne fabriquée et de la technique de localisation utilisée. Par la suite, ces octaves ne seront plus considérées.

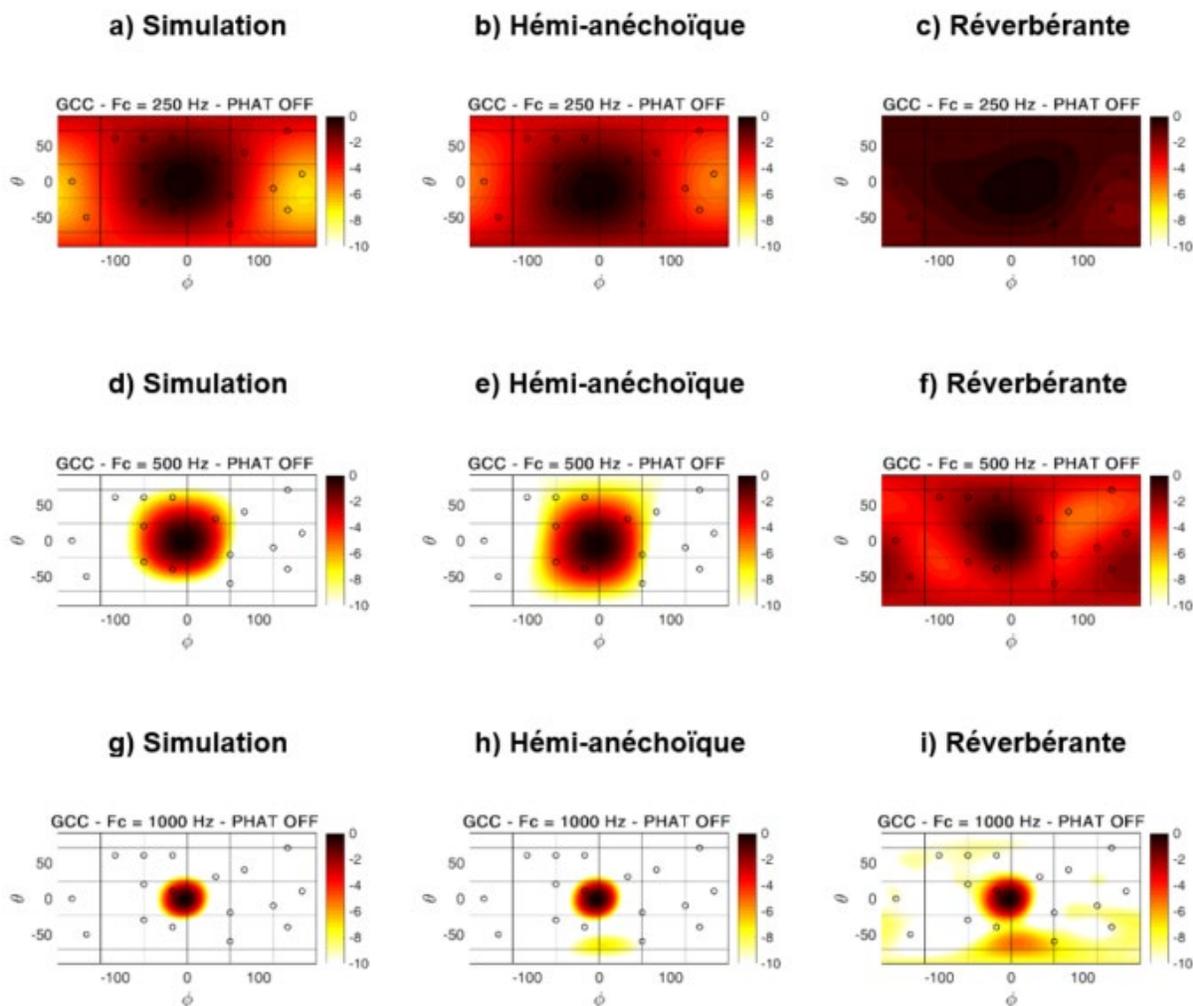


Figure 29. Cartographies des sources obtenues par simulation (colonne de gauche), en chambre héli-anechoïque (au centre) et en chambre réverbérante (colonne de droite). La source est placée devant l'antenne et génère un bruit blanc. Les octaves considérées sont 250 Hz (a, b, c), 500 Hz (d, e, f), 1000 Hz (g, h, i).

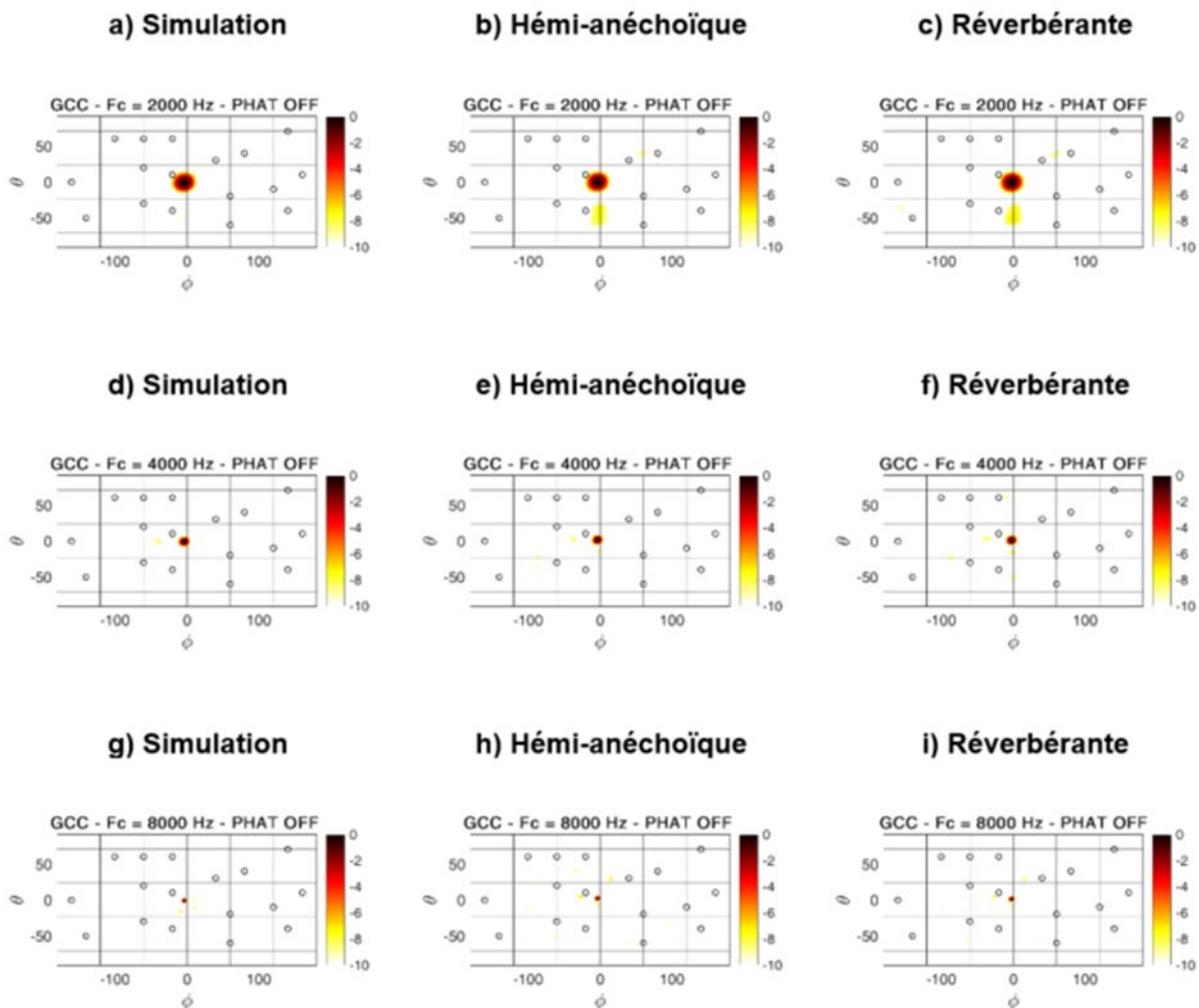


Figure 30. Cartographies des sources obtenues par simulation (colonne de gauche), en chambre hémi-anéchoïque (au centre) et en chambre réverbérante (colonne de droite). La source est placée devant l'antenne et génère un bruit blanc. Les octaves considérées sont 2000 Hz (a, b, c), 4000 Hz (d, e, f), 8000 Hz (g, h, i).

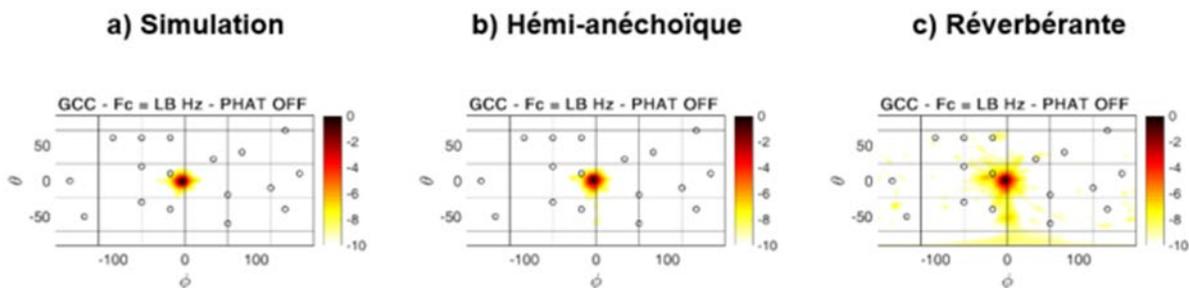


Figure 31. Cartographies des sources obtenues par simulation (colonne de gauche), en chambre héli-anéchoïque (au centre) et en chambre réverbérante (colonne de droite). La source est placée devant l'antenne et génère un bruit blanc. LB signifie large bande.

7.3 Comparaison des cartographies simulées et mesurées dans le cas de deux sources espacées en azimut avec la même élévation et des niveaux acoustiques différents

Dans cette sous-section, la capacité de l'antenne associée à la technique du GCC à localiser deux sources avec des niveaux différents est testée à l'aide de la simulation et des mesures effectuées dans les deux chambres. Comme précédemment, la comparaison des cartographies obtenues par simulation et en chambre héli-anéchoïque permet de valider le code numérique de localisation. De plus, la comparaison avec les cartographies obtenues en chambre réverbérante permet d'évaluer l'influence de la réverbération. Les sources sont des bruits blancs décorrélés avec soit :

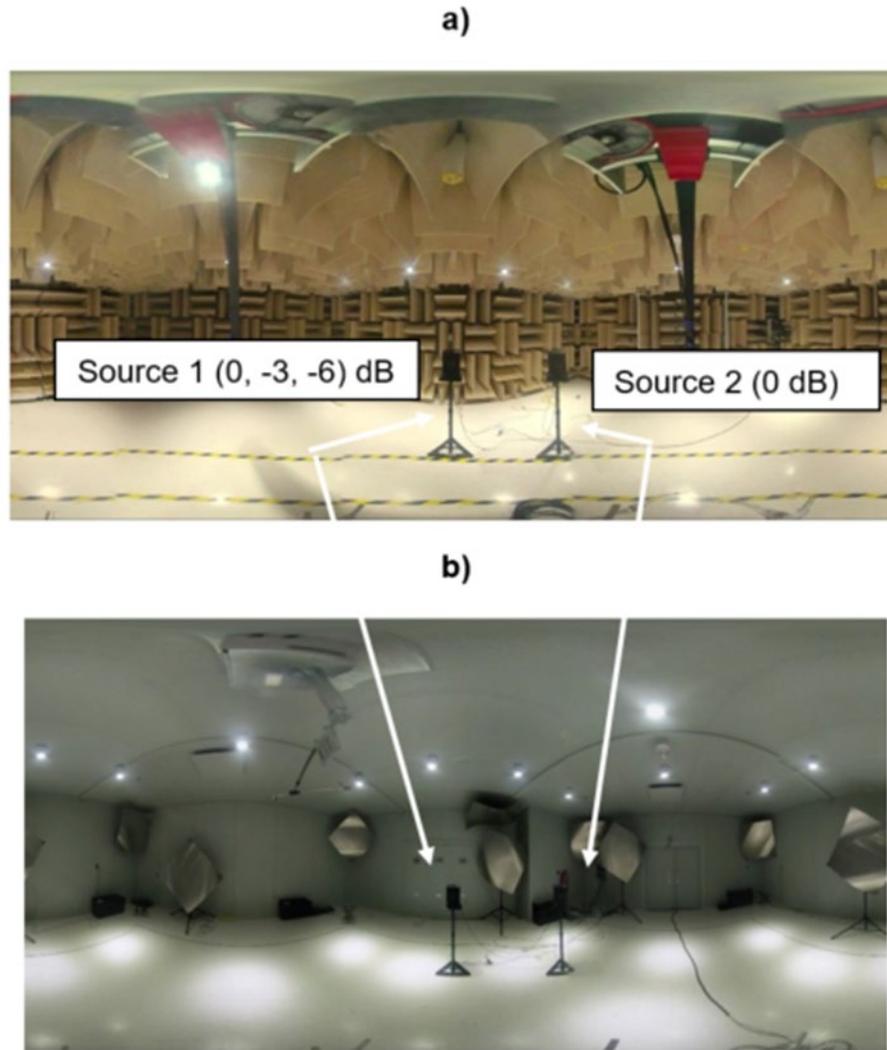
- 1) le même niveau de pression acoustique;
- 2) une différence de 3 dB;
- 3) une différence de 6 dB.

Une différence maximale de 6 dB a été considérée, car, comme les résultats qui suivent le montrent, au-delà de 6 dB il n'est pas possible d'établir la différence entre un lobe secondaire et une source de faible amplitude. Les sources sont séparées par un angle de 45° en azimut et ont la même élévation. La source à l'origine a un niveau qui décroît et celle à 45° en azimut montre un niveau constant (figure 32). Dans ce cas, la photographie réalisée par la caméra est superposée aux cartographies obtenues expérimentalement afin de vérifier que les sources sont bien localisées. De plus, en se basant sur les résultats précédents, seule l'octave à 2000 Hz est considérée pour éviter le grand nombre de figures. Les résultats sont présentés aux figures 33 à 35.

