

THESE

Présentée en vue de
l'obtention du titre de

DOCTEUR

de

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE**

**ÉCOLE DOCTORALE : TRANSFERTS, DYNAMIQUE DES FLUIDES,
ÉNERGÉTIQUES ET PROCÉDÉS**

SPÉCIALITÉ : Énergétique et transferts

par

Emmanuel JULLIARD

**Contribution au développement et à l'évaluation des méthodes d'identification de
sources / chemins de bruit en milieu confiné**

Soutenue le 6 juin 2007 devant le jury :

MM.	V.	GIBIAT	Président
	R.	FERRER	
Mme	D.	HABAULT	Rapporteur
M.	J.C.	PASCAL	Rapporteur
Mme	S.	PAUZIN	Co-directrice de thèse
M.	F.	SIMON	Co-directeur de thèse

Remerciements

Mes premiers mots de remerciement s'adressent à Simone Pauzin et à Frank Simon, mes encadrants de thèse, sans qui celle-ci n'aurait pas pu avoir lieu et qui l'ont dirigé avec beaucoup de discernement. Leur grande sympathie, leur disponibilité, leur compétence et leur dynamisme m'ont permis de mener cette thèse à terme, d'en tirer un grand profit scientifique et humain et de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions possibles. Merci pour tout ! Et j'espère que mon parcours professionnel me permettra de travailler de nouveau avec vous. Mon seul regret sera sûrement de n'avoir jamais pu voir les exploits de Frank sur la piste.

Je tiens également à remercier Daniel Biron et Guy Pailhas pour leur collaboration à la bonne réalisation de cette thèse, pour les conseils et pour leur sympathie. Je remercie également Mr Jean Cousteix, directeur du département DMAE, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe et la société Eurocopter pour leur collaboration durant cette thèse.

Je tiens également à remercier Mme Habault, Mr Pascal, Mr Gibiat et Mr Ferrer, d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse, de m'avoir distillé leurs conseils et leur critiques pour améliorer mon mémoire.

Je remercie également tous mes amis thésards et futurs docteurs de l'ONERA avec qui j'ai passé d'excellents moments et avec qui, je l'espère, on en passera d'autres : tout d'abord Maud, avec qui j'ai eu le plaisir de partager mon bureau, à qui j'ai pu inculquer une solide connaissance en matière musicale rubrique « Barbecue », puis les autres thésards DMAE, « the squirrel » Eric dit VP (« Vannneur Professionnel », à moins que ça ne signifie autre chose...), ses débats, sa 309, son digicode et son école primaire; Florian dit Flo, le compagnon d'arme de la BAM (Brigade Anti-Morosité) avec à notre actif des missions périlleuses telles que « Vélo plombé », « Mix key »,... ; « the beaver » Domingo dit Domi le Basque, qui nous a fait découvrir les joies des sports basques, les charmes de l'Espagne, Remi pour les parties de Coinche faites et analysées ;), Hélène, son hand. Et, pour parfaire le tableau, je n'oublierai certainement pas mes très chers amis du DTIM, Lolo et Steph., leur « musc », le B.O., leur sympathie et leur dynamisme, sans oublier ses balles de squash « malencontreusement » déviées, sa tenue de lapin rose...et nos fauteuils de piscine (qu'on attend toujours, a bons entendeurs !!!), Christophe et ses ailes de pigeon à qui je souhaite tous mes vœux de réussite dans son nouveau poste chez Renault (surtout qu'avec les Méganes, il y a l'air d'avoir du boulot !), Alex, sa guitare et sa 405...

Je tenais également à remercier « les Musclés » pour avoir été un vecteur de bonne ambiance au sein de notre équipe de joyeux lurons. Vivement le prochain barbecue !

Et puis, n'oublions pas de souhaiter un bon courage aux nouveaux arrivants Romain, Gérard et Anthony à qui je souhaite tous mes vœux de réussite pour la suite de leur parcours.

N'oublions pas de citer les amis de longue date et leur dire combien je les apprécie pour tous les merveilleux moments passés en votre compagnie : Nico & Elise, la bande des – ouze (Stan, Etienne, Totoche, Greg, Guigui, Nes, Lulu et Christel), Arnaud, Pécé, la Fredoche, Séb; les amis UTCéen : la bande des i-ou, Ariane et Diane, les Polos, Audrey, Ben & Am et les amis toulousains : Ti'Fred et Grand Fred, Cam's et Cel, Gueric et Karine, Jéré et les membres de la Zanni mais également ceux que j'ai du oublier...

Comment ne pas consacrer un paragraphe entier à celles qui maintenant partagent et illuminent ma vie ? Merci pour cette belle et merveilleuse année déjà passée à vos côtés et aux futures que j'espère nombreuses. Vous êtes mes rayons de soleil et cela même quand le ciel est gris. Tous mes vœux de réussite à Axou et aux (qui sait ?) futurs docteurs. Je voulais vous dire tout simplement que je vous aime.

Mes derniers remerciements qui ne sont pas les moindres s'adressent bien entendu à mes parents, mes frères et plus généralement à ma famille (mes grand-parents, oncles, tantes et cousins) dans laquelle j'ai eu la chance de m'épanouir et d'évoluer, pour les valeurs que vous avez su véhiculer, pour votre amour. Je voudrai bien entendu dédier ce mémoire à mes parents de thèse et graver noir sur blanc ce que je ne leur ai sûrement jamais suffisamment dit : « Je vous aime ! ». Et puis, un dernier petit coucou particulier à ma petite nièce Lilou !

Table des matières.

Nomenclature	11
Abréviations	13
Introduction générale	15
1 – Les méthodes de localisation de sources acoustiques : étude bibliographique	19
1.1 – <i>L'intensimétrie acoustique</i>	20
1.1.1 – Théorie	20
1.1.2 – Limitations et restrictions	22
1.1.3 – Utilisation de l'intensimétrie en milieu confiné	23
1.2 – <i>L'holographie acoustique</i>	25
1.2.1 – L'holographie acoustique en champ proche NAH	26
1.2.2 – De la théorie à la pratique	29
a – Le « zero padding »	30
b – Filtrage dans le domaine des nombres d'onde k	31
c – Domaine de validité fréquentiel	33
d – Pouvoir de résolution de l'holographie	33
e – Précautions d'usage	33
1.2.3 – La méthode à références multiples (ou STSF)	34
1.2.4 – Les autres méthodes dérivées de la NAH	41
1.2.5 – Utilisation de l'holographie en milieu confiné	42
a – Utilisation basée sur une fonction de Green champ libre	42
b – Holographie avec prise en compte de l'habitable	44
1.3 – <i>La méthode IFRF (Inverse Frequency Response Function)</i>	45
1.4 – <i>L'antennerie acoustique</i>	47
1.4.1 – Théorie	48
1.4.2 – Performances de l'antenne	50
a – Le pouvoir de résolution	50
b – La tâche focale	52
c – Domaine de validité fréquentiel	53
1.4.3 – L'antenne acoustique bidimensionnelle	54
a – Traitement de l'antenne en croix et présentation de la méthode développée par Elias.	55
b – Reconstruction du champ de pression par antennerie	58
c – Cécité de l'antenne	58
1.4.4 – Utilisation de l'antennerie en milieu confiné	59
1.5 – <i>Résumé des solutions sélectionnées</i>	62

2 – Création d'un outil de simulation et d'exploitation des données de mesures : étude paramétrique de sensibilité et de performances.	65
2.1 – <i>Préliminaires à l'étude paramétrique</i>	67
2.1.1 – Domaine fréquentiel d'étude	67
2.1.2 – Le placement du capteur de référence	67
2.1.3 – Distance de rétropropagation / focalisation	68
2.2 – <i>Etude paramétrique sur l'holographie (STSF)</i>	68
2.2.1 – Influence de la fréquence d'étude sur la réponse de l'holographie	69
2.2.2 – Précision sur le positionnement des sources par méthode holographique	71
2.2.3 – Influence de la distance de rétropropagation	72
2.2.4 – Influence du positionnement du microphone de référence	75
2.2.5 – Influence de la taille de la grille de mesure	78
2.2.6 – Influence d'une source placée à l'extérieur du volume de reconstruction	79
2.2.7 – Influence du déphasage des microphones	82
2.2.8 – Influence du filtrage	84
2.2.9 – Synthèse de l'étude paramétrique pour l'holographie	85
2.3 – <i>Etude paramétrique sur l'antennerie</i>	87
2.3.1 – Influence de la fréquence d'étude sur la réponse de l'antenne acoustique.	87
2.3.2 – Précision sur le positionnement des sources par antennerie	89
2.3.3 – Influence de la taille de l'antenne	90
2.3.4 – Influence de la distance de focalisation	91
2.3.5 – Evolution de la réponse de l'antenne en fonction de l'angle d'observation	92
2.3.6 – Evolution de la réponse de l'antenne dans le cas où la source n'est pas dans le plan de focalisation	93
2.3.7 – Influence du déphasage des microphones	95
2.3.8 – Influence du filtrage spatial : apodisation	96
2.3.9 – Synthèse de l'étude paramétrique de l'antennerie	98
2.4 – <i>Synthèse globale des résultats obtenus</i>	99
3 – Expérimentations et améliorations proposées	101
3.1 – <i>Deux plans réfléchissants placés en angle droit</i>	102
3.1.1 – Position du problème, description du plan d'expérience et de ses préliminaires	102
a – Présentation du milieu créant les perturbations	102
b – Le dispositif de mesure	104
3.1.2 – Dimensionnement des outils de mesure	104
a – L'holographie acoustique (STSF)	104
b – L'antennerie	105
c – L'intensimétrie acoustique	105
d – Résumé du dispositif de mesure	106
3.1.3 – Premier cas d'étude : une source excitée dans le plan d'étude (effet d'une réflexion)	106
a – L'holographie acoustique (STSF)	107
b – L'antennerie acoustique	109

c – L’intensimétrie acoustique	111
3.1.4 – Second cas d’étude : une source en dehors du plan d’étude (source « parasite »)	112
a – L’holographie acoustique (STSF)	113
b – L’antennerie acoustique	114
c – L’intensimétrie acoustique	117
d – Premier bilan	118
3.1.5 – Nouvelles implémentations dans le logiciel créé	118
a – Simulation de la réflexion	119
b – Critère d’existence de la réflexion sur les résultats holographiques	123
c – Estimation du niveau de la source acoustique par antennerie acoustique	129
3.1.6 – Propositions d’amélioration pour l’holographie	130
3.1.7 – Propositions d’amélioration pour l’antennerie	131
a – Mesure en deux étapes	132
b – Utilisation d’une propriété de la fonction de localisation	133
c – Utilisation d’un masque acoustique	134
d – Bilan des solutions	135
3.2 – <i>Essais réalisés dans le tronçon VASCo</i>	136
3.2.1 – Présentation du tronçon VASCo et du dispositif expérimental	136
3.2.2 – Premiers essais réalisés sans capotage au niveau de la paroi avec le hublot	138
3.2.3 – Premiers essais réalisés à l’aide d’un capotage au niveau de la paroi avec le hublot	141
3.2.4 – Essais sur le plafond du tronçon VASCo (ou plancher mécanique)	142
3.2.5 – Conclusions sur les essais dans le tronçon VASCo	147
 Conclusion générale et perspectives	 149
 Bibliographie	 155
 <u>Annexe n°1</u> : Architecture globale du logiciel développé	 165
<u>Annexe n°2</u> : Les microphones Sennheiser	171
<u>Annexe n°3</u> : Validation du logiciel de traitement des données	175
<u>Annexe n°4</u> : Les haut-parleurs Visaton	179
<u>Annexe n°5</u> : Présentation de la chaîne d’acquisition de l’antennerie acoustique	181
<u>Annexe n°6</u> : Présentation du masque acoustique optimisé	183

Nomenclature.

Variables

t	Variable temporelle
f	Fréquence (Hz)
ω	Pulsation (rad.s^{-1})
k	Nombre d'onde (rad.m^{-1})
k_x	Nombre d'onde dans la direction x (rad.m^{-1})
k_y	Nombre d'onde dans la direction y (rad.m^{-1})
c	Célérité du son dans l'air (m.s^{-1})
λ	Longueur d'onde (m)
p_i	Pression mesurée par le microphone i (Pa)
ρ_0	Masse volumique de l'air (kg.m^{-3})
\vec{v}	Vecteur de la vitesse acoustique (m.s^{-1})
$\Delta x / \Delta y$	Espacement entre 2 microphones (m)
Δf	Résolution fréquentielle (Hz)
I	Intensité acoustique (W/m^2)
I_i	Intensité dans la direction i (W/m^2)
z_H	Position du plan hologramme (m)
z_S	Position du plan source (m)
L	Longueur de la grille de mesure (m)
D	Dynamique de mesure (dB)

Symboles et fonctions mathématiques.

Ecriture complexe.

j	Imaginaire pur ($j^2 = -1$)
z^*	Complexe conjugué de z
$ z $	Module de z
$\text{Re}(z)$	Partie réelle de z
$\text{Im}(z)$	Partie imaginaire de z

Algèbre matricielle.

$A_{m,n}$	Élément m,n de la matrice A
A^*	Conjugué de la matrice A
$\text{Tr}(A)$	Trace de la matrice A
$\text{Re}(A)$	Partie réelle de la matrice A
A^T	Transposée de la matrice A
A^+	Transposée conjuguée de la matrice A
$\text{rg}(A)$	Rang de la matrice A

C	Matrice interspectrale
Γ	Matrice interspectrale obtenue par la méthode du périodigramme
$\ u\ $	Norme du vecteur u

Fonction Mathématique.

Max(.,.) Maximum des valeurs

G Fonction de Green

Opérateurs différentiels.

Δ . Laplacien

$\frac{\partial}{\partial}$.
 $\frac{\partial}{\partial}$. Dérivée partielle

Abréviations.

BAHIM	Boradband Acoustic Holography from Intensity Measurements
BTP	Boîte de Transmission Principale
BEM	Boundary Element Method
dB SIL4	Speech Interference Level : moyenne arithmétique des niveaux obtenus sur les octaves centrés sur 500, 1000, 2000 et 4000 Hz
EPN dB	Effective Perceived Noise en Decibels : pondération qui donne aux fréquences aiguës de 1000 à 4000 Hz plus d'importance qu'elles n'en ont dans les courbes de pondération A,B ou C.
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transform
FFT ⁻¹	Inverse Fast Fourier Transform
FRF	Frequency Response Function
HIE	Helmoltz Integral Equation
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFRF	Inverse Frequency Response Function
NAH	Near Acoustical Holography
SONAH	Statistically Optimal Nearfield Acoustical Holography
STSF	Spatial Transformation of Sound Field

Introduction générale.

Depuis deux décennies, des efforts considérables ont été accomplis par les constructeurs d'aéronefs afin de diminuer les nuisances acoustiques externes dues aux appareils. De plus, les normes de bruit imposées par les organismes internationaux de régulation et de certification pour réduire l'impact sociétal de ces appareils, deviennent de plus en plus drastiques [1]. Ainsi, pour les hélicoptères, de nombreuses solutions ont été envisagées et mises en œuvre afin de réduire les nuisances sonores : la modulation des espacements entre chaque pale d'hélicoptère [2] dans le cadre du programme SILENT, l'optimisation des formes des pales [3-5], l'optimisation du fenestron [6], etc...

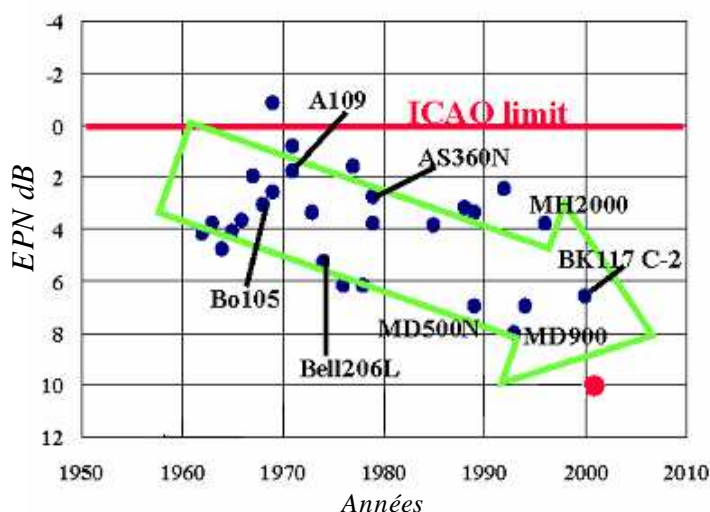


Fig. n°1 : Evolution du bruit des hélicoptères entre 1960 et 2000 par rapport à la limite ICAO (International Civil Aviation Organization) [7].

La figure n°1 présente les résultats obtenus lors du programme ATIC (Advanced Technology Institute of Commuter Helicopter) de 1994 à 2001. L'objectif de ce programme était de réduire de 10dB le niveau de bruit externe des hélicoptères par rapport au niveau de l'ICAO. Les niveaux présentés correspondent à une moyenne sur trois conditions de vol : approche, survol et atterrissage. Pour eux, les propositions de solutions (modifications de pales, vitesse de rotation...) permettent d'atteindre cet objectif sans préciser le domaine en fréquence.

Toutefois, malgré les progrès réalisés dans le domaine du bruit externe (cf. fig. n°1), les cabines d'hélicoptères restent encore très bruyantes (les niveaux pouvant atteindre jusqu'à 100 dB lin dans la gamme audible du spectre fréquentiel). Le besoin d'amélioration du confort acoustique interne est donc indéniable et cela pour deux raisons :

- des raisons de sécurité : conversation difficile, fatigue auditive et physique des pilotes.
- des raisons commerciales : le client devient de plus en plus exigeant sur le confort acoustique en cabine et la compétition est de plus en plus grande entre les différents industriels.

Ainsi, les industriels articulent leur recherche dans ce domaine autour de deux axes. D'une part, ils mènent des études psycho-acoustiques afin de mieux comprendre le ressenti du bruit par le passager, et les exigences du client. Il est important pour eux de pouvoir quantifier la « gêne » acoustique, critère subjectif, en tentant de définir des critères de mesures objectifs permettant de la mesurer [8,9]. Et d'autre part, ils doivent concevoir des solutions nouvelles pour réduire le bruit.

Mais, les contraintes de masse ajoutée, d'intégration, de coût et de faisabilité industrielle de ces solutions sont des facteurs supplémentaires à prendre en compte. Il est donc nécessaire de pouvoir optimiser les solutions pour réduire le bruit interne. Ces exigences en matière de confort acoustique dans les cabines d'hélicoptère contraignent donc les constructeurs à mettre en œuvre des moyens passifs de contrôle du bruit (optimisation de la composition des parois structurales et d'habillage (matériaux composites, absorbants,...), optimisation du positionnement des matériaux absorbants ou affaiblissants) [10-12], mais également à tenter de mettre en place des solutions actives de réduction du bruit (actionneurs vibratoires ponctuels ou capteurs répartis sur la structure) [13-18]. Ces dernières visent à compléter l'action des solutions passives [19,20], inadéquates dans certaines gammes de fréquences (essentiellement aux basses fréquences, sur les raies du spectre) ou engendrant des surcharges pondérales pour atteindre l'atténuation souhaitée.

Sur ce type d'aéronef, les sources principales contribuant au bruit [21-23] (cf. fig. n°2) sont essentiellement liées :

- au rotor principal.
- à la boîte de transmission principale (BTP) : excitation du plancher mécanique par les barres de la boîte de transmission principale.
- aux moteurs.
- au fenestron arrière.
- aux buses de chauffage et de ventilation.
- à l'écoulement de l'air le long de l'appareil.

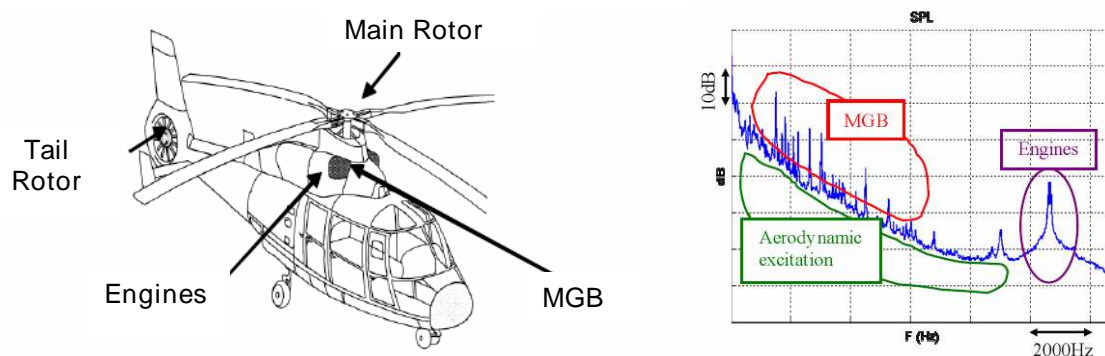


Fig. n°2 : Positionnement des sources principales sur un hélicoptère du type Dauphin et allure du spectre associé [21].

Ainsi, l'allure du spectre du bruit en cabine laisse apparaître un spectre composé de raies dont l'amplitude peut être jusqu'à 20dB supérieure au bruit de fond (cf. fig. n°2) dans la

gamme de fréquences comprises entre 500 et 5000 Hz. La comparaison avec des mesures vibratoires réalisées en différents points de la structure de la cabine, ainsi que sur les barres d'attache et de suspension, permet d'identifier la BTP comme étant la contribution prépondérante dans la génération de ces raies (cf. fig. n°3). Il est également à noter que l'excitation aérodynamique liée à la couche limite turbulente de l'écoulement de l'air le long des parois engendre un bruit de fond à large bande important.

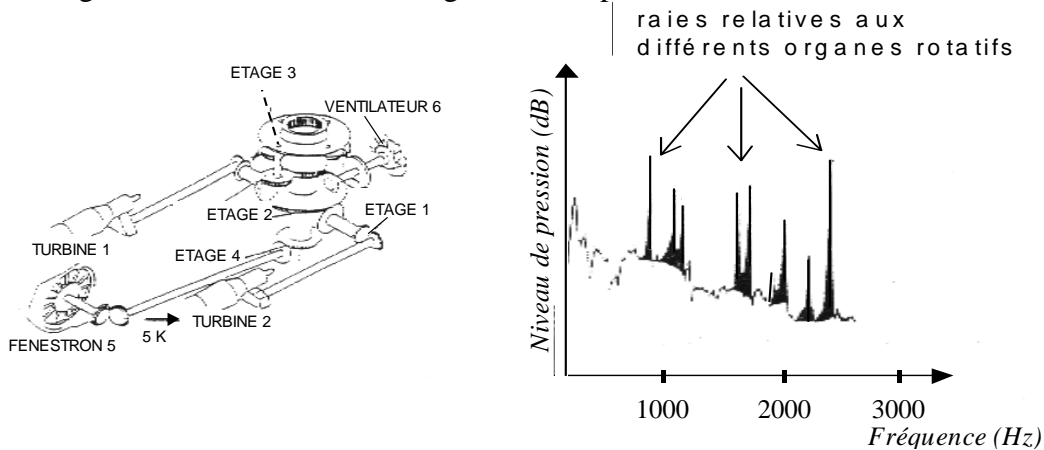


Fig. n°3 : Schéma de la boîte de transmission principale et son bruit de raies associé [17].

On s'intéresse, plus particulièrement, à une gamme de fréquence spécifique : 500 – 4000 Hz, correspondant au dB SIL4 (« Speech Interference Level ») qui caractérise l'intelligibilité de la parole dans un environnement bruyant. Cette gamme correspond à la bande de fréquence pour laquelle l'émission des conversations et la meilleure sensibilité de l'oreille coïncident, mais aussi celle où les raies de la BTP sont présentes.

Dans ce cadre, l'identification des zones sources de bruit (zones pouvant être plus ou moins étendues) et de leurs cheminements associés à l'intérieur de la cabine est nécessaire pour optimiser le placement des traitements acoustiques et pour comprendre les mécanismes de transfert d'énergie. Ce besoin demande de disposer d'un outil de métrologie rapide, efficace et performant. D'autant plus, qu'au vue de la complexité de la machine, les mécanismes de génération et de propagation du bruit sont multiples (sources aéro-acoustiques, vibro-acoustiques). Il existe actuellement un certain nombre de techniques d'imagerie spatio-temporelles permettant de hiérarchiser et de localiser avec satisfaction les sources d'origine vibratoire et/ou acoustique rayonnant dans un espace libre. Ces techniques peuvent permettre d'accéder à des cartographies de quantités diverses (pression, fonction de cohérence de source, intensité) renseignant sur les amplitudes relatives ou absolues des sources potentielles. Mais, il s'avère que, lorsque le milieu est confiné et/ou très réverbérant (existence de sources « virtuelles » par réflexions parasites, sources parasites...), ces différentes méthodes sont soit, théoriquement inadéquates (hypothèse de propagation en champ libre,...), ou utilisables avec restrictions, soit non adaptées à des conditions de mesures rapides ou à des signaux non stationnaires. Néanmoins, les formulations employées peuvent être modifiées dans certains cas en intégrant la présence des plans de réflexion dans le traitement du signal.

L'objectif de ce travail est donc d'adapter les différentes techniques d'imagerie jugées pertinentes pour être utilisées dans le cas d'un milieu confiné afin d'avoir une représentation la plus fidèle possible du champ acoustique rayonné par les parois : capotage de protection du système de mesure, filtrage numérique, prise en compte théorique des réflexions, couplage de

techniques..., de les mettre en œuvre expérimentalement et de comparer leurs performances respectives. Il est également important de noter que les sources peuvent être étendues ou non.

La thèse de J.Caillet [22] a également permis de mettre en évidence la possibilité d'utiliser des méthodes de localisations de sources en cabine d'hélicoptère et d'identifier les contributions des différentes sources de bruit et des différentes parois. Toutefois, le problème rencontré dans ces travaux est le temps de mise en œuvre élevé de leur méthode de localisation de sources, qui rend la technique inadéquate en utilisation industrielle. Ainsi, un des critères primordiaux à prendre en compte lors de cette thèse est le temps de mesure.

Avant de définir les expérimentations à mener, il est nécessaire de simuler (performances en terme de détectabilité), d'adapter et d'implémenter les outils tant matériels (capteurs, conditionnements, systèmes d'acquisition) que logiciels (traitements du signal et d'exploitation) associés aux différentes méthodes à évaluer.

Ainsi, ce mémoire de thèse s'articule autour de trois chapitres :

- Dans un premier chapitre, une étude bibliographique est menée dans le but d'identifier les méthodes de localisations de sources acoustiques existantes. Une sélection de celles qui sont envisageables dans le cas d'un confinement est réalisée.
- Dans un second chapitre, un outil de simulation spécifiquement développé a été employé afin de conduire une étude paramétrique permettant de déterminer l'influence des conditions de mesure et optimiser les performances des techniques retenues.
- Enfin, dans un dernier chapitre, la démarche expérimentale et les résultats obtenus sont présentés pour les méthodes choisies et explicitées dans le chapitre 2. Les tests sont conduits dans un démonstrateur de cabine d'hélicoptère. Une analyse détaillée conduit à des propositions d'amélioration des techniques les plus appropriées.

CHAPITRE 1.

Les méthodes de localisation de sources acoustiques : étude bibliographique.

La première étape de cette étude a été de recenser toutes les méthodes de localisation de sources acoustiques existantes. De nombreux travaux ont été menés sur ce sujet dans les domaines du ferroviaire, de l'automobile et de l'aéronautique, principalement. En effet, depuis une dizaine d'années, les industriels de ces secteurs utilisent ces méthodes, dans des conditions de champ libre, pour identifier les principales sources à l'origine du bruit perçu. Elles ont ainsi contribué à une meilleure compréhension de la propagation et de l'origine du rayonnement acoustique de leur véhicule et à apporter les actions correctives adéquates (capotage du compartiment moteur des automobiles, amélioration de l'aérodynamisme...). Par contre, la problématique de l'utilisation de ces techniques en milieu confiné est elle beaucoup plus récente, et très peu de travaux ont été menés dans ce sens.

Ainsi, les techniques de localisation de sources se classent en quatre grandes familles :

- l'intensimétrie : acoustique et vibratoire.
- l'holographie acoustique.
- les méthodes inverses.
- l'antennerie acoustique.

Aussi, cette étude bibliographique vise à présenter ces techniques de localisation, à justifier leur emploi ou non dans le cas confiné, à expliciter la théorie des méthodes qui auront été sélectionnées, et à présenter les quelques cas d'application intéressants en milieu confiné.

1.1 L'intensimétrie acoustique.

La mesure par intensimétrie acoustique est une méthode très efficace pour étudier les problèmes de rayonnement acoustique par le biais du calcul de l'intensité et de la puissance acoustique. Le caractère à la fois vectoriel et énergétique de l'intensité aide à identifier les sources et permet de remonter à un grand nombre d'informations sur le problème étudié (sens et direction de propagation, puissance acoustique, hiérarchisation des sources...). L'intensité acoustique, est définie comme le produit de la pression acoustique et du conjugué de la vitesse acoustique.

Cette valeur complexe se décompose en deux parties :

- la partie réelle, appelée intensité active, liée au flux d'énergie : pression et vitesse sont en phase. C'est la partie rayonnée de l'énergie.
- la partie imaginaire, appelée intensité réactive, moyennement nulle, liée à une fluctuation d'énergie : pression et vitesse sont en quadrature de phase.

Au final, seule la partie réelle de l'intensité acoustique traduit un flux d'énergie rayonnée. Elle permet alors de mettre en évidence le rayonnement acoustique. Elle consiste à déterminer localement les composantes du vecteur d'intensité acoustique active à l'aide de deux microphones appariés en phase placés l'un en face de l'autre à une faible distance connue Δx [24-26] (cf. fig. n°1.1). La méthode de mesure est basée sur une approximation par différences finies de l'équation d'Euler.

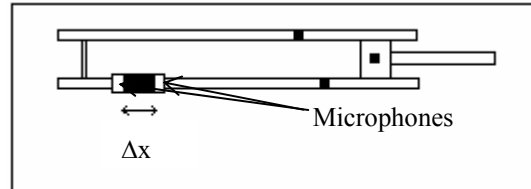


Fig. n°1.1 : Schéma d'une sonde intensimétrique.

Dans le cadre industriel, cette méthode est souvent appliquée pour déterminer la puissance acoustique de machines [26-28], le calcul de transmission de paroi et également pour la localisation de sources acoustiques via une cartographie des vecteurs intensité [25,29].

1.1.1 Théorie.

Soient deux microphones M_1 et M_2 , placés à une distance Δx l'un de l'autre, et mesurant respectivement une pression p_1 et p_2 , à une pulsation ω donnée (onde harmonique).

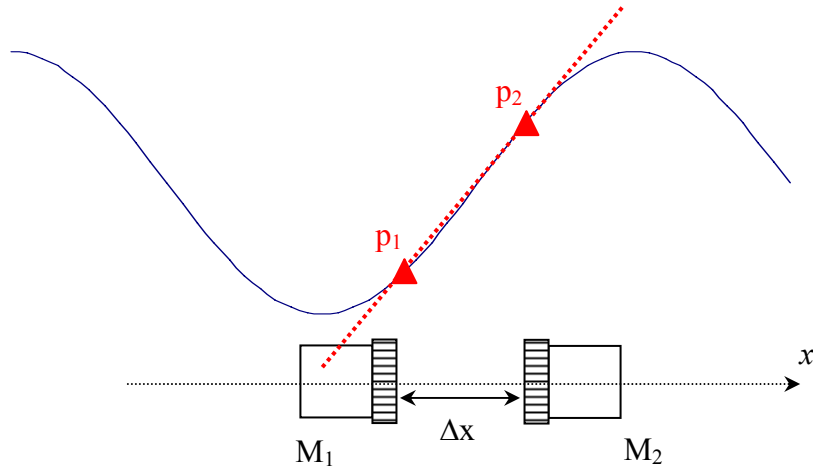


Fig. 1.2 : Schéma du principe de l'intensimétrie acoustique à deux microphones.

Les prochains développements théoriques se basent sur les hypothèses d'une onde harmonique et d'un milieu sans écoulement.

L'équation d'Euler s'écrit :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \overrightarrow{\text{grad}}(p) \Rightarrow \vec{v} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \overrightarrow{\text{grad}}(p)$$

La composante suivant x du vecteur vitesse \vec{v} se déduit donc de la dérivée de la pression p par rapport à x . En faisant l'hypothèse des petits mouvements, les termes du deuxième ordre sont négligés, la dérivée peut ainsi être approchée par une différence finie :

$$v_x = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \approx -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{p_2 - p_1}{x_2 - x_1} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{p_2 - p_1}{\Delta x}$$

où x_1 et x_2 sont respectivement les positions du microphone 1 et du microphone 2.

La mesure de la composante suivant x de la vitesse acoustique est donc déduite de la mesure de pression en deux points situés sur l'axe x , donc par les deux microphones situés sur ce même axe.

L'intensité acoustique va s'écrire en supposant que la pression mesurée entre les deux microphones est donnée par la moyenne de leur pression respective : $p = \frac{p_1 + p_2}{2}$. Par définition, la composante suivant x de l'intensité acoustique peut alors s'écrire :

$$I_x = \frac{1}{2} \text{Re}(pv_x^*) = \frac{1}{2} \text{Re}\left\{ \frac{p_1 + p_2}{2} \left(-\frac{1}{j\omega\rho_0} \right)^* \frac{p_2^* - p_1^*}{\Delta x} \right\}$$

Cette expression se développe sous la forme :

$$I_x = \frac{1}{4\omega\rho_0\Delta x} \text{Re}\left\{ -j(p_2p_2^* - p_1p_1^* + p_1p_2^* - p_2p_1^*) \right\}$$

On en déduit alors que :

$$I_x = \frac{1}{4\omega\rho_0\Delta x} \operatorname{Re}\left\{-j\left(|p_2|^2 - |p_1|^2 + 2j\operatorname{Im}(p_1p_2^*)\right)\right\} = \frac{1}{4\omega\rho_0\Delta x} 2\operatorname{Im}(p_1p_2^*)$$

L'intensité acoustique s'écrit alors : $I_x = \frac{\operatorname{Im}(p_1p_2^*)}{2\omega\rho_0\Delta x}$

Pour reconstruire le vecteur intensité, il suffit de réaliser une mesure dans les 3 directions pour trouver les trois composantes du vecteur.

1.1.2 Limitations et restrictions.

L'utilisation de cette technique impose des limitations au niveau de la gamme de fréquences d'étude (limite haute et basse fréquence) et de la distance d'utilisation [26,30].

La limitation en haute fréquence est liée à l'approximation des différences finies elle-même. Elle introduit une erreur (une surestimation d'un terme $\frac{\sin(x)}{x}$ si la sonde et la direction de l'onde sont colinéaires) qui devient de plus en plus importante en montant en fréquences. En effet, si l'onde a une fréquence élevée, la longueur d'onde devient petite en comparaison de la distance entre les deux microphones (cf. fig. n°1.3). L'estimation du gradient est alors peu précise.

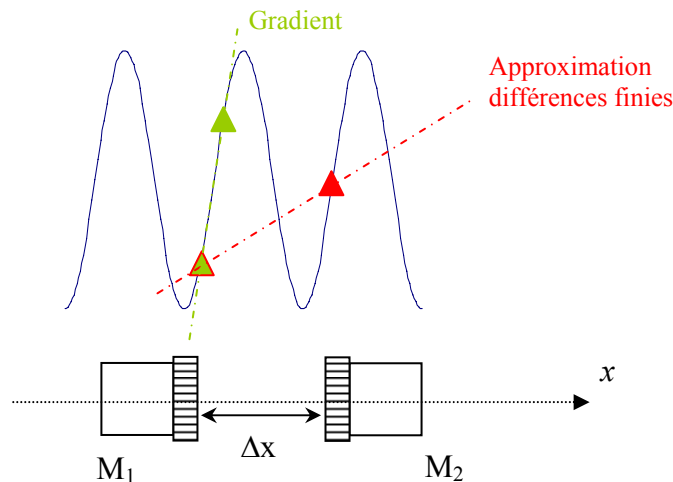


Fig. n°1.3 : Approximation différences finies en hautes fréquences.

Afin d'essayer de s'affranchir de cette approximation, des travaux sont menés afin de mettre non pas deux microphones appariés mais un microphone couplé avec un microflown (capteur composé de 2 fils chauds proche mesurant la vitesse acoustique) permettant ainsi d'accéder directement à la vitesse acoustique [31,32]. Mais, cette méthode reste encore au stade de développement. Et la question de l'appariement entre le microphone et le microflown semble beaucoup moins évidente que pour deux microphones.

La limitation en basse fréquence est liée à la précision de l'étalonnage en phase des deux voies de mesure. Même, si les microphones sont certifiés être appariés en phase, il existe tout de même un déphasage intrinsèque entre les deux (de l'ordre de $0,1^\circ$ pour les sondes

Brüel & Kjaer, par exemple). Ce déphasage engendre une erreur importante dans les basses fréquences (produisant une sur- ou une sous-estimation selon le signe du déphasage). En effet, en basse fréquence, la longueur d'onde devient très grande en comparaison de la distance entre les deux microphones. Le déphasage de l'onde entre les deux points de mesure devient du même ordre de grandeur que l'erreur de phase entre les deux microphones (cf. figure 1.4). Pour que la mesure soit valide en basse fréquence, il faut que le changement de phase de l'onde soit 5 fois plus grand que le déphasage « matériel » [26].

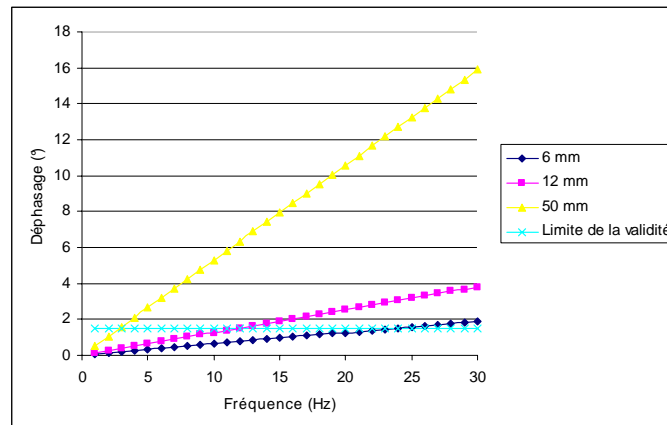


Figure n°1.4 : Evolution du déphasage entre les deux points de mesures microphoniques en fonction de la fréquence et de la distance entre microphone.

Il existe également une limite d'utilisation en champ proche qui est liée à la sphéricité du front d'onde qui engendre des erreurs géométriques. Cette limite évolue selon le type de source que l'on détecte.

Type de source	Erreur de mesure inférieure à 1dB
Monopôle	$> 1.1 \Delta x$
Dipôle	$> 1.6 \Delta x$
Quadripôle	$> 2.3 \Delta x$

Tableau n°1.1 : Distance nécessaire entre la sonde et différents types de source acoustique.

Ainsi, il est montré que, plus la source est complexe, plus la distance entre la sonde et la source doit être importante. Il est donc nécessaire de se placer à une distance minimum du plan source étudié définie comme étant égale à 3 fois la distance entre les deux microphones (cf. tableau n°1.1) pour obtenir une erreur de mesure inférieure à 1dB [26,30].

1.1.3 Utilisation de l'intensimétrie acoustique en milieu confiné.

L'utilisation d'un tel dispositif de mesure présente plusieurs avantages : une facilité d'utilisation (une sonde intensimétrique suffit), un coût faible, et, un accès à des informations sur le champ acoustique étudié : direction, sens, intensité et puissance.

La mesure faite est locale et elle fournit un niveau acoustique à une certaine distance de la surface d'étude (et non au niveau de la source) mais, par le biais de la technique BAHIM, [37,70-72] (cf. chapitre 1.2.5) permet de reconstruire le champ acoustique sur le plan source.

Les quelques références trouvées sur l'application de l'intensimétrie acoustique dans un milieu réverbérant montrent, dans l'une, l'augmentation des incertitudes statistiques pour des mesures en présence d'un champ réverbéré diffus [33] et, dans l'autre, la mesure de l'intensité correspondant à la partie réfléchié ou transmise d'une onde incidente transitoire sur une plaque qui est utilisée pour déterminer la partie réverbérante du champ acoustique [34].