Globalement, les deux sources sont toujours localisées que ce soit en simulation ou expérimentalement. De plus, la différence de niveau est toujours notable. Il est intéressant de noter que la réflexion sur le sol (sous la source à l'origine des coordonnées) disparaît quand l'amplitude de la source secondaire décroît. En revanche, le lobe secondaire sous la seconde source (celle à droite) est toujours présent. Ce lobe est observable dans les simulations, ce qui laisse sous-entendre qu'il est dû à une interaction entre les deux motifs des sources plutôt qu'à une réflexion sur le sol. Cependant, il peut s'agir de la combinaison des deux, soit une interaction entre les deux sources plus une réflexion. L'amplitude de ce lobe étant supérieure

dans les cas expérimentaux, cette hypothèse est probable. Finalement, l'antenne associée à la technique du GCC permet de localiser correctement deux sources ayant des amplitudes égales ou ayant jusqu'à 6 dB de différence.

Figure 32. Photographies de la position des sources dans a) la salle hémianéchoïque, b) la chambre réverbérante.



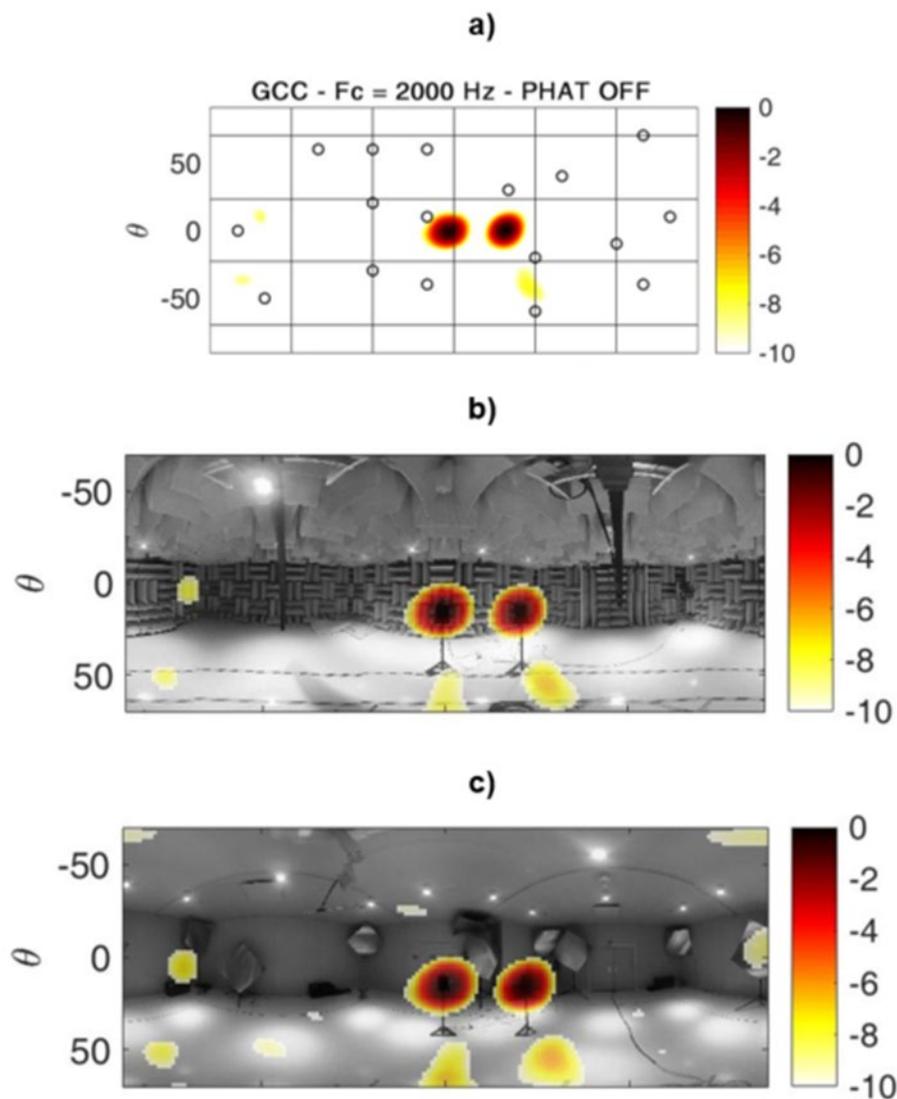


Figure 33. Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre hémianéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées de 45° en azimut génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 0 dB.

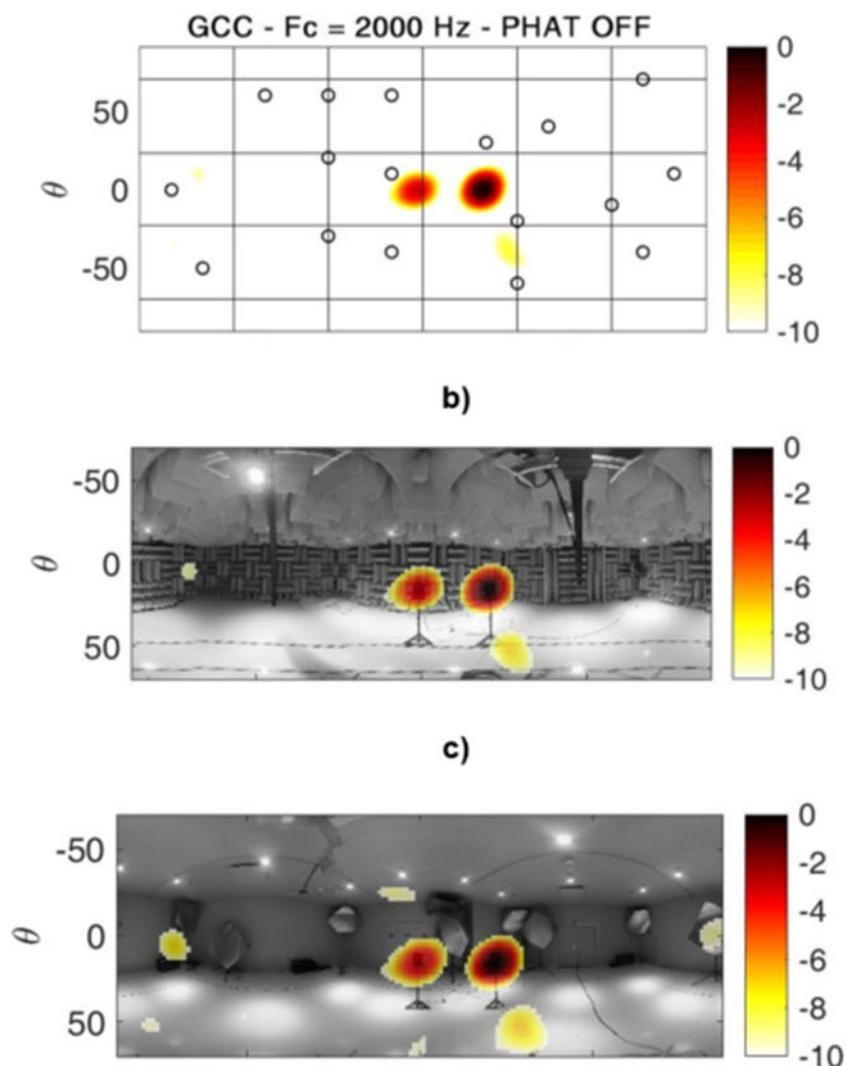


Figure 34. Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre hémianéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées de 45° en azimuth génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 3 dB.

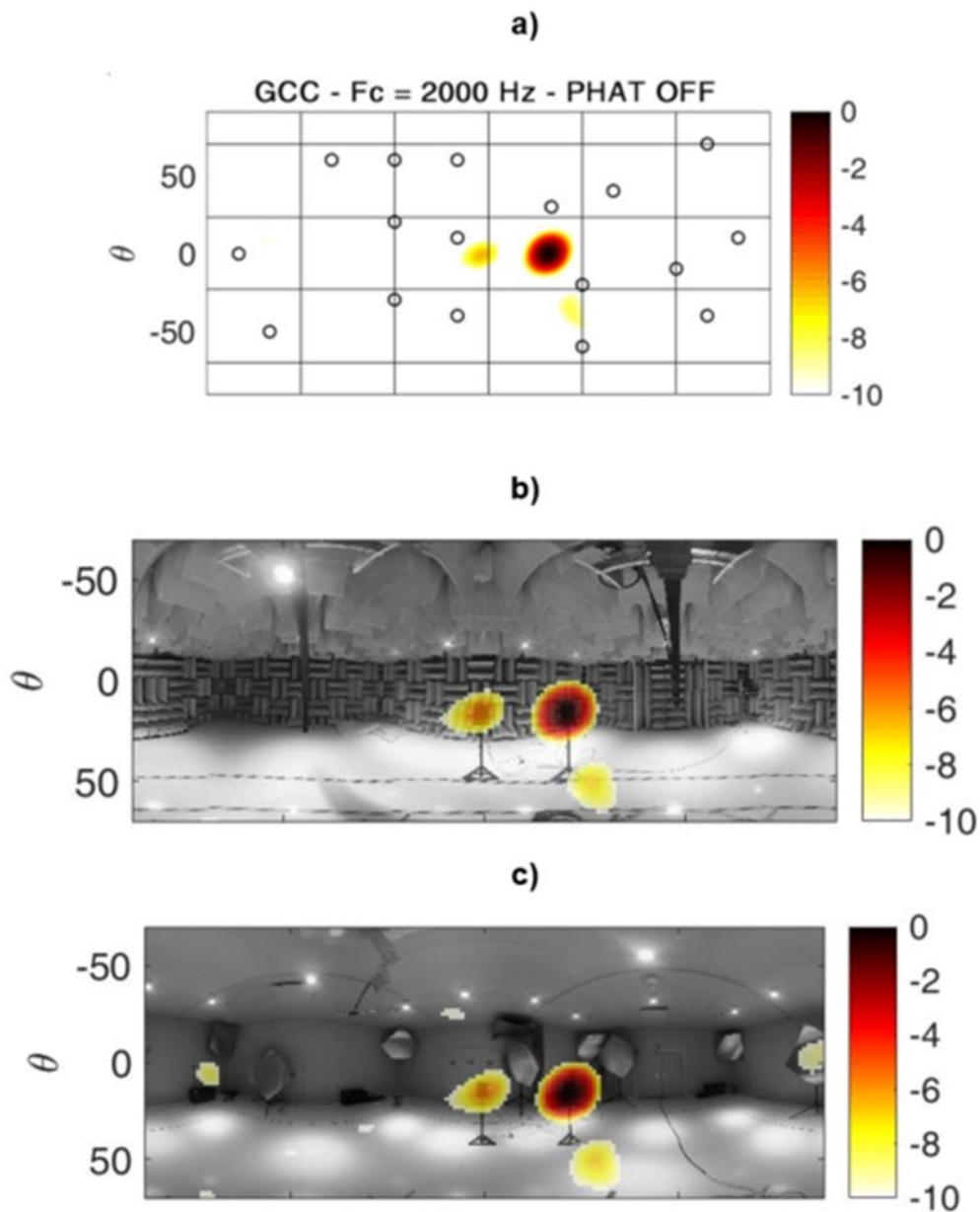


Figure 35. Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre hémianéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées de 45° en azimut génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 6 dB.

Les coupes suivant l'élévation sont montrées dans la figure 36. Chaque figure correspond aux trois différences de niveaux testées 0, 3 et 6 dB. Pour le cas où la différence est de 0 dB, les deux sources sont bien détectées. La différence de niveau est de 0,2 dB pour la simulation et de 0,3 dB pour les deux expériences en chambres contrôlées. Pour chaque cas, le niveau des lobes secondaires est en dessous de -10 dB. Quand la différence est de 3 dB, la simulation donne un écart de 3,2 dB et les expériences en chambres de 2,6 dB. Pour une différence de 6 dB, la simulation donne 6,1 dB et les expériences en chambres de 5,5 dB. Par conséquent, les expériences sous-estiment très légèrement le niveau, mais l'erreur ne dépasse jamais 0,5 dB. Ainsi, l'antenne associée à la technique du GCC est capable de localiser deux sources avec une différence d'au moins 6 dB que ce soit en chambre héli-anéchoïque ou réverbérante.