Néanmoins, la distance entre les deux microphones étant faible, la cohérence entre les signaux acoustiques reçus est bonne. La reconstruction du champ d'intensité est donc possible dans un milieu réverbérant. Mais, elle présente un inconvénient majeur : le temps de mesure peut devenir très long si le maillage est grand (3h pour 600 points de mesure, par exemple). En effet, à moins de disposer d'une grille de sondes intensimétriques (solution inabordable financièrement, problème de diffractions sur les sondes et d'erreurs de phase qui se cumulent avec le nombre de voies de mesure), ce type de mesure locale nécessite un robot de déplacement afin de pouvoir réaliser les mesures sur un plan maillé défini (souvent un plan parallèle à la surface d'étude). Dans le cadre d'essais en vol, cette technique ne semble donc pas des plus adaptées. Mais, dans le cadre de cette étude, il est impératif de disposer d'un outil de localisation de référence faisant foi. Or, l'intensimétrie acoustique développée depuis de nombreuses années est parfaitement maîtrisée et reconnue.

1.2 L'holographie acoustique.

L'holographie acoustique est un moyen pour explorer le champ proche des sources acoustiques. L'objectif principal de cette approche est de localiser et quantifier les sources de bruit. La mesure par holographie se base sur l'enregistrement de signaux d'un champ scalaire, contenant les informations d'amplitude et de phase, sur une surface généralement bidimensionnelle (appelée « surface hologramme ») afin de reconstruire sur une surface parallèle (appelée « surface rétropropagée »). Un champ tridimensionnel peut ainsi être reconstruit. Initialement développée pour l'optique, elle a été généralisée à d'autres domaines de la physique : vibration, acoustique... Mais, la théorie de base de l'holographie « conventionnelle » présentait un inconvénient majeur : sa résolution. En effet, celle-ci était de l'ordre de la longueur d'onde. Cette limite devenait contraignante dans le cas de l'acoustique, notamment en basses fréquences. L'holographie acoustique se fonde donc sur une théorie généralisée qui prend en compte les ondes évanescentes.

Cette méthode permet ainsi:

- d'effectuer les calculs de champ lointain (propagation) et de champ proche du champ acoustique considéré (rétro - propagation).
- de reconstruire non seulement le champ de pression tridimensionnel, mais aussi les informations de vitesse et d'intensité.
- d'augmenter la finesse de résolution spatiale par l'utilisation des ondes évanescentes en effectuant la mesure de l'hologramme en champ très proche.

Le principe de cette mesure est résumé par la figure 1.5.

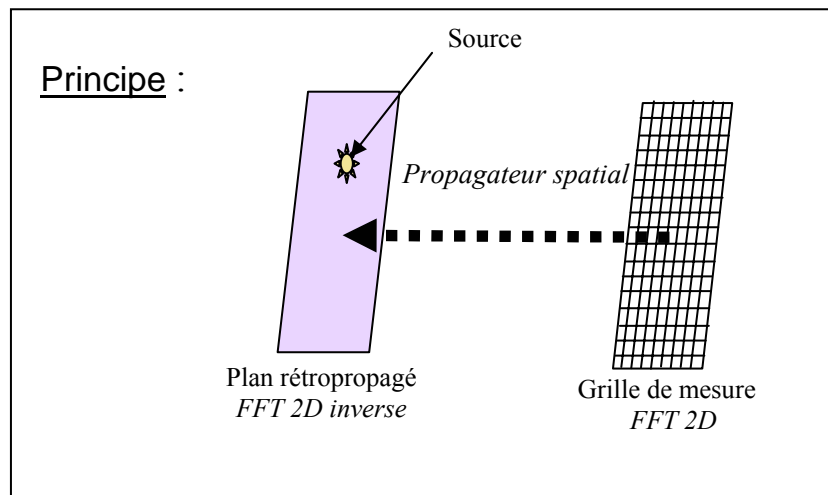


Fig. n°1.5 : Principe de la mesure holographique.

1.2.1 L'holographie acoustique en champ proche NAH (Nearfield Acoustical Holography).

Les grandes bases de la NAH ont été posées au début des années 80 par Maynard et Williams [35-37]. Elle suppose que la surface hologramme et la surface étudiée sont planes et elle se fonde sur trois propriétés fondamentales :

- L'équation d'Helmholtz :
$$\Delta \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

Où : c est la célérité du son et ψ une quantité fluctuante monochromatique.

Soit P un point de l'espace, une transformation de Fourier peut être appliquée sur cette équation, ce qui donne :

$$(\Delta + k^2) \psi(P) = 0$$

Où : k est le nombre d'onde et $\psi(P)$ la transformée de Fourier de $\psi(P,t)$.

- Le théorème de Green :

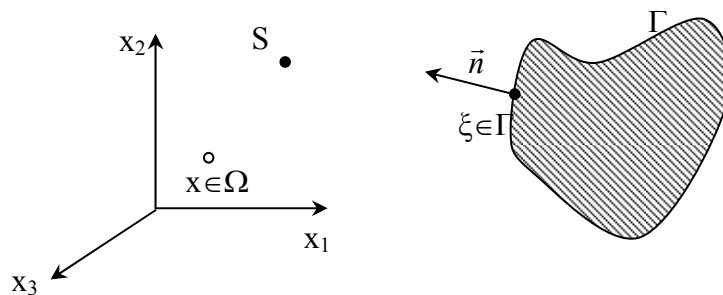
Soit S une surface fermée délimitant un volume V, on vérifie que $\psi(x,y,z)$, $G(x,y,z)$ et leurs dérivées partielles premières et secondes existent et sont définies et continues à l'intérieur de V et sur S :

$$\iiint_{(V)} (G \Delta \psi - \psi \Delta G) dv = \iint_{(S)} \left(G \frac{\partial \psi}{\partial n} - \psi \frac{\partial G}{\partial n} \right) ds$$

Où : G est appelée la fonction de Green et $\frac{\partial}{\partial n}$ la dérivée partielle suivant la normale extérieure à la surface.

- Le théorème intégral d'Helmholtz et de Kirchhoff (HIE) [38-39] :

Soit un objet de dimension fini, de forme quelconque et de surface Γ placé dans un milieu fluide infini idéal et homogène Ω dont la densité est ρ et de vitesse de propagation c, le point x appartenant à la région Ω (extérieur à Γ) et ξ appartenant à la surface Γ sont alors définis.



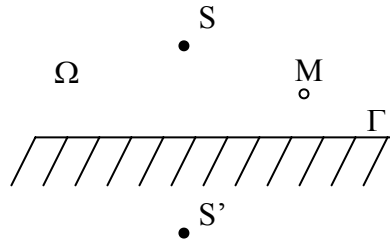
On considère la fonction de Green G de l'espace libre qui respecte : $(\Delta + k^2)G = \delta$ dans R^3 et la condition de rayonnement de Sommerfeld.

La pression p vérifie : $(\Delta + k^2)p = F$ dans le domaine Ω et la condition de Sommerfeld, où F représente l'ensemble des sources incluses dans le domaine Ω .

L'expression suivante est alors obtenue :

$$p = p_0 - \iint_{(\Gamma)} \left(p \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial p}{\partial n} G \right) dS \quad \text{où } x \in R_0. \quad (1)$$

Pour une surface plane, il est possible d'utiliser des fonctions de Green particulières qui vérifient :



- L'équation d'Helmoltz dans le demi-espace, la condition de Dirichlet homogène et la condition de rayonnement à l'infini :

Dans ce cas, on sait que : $G = -\frac{e^{jkR(S,M)}}{4\pi R(S,M)} + \frac{e^{jkR(S',M)}}{4\pi R(S',M)}$

- L'équation d'Helmoltz dans le demi-espace, la condition de Neumann homogène et la condition de rayonnement à l'infini :

Dans ce cas, on sait que : $G = -\frac{e^{jkR(S,M)}}{4\pi R(S,M)} - \frac{e^{jkR(S',M)}}{4\pi R(S',M)}$

C'est ce type de propriétés qui permet d'obtenir l'intégrale de Rayleigh sur laquelle est fondé le principe de base de l'holographie.

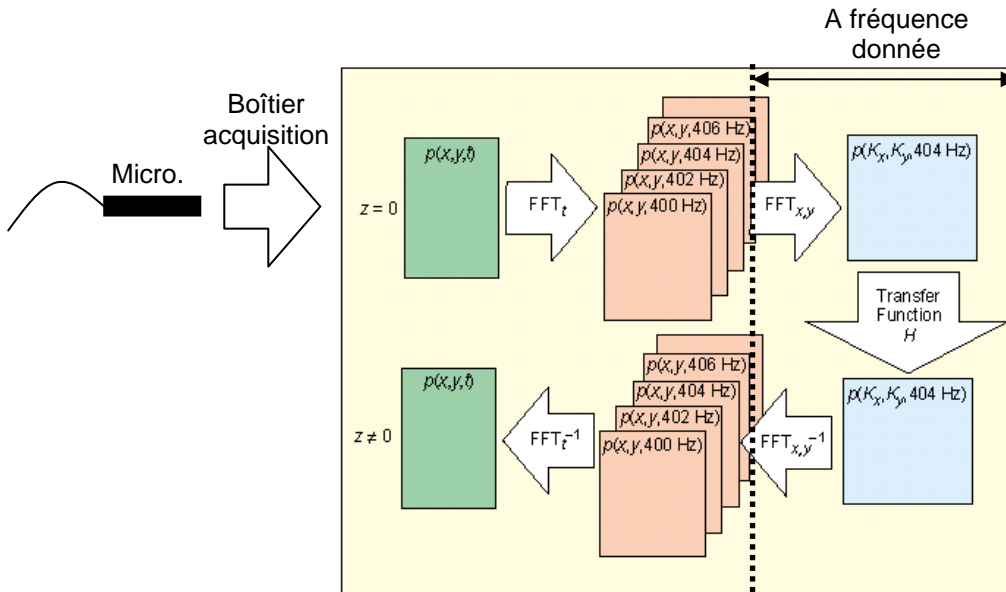


Fig. n°1.6 : Résumé de la résolution des mesures holographiques [42].

Aussi, les deux intégrales de Rayleigh se présentent sous la forme d'un produit de convolution bidimensionnel. Ce produit de convolution est ramenée à une simple multiplication dans le domaine des nombres d'onde $(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y)$ par l'utilisation d'une transformation de Fourier spatiale bidimensionnelle (cf. fig. 1.6). Cette transformation fait apparaître un « propagateur spatial » qui permet de passer d'une transformation de Fourier spatiale du champ dans un plan donné à la transformée de Fourier spatiale du champ dans un autre plan distant de Δz . Ce « propagateur spatial » est lié à la fonction de Green de l'intégrale de Rayleigh. En règle générale, la fonction de Green en champ libre est utilisée. Puis, par transformée de Fourier spatiale inverse, le champ suivant le nouveau plan rétropropagé (c'est à dire qu'on va du plan hologramme vers le plan source) est ainsi reconstruit.

Dans le cas de l'holographie plane, le champ de pression sur le plan étudié s'écrit :

$$\psi(x, y, z) = F^{-1}(\underbrace{\psi(k_x, k_y, z_H) e^{ik_z(z-z_H)}}_{\text{Propagateur spatial}})$$

Propagateur spatial

$$= F^{-1}(\underbrace{\psi(k_x, k_y, z_H) e^{-k_z(z-z_H)}}_{\text{Propagateur spatial}})$$

Propagateur spatial

Où :

- F^{-1} est la transformée de Fourier bidimensionnelle inverse ;
- ψ est le champ étudié ;
- z_H correspond au plan hologramme ;
- z correspond au plan étudié ;
- le terme exponentiel correspond au « propagateur spatial » (qui provient de la transformée de Fourier de la fonction de Green) et change suivant la nature des ondes considérées.

La séparation entre les ondes propagatives et évanescentes se symbolise par le cercle de radiation (cf. fig. n°1.7) : les ondes propagatives se situant à l'intérieur du cercle et les évanescentes à l'extérieur.

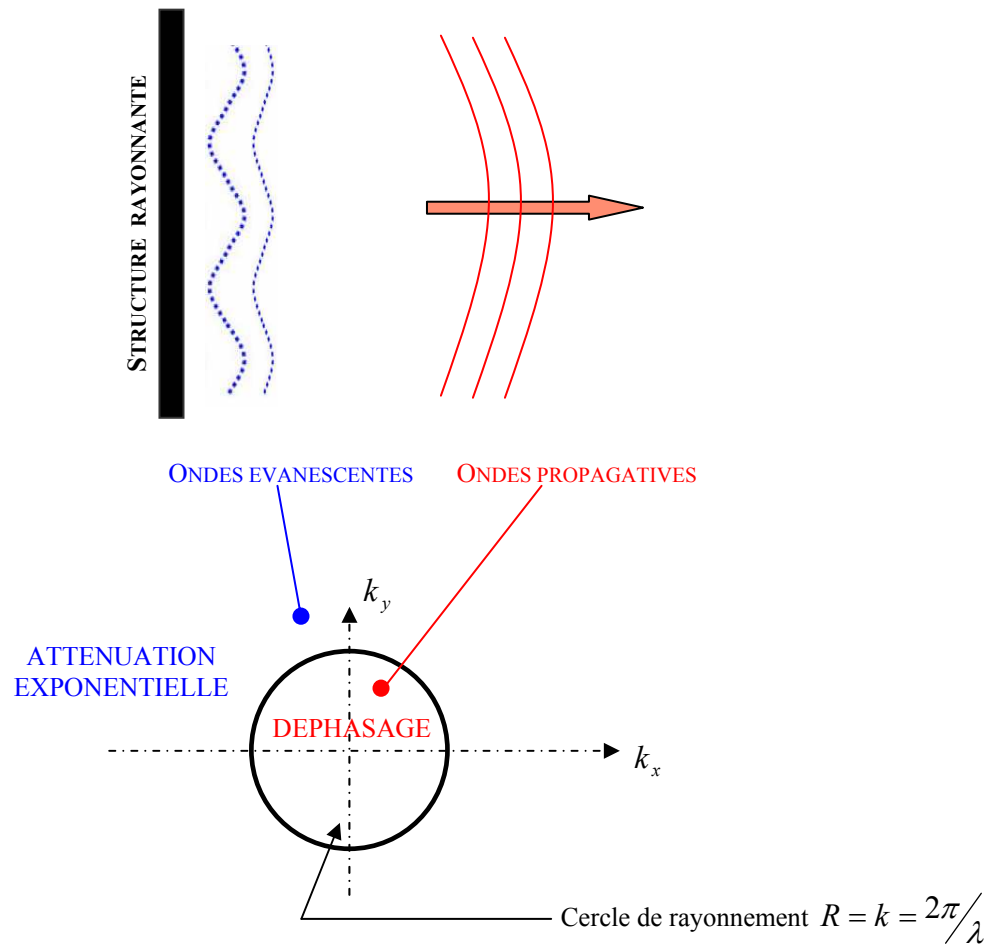


Fig. n°1.7 : Illustration de la séparation des ondes évanescentes et propagatives dans le domaine spatial (x,y) et dans le domaine des nombres d'ondes (k_x,k_y)

Dans les études ultérieures, les conditions d'utilisation de l'holographie se sont élargies à d'autres formes de plan hologramme plus complexes (cylindriques, sphériques) [39,40]. Dans le cas d'un hélicoptère, les parois cabine sont quasi planes. La géométrie plane est donc suffisante pour cette étude.

1.2.2 De la théorie à la pratique.

Dans la pratique, une grille de microphones également espacés dans le plan hologramme est utilisée pour récupérer le champ acoustique sur le plan [36,37]. L'utilisation d'un tel dispositif pose des problèmes au niveau des hypothèses. En effet, dans la théorie, le champ acoustique acquis est supposé continu et infini. Or, en pratique, les données acquises sont mesurées sur un ensemble de points discrets sur une surface de dimension finie. Ainsi, la reconstruction des champs ne peut se faire que dans les limites de la taille de la grille considérée. Le caractère fini de la grille engendre donc des problèmes de troncatures des données. Ainsi, de nombreux auteurs recommandent que la taille de la grille de capteurs soit au moins deux fois supérieure à celle de la taille de la source considérée [40-42]. En pratique, cette dernière recommandation n'est pas souvent remplie. Néanmoins, il n'est pas recommandé d'utiliser la rétropropagation si le niveau sur l'hologramme est maximum sur le bord. Plus précisément, il faut s'assurer que la pression soit 10 à 20 dB inférieure aux bords

de la grille par rapport au niveau maximum constaté sur le plan hologramme [40,41]. En effet, si une source est placée trop près du bord de la grille, une trop grande partie de son énergie rayonnée ne sera pas captée par la grille de microphones et cette source sera donc mal, voire pas du tout détectée. Les informations concernant cette source seront donc erronées. Ainsi, de manière générale, un problème inhérent de l'utilisation de l'holographie en milieu confiné vient du fait que le cadre physique de la grille de microphones limite l'expansion de celle-ci. En effet, si une source acoustique peut être positionnée sur une arête d'un habitacle (une fuite au niveau de la jointure entre deux panneaux par exemple), il ne sera pas possible d'étendre la grille microphonique physiquement pour pouvoir capter suffisamment d'énergie acoustique et de permettre une reconstruction exacte de la source. La source peut être détectée mais sera mal reconstruite (en terme de niveau de pression par exemple). De plus, la fonction de propagation régulièrement utilisée est la fonction de Green en champ libre. Dans le cas d'un milieu confiné, il faut l'écrire différemment.

a) Le « zero padding » :

La dimension finie de la grille de mesure produit une répétition périodique des sources (cf. fig. n° 1.8), causée par la transformée de Fourier.

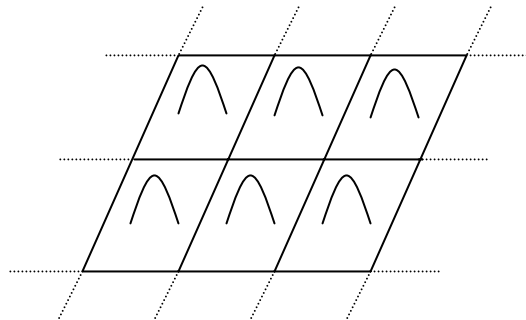


Fig. n°1.8 : Répétition périodique des sources.

Ces sources « fantômes » périodiques peuvent influencer le résultat final en apportant une contribution non négligeable à ce dernier. Il est donc important de pouvoir s'en affranchir. Pour cela, la méthode du « zero padding » est utilisée [36] dans un premier temps afin de réduire l'influence du caractère fini de la grille. La taille de la grille de mesure est augmentée artificiellement et une pression nulle est imposée sur tous les points extérieurs à la grille réelle (cf. fig. n°1.9). Ainsi, ces sources « fantômes » sont repoussées beaucoup plus loin et leur contribution au résultat final est diminuée. Afin de s'affranchir complètement de ces sources, une fonction de Green tronquée définie nulle en dehors de la grille d'étude complète est utilisée.

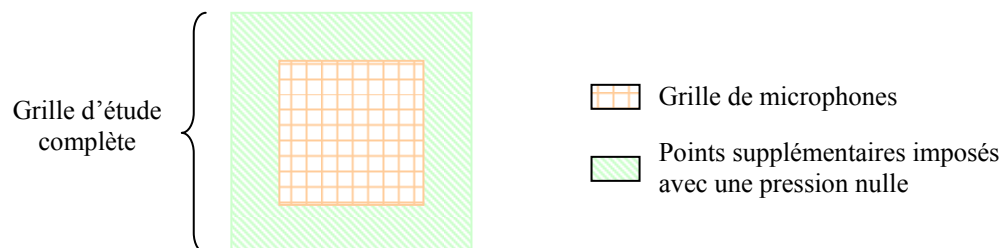


Fig. n°1.9 : Illustration de la méthode du « zero padding ».

De plus, le « zero-padding » présente également l'avantage d'augmenter le nombre de points dans le domaine des nombres d'ondes en utilisant une interpolation de Shannon afin de mieux séparer les composantes propagatives et évanescentes.

b) Filtrage dans le domaine des nombres d'onde \mathbf{k} .

Quand le champ est rétropropagé, le domaine \mathbf{k} est amplifié de manière exponentielle (via le propagateur spatial) suivant deux paramètres : la distance de rétro-propagation et la fréquence de la composante elle-même. Les composantes hautes fréquences dans le domaine \mathbf{k} sont donc plus amplifiées que les basses fréquences [39-43]. Or, ces composantes hautes fréquences sont souvent très bruitées. Les effets liés au bruit vont donc s'amplifier et venir parasiter la surface reconstruite. Ces bruits « spatiaux » incluent les erreurs de positionnement et de calibration des microphones ainsi que les différences de phase pouvant exister entre les voies de mesure [44,45]. Afin de minimiser leurs effets, il est nécessaire de filtrer ces données, dans le domaine des nombres d'ondes. De nombreux travaux ont été menés pour essayer de trouver le filtre optimal [43,52,53]. Le filtre le plus communément utilisé est celui développé par Veronesi (cf. fig. n°1.10) [43] que de nombreux auteurs utilisent dans leurs travaux d'application [22,45,48,49]. Il est défini tel que :

$$W_{ver}(k_x, k_y) \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} e^{\frac{(k/k_c)^{-1}}{\alpha}} & \text{pour } k \leq k_c \\ \frac{1}{2} e^{\frac{-(k/k_c)^{-1}}{\alpha}} & \text{pour } k > k_c \end{cases} \quad \text{avec } k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

k_c, α sont les paramètres d'ajustement de ce filtre. Mais, le filtrage implique une troncature des données qui engendre une perte d'informations ce qui dégrade par conséquent la résolution. Une fréquence de coupure optimale, dans le domaine des nombres d'onde, qui permet de maintenir une bonne résolution sans ajouter trop de bruit additionnel, peut être obtenue. Les valeurs optimales de ce filtre ont été déterminées par [42,45-47] comme suit : $\alpha = 0.2, k_c = 0.6k_{\max}$.

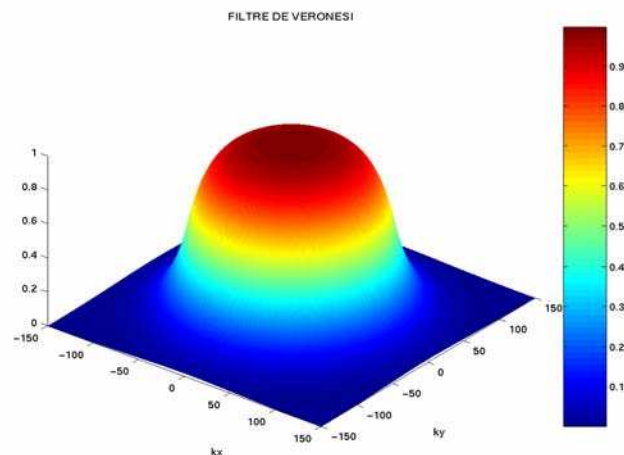


Fig. n°1.10 : Filtre de Veronesi dans le domaine des nombres d'ondes.

De plus, un filtre de Wiener [54] est également régulièrement utilisé et associé au filtre de Veronesi [22,50]. Ce filtre permet de limiter les erreurs liées au caractère mal posé du problème inverse qu'est la rétropropagation. En effet, l'existence d'ondes évanescentes,

exponentiellement décroissantes et bruitées peut amener la solution à diverger, à mettre en valeur des sources inexistantes liées au bruit de mesure. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes de régularisation, dont le filtre de Wiener est le représentant le plus communément usité en holographie [52,53,55-58]. Elles sont d'autant plus utiles que les distances entre le plan hologramme et le plan reconstruit sont grandes.

Mais, il apparaît que l'estimation de la pression acoustique via ce filtrage est beaucoup moins performante dans le cas où l'holographie est utilisée sur une plaque en vibration (cf. fig. n°1.11) [47]. Dans cet article, les auteurs mettent en œuvre quatre algorithmes de calculs de type NAH : holographie à références multiples avec deux filtres différents (Veronesi (STSF) et Wiener), une utilisant une méthode statistique SONAH (cf. paragraphe 1.2.5) et la dernière est une méthode itérative (non présentée dans l'article).

Ainsi, la pression acoustique est nettement sous-estimée par rapport à la réalité et la plage d'erreur est de 20 dB [47].

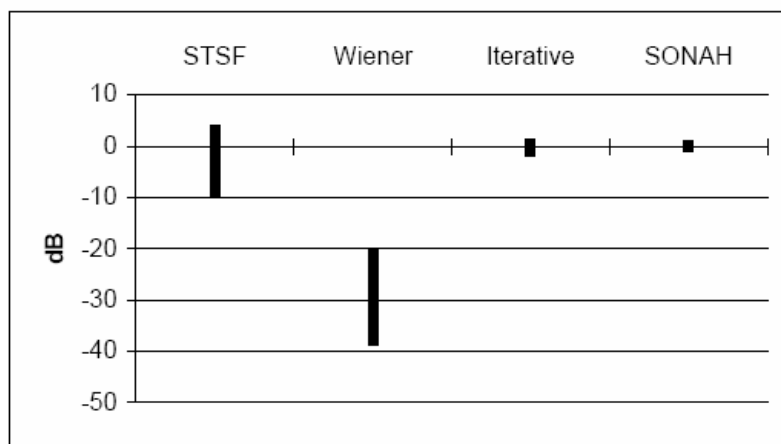


Fig. n°1.11 : Plage d'erreurs de calcul pour différentes méthodes NAH sur une plaque en vibration [47].

La méthode SONAH est performante dans ce cas de figure mais elle ne sera pas employée dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 1.2.5).

c) Domaine de validité fréquentiel.

Le caractère discret de la grille de mesure impose une bande de fréquence d'étude [36,40-42].

Le pas entre deux points de mesure impose la fréquence maximale : il doit être inférieur à la demi longueur d'onde pour la longueur d'onde la plus courte : $d \leq \frac{\lambda_{\min}}{2}$ (théorème de Shannon). Ce pas d'échantillonnage doit être constant suivant une direction pour pouvoir appliquer les méthodes de type FFT. Dans le cas d'une antenne 2D plane avec deux pas d'échantillonnage différents ($\Delta x, \Delta y$), le pas le plus critique est alors sélectionné :

$$d = \max(\Delta x, \Delta y) \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \Leftrightarrow f_{\max} = \frac{c}{2d}$$

L'envergure de la grille de microphones impose par contre la fréquence minimale d'étude : une antenne de taille L doit au moins être égale à la longueur d'onde acoustique la plus grande.

$$L \geq \lambda_{\max} \Leftrightarrow f_{\min} = \frac{c}{L}$$

d) Pouvoir de résolution de l'holographie.

Théoriquement, le pouvoir de résolution de l'holographie est infini [36,41]. Mais, dans la pratique, du fait du caractère imparfait de la chaîne de mesure, il va exister une résolution « limite » R dépendant de la fréquence du signal acoustique, de la dynamique de la chaîne d'acquisition et de la distance entre le plan hologramme et le plan source [36,41,59]. Elle est définie comme suit :

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 + \left(\frac{D \ln(10)}{20(z_H - z_S)}\right)^2}}$$

où :

- k : nombre d'onde.
- D : dynamique de mesure de la chaîne d'acquisition.
- z_H : position du plan hologramme.
- z_S : position du plan source.

Ainsi, par exemple, à la fréquence de 1000Hz, avec une dynamique de mesure de 60 dB et une distance de 10 cm entre le plan hologramme et le plan source, une résolution de l'ordre de 4 cm est ainsi obtenue. Les performances de l'holographie en terme de résolution restent donc très intéressantes.

e) Précautions d'usage.

D'un point de vue pratique, les méthodes holographiques se basent sur les informations de phase et d'amplitude recueillies par chaque capteur (cf. chapitre 1.2.1). La connaissance des performances de ceux-ci et leur position exacte est donc très importante. En effet, il peut exister une différence de phase ou d'amplitude relative entre les capteurs, ou les microphones peuvent être mal positionnés par rapport à la position voulue [41,44,45]. Comme on l'a vu précédemment, ces erreurs vont essentiellement se retrouver dans les composantes spatiales hautes fréquences du domaine \mathbf{k} . Ces erreurs peuvent être réduites en appliquant des fonctions de correction aux données avant de les traiter, à condition que les microphones (phase et amplitude) ainsi que les voies de mesure soient parfaitement appariés. Quoi qu'il en soit, il est important de prendre en compte les caractéristiques des microphones car, par exemple, une différence de phase de quelques degrés peut engendrer une très forte distorsion au niveau du plan reconstruit (surtout en rétropropagation) : niveau de pression acoustique imprécis, mauvais positionnement de la source...

En résumé, la méthode NAH se base sur une mesure de champ acoustique réalisée à l'aide d'une grille de microphones complète afin d'avoir l'information en phase et en amplitude de manière synchrone. De plus, l'utilisation des méthodes holographiques nécessite un certain nombre de précautions (dimensionnement de grille adapté au problème étudié, filtrage des données nécessaires,...) mais aussi d'hypothèses comme l'utilisation de la fonction de Green en champ libre pour la propagation des ondes à moins qu'elle soit connue pour le champ considéré.

Malgré l'énorme intérêt de la NAH, elle présente encore un inconvénient majeur : elle nécessite une grille de microphones complète. Le nombre de microphones à utiliser est donc

proportionnel à la surface d'étude. Dans le cas d'une surface d'étude importante, il devient complexe de réunir le nombre de microphones nécessaires. Ainsi, par exemple, pour une surface de 1m² et un espacement entre microphones de 4 cm, il faudrait disposer de 625 microphones et du matériel d'acquisition associé.

1.2.3 La méthode NAH à références multiples (ou STSF).

La méthode NAH à références multiples a été développée pour pallier à ces problèmes. Elle permet, contrairement à la NAH classique, le déplacement d'une antenne partielle dans un champ partiellement cohérent. Elle se base sur des mesures de densités interspectrales de puissance (ou d'énergie) [60-66]. Elle consiste à mesurer des interspectres (porteurs de l'information de phase et d'amplitude) entre des capteurs placés sur une grille de mesure et des capteurs de référence disposés de manière à ce que les références donnent une vue des plus complètes des sources. Ainsi, cette méthode permet de calculer une représentation principale du champ de pression acoustique aux différentes fréquences d'analyse. De plus, en supposant le phénomène étudié stationnaire, les interspectres ne dépendent pas de l'instant initial et sont donc mesurés séquentiellement : un capteur de pression mobile couvre la surface entourant la source et un 2^{ème} capteur fixe sert de référence. De plus, comme il contient uniquement les informations corrélées entre les spectres enregistrés par les capteurs, l'interspectre élimine le bruit de fond non corrélé avec les signaux captés au niveau des références.

Le but de la mesure est de se ramener à une représentation principale ψ équivalente au champ de pression \mathbf{P} , matrice unicolonne représentant les pressions acoustiques des différents microphones de la grille (cf. (2)), qui permettra d'appliquer la méthode de rétropropagation de la méthode NAH [60].

Pour simplifier, une source supposée monochromatique émet à une fréquence f , correspondant à un nombre d'onde k . Soit N le nombre de capteurs sur la grille, et \mathbf{P} le vecteur composé des transformées de Fourier temporelle du champ de pression mesuré :

$$P = \begin{bmatrix} p(r_1) \\ p(r_2) \\ \dots \\ p(r_N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec : $p(r_i)$ la valeur de la transformée de Fourier temporelle aux points de mesure à la fréquence considérée.

La densité interspectrale d'énergie du champ acoustique entre deux points m et n est définie comme :

$$c_{m,n} = p_m^* p_n$$

avec : p_m, p_n respectivement les valeurs de la transformée de Fourier de pression aux points m et n .

Dans le cas plus général d'un champ acoustique non cohérent, il faut trouver un modèle qui permette de représenter ce champ en termes matriciels. Pour cela, le champ de pression \mathbf{P} est supposé être engendré par L sources décorréélées (ou indépendantes) et les différents champs partiels P_l sont connus. Une source décorréélée est définie comme étant une zone émissive créant un champ acoustique linéairement indépendant des autres champs émis. Ainsi, deux zones émissives parfaitement corrélées correspondent à une seule source.

La densité interspectrale due à la source l s'écrit :

$$C_l = P_l^* P_l^T$$

En sachant que les L sources sont indépendantes, la matrice interspectrale \mathbf{C} s'écrit :

$$\boxed{C = \sum_{l=1}^L C_l} \quad (3)$$

On pose : $P = [P_1, P_2, \dots, P_L]$ (4)

Ainsi, (3) peut alors s'écrire ainsi : $C = P^* P^T$ (5)

Chacun des vecteurs colonnes de \mathbf{P} exprime la « trace » de la source indépendante l sur les capteurs de la grille. Et chacune des lignes de \mathbf{P} exprime la « vue » à partir d'un point de la grille de mesure de l'ensemble des sources.

Pour mesurer ces champs de pression partiels, K capteurs placés le plus près possible des sources, sont introduits (cf. fig. n°1.12). Ils sont appelés, par conséquent, capteurs de référence.

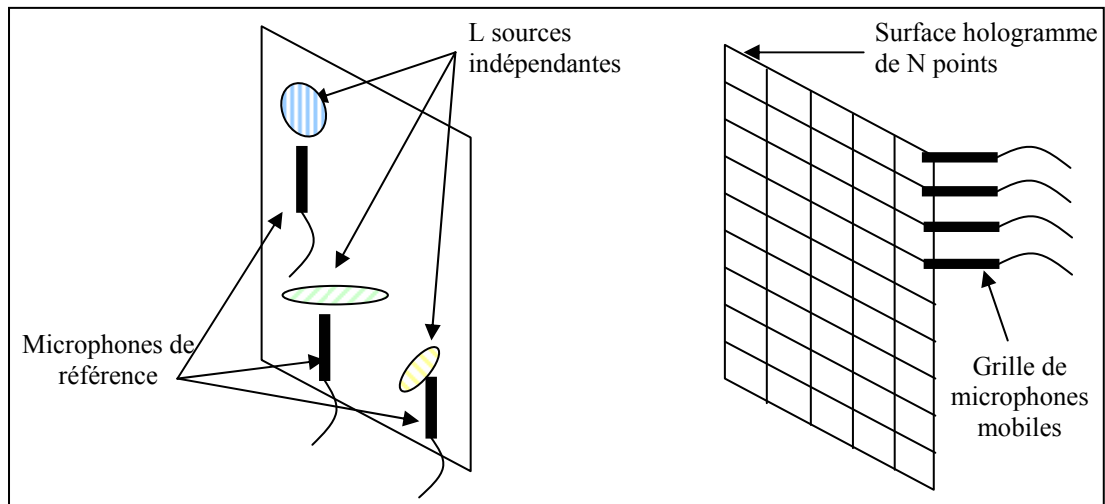


Fig. n°1.12 : Principe de la mesure par holographie à référence multiple.

De même que précédemment, R_l le champ partiel dû à la source l sur les capteurs de référence et \mathbf{R} la matrice dont les colonnes sont les différents champs partiels R_l , sont définis. Chaque vecteur colonne de \mathbf{R} exprime la trace de la source indépendante l sur les capteurs de référence et chaque ligne exprime la vue à partir d'un point de référence de l'ensemble des sources.

Maintenant, toutes ces notations sont compactées sous la forme matricielle suivante :

$$Q = \begin{bmatrix} R \\ P \end{bmatrix}$$

Chaque vecteur colonne de Q exprime la trace de la source indépendante l sur l'ensemble des capteurs et chaque ligne exprime la vue à partir d'un capteur donné de l'ensemble des sources. Maintenant une nouvelle matrice interspectrale est définie :

$$C^+ = Q^* Q^T \Rightarrow C^+ = \begin{bmatrix} C_R & C_\Delta \\ C_\Delta^{*T} & C \end{bmatrix} \quad (6)$$

avec :

C_R matrice, de dimension $K \times K$, des interspectres entre références ($C_R = R^* R^T$).

C_Δ matrice, de dimension $K \times N$, des interspectres entre références et points de la grille ($C_\Delta = R^* P^T$).

C matrice, de dimension $N \times N$, des interspectres entre capteurs de la grille (cf. (5)).

On peut en déduire que :

$rg(C_R) = rg(R) =$ le nombre de vue indépendantes des sources à partir des points de référence.

$rg(C^+) = rg(Q) =$ le nombre de vues indépendantes des sources à partir de tous les points de mesure.

$rg(C^+) \geq rg(C_R)$ car C_R est une sous matrice de C^+ .

Par exemple, dans le cas d'un ensemble de sources décorréelées, au moins un capteur de référence est placé près de chaque source indépendante. Chaque référence enregistre une vue relativement indépendante des sources car elle mesure principalement le champ émis par la source la plus proche. Ce champ est linéairement indépendant du champ émis par les autres sources. Ainsi, le nombre de vues indépendantes des sources à partir des références devient égal au nombre maximal des vues indépendantes possibles des sources donc :

$$rg(C^+) = rg(C_R) \quad (7)$$

Cette supposition va permettre de simplifier la méthode de mesure. Il importe donc de pouvoir la vérifier expérimentalement. Une méthode de validation a été mise en place dans ce but et sera discutée en fin de paragraphe.

En définissant la matrice C^+ comme en (6), les K premières colonnes sont supposées être connues grâce aux mesures. Cette partie de C^+ est noté C_1 :

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_R \\ C_\Delta^{*T} \end{bmatrix}$$

Les deux parties restantes C_2 sont alors notées :

$$C_2 = \begin{bmatrix} C_\Delta \\ C \end{bmatrix} \quad (8)$$

La matrice interspectrale C^+ s'écrit alors :

$$C^+ = [C_1, C_2]$$

Avec : $rg(C_1) = rg(C_R)$.

D'après l'équation (7), $rg(C_1) = rg(C^+)$ donc il existe une matrice \mathbf{E} telle que :

$$C_2 = C_1 E$$

En substituant dans l'équation précédente, il vient :

$$\left. \begin{array}{l} C_\Delta = C_R E \\ C = C_\Delta^{*T} E \end{array} \right\} \Rightarrow E = C_R^{-1} C_\Delta \text{ et } C = C_\Delta^{*T} C_R^{-1} C_\Delta$$

Or, il se peut que la matrice C_R ne soit pas inversible. Ainsi, en cas de mauvais positionnement des microphones de référence, le rang de la matrice \mathbf{R} est inférieur au nombre de références et donc le déterminant est nul ($\det(C_R) = 0$). Pour passer outre ce problème, la matrice inverse généralisée de C_R que l'on note C_R^+ est utilisée. En effet, en décomposant en vecteurs et valeurs propres la matrice complexe C_R , elle s'écrit alors :

$$C_R = S^* D S^T = \sum_{i=1}^K d_i s_i^* s_i^T$$

avec :

\mathbf{D} la matrice diagonale des valeurs propres.

\mathbf{S} la matrice des vecteurs propres associés aux valeurs propres. \mathbf{S} est $K \times K$ orthonormale avec : $S^* S^T = S^T S^* = I_K$.

Dans le cas où C_R est non inversible, la matrice diagonale des valeurs propres \mathbf{D} contient des valeurs propres nulles. Ainsi, en supposant, par exemple, la présence de J sources indépendantes avec $J \leq K$, et, en notant \mathbf{D}_1 la partie non nulle de \mathbf{D} et \mathbf{S}_1 la partie correspondante de \mathbf{S} , la matrice \mathbf{D} s'écrit :

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & & & & & \\ & \dots & & & & \\ & & d_J & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & \dots & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \text{ et } S = \underbrace{[S_1, \dots, S_J]}_{S_1} \underbrace{[S_{J+1}, \dots, S_K]}_{S_2}$$

Autrement dit, le champ capté sur l'antenne est séparé en L composantes indépendantes en utilisant une décomposition en valeurs singulières de la matrice interspectrale des pressions. Ainsi, si la matrice interspectrale des références possède les mêmes propriétés statistiques (donc le même rang) que la matrice interspectrale des pressions alors elle pourra servir à faire la décomposition et une antenne partielle pourra être déplacée.

Dans la pratique, durant le calcul des valeurs propres, il est important de pouvoir supprimer certaines valeurs propres négligeables en proposant des méthodes de régularisation [58,60,64]. En effet, si celles-ci sont négligeables (dans le cas où le nombre de microphones de référence est supérieur au nombre de sources indépendantes, par exemple), elles ne correspondent à rien de physique et sont exagérément amplifiées lors de la rétropropagation.