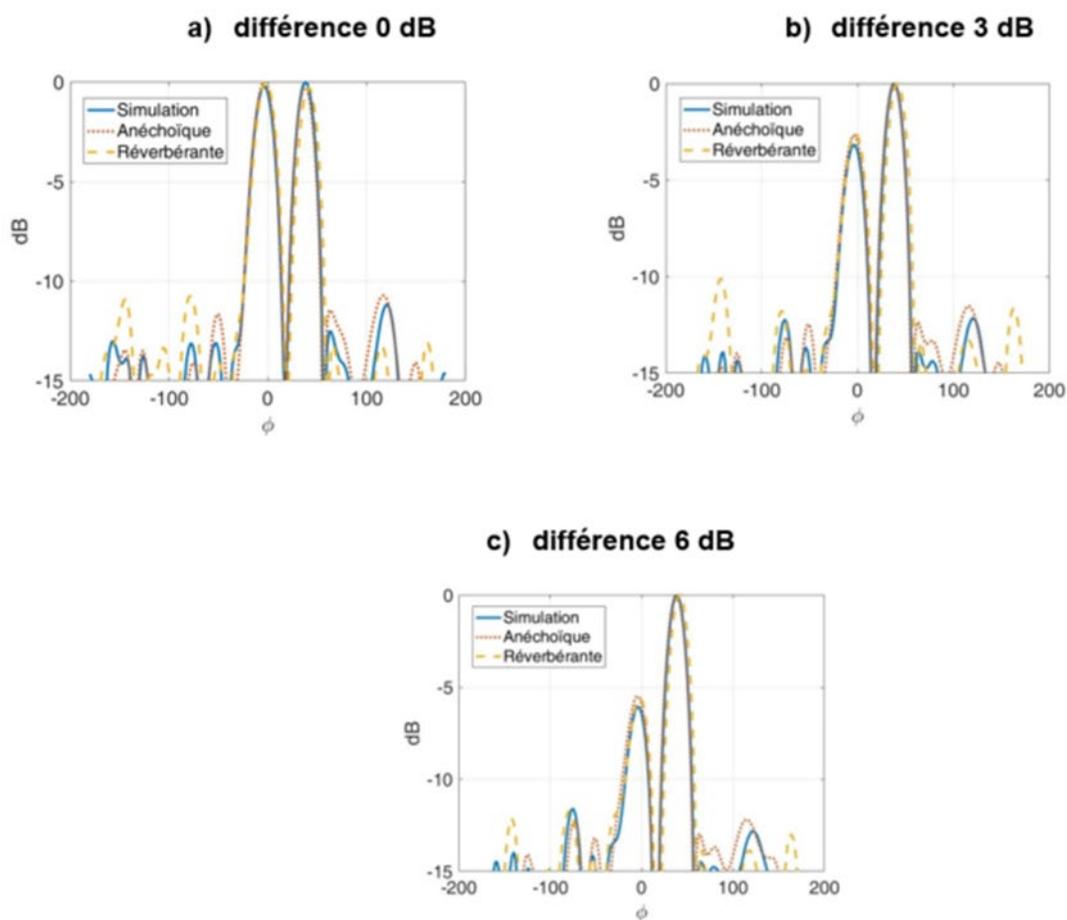


Figure 36. Coupes selon l'azimut des cartographies de la figure 35 avec une différence de niveau de a) 0 dB, b) -3 dB, c) -6 dB.

7.4 Comparaison des cartographies simulées et mesurées dans le cas de deux sources espacées en azimut et en élévation avec des niveaux acoustiques différents

Dans le cas précédent, la capacité de l'antenne à localiser en azimut a été testée. Maintenant les sources sont décalées en élévation et en azimut (figure 37). Les positions sont en azimut -4° et 14° et en élévation 16° et -12° . Les niveaux de pression acoustique varient de la même façon que précédemment (0, -3, -6 dB). Les signaux utilisés sont ceux du cas large bande c'est-à-dire qu'ils sont filtrés entre 250 et 8000 Hz.

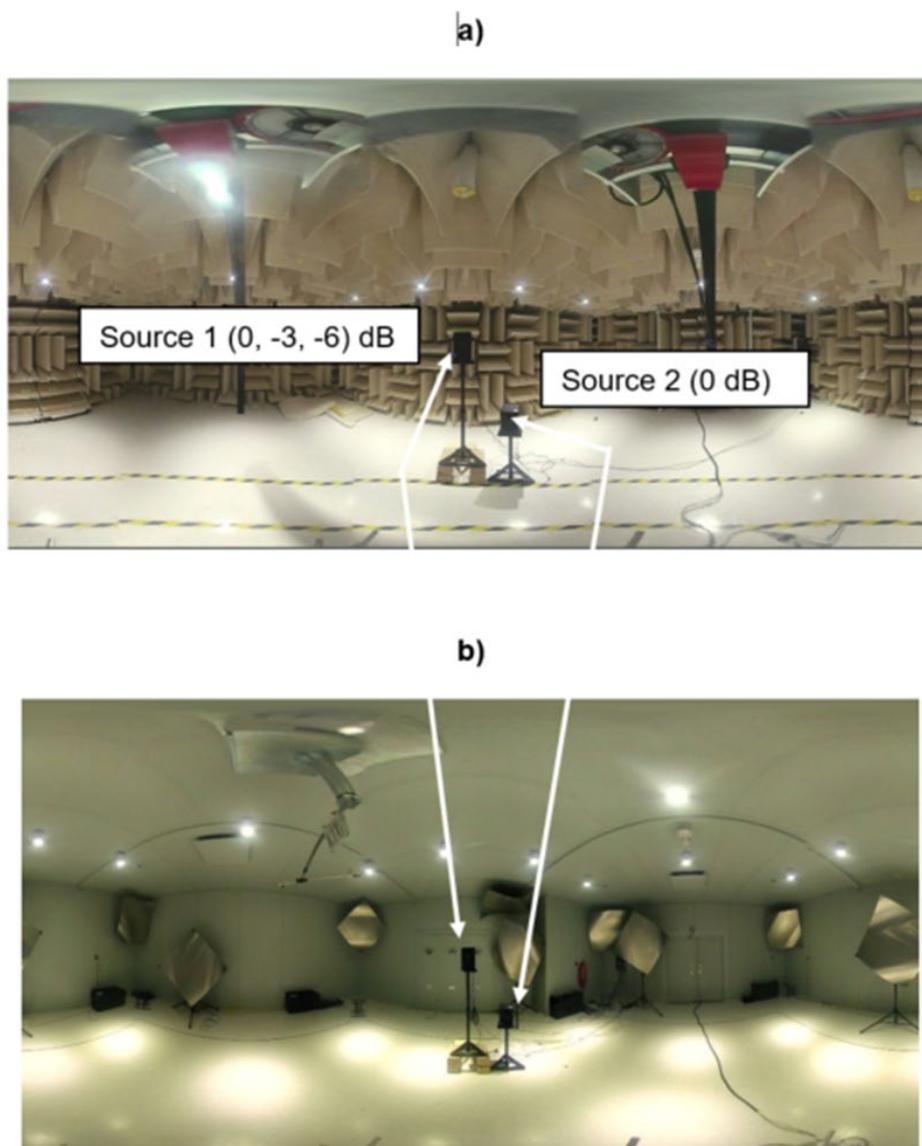


Figure 37. Photographies de la position des sources dans a) la salle héli-anéchoïque, b) la chambre réverbérante.

Les cartographies des sources sont illustrées dans les figures 38 à 40. Celles obtenues avec la simulation et dans la chambre héli-anéchoïque donnent des résultats similaires. Quand l'écart de niveau est inférieur à 3 dB, les deux sources sont bien localisées. En revanche, pour une différence de 6 dB, il est plus difficile de localiser la source ayant le plus faible niveau en raison de l'étalement du lobe principal.

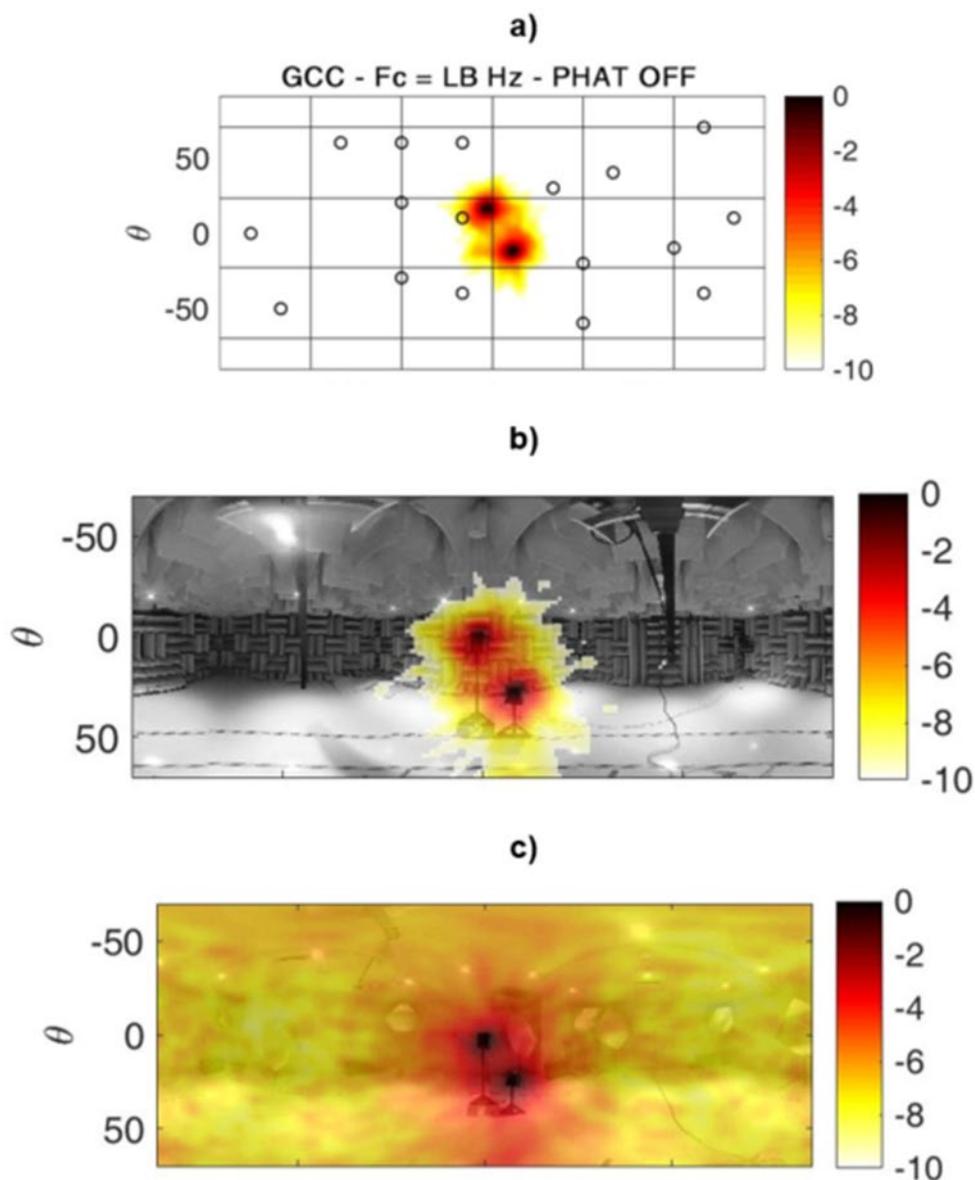


Figure 38. Cartographies des sources obtenues a) par simulation, b) en chambre héli-anéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées en azimut et en élévation génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 0 dB.

Dans la chambre réverbérante, les cartographies obtenues ne permettent pas une localisation claire des deux sources à cause du haut niveau des lobes secondaires. Cependant, pour une différence inférieure à 3 dB, deux lobes sont présents aux positions des sources. Pour une différence de 6 dB, la localisation de la seconde source est quasi impossible.

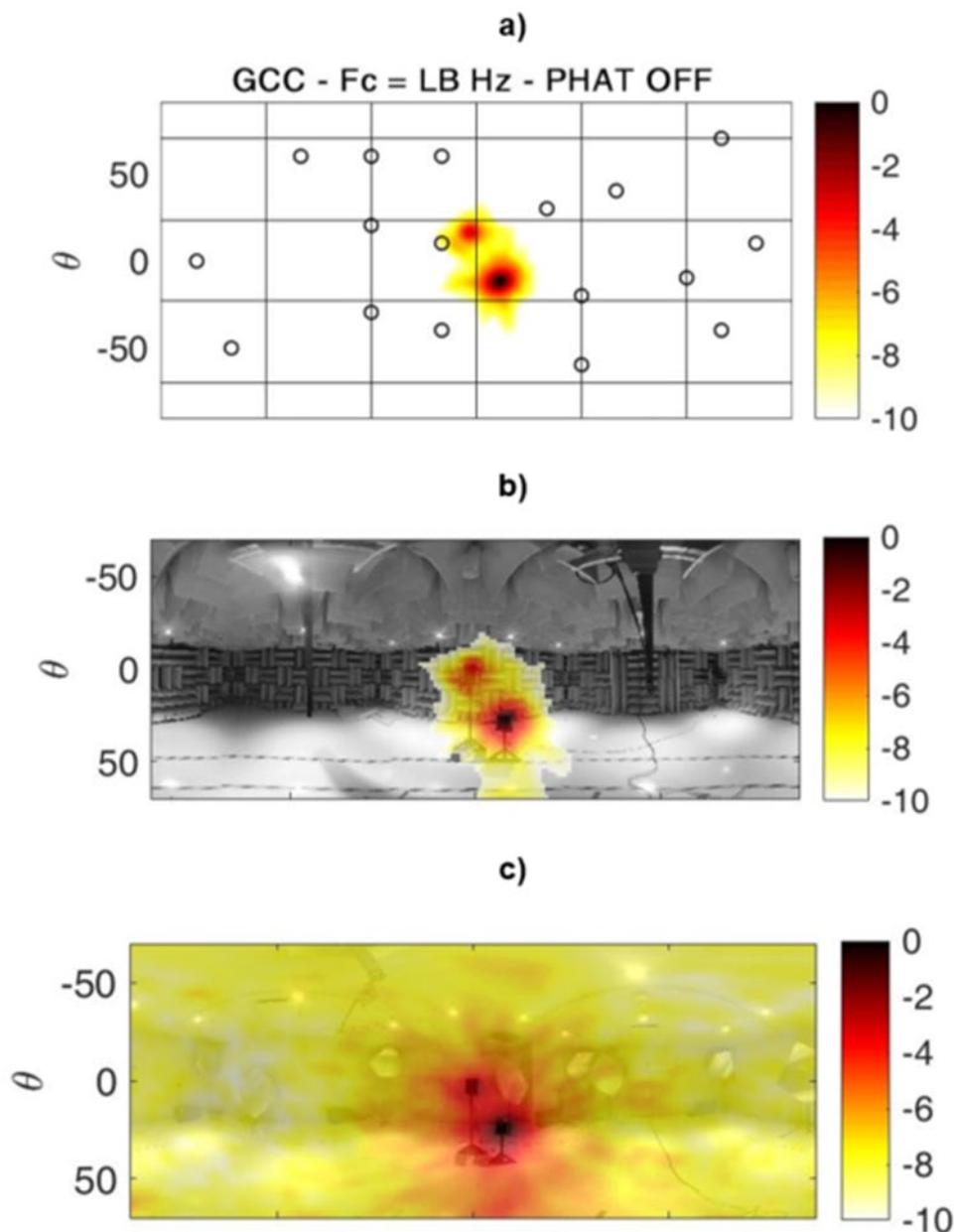


Figure 39. Cartographie des sources obtenue a) par simulation, b) en chambre hémianéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées en azimut et en élévation génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 3 dB.