L'inverse généralisée s'écrit :

$$C_R^+ = S_1^* D_1^{-1} S_1^T \quad (9)$$

Et, par conséquent :

$$C = C_\Delta^{*T} C_R^+ C_\Delta \quad (10)$$

Ainsi, à condition que les références donnent la vue la plus complète possible des sources, la matrice C des densités interspectrales est déduite à partir de la connaissance des matrices C_R et C_Δ . Ainsi, le nombre de microphones de référence K étant inférieur au nombre de capteurs de la grille N , le nombre de mesures à effectuer pour acquérir C_R et C_Δ au lieu de C , est nettement diminué de $\left(\frac{1}{2}K(K+1)+KN\right)$ au lieu de $\left(\frac{1}{2}N(N+1)\right)$. Typiquement, K est compris entre 1 et 4, et N de l'ordre de 500. Ainsi, si par exemple $K=2$ et $N=500$, 1503 mesures d'interspectres sont nécessaires dans le premier cas au lieu de 125250 dans le second cas.

Le second problème à résoudre est le passage de la matrice d'interspectres C au champ complexe de pression acoustique exploitable au travers des formules NAH. En remplaçant C_R^+ par son expression donnée dans l'équation (9) dans l'équation (10), on obtient :

$$C = \left(C_\Delta^T S_1 D_1^{-1/2}\right)^* \left(C_\Delta^T S_1 D_1^{-1/2}\right)^T$$

Cette expression est analogue à celle de l'équation (2). Soit alors :

$$A = C_\Delta^T S_1 D_1^{-1/2}$$

Avec A la matrice susceptible de remplacer la matrice P dans le traitement NAH. C 'est une représentation minimale de la pression P (équation (4)). En effet, A est une matrice $N \times J$ où J est le rang de C_R , donc le nombre de sources indépendantes qui sont séparables à partir des mesures effectuées par les capteurs de référence.

La matrice A apparaît ainsi comme une matrice où chaque colonne représente la trace d'une des sources indépendantes sur l'ensemble des capteurs de la grille, et où chaque ligne représente la vue à partir d'un point de la grille de l'ensemble des J sources séparées par les références :

$$A = \begin{bmatrix} \psi_1(r_1) & \cdots & \psi_J(r_1) \\ \psi_1(r_2) & \cdots & \psi_J(r_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_1(r_N) & \cdots & \psi_J(r_N) \end{bmatrix}$$

Chaque colonne de A est la trace d'un champ complexe auquel on peut appliquer la formulation NAH. A est appelée représentation principale du champ à la fréquence d'analyse f .

Maintenant que les champs partiels indépendants (inclus dans les colonnes de A) sont récupérés, chaque champ partiel est traité séparément. Le champ colonne à étudier est extrait de la matrice A . Le champ de pression lié à la source indépendante sur la grille est alors recomposé. Le traitement classique de la NAH est alors appliqué au champ acoustique ainsi extrait : rétropropagation et filtrage (cf. chapitre 1.2.1 et 1.2.2).

Ainsi, une fois la transformée spatiale bidimensionnelle réalisée, elle est multipliée par le propagateur spatial. Ensuite, une transformée de Fourier bidimensionnelle inverse est effectuée et permet ainsi de remonter à une pression dépendant de (x,y) . Le champ obtenu est placé dans une nouvelle matrice A' qui sera la représentation principale dans le plan S .

Ensuite, le processus est réitéré pour tous les champs colonnes de A . A la fin, la matrice A' , représentation principale du champ de pression dans le nouveau plan S , est

obtenue. La matrice interspectre C' sur la surface S , représentant les niveaux de pression acoustique, est alors calculée :

$$C' = A'^* A'^T$$

Ensuite, il reste à tracer la représentation graphique de ce champ. Les informations sont contenues sur la diagonale de la matrice C' . Les autospectres sur tous les points de la grille reconstruite sont ainsi calculés.

De même, du point de vue pratique, une méthode de type périodigramme [93,95] est utilisée : le signal acquis est découpé en N blocs temporels, la matrice interspectrale est calculée sur chaque bloc puis une moyenne est effectuée. Cette matrice s'exprime ainsi :

$$\Gamma_{ij} = \frac{1}{N_b} \frac{2}{(t_{bloc})^2} \sum_{i=1}^{N_b} FFT_i FFT_j^*$$

Où :

- (i,j) représente un couple de microphones de l'antenne.
- FFT représente la Fast Fourier Transform.
- N_b est le nombre de blocs utilisés pour la FFT.
- t_{bloc} est la taille des blocs utilisés pour la FFT.

En résumé, la méthode holographique à références multiples permet de s'affranchir de l'utilisation d'une grille de microphones complète imposée par la NAH classique et d'acquérir les données de manière séquentielle. Mais, du point de vue pratique, pour que cette représentation soit correcte, certaines précautions doivent être prises :

- les capteurs de référence doivent donner la vue la plus complète des sources.
- le nombre de capteurs de références doit être supérieur ou égal au nombre de sources indépendantes (ce qui présuppose évidemment d'en avoir fait un recensement préalable).
- le maillage de la surface hologramme doit être régulier et être suffisamment large pour capter le maximum d'informations (inférieur de 10 à 20 dB sur les bords de la grille par rapport au niveau de la source).

Par contre, la STSF ne permet pas de s'affranchir des autres précautions d'emploi imposées par l'holographie (filtrage, précaution d'usage, hypothèses de champ libre,...(cf. chapitre 1.2.2)).

D'autre part, il est important de noter que la majorité des systèmes holographiques fonctionne sur la base d'une grille de microphones. Les données d'entrée sont donc des pressions acoustiques. Mais, de récents travaux menés en 2006 [67,68] mettent en évidence l'intérêt de travailler avec des vélocimètres de type microflown qui ont l'avantage d'avoir une meilleure dynamique de mesure et une moindre sensibilité aux erreurs de phase. Les données d'entrée sont alors des vitesses particulières. La théorie holographique se base cette fois sur la deuxième intégrale de Rayleigh (équation (1b)). Cette technique n'a pas été envisagée dans le cadre de cette thèse car les évolutions techniques sont récentes et postérieures aux choix qui ont été faits.

Dans le cadre de l'étude comparative sur les différentes techniques de localisation de sources, la méthode STSF sera mise en œuvre car simple d'utilisation (nécessite peu de matériel, facilement adaptable pour des surfaces planes de différentes dimensions). En outre, d'un point de vue pratique, un positionnement introduisant peu d'erreurs peut être obtenu

grâce à un système de déplacement robotisé qui présente l'avantage de minimiser les déphasages spatiaux entre les microphones en cas de mauvais positionnement du microphone.

De plus, les résultats présentés dans l'article écrit par Gratz [47] dans le cas d'une plaque en vibration qui se rapproche du cas étudié, permettent de conforter le choix de la méthode STSF quant à sa précision (cf. fig. n°1.11), même si une marge d'erreur de -10 à +5 dB par rapport à la pression réelle est encore observée à une fréquence de 500 Hz. Cette erreur peut être réduite de quelques dB à l'aide d'une méthode de régularisation, telle que celle développée par Nouals [58] (suppression des valeurs propres trop faibles). Ainsi, les travaux menés par A. Mitjavila [72] mettent en avant un déficit de 8 dB en moyenne et en tout point entre la pression mesurée et la pression calculée avec cette méthode de régularisation.

Pour conclure, cette méthode est représentative des systèmes de mesure commercialisés sous l'appellation STSF (B&K, MTS,...).

1.2.4 Les autres méthodes dérivées de la NAH.

La méthode BAHIM (**B**roadband **A**coustic **H**olography from **I**ntensity **M**easurements) [37,70-72] se base sur des mesures séquentielles d'intensité acoustique active en champ proche et de pression quadratique, mettant ainsi en évidence les possibilités de caractérisation des sources à partir des informations contenues dans le champ vectoriel de l'intensité acoustique. L'intérêt de cette méthode repose sur le fait qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un signal de référence (à contrario de la STSF, par exemple) vu que ces grandeurs physiques (intensité acoustique et pression quadratique) sont indépendantes. Mais, cette technique présente les mêmes inconvénients que pour l'intensimétrie. Sur le plan pratique, le temps de mesure est excessif par rapport aux impératifs de temps d'un essai réel.

La méthode SONAH (**S**tatistically **O**ptimal **N**earfield **A**coustical **H**olography) [74-77] présente l'avantage de réaliser la propagation du champ non pas dans le domaine des nombres d'ondes mais dans le domaine spatial directement. Ceci permet d'éviter les problèmes d'effet de troncatures liés à l'utilisation des transformées de Fourier bidimensionnelle spatiale. Ainsi, la propagation s'effectue par le biais d'une matrice de transfert définie à l'aide de méthodes statistiques de telle façon que toutes les ondes propagatives et qu'une partie des ondes évanescentes soient projetées avec une exactitude moyenne optimale. Cette méthode présente également l'avantage de ne pas nécessiter une répartition équitable des capteurs puisque la transformée bidimensionnelle spatiale n'est plus réalisée. Tout comme la STSF, cette méthode donne une reconstruction de la pression acoustique précise mais présente le désavantage d'avoir des temps de calculs beaucoup plus importants (5 fois plus de temps de calcul que la STSF) que les autres techniques holographiques [47].

La méthode NAH couplée à la BEM (**B**oundary **E**lement **M**ethod) [78-83] présente l'intérêt de pouvoir être utilisée sur une surface de forme quelconque et sans avoir un pas d'échantillonnage spatial constant. Contrairement aux autres méthodes dérivées de la NAH, un calcul numérique de type BEM est utilisé pour calculer la fonction de Green du problème étudié, ce qui permet de s'affranchir de l'hypothèse de champ libre pour la reconstruction des champs. Par contre, l'utilisation de méthodes de type éléments finis impose d'autres limitations liées aux calculs numériques. En effet, généralement, on impose d'utiliser au moins 4 éléments par longueur d'onde. Or, en considérant la gamme fréquentielle d'étude (1000 – 5000 Hz) et les dimensions de la cabine, le nombre d'éléments nécessaires pour modéliser la cabine va devenir trop important pour les moyens de calcul actuels. Ainsi, pour

une fréquence de 5000 Hz et pour une dimension de cabine de 2900x1100x1700mm³, 100 000 mailles sont approximativement nécessaires.

Enfin, la phonoscopie [86], développée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), a pour but de caractériser le rayonnement d'une structure, telle qu'un mur.

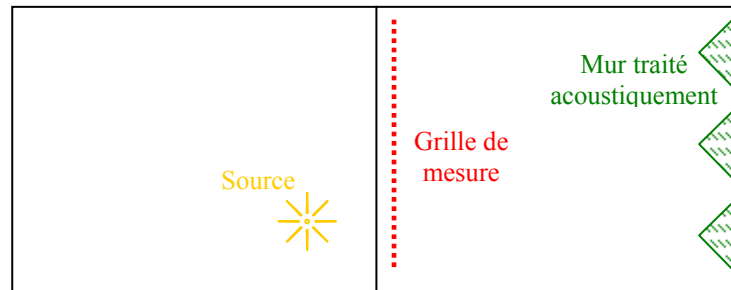


Fig. 1.16 : Principe de la mesure par phonoscopie.

Les auteurs considèrent que la pièce, où est placée la grille de mesure, est un conduit semi-infini rigide. De plus, le mur opposé au mur de mesure est traité acoustiquement pour éviter les ondes réfléchies et les autres murs sont considérés comme rigides (cf. fig. n°1.16). Le champ sonore mesuré est alors décomposé en termes de modes transverses sous la forme d'une série de cosinus. De plus, dans ce cas de figure, un seul mur rayonne et la fonction de Green en champ libre peut être utilisée. Cette application ne pourra pas être mise en œuvre en cabine d'hélicoptère du fait que toutes les parois de l'hélicoptère rayonnent et que le traitement acoustique d'une partie n'est pas envisageable.

1.2.5 Utilisation de l'holographie en milieu confiné.

a) Utilisation basée sur une fonction de Green champ libre.

Deux cas d'application en milieu confiné peuvent être cités dans la gamme fréquentielle de l'étude : une menée par la société Metravib dans un habitacle de voiture [50] et l'autre par Eurocopter dans une cabine d'hélicoptère [21,22]. Dans les deux cas, la fonction de propagation mise en œuvre reste la fonction de Green en champ libre et elle se basait sur de l'utilisation sur de la NAH à multiples références.

Dans le premier cas [50], les résultats présentés sont obtenus à l'aide d'une grille carrée de microphones composée de 64 microphones espacés de 2 cm. Le but de ces travaux est de détecter les fuites acoustiques au niveau d'une porte de voiture. Une excitation de type bruit blanc est réalisée à l'extérieur de l'habitacle. La grille de microphones est placée à l'intérieur de la voiture : 55 positions différentes de grille sont nécessaires pour reconstruire la surface hologramme entière (cf. fig. n° 1.13.c). Le positionnement de chaque mesure est réalisé à l'aide d'un robot de déplacement. Les résultats obtenus sont comparés avec des mesures standards (accéléromètre).

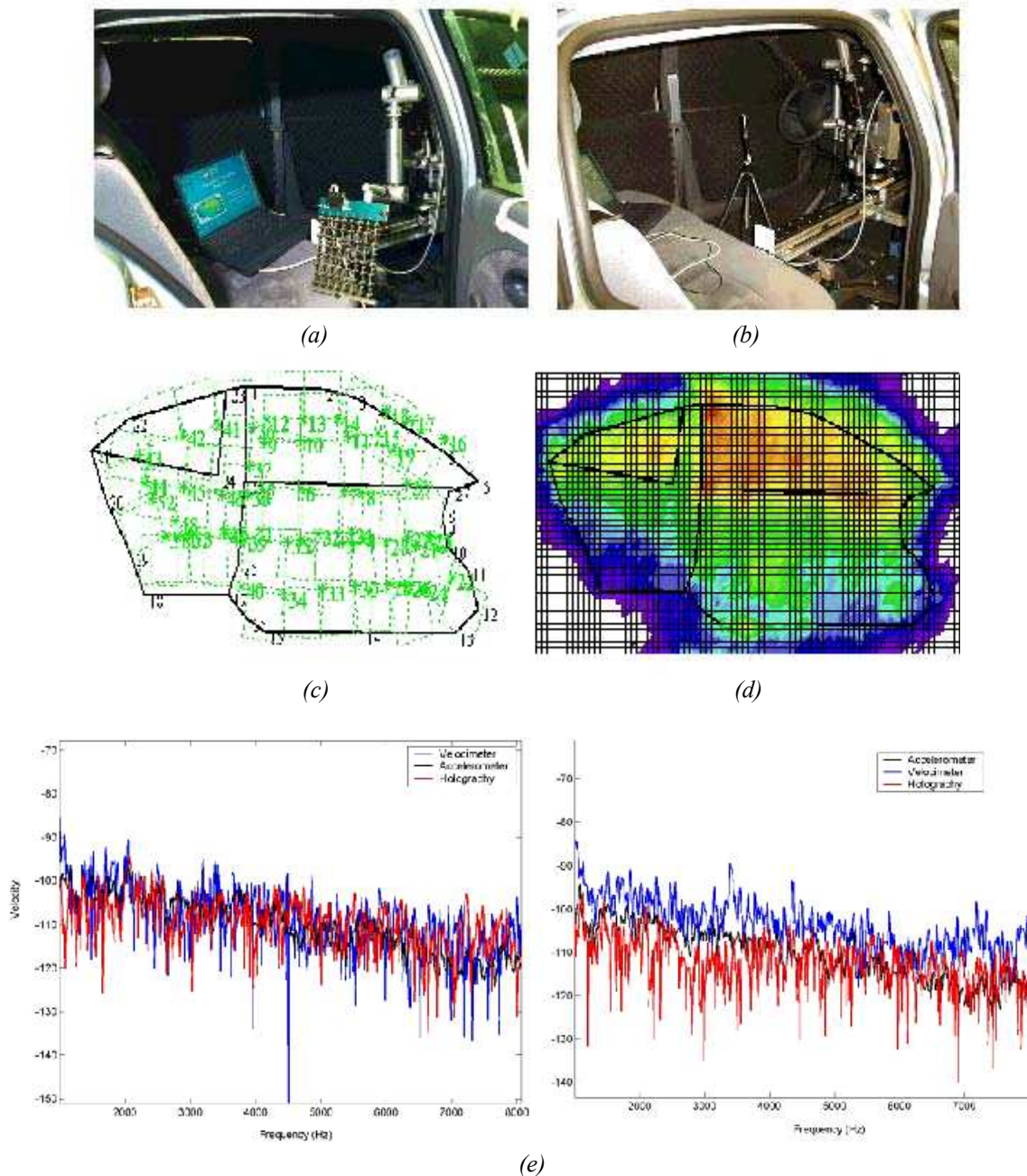


Fig. n°1.13 : Principe de la mesure mise en place par Metravib dans l'habitacle d'une voiture [50] : (a) grille de microphones utilisé (b) système de déplacement utilisée (c) ensemble des positions de la grille (d) grille reconstruite (e) Comparaison des résultats entre la vélocimétrie laser, l'holographie et les accéléromètres au niveau de la fenêtre pour 2 positions d'accéléromètre .

Les vitesses obtenues par reconstruction holographique, via les accéléromètres et par un vélocimètre laser sont présentées sur la figure n°1.13 e). Les grandes tendances et les ordres de grandeur sont retrouvées mais les valeurs de vitesses calculées par holographie sont moins précises que pour les accéléromètres. Par contre, afin d'obtenir ces résultats, toutes les autres parois du véhicule ont été recouvertes de mousse absorbante limitant ainsi l'énergie acoustique rayonnée par les autres parois et les réflexions existant dans l'habitacle. Les conditions ainsi créées se rapprochent de celles du champ libre, justifiant l'utilisation de la fonction de Green en champ libre. Ce type de masque acoustique est difficile à mettre en œuvre dans le cadre de la cabine d'hélicoptère étant donné les contraintes d'essais imposées

par Eurocopter (temps de mesure, d'immobilisation de l'engin, de préparation de la machine...).

Dans le second cas [21,22], le même système de mesure est utilisé dans le cadre d'une cabine d'hélicoptère. Cent mesures sont nécessaires pour reconstruire la surface hologramme d'une paroi. Les résultats présentés (panneau arrière et porte gauche de l'hélicoptère) permettent de faire ressortir les zones de fuites acoustiques de ces parois.

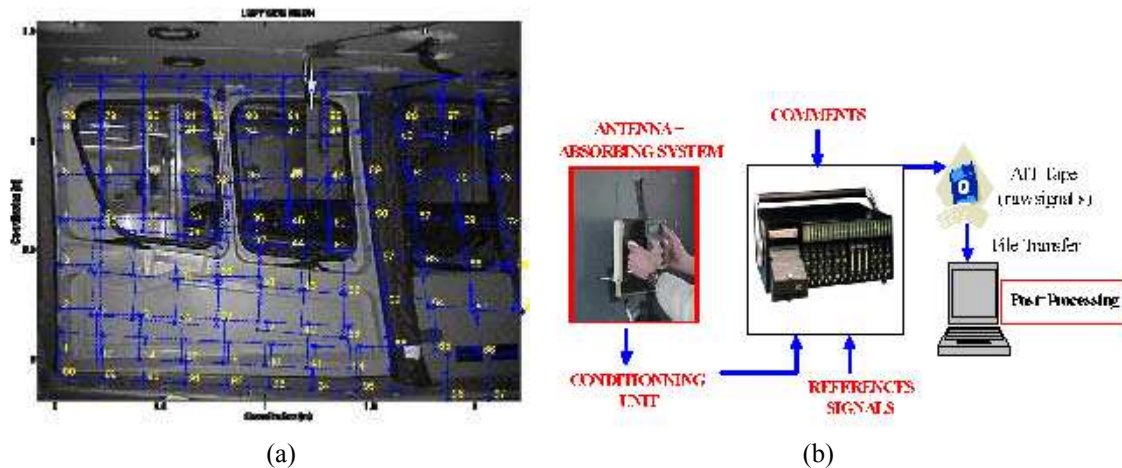


Fig. n°1.14 : Principe de la mesure mise en place par Eurocopter [21] : (a) ensemble des positions de la grille (b) moyens de mesures utilisés.

Ainsi, les résultats donnent des indications très intéressantes sur la localisation des zones de fuites acoustiques au niveau de la porte latérale et du panneau arrière, mais ceux-ci ne sont présentés que pour des fréquences supérieures à 2000 Hz. Par contre, aucune information n'est donnée sur la qualité de la reconstruction des champs de pression (en terme de niveaux,...). D'autant plus que le positionnement de l'antenne se fait manuellement (cf. fig. n°1.14) : les sources d'erreurs et d'imprécisions sont nombreuses (positionnement en distance entre l'antenne et la paroi, positionnement des mesures dans le plan hologramme, antenne instable durant la mesure, etc.) et non quantifiées. De plus, une protection en fibre de carbone et une mousse absorbante sont placées à l'arrière du support métallique de la grille utilisée : des effets de réflexion, de diffraction ou d'ondes stationnaires entre les supports métalliques et la protection en carbone pouvant gêner la mesure ne sont pas quantifiés.

b) Holographie avec prise en compte de l'habitacle.