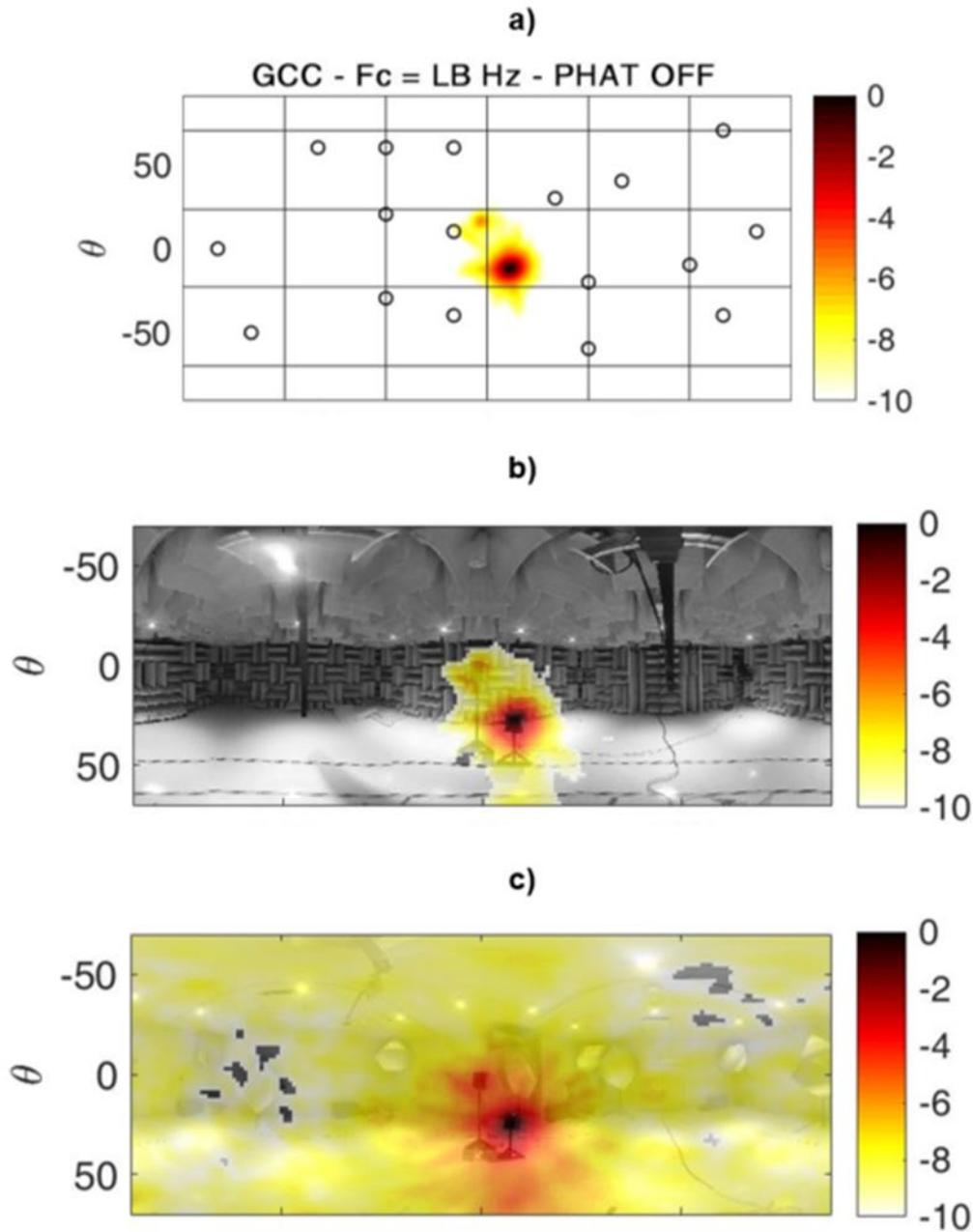


Figure 40. Cartographie des sources obtenue a) par simulation, b) en chambre hémianéchoïque, c) en chambre réverbérante. Deux sources espacées en azimut et en élévation génèrent des bruits blancs décorrélés. La différence de niveau est de 6 dB.

Finalement, l'antenne fabriquée et associée à la technique du GCC permet de localiser deux sources proches si la différence de niveau est inférieure à 3 dB. Pour de plus grands écarts, il serait nécessaire d'utiliser une technique plus élaborée.

Dans ces cas, il n'est pas possible de tracer les coupes selon les axes azimut et élévation, car les deux sources ne sont pas alignées. Pour comparer les cartographies, l'ellipse de covariance à -6 dB est utilisée. La figure 41 présente les différentes ellipses pour les divers niveaux testés. Les ellipses obtenues en simulation et en chambre héli-anéchoïque ont des surfaces similaires. Ce qui signifie que la taille des lobes principaux est la même. En revanche, en chambre réverbérante, l'ellipse est beaucoup plus grande, ce qui signifie une dispersion plus importante du lobe principal. Pour la différence de 6 dB entre les deux sources, l'ellipse obtenue en chambre héli-anéchoïque présente un axe majeur plus court que celui obtenu en simulation, car la source avec le plus bas niveau est moins bien localisée.

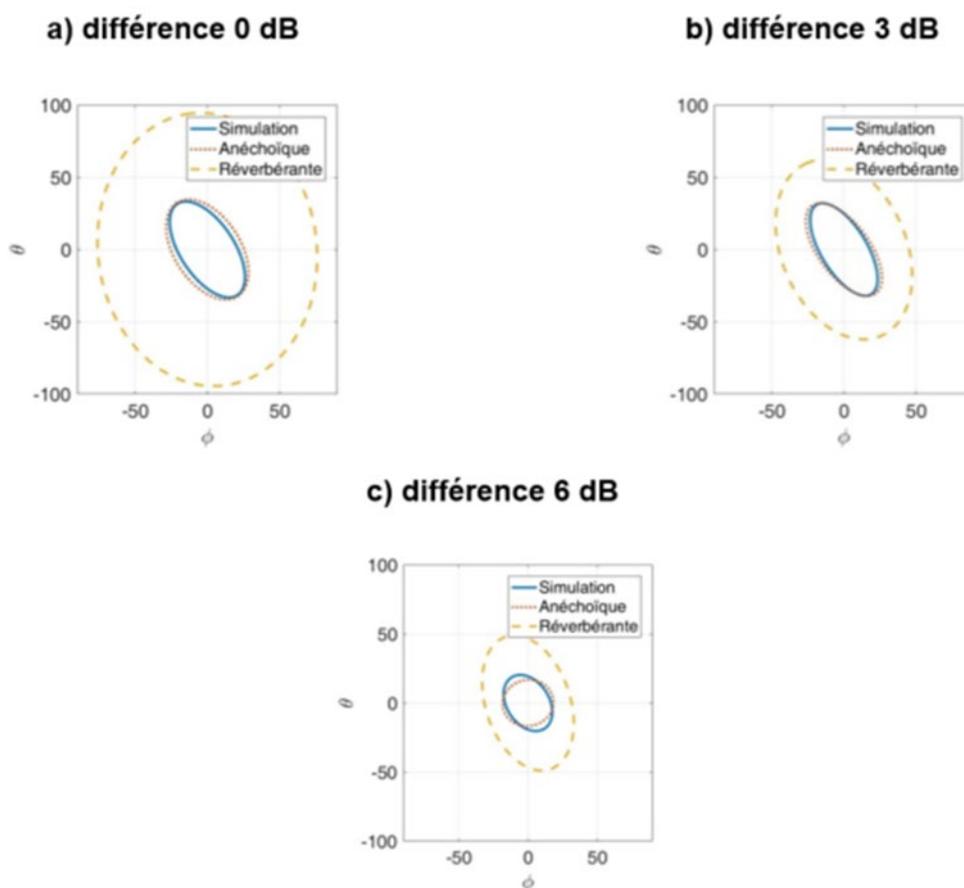


Figure 41. Ellipses de covariance des cartographies de la figure 40, avec une différence de niveau de a) 0 dB, b) -3 dB, c) -6 dB.

7.5 Précision de la localisation en fonction de la déformation créée par les objectifs de la caméra.

Les mesures précédentes ont permis de montrer que la technique de localisation de sources était capable de déterminer la position des haut-parleurs. Cependant, les haut-parleurs étaient positionnés devant l'antenne et non aux extrémités du champ de vision de la caméra où il y a une déformation de l'image. Pour de grandes valeurs d'élévation, il est possible de constater que l'image est déformée en raison des objectifs. Pour tester la précision de la localisation, une source acoustique a été placée à différentes positions aux limites du champ de vision de la caméra. Étant donné qu'il est difficile de positionner un haut-parleur à ces positions, la source est le téléphone intelligent mobile qui permet de prendre les photographies. Après la prise de photographies, le téléphone génère un bruit blanc. La petite taille de la source constitue un avantage pour vérifier les performances de la technique de localisation. Le téléphone est placé à trois endroits différents, soit sur sol, sur le plafond en face et sur le côté. Pour chaque cas, les signaux microphoniques sont filtrés entre 2000 et 8000 Hz. Les cartographies des sources sont données dans la figure 42. Pour chaque cas, la source est correctement localisée. Ainsi, malgré une légère déformation de l'image due aux objectifs de la caméra, il est possible de localiser des sources qui sont aux extrémités du champ de vision.

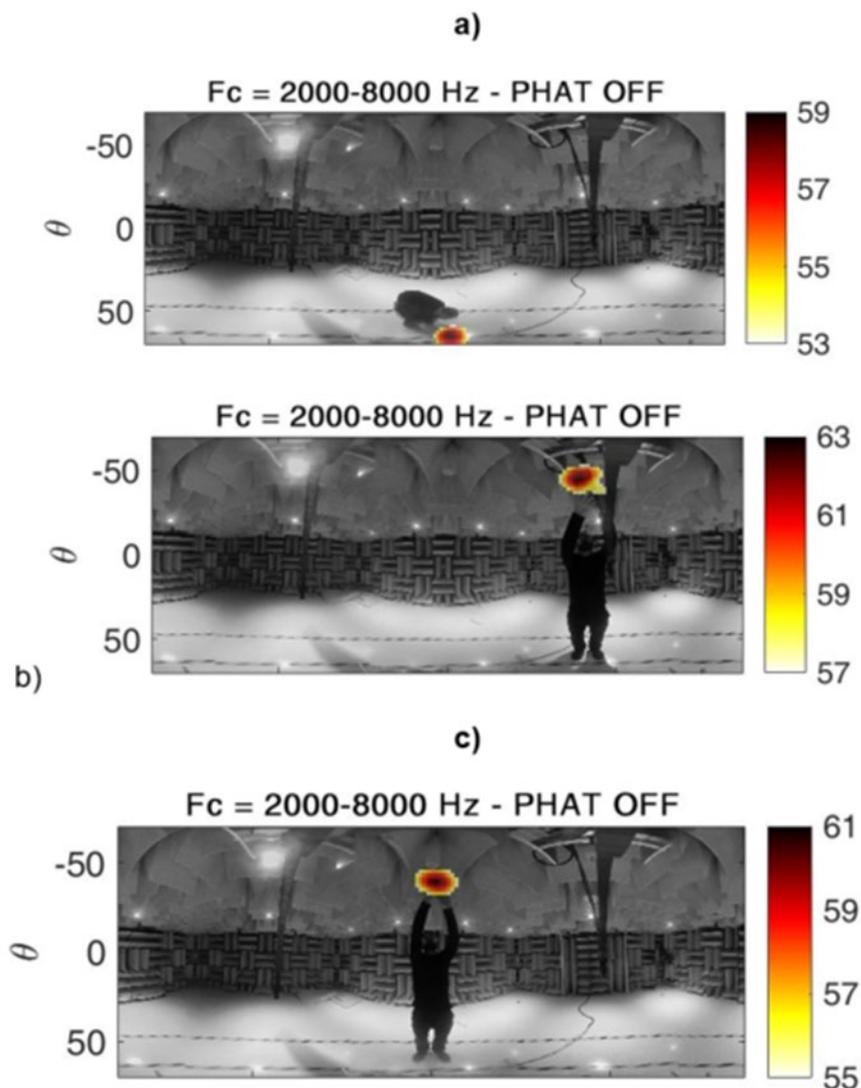


Figure 42. Cartographies des sources pour des positions aux extrémités du champ de vision de la caméra a) au sol, b-c) au plafond.

7.6 Cartographies des sources acoustiques d'un atelier

7.6.1 Description de l'atelier et du scénario acoustique

Des mesures ont été réalisées dans un atelier pour tester les capacités de l'antenne associée à la technique du GCC dans un environnement sonore avec des conditions de réverbération intermédiaires entre les salles héli-anéchoïque et réverbérante. L'atelier est composé d'une pièce principale qui communique avec une pièce en longueur de type couloir. La figure 43 montre un schéma de l'organisation dans l'atelier.

L'atelier est situé dans le laboratoire d'acoustique de l'ÉTS devant les chambres héli-anéchoïque et réverbérante. La chambre héli-anéchoïque peut devenir complètement

anéchoïque en ajoutant des dièdres supplémentaires au sol. Lors des mesures avec l'antenne, ces dièdres supplémentaires n'étaient pas utilisés dans la chambre héli-anéchoïque et étaient donc rangés sur des étagères. Ces dièdres diminuent les réflexions sur les murs près desquels ils sont rangés, mais de nombreuses réflexions existent sur les autres parois où il n'y a aucun traitement (sol, mur, porte). Le bruit de fond de l'atelier est généré par le système de ventilation et les appareils électroniques (ordinateurs, amplificateurs) et est faible lorsque comparé au bruit généré par les différents outils testés.

Trois opérateurs utilisent chacun une perceuse à colonne, une perceuse et un marteau. L'opérateur à la perceuse à colonne perce un morceau de bois, l'opérateur à la perceuse actionne uniquement la perceuse et l'opérateur avec le marteau enfonce un clou dans une bûche de pin qui est posée sur une table. Une photographie de la scène acoustique est présentée à la figure 43b. Le matériel utilisé pour faire l'acquisition du champ acoustique est le même que celui dont il a été fait usage précédemment. L'antenne est placée au milieu de la pièce principale. La scène acoustique jouée par les trois opérateurs est la suivante. Tout d'abord chaque machine est opérée indépendamment pendant trois secondes, puis les trois machines sont opérées simultanément.

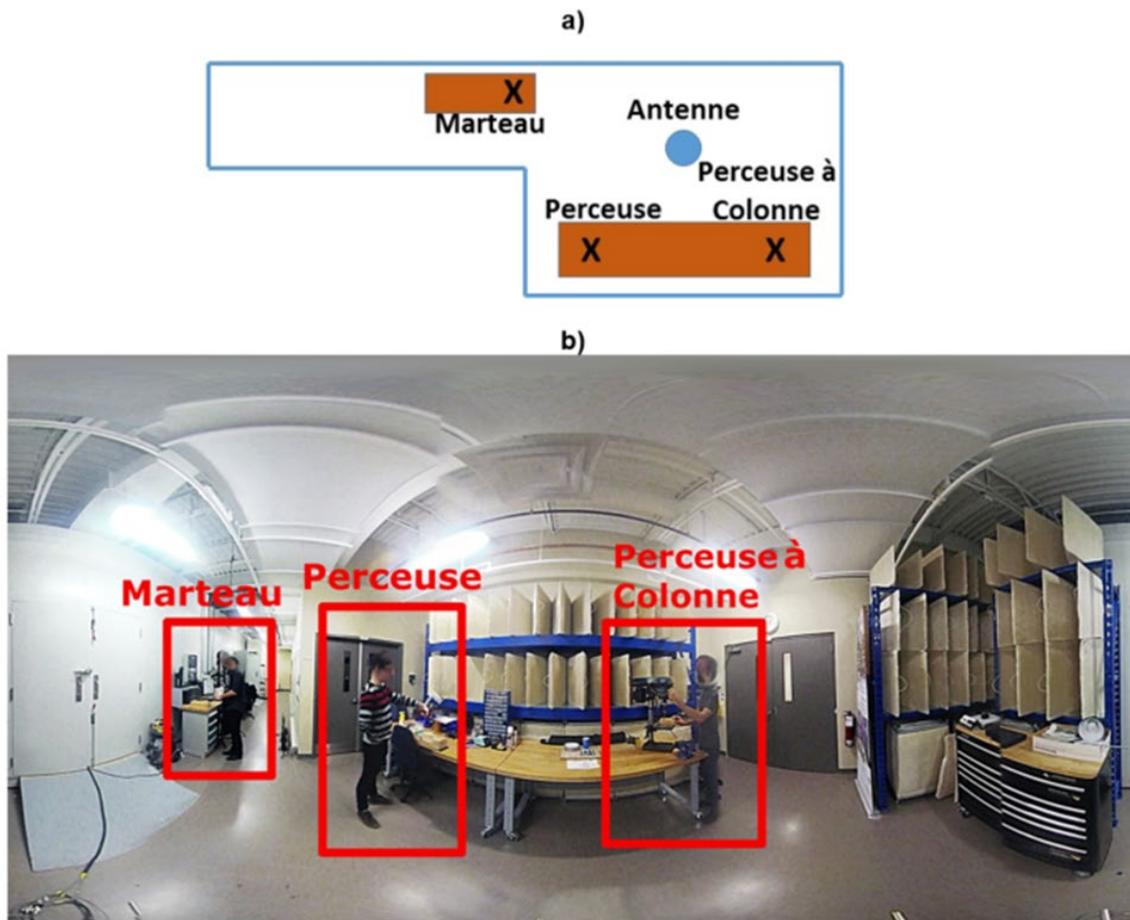


Figure 43. a) Schéma de l'organisation des machines dans l'atelier, b) photographie de la scène acoustique.

Pour chaque cas, la première étape consiste à observer le signal temporel pour sélectionner la partie du signal à utiliser avec la technique du GCC. Puis, la transformée de Fourier du signal est calculée pour déterminer dans quelle bande de fréquences rayonne la machine (ce qui n'était pas le cas avant, car la source était un bruit blanc qui contient la même énergie pour toutes les fréquences). Pour chaque cas, le spectre de la transformée de Fourier est représenté en tiers d'octave (dB et dB(A)) et en bandes fines. Le niveau global sur toute la bande de fréquences est également indiqué en dB et dB(A). Le dB(A) est le niveau en dB perçu par un être humain alors que le dB est le niveau capté par un microphone.

7.6.2 Cartographie des sources acoustiques de la perceuse à colonne

La première machine testée est une perceuse à colonne. Le signal temporel ainsi que le spectre sont représentés dans la figure 44. La perceuse à colonne génère un bruit dont le contenu est en basses fréquences, avec un niveau maximal dans les tiers d'octave 200, 250 et 315 Hz. Puis, l'amplitude décroît avec l'accroissement de la fréquence. La pondération A réduit l'amplitude des basses fréquences et révèle un spectre avec un niveau quasi similaire sur la bande fréquentielle de 200 à 1600 Hz. Le niveau global est de 66,3 dB et de 57,1 dB(A).

La bande de fréquences choisie pour créer la cartographie va de 700 à 5000 Hz (car, comme vu précédemment, l'antenne associée à la technique du GCC n'est pas performante en basses fréquences). La cartographie des sources est présentée dans la figure 44c. Un lobe avec le maximum d'amplitude est présent à la position de la source. Un second lobe est détectable sous le lobe principal. Ce lobe peut être associé à une réflexion sur le sol. Ainsi, la perceuse à colonne et la réflexion au sol sont bien détectées avec l'antenne et la technique du GCC. Cependant, la taille du lobe principal est grande, cela s'explique par les basses fréquences comprises dans le signal. En augmentant la fréquence de coupure basse du filtre passe-bande, il est possible de réduire la taille du lobe. La cartographie des sources pour un signal filtré entre 2000 et 5000 Hz est présentée dans la figure 45c. Dans ce cas, seul le haut de la perceuse à colonne où se situent le moteur et la courroie est détecté. Cette cartographie des sources est plus précise.

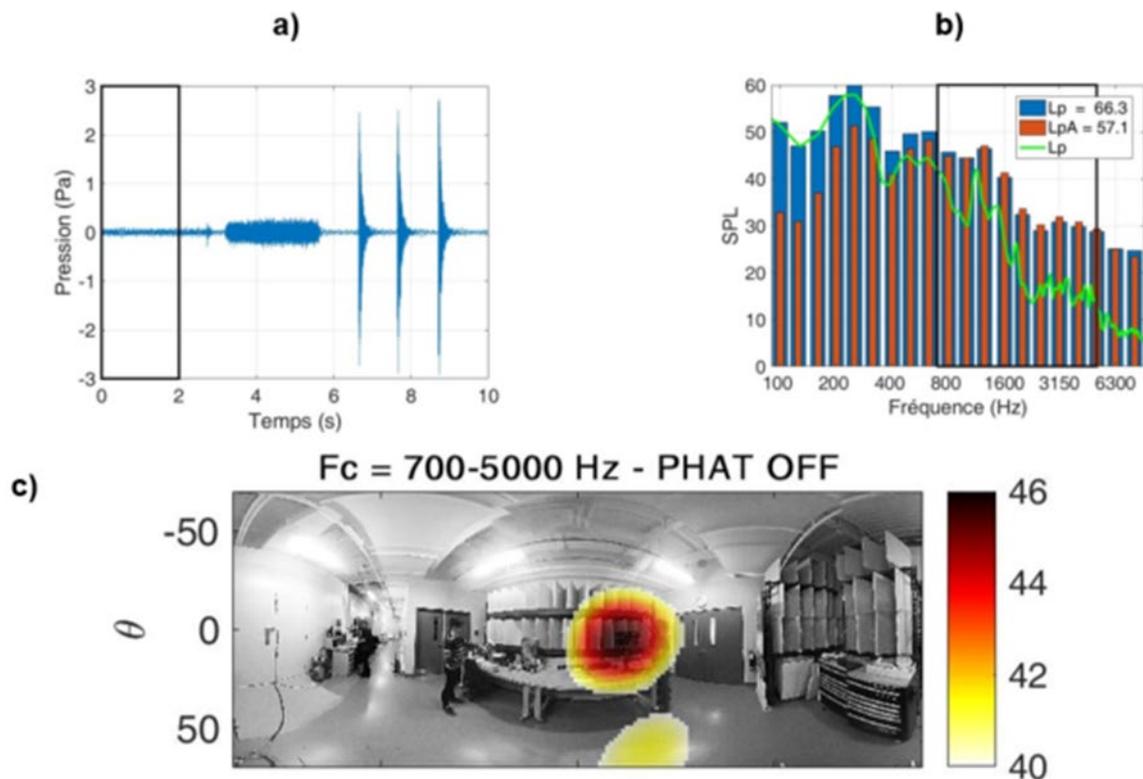


Figure 44. Test avec perceuse à colonne : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 5000 Hz.

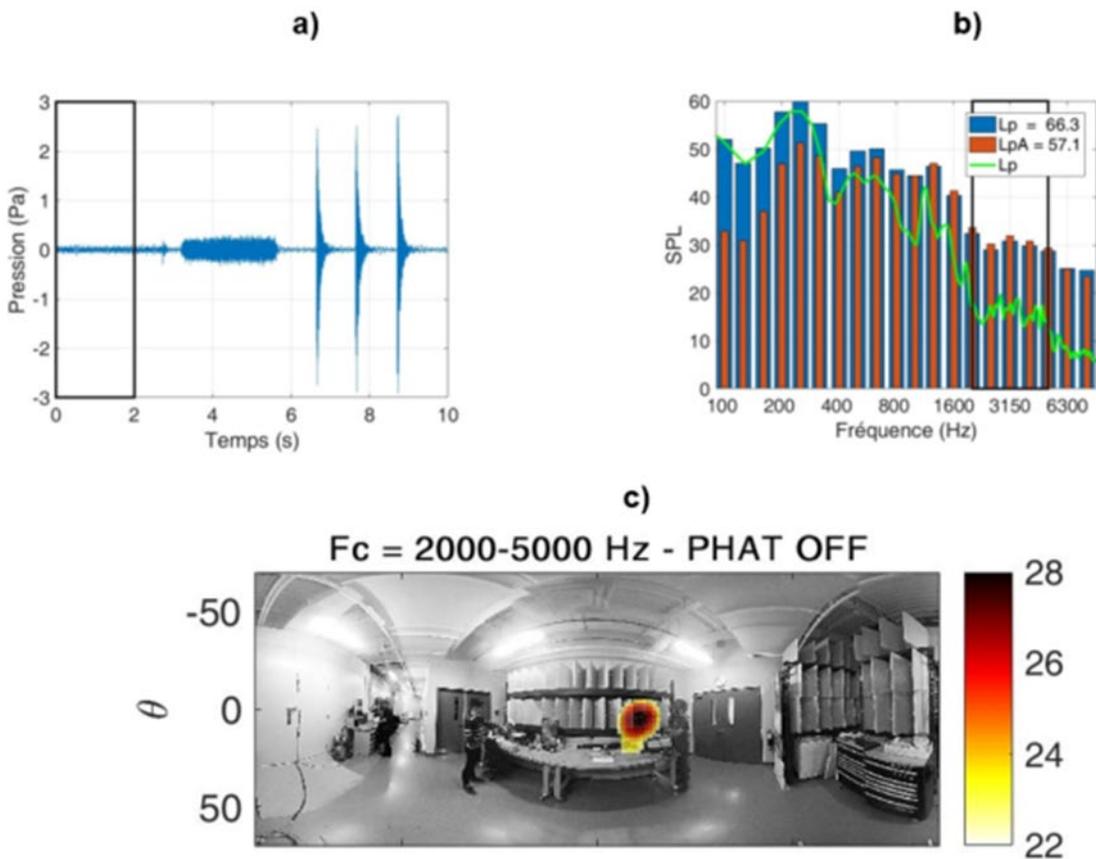


Figure 45. Test avec perceuse à colonne : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 2000 et 5000 Hz.

7.6.3 Cartographie des sources acoustiques de la perceuse

La seconde machine testée est une perceuse (ou visseuse). Il est aisé de voir sur le signal temporel que l'amplitude du signal est plus élevée que celle de la perceuse à colonne (figure 46a). Cela est confirmé par la valeur globale du niveau de pression qui est de 71,4 dB et de 70 dB(A). La perceuse a donc un niveau supérieur de 5 dB et de 13 dB(A) par rapport à celui de la perceuse à colonne. Le spectre du signal montre un bruit à très hautes fréquences avec des tons purs au-delà de 3000 Hz. La bande de fréquences sélectionnée pour générer la cartographie des sources est donc entre 2500 et 8000 Hz. La cartographie des sources est présentée à la figure 46c où un lobe principal est présent à la position de la perceuse. L'opérateur tient la perceuse dans sa main et le lobe est juste à l'extrémité de celle-ci. Quelques lobes secondaires sont également détectables. Il est difficile d'associer ces lobes à des réflexions sur les murs.