Des travaux prometteurs menés par Williams & al. sont à mettre en avant car ce sont les seuls à réaliser de la reconstruction holographique prenant en compte l'habitacle d'étude [78,82-84]. Leur résultat se base sur l'utilisation des techniques NAH couplées à de la BEM (cf. paragraphe 1.2.4). Elle est essentiellement utilisée dans le domaine des basses fréquences et donne des résultats très intéressants. En effet, elle a été mise en œuvre à plusieurs reprises dans des milieux confinés (habitacles de voiture, cabine d'avion nue) en donnant des résultats prometteurs jusqu'à 200Hz. Toutefois, dans le cas de l'essai réalisé dans un avion [84], à la fréquence de 100Hz, il existe déjà une erreur de l'ordre de 10% sur les valeurs RMS de vitesse normale vibratoire reconstruites (cf. fig. n°1.15 (a)) lié aux discontinuités existant aux niveaux des jointures des parois. De même, l'instrumentation embarquée reste imposante (cf. fig. n°1.15 (b)).

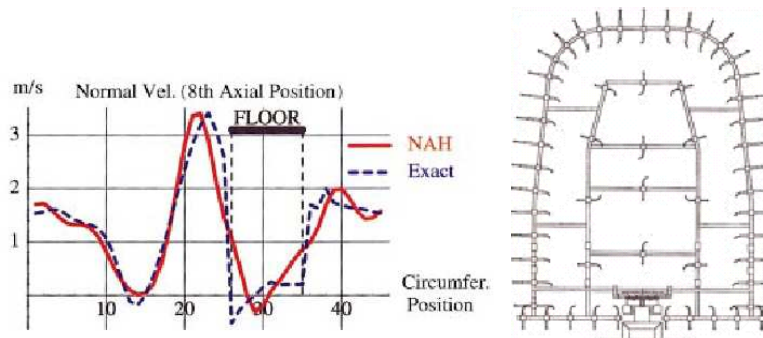


Fig. n°1.15 : (a) comparaison entre la vitesse normale reconstruite par NAH/BEM et les valeurs exactes mesurées par des accéléromètres, (b) Instrumentation utilisée pour la mesure.

L'extrapolation de cette technique à la gamme de fréquence d'étude ne semble pas envisageable (trop d'éléments finis et instrumentation trop imposante).

1.3 La méthode IFRF (Inverse Frequency Response Function).

La méthode IFRF se base sur la connaissance des « fonctions de transfert » décrivant le milieu étudié et un modèle linéaire de propagation acoustique [87-89]. Sur le plan théorique, la méthode est très simple. Elle consiste à étudier la relation entre des données d'entrée et des données de sorties (méthode de type inverse) :

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\}$$

ou

$$\{F(\omega)\} = [H(\omega)]^+ \{X(\omega)\}$$

Où :

- $\{F(\omega)\}$ est la transformée de Fourier des entrées
- $\{X(\omega)\}$ est la transformée de Fourier des sorties
- $[H(\omega)]$ est la matrice de transfert FRF.

Dans le cadre d'un problème acoustique, les entrées correspondent aux sources acoustiques (à priori localisées) et les sorties aux pressions mesurées sur la grille de microphones (cf. fig. n°1.17). Le système étudié est alors décrit par un ensemble de fonctions de transfert entre des entrées et des sorties, qui représentent donc les chemins de propagation du système étudié. Ainsi, les effets des réflexions et des absorptions existant dans le système étudié sont pris en compte dans la matrice de transfert, et, la géométrie de la source et les conditions aux limites peuvent être quelconques. Cela représente un gros avantage dans le cadre de l'étude menée. Par contre, les matrices de transfert peuvent poser des problèmes de conditionnement lors de leur inversion : des méthodes de régularisation de matrice sont donc utilisées pour éviter ce type de problème [87,88].

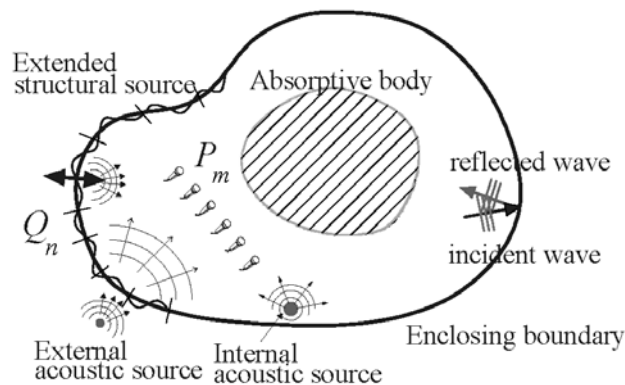


Fig. n°1.17 : Schéma de principe de la méthode IFRF [88].

Pour établir la matrice de transfert dans l'environnement opérationnel, il faut déterminer un nombre N de positions « candidates » (position où l'on pense qu'une source est potentiellement présente). Une grille de M microphones est utilisée, avec $M > N$ afin d'avoir un système surdéterminé et de réduire le bruit de mesure. Le positionnement des microphones ne revêt aucune importance puisque celui-ci est intégré lors de la détermination des fonctions de transfert.

En premier lieu, une phase de « calibration » est nécessaire : des haut-parleurs excités par des signaux acoustiques connus sont placés au niveau de tous les points « candidats », et, ensuite, le signal d'excitation acoustique et les signaux mesurés à l'aide des microphones sont

mesurés. On en déduit alors les matrices de transfert. Ainsi, il est implicitement supposé que la directivité des sources de calibration et des vraies sources sont identiques et qu'entre la calibration et la phase de mesures, les microphones ne sont pas déplacés et les conditions de mesures n'ont pas changé (réflexion/absorption, conditions aux limites...) [87]. Par contre, dans le cas où une source ne se trouve pas exactement sur une des positions « candidates », la contribution de la source va s'étaler sur les points « candidats » les plus proches. De même, dans le cas où la source est éloignée des points « candidats », l'énergie acoustique captée de cette source est concentrée sur les points « candidats » les plus proches de cette source [87].

La méthode IFRF a également été mise en œuvre en milieu confiné (habitacle de voiture) [87,90]. Une grille de 75 microphones est utilisée et 7 positions « candidates » sont testées. La phase de « calibration » de ces positions est réalisée à l'aide d'un haut-parleur mobile excité par un bruit blanc. Ensuite, deux haut-parleurs sont placés sur 2 des 7 positions testées et sont excités par un sinus à 300 Hz. Les résultats obtenus mettent en évidence un positionnement des sources exact et une erreur de reconstruction pour en niveau de pression inférieure à 2% pour les positions où se trouvent les sources, et une erreur de reconstruction de 5% pour les autres positions.

Mais, dans le cadre de l'étude menée, cette méthode n'est pas adaptée aux impératifs industriels d'Eurocopter. En effet, les positions des sources potentielles ne sont pas connues. Ceci impose donc de définir un nombre important de points « candidats » pour pouvoir s'affranchir des problèmes de reconstruction cités précédemment. Et, au vue des dimensions d'une cabine, le nombre de mesures est beaucoup trop élevé (notamment la phase de « calibration »).

1.4 L'antennerie acoustique.

La méthode de localisation de sources acoustiques par formation de voies est héritée des sonars « passifs » utilisés pour la localisation des navires. Elle consiste à combiner les mesures d'un grand nombre de capteurs afin d'augmenter le rapport signal sur bruit et ainsi observer une direction donnée. Un ensemble de microphones (appelé « réseau » ou « antenne ») répartis suivant une ligne par exemple (cf. fig. n°1.18), est soumis à une onde plane provenant d'une direction repérée par l'angle θ_0 .

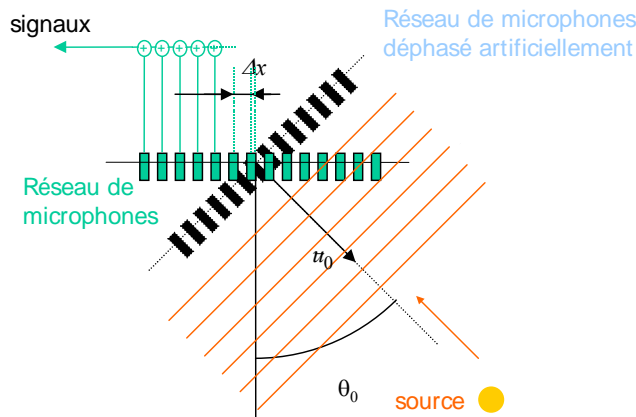


Fig. n°1.18 : Schéma de principe de l'antennerie unidimensionnelle en ondes planes.

En effectuant une addition synchrone des signaux reçus par les microphones, l'« écoute » suivant la direction $\theta = 0^\circ$ est amplifiée, contrairement à celle des autres directions. Maintenant, si on désire observer la source définie selon l'angle θ_0 , il convient d'orienter physiquement l'antenne face à la source, soit, en pratique, de retarder les signaux les uns par rapport aux autres de façon à les synchroniser. Généralement, cette opération s'effectue dans le domaine des fréquences, la compensation des retards devient alors une simple rotation de phase. La direction de la source étant supposée inconnue, il suffit de faire varier les déphasages de façon à parcourir les directions possibles : le signal d'antenne devient maximal lorsque la direction de la source est trouvée. La réponse de l'antenne présente l'allure d'un sinus cardinal [91] (cf. fig. n°1.19), avec un lobe principal centré sur la source, et des lobes secondaires d'amplitude faible et décroissants avec la distance.

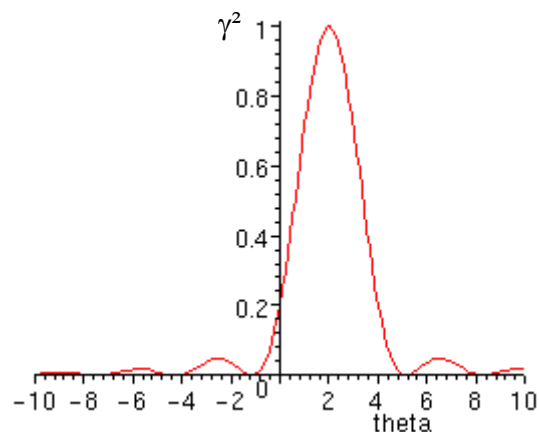


Fig. n°1.19 : Réponse de l'antenne de $N=20$ capteurs excitée par des ondes planes et une source placée en $\theta_0=2$ rad [91].

La problématique en acoustique aérienne n'est pas celle rencontrée en acoustique sous-marine. Il ne s'agit pas d'isoler une source d'un bruit de fond, mais de caractériser finement une région source donnée, souvent complexe (sources multiples, étendues, présentant des cohérences spatiales...). Pour cela, il est en pratique préférable de se placer suffisamment proche des sources pour que le réseau puisse capter la sphéricité des ondes. La localisation est alors plus précise car elle fournit une position et non une simple direction. De plus, la méthode est fondée sur un modèle simple et robuste qui permet une distinction et une hiérarchisation précise des sources principales, fréquence par fréquence.

Les antennes sont très utiles à l'étude du bruit aérodynamique où l'emploi des systèmes bidimensionnels (typiquement 50 microphones) permettent d'établir des cartographies 2D de sources [97,108,109]. De plus, les moyens d'acquisition actuels présentent l'avantage d'une mesure très rapide (quelques secondes d'acquisition) puisque les traitements sont effectués numériquement après la mesure.

1.4.1 Théorie.

Les premiers travaux sur l'antennerie acoustique en milieu aérien supposaient la présence d'ondes planes (simple transposition de la théorie de détection sous-marine). Puis, afin d'améliorer la précision de la détection, la sphéricité des ondes a été introduite [92-94].

Une antenne linéaire composée de N microphones et une source S monochromatique ponctuelle d'amplitude A émettant à la fréquence f , sont utilisées (cf. fig. n°1.20).

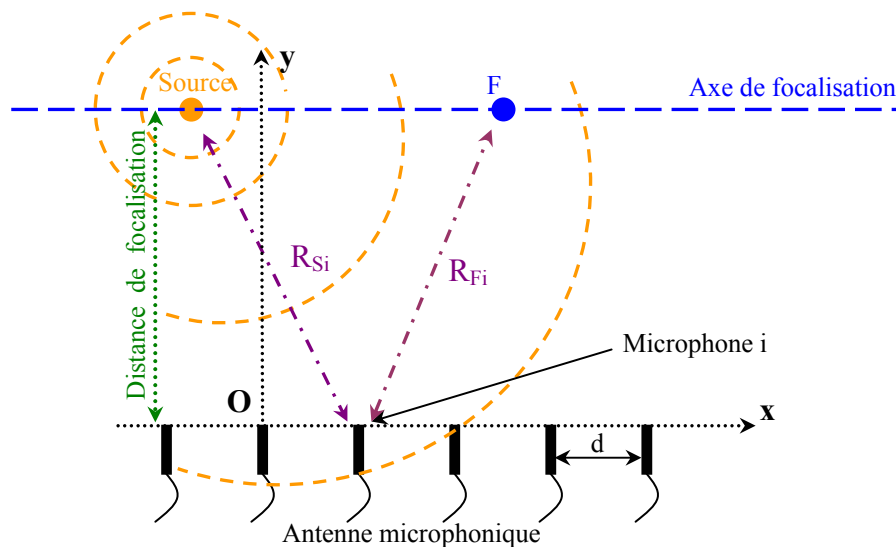


Fig. n°1.20 : Schéma de principe d'une antenne microphonique excitée par une source ponctuelle.

Notations :

- Antenne de N capteurs équidistants de d positionné en (x_i, y_i) avec $y_i = 0$.
- Source S monochromatique ponctuelle d'amplitude A , de fréquence f , placée en (x_s, y_s) .
- p_i pression mesurée sur le microphone i .
- R_{Si} distance de la source au capteur i .
- R_{Fi} distance du point focal au capteur i .

Le capteur i capte un signal provenant de la source égal à :

$$p_i(f) = A \frac{e^{jkR_{Si}}}{R_{Si}}$$

Le principe de la localisation consiste à rechercher la (ou les) source(s) (de position(s) inconnue(s)) le long d'un axe de focalisation. F est appelé le point de focalisation se déplaçant sur cet axe, de coordonnées (x_{Fi}, y_{Fi}) . Pour la résolution, on considère une source fictive placée en F dont l'expression est la suivante (en prenant comme référence une amplitude égale à 1) :

$$u_{Fi}(t) = \frac{e^{jkR_{Fi}}}{R_{Fi}}$$

Une matrice unicolonne pression $\vec{p} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ p_N \end{Bmatrix}$ et un vecteur de focalisation $\vec{u}_F = \begin{Bmatrix} u_{F_1} \\ u_{F_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{F_N} \end{Bmatrix}$ sont

créés.

La fonction de localisation est alors définie comme étant le produit scalaire de deux vecteurs : \vec{p} et \vec{u}_F . Ce produit est maximum quand les deux vecteurs sont colinéaires. La source est alors localisée. Cette fonction est alors normalisée telle qu'elle soit égale à 1 quand la source est localisée (dans le cas d'une source idéale). Cette fonction s'écrit alors :

$$\gamma^2 = \frac{|\vec{u}_F \cdot \vec{p}|^2}{|\vec{p}|^2 |\vec{u}_F|^2} = \frac{|{}^t U_F^* P|^2}{|U_F|^2 |P|^2} \quad (11)$$

où : t représente la transposée de la matrice et $*$ le conjugué.

Or :

- $|\vec{u}_F \cdot \vec{p}|^2 = \left| \sum_{i=1}^N u_{Fi} \times p_i^* \right|^2 = \left| \sum_{i=1}^N \frac{A^*}{R_{Fi} R_{Si}} e^{jk(R_{Fi} - R_{Si})} \right|^2$
- $|\vec{p}|^2 = \sum_{i=1}^N p_i \times p_i^* = \sum_{i=1}^N \frac{|A|^2}{R_{Si}^2}$
- $|\vec{u}_F|^2 = \sum_{i=1}^N u_{Fi} \times u_{Fi}^* = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{Fi}^2}$

L'expression de la fonction de localisation γ^2 qui n'est d'autre qu'une cohérence entre vecteurs, s'écrit :

$$\gamma^2(f, F) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \frac{A^*}{R_{Fi} R_{Si}} e^{jk(R_{Fi} - R_{Si})} \right|^2}{\sum_{i=1}^N \frac{|A|^2}{R_{Si}^2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{Fi}^2}} \quad (12)$$

Du point de vue pratique, la fonction de localisation est calculée en se basant sur la matrice interspectrale Γ [89-92] qui est ensuite utilisée pour calculer la fonction de localisation. Deux signaux supposés aléatoires, stationnaires et ergodiques, sont alors utilisés et l'expression de γ^2 doit être prise en moyenne d'ensemble.

Le numérateur de la fonction de localisation γ^2 définie précédemment (11) devient alors :

$$\left| {}^t U_F^* P \right|^2 = \sum_{i,j} U_{Fi}^* \Gamma_{ij} U_{Fj} \text{ avec : } \Gamma_{ij} = \langle P_i P_j^* \rangle$$

Et, le dénominateur de cette même fonction devient :

$$|P|^2 = \left\langle \sum_{i=1}^N |P_i|^2 \right\rangle = \sum_i \Gamma_{ii}^* = Tr(\Gamma)$$

où : $Tr(\Gamma)$ est la trace de la matrice interspectrale.

Ainsi, l'expression suivante est obtenue pour (11) :

$$\gamma^2 = \frac{{}^t U_F^* \Gamma U_F}{\|U_F\|^2 Tr(\Gamma)} = \frac{U_F^+ \Gamma U_F}{\|U_F\|^2 Tr(\Gamma)}$$

Où : $^+$ est la transposée conjuguée.

En général, l'intérêt de cette méthode est qu'une fois la matrice interspectrale Γ calculée, le calcul de γ^2 est immédiat. Alors qu'en utilisant l'expression (11) définie précédemment, le calcul doit être refait pour chaque point de focalisation. L'utilisation de la matrice interspectrale permet donc de réduire considérablement le nombre de calculs. De façon pratique, pour déterminer la matrice interspectrale, tout comme pour la STSF, une méthode de type périodigramme est utilisée [94,96] (cf. chapitre 1.2.3).

1.4.2 Performances de l'antenne.

En règle générale, les performances d'une antenne se mesurent en terme de :

- pouvoir de résolution (capacité du réseau à séparer deux sources proches) que traduit la largeur du lobe principal qui doit être la plus faible possible.
- rapport signal sur bruit ou dynamique de mesure (capacité à identifier une source faible en présence d'une source prépondérante) qui est le rapport entre le niveau des premiers lobes secondaires au lobe principal.

Ces performances sont ajustées pour une bande de fréquences donnée, par la taille du réseau, l'espacement des microphones et la distance à la source. Typiquement, le pouvoir de résolution est de l'ordre de la longueur d'onde, la taille du réseau et sa distance aux sources sont du même ordre de grandeur, supérieur aux longueurs d'onde.

a) Le pouvoir de résolution.

Dans le cas des ondes sphériques, le pouvoir de résolution spatial Δx de l'antenne dans le cas limite où l'antenne, placée à une distance de focalisation D , est de longueur L tendant vers l'infini [90,92], peut être déterminé.

Dans ce cas, la distance de focalisation D est inférieure à la longueur L de l'antenne ($D \ll L$). De plus, en général, $\forall i, x_{Fi} - x_i \gg y_{Fi} - y_i$ et $x_{Si} - x_i \gg y_{Si} - y_i$. En développant R_{Fi} et R_{Si} à l'ordre 1, il en ressort que : $R_{Fi} \approx x_F - x_i$ et $R_{Si} \approx x_S - x_i$ soit $R_{Fi} - R_{Si} \approx x_F - x_S = x$.