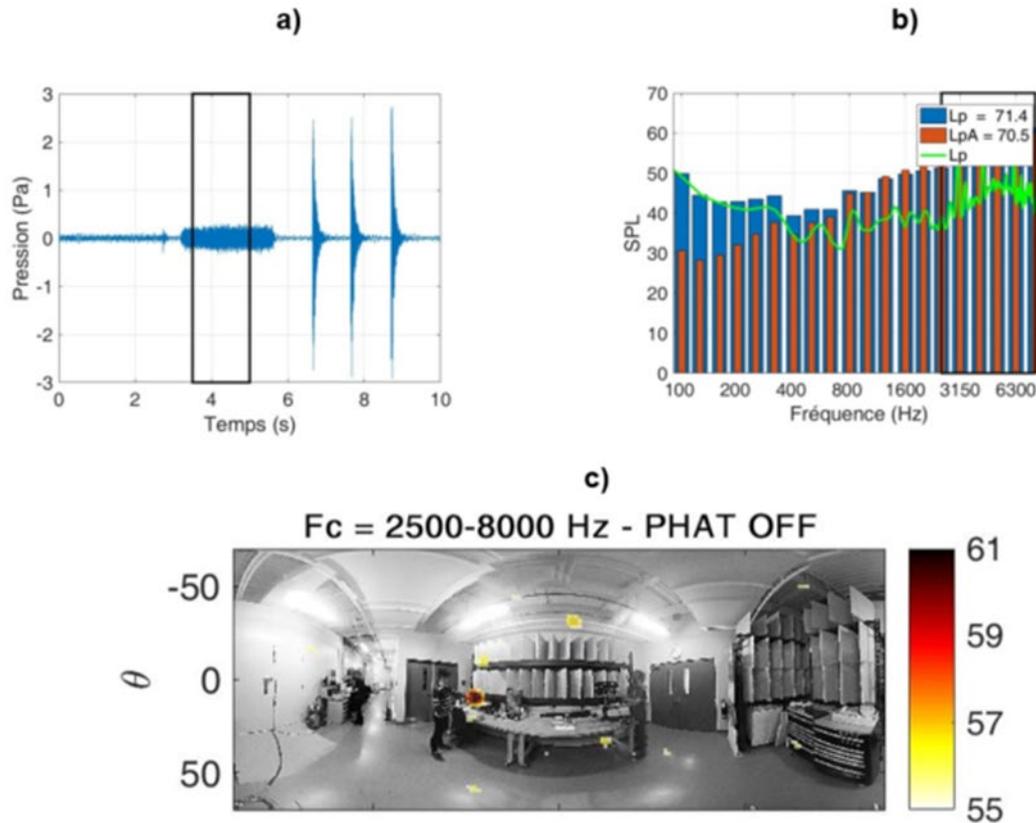


Figure 46. Test avec perceuse : a) Signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 2500 et 8000 Hz.

7.6.4 Cartographie des sources acoustiques du marteau

La dernière machine testée est un marteau de charpenterie classique. Un opérateur devait enfoncer un clou dans une bûche de pin qui était posée sur une table. Le signal temporel montre clairement les impulsions dues au choc du marteau sur le clou. L'amplitude du signal temporel est grandement supérieure aux amplitudes des machines précédentes. Par exemple, l'amplitude de l'impact du marteau avec le clou est 10 fois supérieure à l'amplitude de la perceuse. Cela est confirmé par le niveau de pression global qui est de 82,6 dB et de 79,3 dB(A). Le signal généré étant un impact, un spectre relativement plat est produit. La pondération A diminue le niveau des basses fréquences.

La bande de fréquences choisie pour générer la cartographie des sources est de 800 à 8000 Hz. La cartographie des sources est montrée à la figure 47c. Un lobe principal est présent à la position de la source. Cela montre que la technique du GCC est également capable de localiser une source impulsionnelle. Le lobe principal est étendu selon l'élévation, ce qui s'explique par le fait que l'opérateur tape sur la bûche faisant ainsi rayonner la table sur laquelle

elle est posée. Un lobe secondaire est présent au-dessus du lobe principal. Ce type de lobe n'est pas détectable sur les cartographies obtenues par simulation en champ libre. Ainsi, il est fort probable que ce lobe soit lié à la réflexion sur le plafond. Pour réduire la taille du lobe principal, la bande de fréquences considérée va de 2000 à 8000 Hz. Dans ce cas, il est possible de constater plusieurs lobes sur la cartographie (figure 48c). Le lobe à la position de la source montrant l'emplacement de la bûche est présent. Un second lobe en dessous est également présent et potentiellement lié à la réflexion sur le sol. Finalement, le lobe lié à la réflexion sur le plafond est également présent. En conclusion, cette série de mesures dans un atelier avec des signaux de machines couramment utilisées au quotidien a permis de montrer que l'antenne associée à la technique du GCC était capable de localiser différents types de sources ainsi que les réflexions sur les parois.

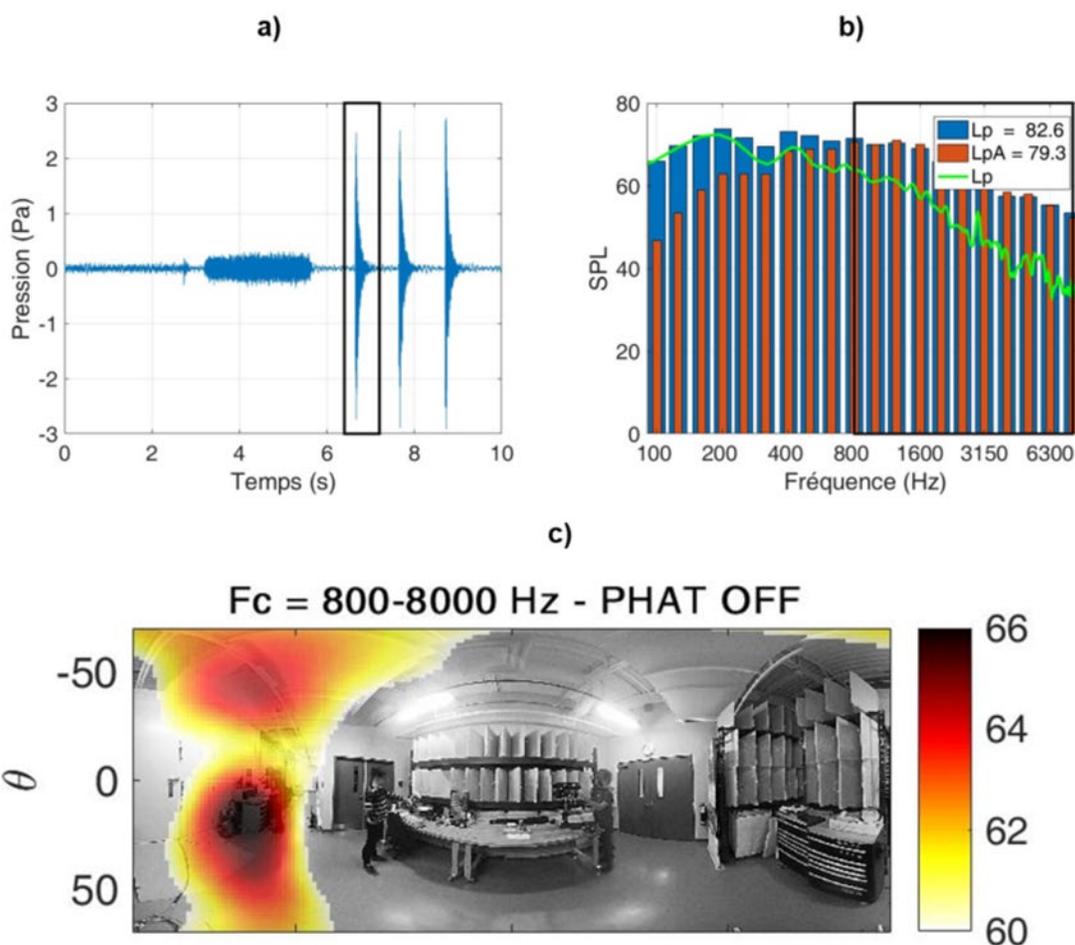


Figure 47. Test avec marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 800 et 8000 Hz.

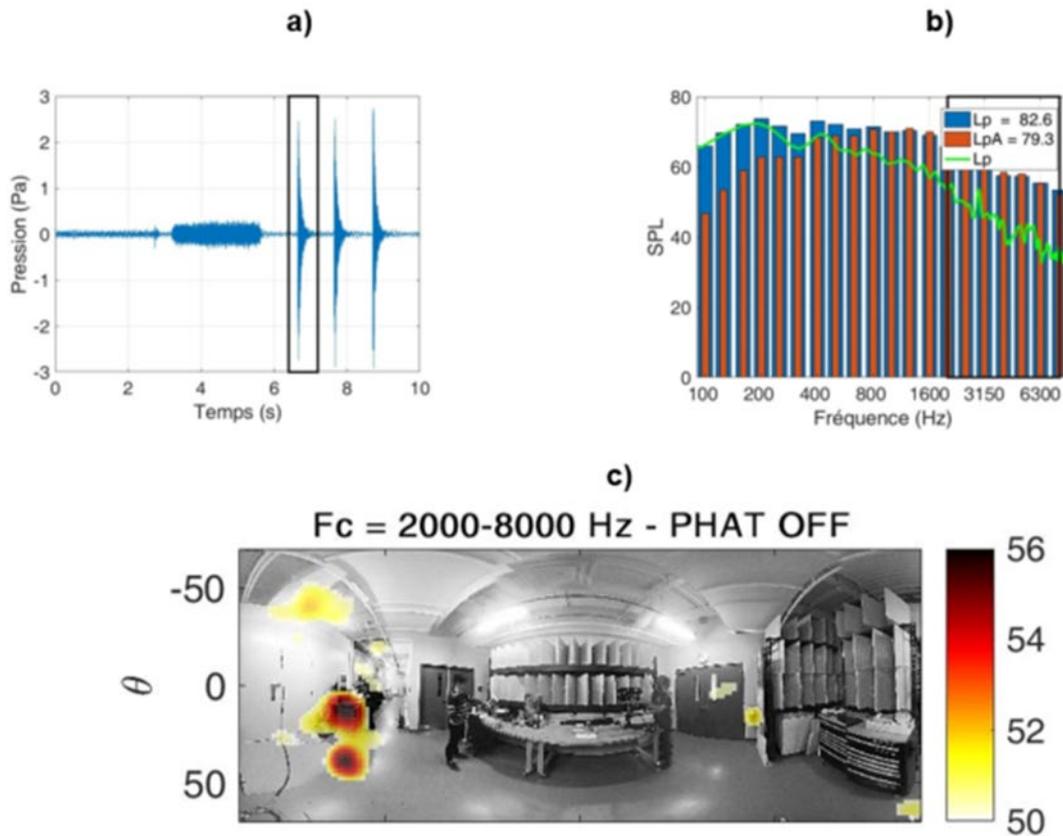


Figure 48. Test avec marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 2000 et 8000 Hz.

7.6.5 Cartographie des sources acoustiques des machines opérées simultanément

Maintenant les trois machines fonctionnent en même temps. Ce scénario acoustique met en jeu des machines avec des niveaux et des spectres acoustiques différents dans un local où il y a des réflexions sur les parois et sur différents objets. Les conditions sont donc beaucoup plus complexes que celles qui existaient dans le cas du haut-parleur dans la chambre hémianéchoïque.

Le premier cas testé est celui où la perceuse à colonne et la perceuse sont utilisées simultanément. La différence de niveau entre ces deux outils est de 5 dB et 13 dB(A). La perceuse à colonne étant l'outil le moins bruyant, il est nécessaire de choisir une bande de fréquences où celui-ci rayonne pour être en mesure de le localiser. Par conséquent, le signal temporel est d'abord filtré entre 700 et 1500 Hz. Il est important de noter que la perceuse rayonne davantage dans cette bande de fréquences. La cartographie des sources est montrée à la figure 49c. Malgré un niveau sonore plus important rayonné par la perceuse, qui est indiqué

par le lobe principal, il est possible de détecter la position de la perceuse à colonne. Un large lobe secondaire indique potentiellement les réflexions sur le sol. Ainsi, cette mesure, semblable à celles effectuées dans les conditions de laboratoire avec les deux haut-parleurs, montre un résultat similaire. Il est possible de détecter deux sources avec des niveaux différents.

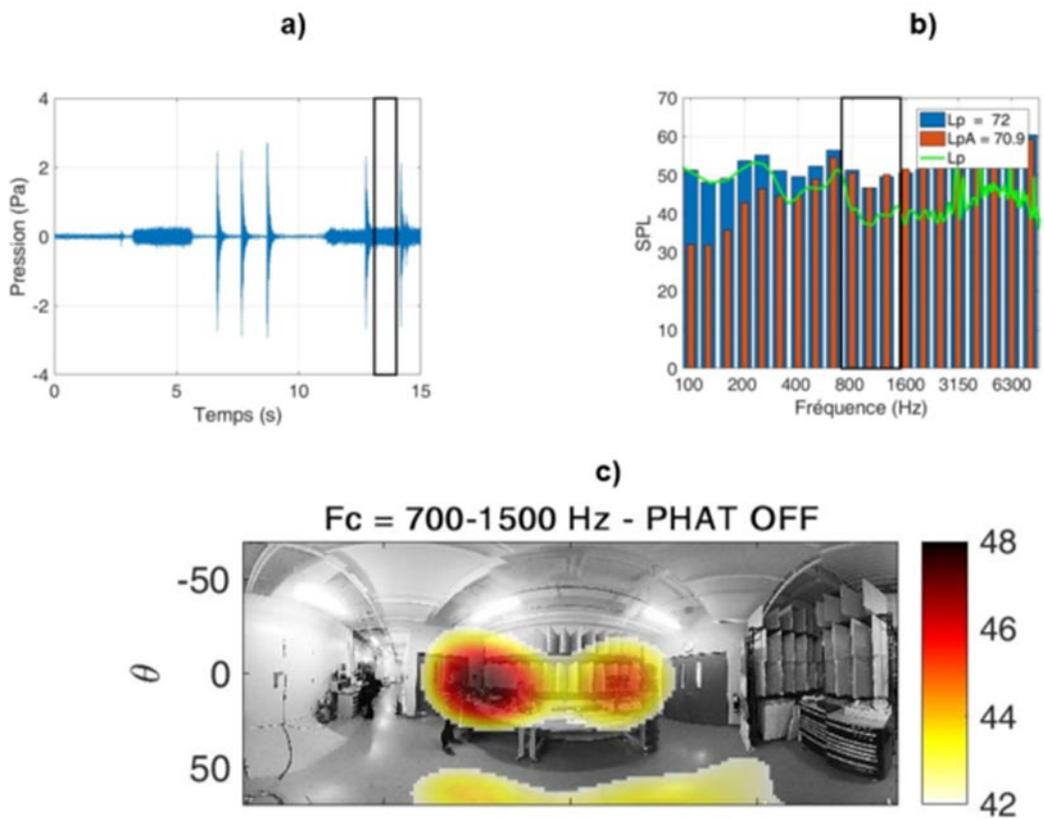


Figure 49. Test avec perceuse à colonne et perceuse : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d’octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 1500 Hz.