Les nouvelles définitions des longueurs sont reportées dans (12) :

$$\gamma^2 = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \frac{A^*}{R_{Fi} R_{Si}} e^{jkx} \right|^2}{\sum_{i=1}^N \frac{A^2}{R_{Si}^2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{Fi}^2}} \sim |J_0(kx)|^2 \quad [93]$$

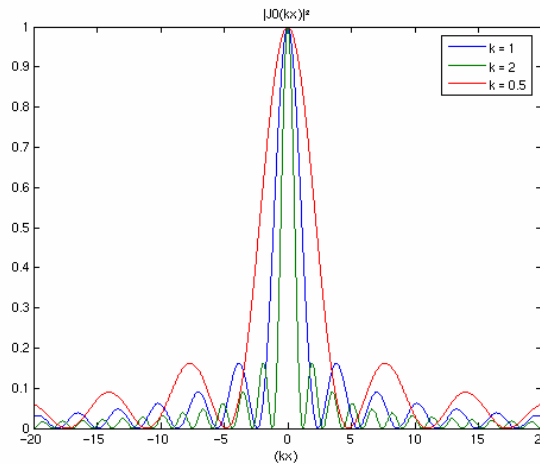


Fig. n°1.21 : Fonction de Bessel d'ordre 0 pour $k = 0.5, 1, 2$.

Il en ressort donc que : $\gamma^2 \sim |J_0(kx)|^2$ soit $\Delta x \sim \lambda$ (cf. fig. n°1.21) qui correspond à la largeur du lobe de $|J_0(kx)|^2 = 0,5$.

Une résolution maximale de $0,38\lambda$ exactement [94] peut être obtenue par antennerie. Dans [90-92], d'autres paramètres de l'antenne (pouvoir de résolution angulaire, pouvoir de résolution spatiale, largeur de lobe à 3dB, tailles et positions des lobes secondaires...) sont calculés dans le cas des ondes planes. Cette limitation du pouvoir de résolution est atteinte dès que D est de l'ordre de grandeur de L [90-92]. Ainsi, la résolution est améliorée de manière infime en rallongeant l'antenne au-delà d'une envergure supérieure à la distance de focalisation. C'est une différence par rapport au domaine de Fourier où plus la fenêtre temporelle est grande, plus la résolution fréquentielle s'améliore.

L'antenne est donc peu résolutive dans les basses fréquences puisque les longueurs d'onde deviennent grandes dans cette gamme de fréquences (contrairement à l'holographie par exemple).

Aussi, pour pallier au problème de faible résolution de l'antenne dans les basses fréquences, plusieurs solutions ont été proposées : Hald [102] développe un système de mesure unique fondé sur une l'holographie de type SONAH (approche statistique) pour l'étude des basses fréquences et l'antennerie pour l'étude des hautes fréquences. Cette méthode permet de profiter des avantages de chacune des deux méthodes. D'autres préconisent l'utilisation d'algorithmes adaptatifs (MUSIC, Antennerie orthogonale...) [118-

121] mais souvent ces algorithmes sont très sensibles aux modèles utilisés pour représenter les sources et peuvent présenter une importante dégradation de leur performance s'ils sont utilisés dans un environnement inadéquat. Dans le cas de cette étude, étant donné la gamme de fréquence utilisée (1000 – 5000Hz), les performances « standard » de l'antenne sont jugées suffisantes. En effet, le pouvoir de résolution, représentant la capacité de l'antenne à différencier deux sources proches, est inférieur à 34 cm à 1000 Hz ce qui reste satisfaisant, dans notre cas, pour dégager les grandes tendances du rayonnement acoustique.

b) La tâche focale.

Pour une antenne focalisée, la notion de largeur de lobe à 3dB, existant également dans le cas des ondes planes, est souvent remplacée par celle de la dimension de la tâche de focalisation. En effet, pour un monopôle situé en un point F_0 , la fonction de localisation est égale à l'unité et passe à la valeur 0,5 sur une ellipse dont F_0 occupe le centre et dont le grand axe est porté par la bissectrice de l'angle formé par F_0 et les extrémités de l'antenne (cf. fig. n°1.22).

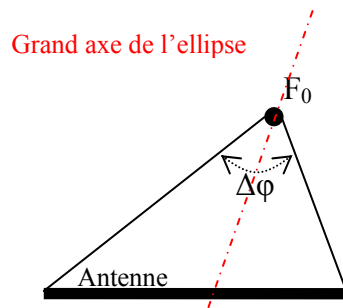


Fig. 1.22 : Illustration de la construction du grand axe de l'ellipse représentant la tâche focale.

De même, il est montré que les demi-axes sont approchés par les expressions suivantes [92,95] :

$$\begin{cases} a = \frac{\lambda}{2\pi} \left(1 - \frac{\sin(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi} \right)^{-1/2} \\ b = \frac{\lambda}{2\pi} \left[1 + \frac{\sin(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi} - 2 \left(\frac{\sin(\Delta\varphi/2)}{\Delta\varphi/2} \right)^2 \right]^{-1/2} \end{cases} \quad (12)$$

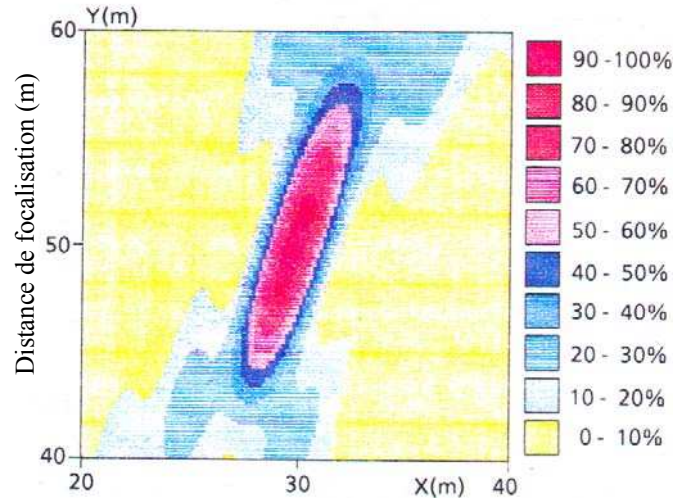


Fig. 1.23 : Image d'une source monopolaire en F_0 ($X=30m$, $Y=50m$) par antenne focalisée de caractéristiques : $L = 100m$, $\Delta\varphi = 91^\circ$, $\lambda = 3,75m$ [94].

La tâche de focalisation est donc d'autant plus petite que l'ouverture angulaire $\Delta\varphi$ est grande (cf. relation (12)). Cependant, même pour $\Delta\varphi = \pi$ (antenne de longueur infinie), les dimensions de la tâche restent de l'ordre de la longueur d'onde λ . Ceci démontre à nouveau qu'il est inutile d'allonger exagérément la base de l'antenne et qu'une configuration optimale [94] (au sens du nombre de microphones à disposer) consiste à placer l'antenne face aux sources étudiées à une distance telle que $\Delta\varphi = \pi/2$.

De plus, dans le cas où la focalisation se fait sur un plan différent du plan source, la source est encore localisée mais avec une valeur de cohérence inférieure à 1 (cf. forme elliptique de la tâche focale).

c) Le domaine de validité fréquentiel.

Le caractère discret de la grille de mesure impose une bande fréquentielle d'étude [91-93,95].

Finalement, les conditions à respecter sont les mêmes que pour l'holographie :

- Dans le domaine des hautes fréquences : $d \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \Leftrightarrow f_{\max} = \frac{c}{2d}$ (théorème de Shannon)
- Dans le domaine des basses fréquences : $L \geq \lambda_{\max} \Leftrightarrow f_{\min} = \frac{c}{L}$

Toutefois, dans le domaine des hautes fréquences, la condition imposée par le théorème de Shannon est plutôt restrictive car, pour obtenir une résolution donnée, il faut une longueur d'antenne donnée L et donc un nombre de capteurs $N \approx \frac{L}{d}$ qui peut devenir très important dans le cas des hautes fréquences. Ainsi, si le domaine d'étude se limite à un espace compris entre $-\theta_m$ et θ_m (cf. fig. 1.24), dans le cas d'ondes planes, une condition moins stricte [91,92] peut être choisie :

$$\boxed{\frac{\lambda}{d} > 2 \sin \theta_m \Leftrightarrow d < \frac{\lambda}{2 \sin \theta_m}}$$

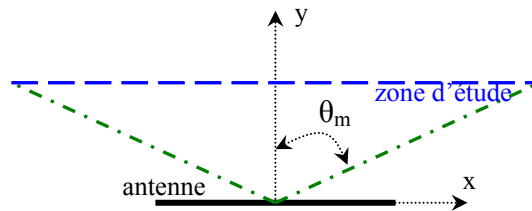


Fig. 1.24 : Illustration de la condition de Shannon moins restrictive.

1.4.3 L'antenne acoustique bidimensionnelle.

La théorie de l'antenne linéaire (cf. chapitre 1.4.1) permet de traiter des problèmes de type plan (l'antenne est placée suivant x et la focalisation se fait suivant y) et s'étend naturellement au cas tridimensionnel avec l'utilisation d'une antenne bidimensionnelle (une antenne placée dans un plan (x,y) et la direction z est alors explorée).

Au final, la principale difficulté résulte dans le choix de la forme de l'antenne. En effet, il est possible d'utiliser toute forme d'antenne (cf. fig. n°1.25) souvent optimisée pour un environnement donné : grille carrée pleine (très peu utilisée car non optimale), antenne en forme de croix [96,98], antenne en forme de T [99], un placement aléatoire de tous les microphones [100], placement optimisé [100-103], antenne en spirale [100], antenne circulaire [104], antenne sphérique [105,106].

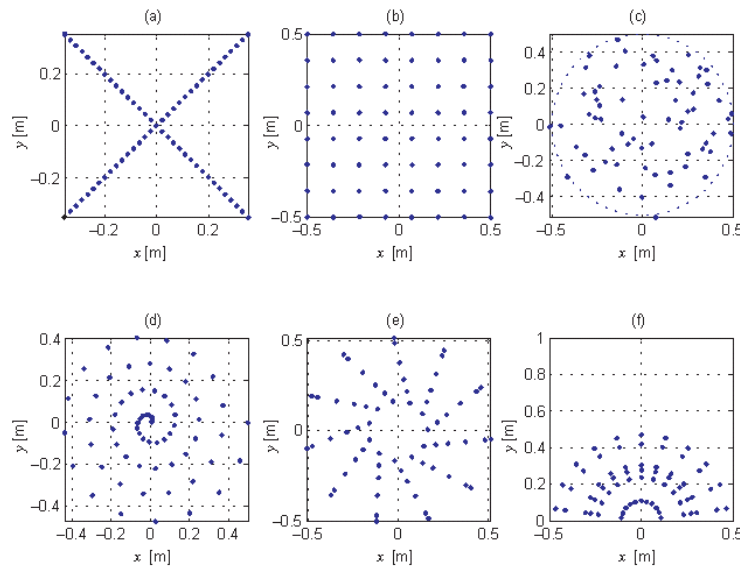


Fig. 1.25 : Illustration de quelques formes différentes d'antennes testées [99] : (a) antenne en croix, (b) grille carrée pleine, (c) placement aléatoire, (d) antenne en spirale, (e) placement aléatoire optimisé B&K, (f) antenne optimisé en demi rond.

Les performances obtenues pour chacune de ces antennes sont présentées sur la figure n°1.26 et le tableau n°1.2. Ces figures présentent des simulations réalisées avec une source monopolaire placée face au centre de l'antenne à la fréquence de 5000Hz. La dynamique de mesure est la même sur toutes les figures.

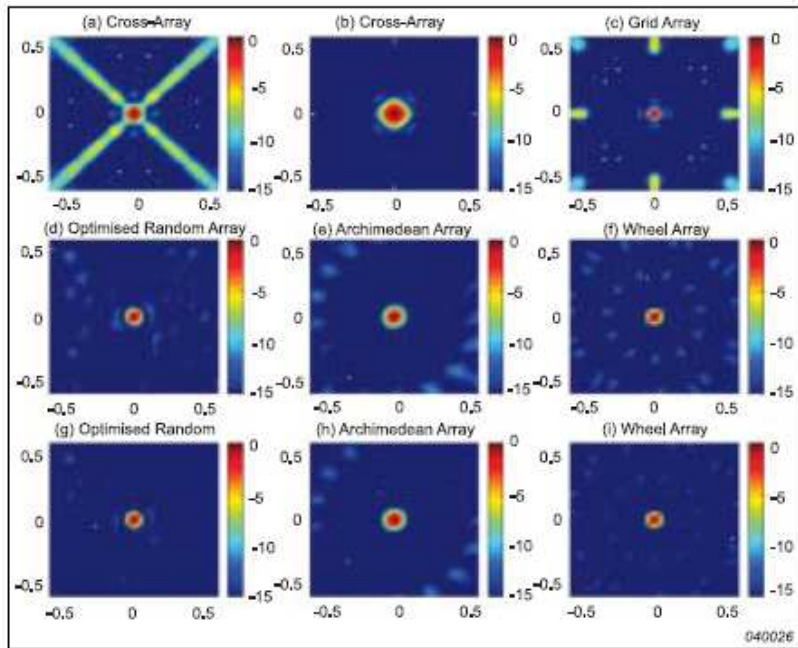


Fig. n°1.26 : Simulation des réponses, à une fréquence de 5000 Hz, de différentes géométries d'antenne à une source placée face au centre de l'antenne (a) antenne en croix additive, (b) antenne en croix multiplicative avec un fenêtrage Hanning, (c) antenne grille complète en traitement « additif » (d) antenne placement optimisé « aléatoire » en traitement additif, (e) antenne spirale en traitement additif, (f) antenne B&K en traitement additif, (g) antenne placement optimisé « aléatoire » en traitement multiplicatif, (h) antenne spirale en traitement multiplicatif, (i) antenne B&K en traitement multiplicatif [99].

Géométrie antenne	Dynamique de mesure à 5000Hz
Antenne en croix classique traitement additif	-5 dB
Antenne placement « aléatoire » non optimisée	-9 dB
Antenne placement « aléatoire » optimisée	-11 dB
Antenne spirale	-8 dB
Antenne B&K	-13 dB
Antenne demi-sphère	-15 dB

Tableau n°1.2 : Comparaison de la dynamique de mesure à 5000 Hz pour différentes géométries d'antenne.

L'ONERA travaille depuis plusieurs années sur une antenne en forme de croix avec un traitement optimisé et possède donc une expertise importante sur ce type d'antenne [94-97,106-110]. Elle présente aussi l'avantage d'être compacte ce qui est important lorsqu'un moyen d'essai doit être utilisé dans un milieu confiné. De plus, la faible expansion des capteurs permet d'avoir une cohérence correcte entre tous les capteurs malgré le caractère potentiellement réverbérant du milieu.

Le traitement du signal associé à celle-ci a fait l'objet d'amélioration et d'optimisation de performances [98]. En effet, le traitement « standard » d'une antenne en forme de croix possède des performances dégradées par rapport à une antenne complète de microphones (notamment au niveau de la dynamique de mesure (cf. fig. n°1.26)). La dynamique de mesure est définie comme le rapport entre le lobe principal et le second lobe. Ainsi, par exemple, pour une excitation et une position de source identiques, l'amplitude obtenue pour le second lobe, pour une antenne carrée pleine, est de 0,06 (soit une dynamique de mesure de 13 dB) alors que, pour l'antenne en croix standard, le second lobe a une amplitude de 0,23 (soit une dynamique de mesure de 7dB) [93].

- a) Traitement de l'antenne en croix et présentation de la méthode développée par Elias [97].

On suppose que :

- les sources sont dans la région de Fresnel de l'antenne. Le champ incident est alors modélisé par une somme de monopôles.
- l'antenne a une forme de croix et se compose de 2 bras A et B muni chacun de N microphones aux positions \vec{r}_n , où n représente le microphone n de l'antenne.

Le vecteur de focalisation \mathbf{U} , représentant une pression rayonnée sur l'antenne par un monopôle d'amplitude unitaire placé en \vec{R}_S , de nombre d'onde k donné, s'écrit :

$$U_n = \frac{e^{ik|\vec{R}_S - \vec{r}_n|}}{|\vec{R}_S - \vec{r}_n|}$$

La matrice interspectrale $\mathbf{\Gamma}$ est définie ainsi : $\mathbf{\Gamma} = \langle \mathbf{P}\mathbf{P}^* \rangle$ où \mathbf{P} est la matrice unicolonne des pressions mesurées sur l'antenne. La fonction de localisation s'exprime alors de la façon suivante (cf. 1.4.1) :

$$\gamma^2 = \frac{\mathbf{U}^+ \mathbf{\Gamma} \mathbf{U}}{\|\mathbf{U}\|^2 \text{Tr}(\mathbf{\Gamma})}$$

Où :

- $^+$ est la transposée conjuguée.
- Tr est la trace de la matrice.

Vue la faiblesse des performances de ce type d'antenne, Elias [97] a développé et introduit un nouveau type de traitement du signal consistant à diviser la matrice unicolonne \mathbf{U} en 2 parties, \mathbf{U}_A et \mathbf{U}_B , respectivement les matrices relatives au bras A et B de l'antenne.

L'idée proposée par Elias est d'effectuer le produit plutôt que la somme des contributions des deux bras pour améliorer la réponse de l'antenne en croix. Une nouvelle matrice interspectrale est calculée en ne considérant que les couples de microphones se trouvant sur des bras différents, soit en annulant Γ_{AA} et Γ_{BB} , comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A^+ \\ \mathbf{U}_B^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_{AA} & \Gamma_{AB} \\ \Gamma_{AB}^+ & \Gamma_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_A^+ \\ \mathbf{U}_B^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \Gamma_{AB} \\ \Gamma_{AB}^+ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \end{bmatrix}$$

La fonction de localisation est alors déterminée par la formulation suivante :

$$J(F) = \frac{\left| \sum_{(i,j) \in \Omega} U_i^+ \Gamma_{ij} U_j \right|}{\sum_{i \in R} \Gamma_{ii} \left(\frac{1}{\sum_{i \in R} |U_i|^2} \right) \sum_{i \in A} |U_i|^2 \sum_{j \in B} |U_j|^2}$$

Cette nouvelle fonction vérifie bien les mêmes conditions que dans le cas standard (fonction maximum et égale à 1 quand le point de focalisation passe par la position de la source) permet d'obtenir des performances d'antenne proche de celle d'une antenne complète

[94], autorisant ainsi une augmentation de la surface de mesure tout en gardant un nombre acceptable de microphones.

La simulation suivante (cf. fig. n° 1.27 et 1.28) montre l'amélioration des performances de l'antenne en croix avec le traitement présenté ci-dessus. Une source monopolaire placée à l'origine (0;0;0) émet à une fréquence de 2400 Hz. Le plan de focalisation est choisi à 25 cm du plan de la source.

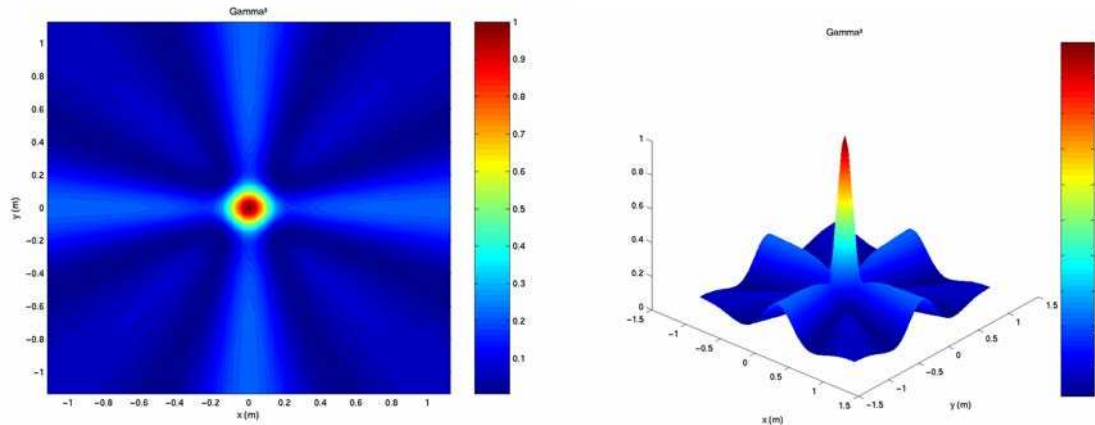


Fig. 1.27 : Fonction de localisation calculée avec matrice interspectrale complète [109].