Dans un deuxième temps, le signal temporel est filtré entre 700 et 8000 Hz, ce qui revient à un cas large bande. La cartographie des sources est présentée à la figure 50. La source localisée est bien la perceuse qui génère le plus de bruit. Une réflexion au sol semble visible également. La perceuse à colonne n’est pas identifiée, ce n’est donc pas la source principale dans ce cas.

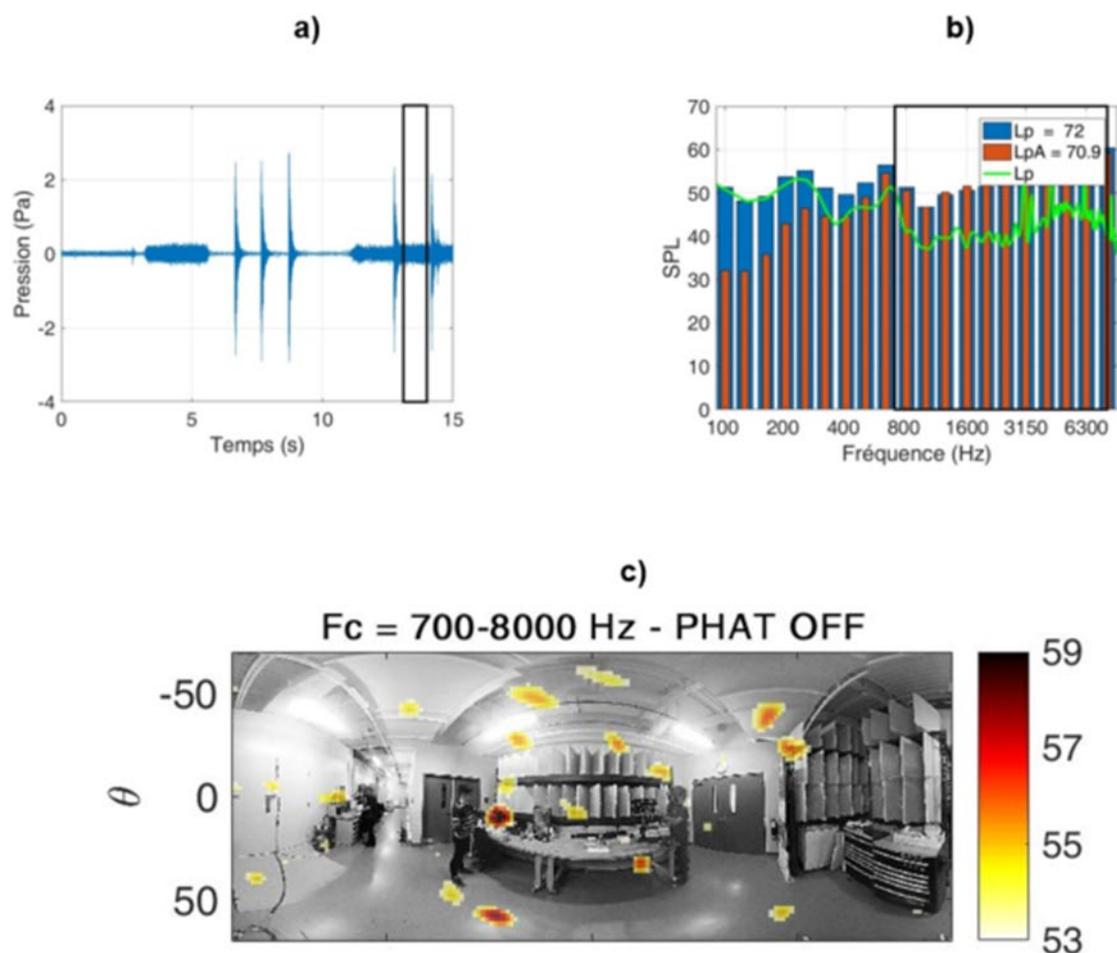


Figure 50. Test avec perceuse à colonne et perceuse : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 8000 Hz.

Le second cas étudié est celui lors duquel les perceuses et le marteau sont opérés en même temps. Dans ce cas, il est important de noter que les sources sont vraiment différentes, c'est-à-dire : 1) les perceuses émettent des bruits stationnaires alors que le marteau génère une impulsion, 2) l'amplitude du signal temporel du marteau est 10 fois plus grande que celle du signal temporel des perceuses, 3) le signal acoustique du marteau est un spectre large bande alors que celui des perceuses comprend des pics liés à des tons purs.

La première cartographie des sources est obtenue pour un signal filtré entre 3000 et 6300 Hz, là où la perceuse rayonne (figure 51c). La perceuse à colonne ne rayonne que très peu dans cette bande de fréquence et donc ne peut être localisée. Dans cette bande de fréquences, la perceuse génère un niveau acoustique légèrement supérieur à celui du marteau. Cependant, l'impulsion liée à l'impact est quand même présente dans le signal temporel étudié (figure 51a).

La cartographie des sources montre un lobe principal à la position de la perceuse avec une potentielle réflexion sur le sol et divers lobes secondaires. Ainsi, malgré la présence de l'impulsion dans le signal, il est possible de détecter précisément la position de la perceuse. Dans un deuxième temps, le signal temporel est filtré entre 1000 et 3000 Hz, ce qui correspond à une gamme de fréquences où le marteau génère plus de bruit que la perceuse et la perceuse à colonne. La cartographie obtenue (figure 52c) indique bien le marteau comme source principale. Le rayonnement de la table et la potentielle réflexion sont également déterminés.

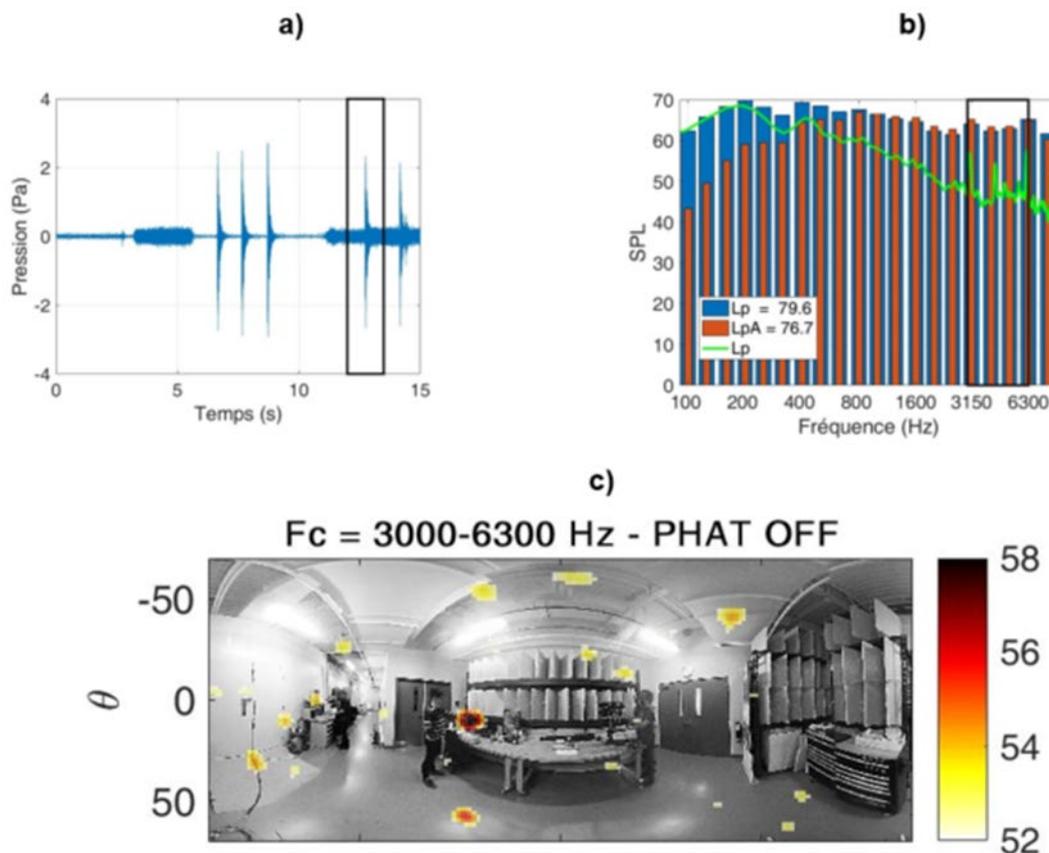


Figure 51. Test avec perceuses et marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 3000 et 6300 Hz.

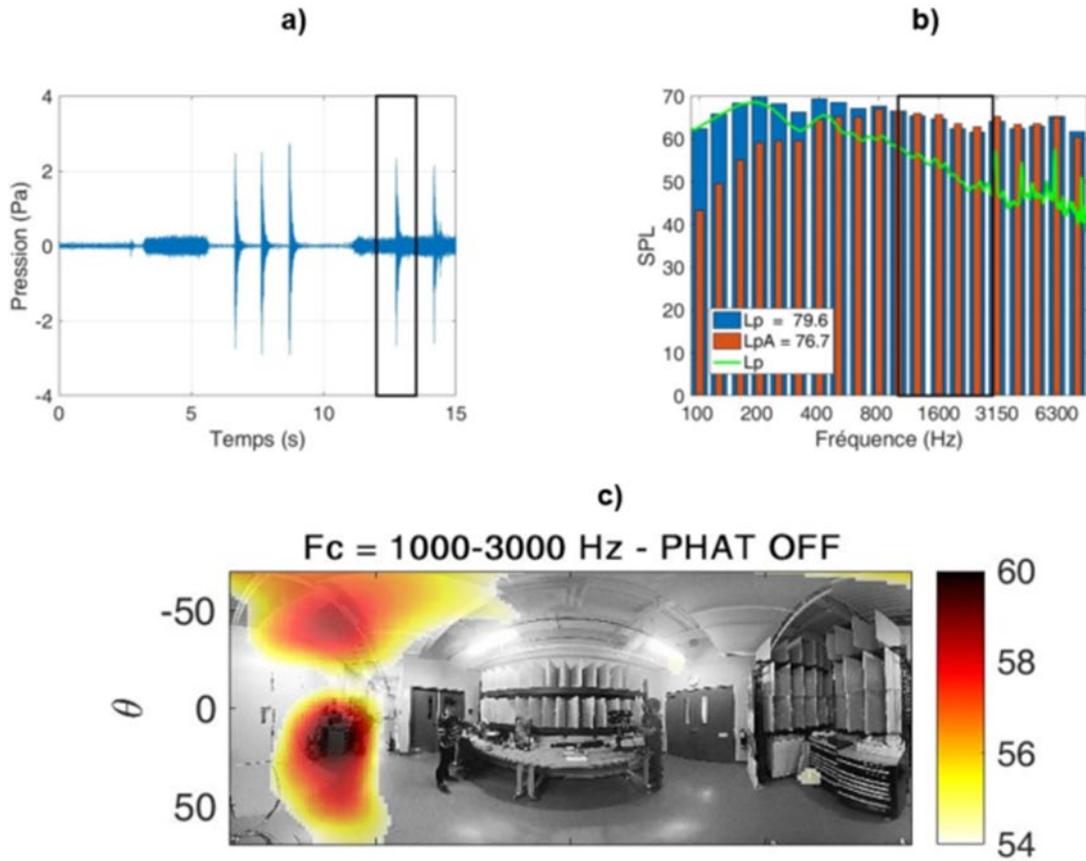


Figure 52. Test avec perceuses et marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d’octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal filtré entre 1000 et 3000 Hz.

Enfin, le signal temporel est filtré entre 700 et 8000 Hz, ce qui revient à un cas large bande. La cartographie des sources est présentée à la figure 53c. Dans ce cas, la source principale est le marteau, ce qui est cohérent, car cette source a la plus grande amplitude. Cependant, la perceuse est également localisée malgré une amplitude plus faible. En conclusion, l’antenne associée à la technique du GCC est capable de localiser plusieurs machines opérant différemment dans des conditions réelles.

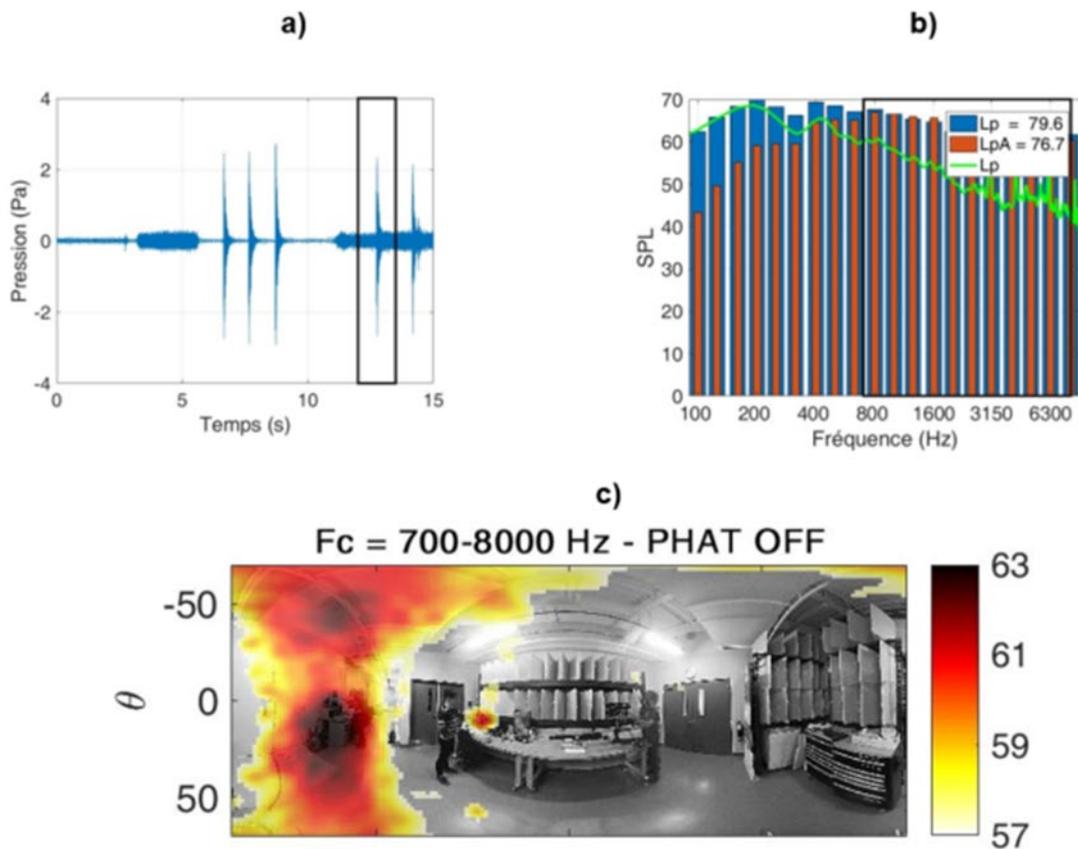


Figure 53. Test avec perceuses et marteau : a) signal temporel capté par un microphone (le rectangle noir représente la portion de signal utilisée pour générer la cartographie), b) spectre du signal microphonique en tiers d'octave (dB et dB(A)) et linéaire (le rectangle noir représente la gamme fréquentielle étudiée), c) cartographie des sources, signal temporel filtré entre 700 et 8000 Hz.

7.6.6 Utilisation sur le terrain

Les performances de l'antenne et de la technique développées ont été montrées dans les sections précédentes. Dans un milieu réel, la démarche à suivre pour utiliser l'outil acoustique est la suivante : premièrement, il faut installer l'antenne sphérique à la position du travailleur. L'antenne est reliée à l'ordinateur par des câbles LEMMO, ceux-ci sont suffisamment longs pour déporter le système d'acquisition loin de l'antenne et donc ne pas affecter le champ acoustique. La calibration des microphones est préenregistrée dans le logiciel d'acquisition; il n'est donc pas nécessaire de calibrer à chaque mesure. Cependant, une vérification hebdomadaire est recommandée. Une fois les microphones branchés au système d'acquisition, l'enregistrement se fait avec le logiciel Time Data Recorder. Ce logiciel fonctionne comme un lecteur audio classique. Une fois les signaux enregistrés, l'obtention des cartographies des sources peut se diviser en deux étapes : une analyse large bande et par bande prédéfinie. L'analyse large bande signifie un filtrage des signaux microphoniques dans la gamme 1-8 kHz. Dans ce cas, la cartographie des sources indique les sources rayonnant dans cette gamme de

fréquences. Ce cas réfère à une analyse globale. À la suite de cette analyse, il est possible de regarder le spectre acoustique par bande d'octaves et de sélectionner la bande de fréquences qui rayonne le plus de bruit. Ce cas réfère à une analyse en bande prédéfinie et permet potentiellement de ne localiser qu'une seule machine ou qu'une partie d'une machine. Cette double analyse favorise, dans un premier temps, l'obtention d'une image globale de la situation acoustique et, par la suite, de la raffiner. Cela pourrait correspondre à deux niveaux d'expertise, celui d'une personne non acousticienne qui observe le problème globalement et celui d'une personne qualifiée en acoustique qui va chercher à proposer des solutions.

En comparaison avec l'antenne de l'INRS (Noël et al., 2006), celle développée lors de la présente étude a l'avantage d'avoir une caméra qui permet une superposition de l'image acoustique avec celle du local. Ainsi, les positions de sources acoustiques peuvent être localisées par une personne non experte. Cependant, les performances de localisation sont inférieures, car aucune technique avancée de traitement du signal, comme la résolution d'un problème inverse, n'a été prise en compte. Toutefois, la complexité de la technique développée par l'INRS limite le nombre de points de la zone de scan. En effet, pour des zones de scan avec plusieurs dizaines de milliers de points, la résolution du problème inverse devient très demandante en temps de calcul. La technique proposée ici garde un temps de calcul de l'ordre de la seconde même pour un million de points (Padois et al., 2017), ce qui permet une utilisation sur le terrain rapide et efficace.

8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au Québec, la surdité causée par l'exposition au bruit constitue, et de loin, la maladie professionnelle la plus importante. Le bruit est également un agent causal important des accidents du travail. Le risque de détérioration de l'appareil auditif des travailleurs est donc important et il est nécessaire de le réduire. La gestion des risques exige, dans un premier temps, une analyse et celle-ci débute toujours par l'identification des sources de risques qui sont, dans le contexte de la présente étude, les différentes sources de bruit émises dans l'environnement du travailleur. Après l'identification des risques, la localisation et la hiérarchisation des sources acoustiques, il est possible de choisir les mesures préventives les plus adéquates. L'objectif général de cette étude était d'optimiser une antenne sphérique de microphones par des simulations numériques puis de fabriquer un prototype de l'antenne en y intégrant une caméra afin de l'utiliser en milieu industriel.

Dans la première section, une technique de localisation de sources basée sur les intercorrélations généralisées des signaux microphoniques a été développée. Cette technique utilise un segment temporel des signaux microphoniques acquis pour générer une cartographie indiquant la position des sources. Trois critères caractérisant la cartographie des sources ont été présentés dans la section 2. Ils sont basés sur la largeur et la surface du lobe principal ainsi que sur le niveau des lobes secondaires. Puis, deux géométries d'antenne sphérique ont été comparées : linéaire et linéaire avec microphones sur l'équateur décalés. Les critères précédemment définis ont permis de montrer que l'antenne décalée améliorerait la cartographie des sources éliminant les lobes secondaires. Ainsi, il était nécessaire d'optimiser la répartition des microphones sur la sphère. Une fonction basée sur la minimisation des symétries des cartographies des angles d'ouverture a été proposée. Après optimisation de cette fonction, il a été montré que la géométrie d'antenne obtenue fournit de meilleures cartographies que l'antenne à répartition linéaire. Cette géométrie d'antenne optimale a ensuite été fabriquée. Une sphère munie de trous a été imprimée en 3D. Dans chaque trou, il est possible d'y visser une tige qui peut accueillir un microphone à son extrémité opposée. Une caméra panoramique est fixée au zénith de la sphère imprimée. Cette caméra permet de prendre une photographie panoramique de la scène acoustique afin de superposer la cartographie des sources. Finalement, l'ensemble est tenu par un trépied facilement transportable.

L'antenne prototypée et la technique de localisation de sources ont ensuite été éprouvées dans une chambre héli-anéchoïque puis dans une chambre réverbérante. Deux haut-parleurs ont été placés devant l'antenne à différentes positions. Premièrement, il a été montré que pour des fréquences en dessous de 1000 Hz, il est difficile de localiser la position de la source à cause de la petite taille de l'antenne. Au-delà de 1000 Hz, la source est toujours localisée. Puis, l'antenne associée à la technique de localisation s'est révélée capable de détecter deux sources séparées en azimut ou en élévation même si le niveau acoustique émis par chaque source est différent. Cependant, si les sources sont trop proches, le résultat se dégrade surtout dans la chambre réverbérante. De plus, pour des différences de niveaux acoustiques supérieures à 6 dB, il n'est pas possible de détecter les deux sources en raison des lobes secondaires.

Pour tester l'antenne en milieu réel, des mesures ont été réalisées dans un atelier où trois opérateurs utilisaient une perceuse à colonne, une perceuse et un marteau. Les trois machines

ont des spectres d'émission acoustique différents, allant de l'impact à la source tonale. De plus, de nombreuses réflexions acoustiques peuvent se produire sur les murs et sur des objets présents dans la pièce. Finalement, les trois sources ont été positionnées à des distances différentes de l'antenne. Les cartographies des sources ont montré qu'il était possible de localiser les trois outils malgré l'environnement complexe.

Les résultats obtenus avec l'antenne fabriquée et la technique de localisation de sources sont prometteurs. Cependant, plusieurs points méritent d'être améliorés. Premièrement, la limite en basse fréquence pourrait être repoussée soit en utilisant des techniques de localisation plus avancées soit en changeant le diamètre de la sphère sur laquelle les microphones sont positionnés. L'antenne fabriquée étant polyvalente, il serait possible d'étudier l'influence d'une antenne double couche, c'est-à-dire avec des microphones répartis sur deux rayons différents afin de potentiellement estimer la distance entre la source et l'antenne. La sphère fabriquée possède plus de deux cents trous, ce qui multiplie les géométries possibles. Deuxièmement, il serait intéressant d'étudier la réduction du nombre de microphones pour obtenir une cartographie des sources de qualité afin de réduire le temps de calcul au minimum. Enfin, la sphère fabriquée réfléchit et diffracte les ondes acoustiques. Ces effets ont été négligés dans cette étude. Il serait donc intéressant de les quantifier en fonction de la fréquence afin de corroborer cette hypothèse ou de proposer une correction.

BIBLIOGRAPHIE

- Aarabi, P. (2003). The fusion of distributed microphone arrays for sound localization. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2003(4), 338-347. doi: 10.1155/S1110865703212014
- Chardon, G., Daudet, L., Peillot, A., Ollivier, F., Bertin, N. et Gribonval, R. (2012). Near-field acoustic holography using sparse regularization and compressive sampling principles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(3), 1521-1534. doi: 10.1121/1.4740476
- Duguay, P., Boucher, A. et Busque, M.-A. (2014). *Statistiques sur les maladies professionnelles au Québec*. Conférence vidéo, IRSST. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/video/i/100251/n/statistiques-maladies-professionnelles-quebec/redirected/1>
- Jacobsen, F. et de Bree, H.-E. (2005). A comparison of two different sound intensity measurement principles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3), 1510-1517. doi: 10.1121/1.1984860
- Jacobsen, F., Moreno-Pescador, G., Fernandez-Grande, E. et Hald, J. (2011). Near field acoustic holography with microphones on a rigid sphere (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), 3461-3464. doi: 10.1121/1.3575603
- Johnson, R. A. et Wichern, D. W. (2007). *Applied multivariate statistical analysis* (6^e éd). Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall.
- Knapp, C. et Carter, G. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 24(4), 320-327. doi: 10.1109/TASSP.1976.1162830
- Lanslots, J. et Deblauwe, F. (2010). Selecting sound source localization techniques for industrial applications. *Sound & Vibration*, 44(6), 6-10.
- Le Digabel, S. (2011). Algorithm 909: NOMAD: Nonlinear Optimization with the MADS algorithm. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 37(4), 1-15. doi: 10.1145/1916461.1916468
- Lebeau, M. (2014). *Maladies professionnelles : impact économique au Québec*. [Fichier vidéo]. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/video/i/100252>
- Maynard, J. D., Williams, E. G. et Lee, Y. (1985). Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4), 1395-1413. doi: 10.1121/1.392911
- Noël, C., Planeau, V. et 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
- Oshino, Y. et Tachibana, H. (1991). Noise source identification on rolling tires by sound intensity measurement. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 12(2), 87-92.
- Padois, T. (2018). Acoustic source localization based on the generalized cross-correlation and the generalized mean with few microphones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(5), EL393-EL398. doi: 10.1121/1.5039416
- Padois, T., Doutres, O., Sgard, F. et Berry, A. (2016a). On the use of geometric and harmonic means with the generalized cross-correlation in the time domain to improve noise source maps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), EL56-EL61. doi: 10.1121/1.4955007

- Padois, T., Doutres, O., Sgard, F. et Berry, A. (2017). Time domain localization technique with sparsity constraint for imaging acoustic sources. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 85-93. doi: 10.1016/j.ymssp.2017.02.035
- Padois, T., Doutres, O., Sgard, F. et Berry, A. (2016b). Time domain source localization technique based on generalized cross correlation and generalized mean. *Canadian Acoustics*, 44(3).
- Padois, T., Sgard, F., Doutres, O. et Berry, A. (2017). Acoustic source localization using a polyhedral microphone array and an improved generalized cross-correlation technique. *Journal of Sound and Vibration*, 386, 82-99. doi: 10.1016/j.jsv.2016.09.006
- Padois, T., Sgard, F., Doutres, O. et Berry, A. (2015). Comparison of acoustic source localization methods in time domain using sparsity constraints. Communication présentée à Internoise, San Francisco, CA.
- Prime, Z. et Doolan, C. (2013). A comparison of popular beamforming arrays. Communication présentée à ACOUSTICS, Victor Harbor, Australie. Tiré de https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2013/papers/p5.pdf
- Quaegebeur, N., Padois, T., Gauthier, P.-A. et Masson, P. (2016). Enhancement of time-domain acoustic imaging based on generalized cross-correlation and spatial weighting. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75, 515-524. doi: 10.1016/j.ymssp.2015.12.012
- Rafaely, B. (2015). *Fundamentals of spherical array processing*. Berlin, Allemagne: Springer. doi: 10.1007/978-3-662-45664-4
- Velasco, J., Pizarro, D. et Macias-Guarasa, J. (2012). Source localization with acoustic sensor arrays using generative model based fitting with sparse constraints. *Sensors*, 12(10), 13781-13812. doi: 10.3390/s121013781