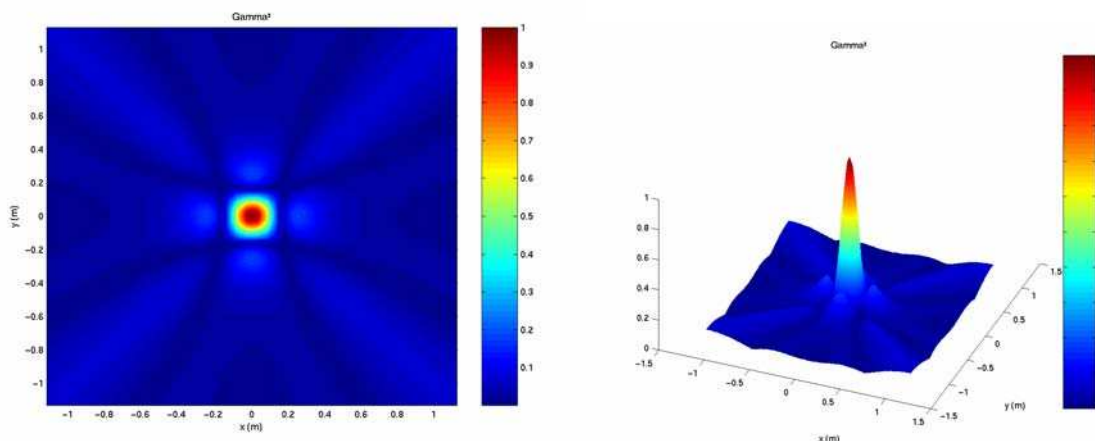


Fig. 1.28 : Fonction de localisation calculée avec matrice interspectrale incomplète [109].

On remarque que les amplitudes des pics secondaires de la fonction de focalisation sont beaucoup moins prononcées (cf. tableau n°1.3) et étendues avec la matrice interspectrale incomplète [97,111], améliorant ainsi la dynamique de mesure (rapport entre le niveau du pic central et du premier lobe secondaire).

	Méthode classique	Méthode Elias
<i>Dynamique de mesure Sans apodisation</i>	-7 dB	-13 dB

Tableau n°1.3 : Comparaison des dynamiques de mesure avec la méthode classique et Elias à une fréquence de 5000Hz.

Il est également possible d'introduire un filtrage spatial [109] en introduisant une pondération A_i (triangulaire, Hanning, Hamming ou Blackman) à la pression mesurée sur le microphone i , dépendant de sa distance d_i au centre du réseau et de la distance maximale

constatée. Cette pondération permet de réduire l'influence des lobes secondaires. Au final, cela consiste à remplacer :

- Γ_{ij} par $\Gamma_{ij} A_i A_j$.
- U_i par $U_i A_i$.

Les performances obtenues avec l'antenne en croix et un traitement du type Elias sont donc comparables avec celles observées en figure n°1.26.

b) Reconstruction du champ de pression par antennerie.

Dans le cas où seule une source monopolaire produit le champ de pression propagé, Elias [107,111-115] et d'autres auteurs [117] proposent également de déduire l'amplitude de la source par des processus de minimisation d'erreur.

Ainsi, la méthode la plus commune, après avoir identifié la position de la source (située au maximum de la fonction de localisation), s'appuie sur le calcul de l'amplitude a en minimisant l'erreur E tel que : $E = \|P - aU\|^2$ ce qui revient finalement à annuler sa dérivée :

$\frac{\partial E}{\partial a} = U^+(P - aU) = 0$ où a et a^* constituent une base de décomposition. L'amplitude peut alors s'écrire ainsi :

$$a = \frac{U^+ P}{\|U\|^2}$$

Ce type de processus peut aisément être étendu à n monopôles identifiés en n positions.

c) Cécité de l'antenne.

Lors du traitement des données, l'antenne n'arrive pas à différencier le côté d'émission de la source. Autrement dit, en supposant qu'il existe deux sources identiques placés de part et d'autre de l'antenne à égale distance (cf. fig. n°1.29), l'antenne localise les 2 sources avec un même niveau de cohérence.

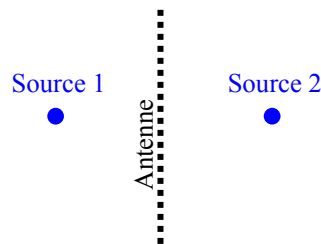


Fig. n°1.29 : Cas où l'antenne est « aveugle » au côté d'émission de la source.

Ainsi, dans le cas d'un milieu confiné, cette propriété de l'antenne risque d'être pénalisante car il est envisageable dans ce type de milieu qu'une source perturbatrice puisse émettre d'une paroi arrière et ainsi gêner la localisation.

1.4.4 Utilisation de l'antennerie en milieu confiné.

La problématique de la détection de sources acoustiques en milieu confiné par le biais d'antennes est récente : l'essentiel des travaux a été réalisé dans les cinq dernières années. Les solutions proposées sont souvent spécifiques à la problématique du laboratoire (notamment les solutions adaptées aux appareils auditifs ou encore au cas des ondes planes [122]).

Néanmoins, quelques travaux plus généraux sur la localisation de sources en milieu réverbérant peuvent être trouvés. En effet, l'utilisation courante de ces outils dans des chambres assourdis (sol rigide et murs traités acoustiquement) ou des veines de soufflerie nécessitent de prendre en compte la réflexion existant respectivement sur le sol ou sur le mur en face. Ainsi, dans [101,123,124], la taille de l'antenne est virtuellement doublée par le principe de réciprocité (cf. fig. n°1.30) afin d'améliorer la résolution et ensuite un algorithme développé par Guidati [123] est utilisé afin de séparer la source réelle et la source image. L'idée de cet algorithme est de modifier le vecteur de focalisation pour qu'il prenne en compte les réflexions.

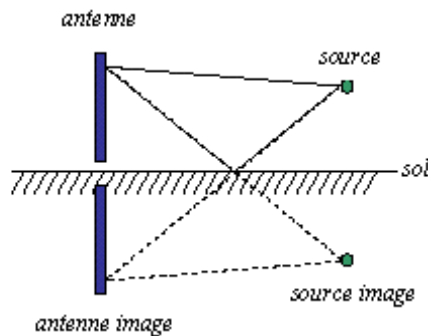


Fig. n°1.30 : Source et antenne « image » en présence d'une surface réfléchissante [100].

Par contre, cette méthode présente deux inconvénients majeurs [101] :

- le principe est mis en défaut si la surface n'est pas purement réfléchissante.
- la répartition des microphones issue de l'antenne réelle et virtuelle peut devenir non optimale (dans le cas des antennes aléatoires) ce qui implique la possibilité de voir apparaître des sources virtuelles.

Dans le cas de cette étude, le milieu étudié est réverbérant dans les 3 directions, les coefficients de réflexions ne sont pas toujours égaux à 1 (notamment en présence de l'habillage de la cabine) et celui-ci est beaucoup plus confiné.

De même, les auteurs de [125] se proposent de déterminer, à une position précise, via un traitement d'antennerie dans le domaine temporel, les directions angulaires fournissant les principales contributions participant au niveau sonore global en ce point. Cette technique est ainsi utilisée dans un milieu réverbérant tel que des ateliers où de nombreuses machines fonctionnent et ne peuvent pas être stoppées. L'utilisation de cette technique permet ainsi de comprendre en un point les contributions de chaque direction au niveau global, puisque chaque direction « source » détectée correspond soit à une source en incidence directe soit à leurs sources images (réflexion sur les sols et murs).

L'antenne utilisée se compose de 13 microphones disposée sur une sphère (cf. fig. n°1.31 a). Dans la figure n°1.31 b, une des expérimentations menées est présentée : une source et l'antenne sont placées en chambre anéchoïque (toutes les parois sont traitées sauf le sol) et un plan réfléchissant est placé à proximité de l'antenne. Ainsi, des réflexions sont

généérées sur le sol et le plan réfléchissant. Les résultats présentés montrent le type de cartographie obtenu via cette technique. Les directions trouvées sont identifiables aux différents chemins possibles de l'onde : onde directe (Point 1), onde réfléchi sur le sol (Point 2), onde réfléchi sur le plan réfléchissant (Point 3), onde réfléchi sur le sol puis sur le plan réfléchissant (Point 4).

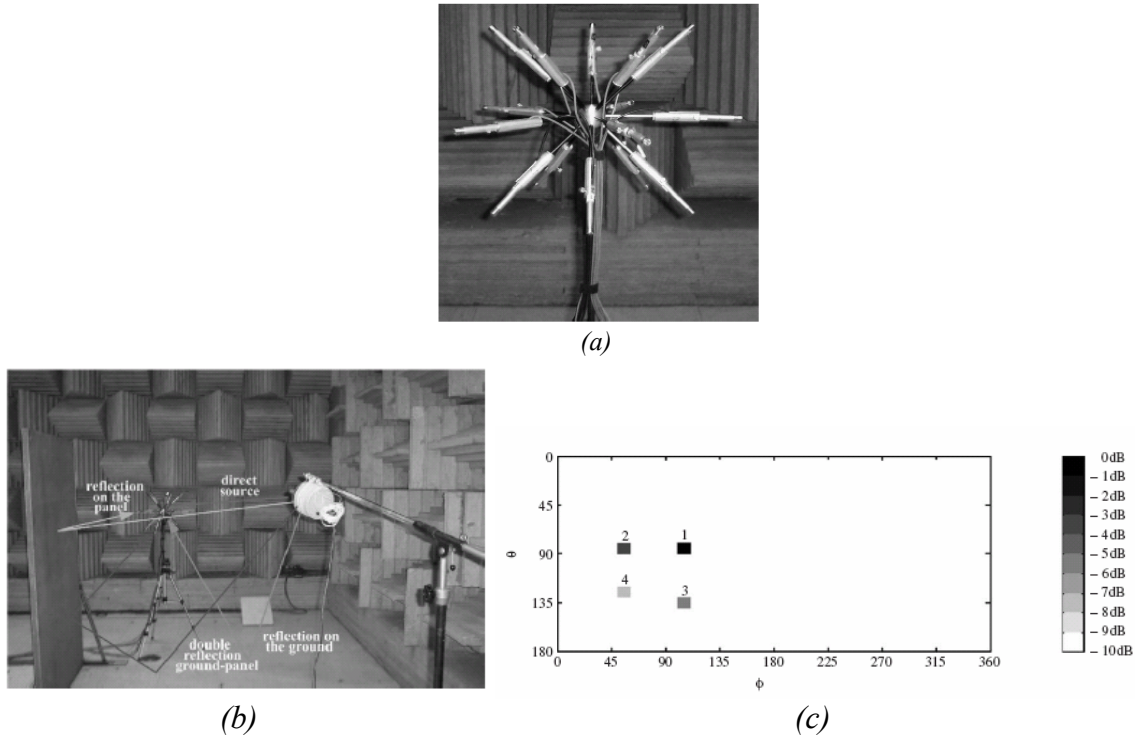


Fig. n°1.31 : (a) Antenne sphérique utilisée, (b) Expérimentation menée en chambre sourde, (c) Exemple d'un résultat obtenu pour cette même expérimentation [125].

Dans le cadre de cette thèse, cette solution ne paraît pas envisageable car elle se base sur une hypothèse d'ondes planes, hypothèse inadaptée au cas d'une cabine d'hélicoptère (pas de position de source identifiée). La configuration testée à 2 parois réfléchissantes ainsi que la précision angulaire (10°) ne sont pas suffisantes pour représenter la complexité de l'environnement cabine. Par contre, il serait intéressant d'utiliser cette antenne au niveau de la tête des passagers ou des pilotes pour appréhender les gênes acoustiques rencontrées par les utilisateurs de l'hélicoptère.

Une autre solution [126], actuellement en développement (2006), se base sur un algorithme statistique optimisé SOAP (Statistically Optimal Array Processing) qui vise à améliorer les performances de l'antenne en basses fréquences et sur l'utilisation d'une double antenne (2 antennes de microphones positionnées sur 2 plans parallèles ou une antenne composée de microphones et l'autre de capteurs de vitesses particulières). Ainsi, grâce à celle-ci, la vitesse acoustique (via l'équation d'Euler) peut être calculée et donc l'intensité aussi. En outre, par le biais de l'utilisation d'estimateurs de puissance, les sources émettant en face de l'antenne de celle émettant dans le dos de l'antenne peuvent être maintenant différenciées.

Cette technique nécessite donc une instrumentation plus importante (2 fois plus de capteurs que pour l'antennerie normale) ou une prise de mesure en deux fois consécutives avec la présence d'un microphone de référence pour avoir l'information de phase. D'autre part, dans le cas de l'utilisation d'une double antenne complète, la question de la diffraction des antennes peut se poser et n'est pas abordée dans cet article.

Un autre cas intéressant a été réalisé dans l'habitacle d'une voiture [127]. Une antenne carrée composée de 8x8 microphones espacés de 10 cm et placée à 45 cm de la porte passager est utilisée pour localiser les fuites acoustiques pendant que la voiture roule. Pour réduire les réflexions, quelques plaques de mousse absorbante sont disposées dans l'habitacle, plus particulièrement derrière l'antenne (cf. fig. n°1.32) pour pallier à la non-différenciation des sources potentielles par l'antenne entre l'arrière et l'avant.

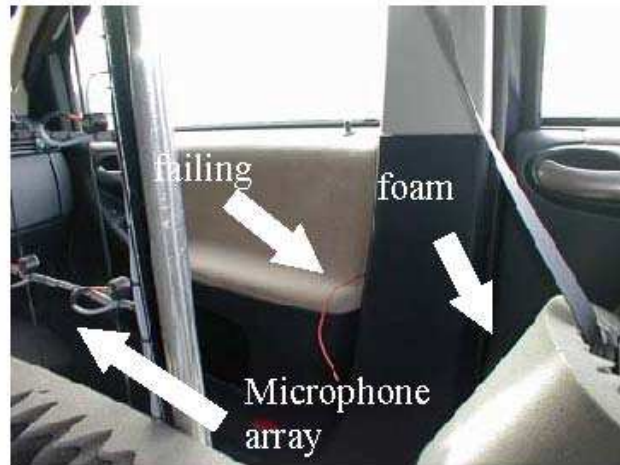


Fig. n°1.32 : Dispositif expérimental dans l'habitacle de voiture [127].

Un câble peut être introduit lors de la fermeture de la porte ce qui engendre une mauvaise fermeture et donc une fuite acoustique au niveau du câble. Deux configurations sont ainsi comparées : l'une sans le câble et l'autre avec le câble. Pour valider l'expérimentation, un système ultrasonore a été placé afin de détecter les fuites acoustiques le long de la fermeture de la portière. Les résultats obtenus sont concluants puisque le défaut est parfaitement localisé. Ces résultats sont très intéressants mais à tempérer car l'habitacle de la voiture a été habillé avec de la mousse absorbante supplémentaire pour réduire les réflexions existant dans l'habitacle.

1.5 Résumé des solutions sélectionnées.

Au final, deux solutions sont retenues : l'holographie (via la méthode STSF) et l'antennerie acoustique. Toutefois, une troisième solution est mise en œuvre : l'intensimétrie. Cette méthode de localisation, bien que peu adaptée au cadre d'essais en vol, sert, dans le cadre de cette étude, de moyen de localisation de référence. En effet, elle est connue et maîtrisée depuis de nombreuses années et elle reste valable en milieu confiné. D'autre part, des comparaisons avec des résultats obtenus par intensimétrie de structure [16,128] seront réalisées.

	<i>Intensimétrie</i>	<i>Holographie</i>	<i>Antennerie</i>
<i>Avantages</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution relativement élevée (dépendant du maillage). - Méthode peu coûteuse. - Large gamme de fréquence. - Informations sur le champ acoustique étudié (direction, puissance,...). 	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution élevée. - Informations rapides sur le champ acoustique (pression, vitesse, intensité, etc...). 	<ul style="list-style-type: none"> - Acquisition rapide. - Détection possible au-delà du cadre physique de l'antenne. - Robuste vis-à-vis des capteurs utilisés (phase). - Outil compact. - Données quantitatives avec adaptations.
<i>Inconvénients</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Acquisition très longue (point par point). 	<ul style="list-style-type: none"> - Acquisition longue. - Nécessite l'utilisation de microphones de référence. - Reconstruction impossible en dehors du cadre physique de la grille. - Sources supposées stationnaires. - Nombreux filtrages nécessaires. - Sensibilité importante aux capteurs (phase). - Hypothèse de champ libre 	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution faible en basses fréquences. - Privilégie les sources compactes aux sources étendues. - Non différenciation entre source à l'avant ou à l'arrière. - Hypothèse de champ libre

Tableau n°1.4 : Avantages et inconvénients qualitatifs de chaque méthode.

Au vue de cette étude bibliographique, on remarque que, bien que moins résolutive (cf. tableau n°1.5), l'antennerie requiert une mise en œuvre moins contraignante que l'holographie (ou l'intensimétrie) et les risques d'erreurs sont plus faibles (déphasage intrinsèque des capteurs, erreur de positionnement engendrant des déphasages factices...). De plus, la technique de focalisation permet de viser des domaines étendus, à partir de grilles de faible surface, en une seule acquisition, contrairement à l'holographie qui suppose un déplacement de la grille de mesure pour couvrir une surface "source" équivalente. L'antennerie possède également la particularité de pouvoir identifier des sources situées sur une surface quelconque.

Toutefois, l'antennerie privilégie les sources compactes aux sources étendues et elle possède une résolution inférieure à celle de l'holographie.

De même, lors de la réalisation de mesures, elle ne peut fournir immédiatement qu'une estimation du carré de l'amplitude de la source monopolaire grâce à la relation suivante :

$$\gamma^2 = \frac{U^+ \Gamma U}{|U^+ U|^2}$$

est nécessaire d'utiliser des méthodes inverses entraînant des calculs supplémentaires.

D'autre part, malgré les quelques essais en milieu confiné menés récemment à l'aide des deux méthodes, les résultats obtenus et les solutions proposées ne sont pas généralisables à n'importe quel environnement et n'importe quelle condition d'essai. Seule l'holographie couplée à la BEM est utilisable de manière universelle mais cette technique n'est pas envisageable dans le cadre de cette thèse vu le domaine de fréquence étudié (cf. paragraphe 1.2.5 b).

Dans tous les autres cas, ces deux techniques présentent un défaut commun : elles se basent sur une hypothèse de champ libre, il est donc nécessaire d'adapter le traitement ou l'environnement pour que ces méthodes restent valables.

<i>Performances</i>	Holographie	Antennerie	Intensité
<i>Pouvoir de résolution</i>	$R = \frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 + \left(\frac{D \ln(10)}{20(z_H - z_S)}\right)^2}}$	0,38λ	Dépend du maillage
<i>Précision position et amplitude</i>	Cf. chapitre 2	Cf. chapitre 2	<u>Position</u> : Dépend du maillage. <u>Amplitude</u> : Dépend de la sonde.
<i>Gamme de fréquence</i>	<u>Basses fréquences</u> : $L \geq \lambda_{\max} \Leftrightarrow f_{\min} = \frac{c}{L}$ <u>Hautes fréquences</u> : $f_{\max} = \frac{c}{2d}$	<u>Basses fréquences</u> : $L \geq \lambda_{\max} \Leftrightarrow f_{\min} = \frac{c}{L}$ <u>Hautes fréquences</u> : $f_{\max} = \frac{c}{2d}$	<u>Basses fréquences</u> : 5xdéphasage microphones <u>Hautes fréquences</u> : Dépend espacement entre les 2 micros.
<i>Temps de mesure</i>	Panneau 1m ² et antenne 8 microphones : 1h [130]	Panneau 1m ² et antenne 8+8 microphones : 2min	Panneau 1m ² et 1 sonde : 3h [130]
<i>Hypothèse propagation</i>	Fonction de Green	Monopole + fonction de Green	Fonction de Green (BAHIM)
<i>Reconstruction possible à l'ext. du champ physique de l'antenne</i>	Non	Oui	Non
<i>Précaution d'usage</i>	Ecart de 10 à 20 dB entre le niveau sur le bord de la grille et le maximum constaté	Cécité de l'antenne à prendre en compte en particulier dans un milieu confiné	Champ proche
<i>Sensibilité aux déphasages des voies de mesure</i>	Grande	Faible	Micro. appariés
<i>Filtrage</i>	Zero-padding, Veronesi, Nouals (obligatoire)	Apodisation (non obligatoire)	Aucun

Tableau n°1.5 : Les différentes performances importantes de l'antennerie, de l'holographie et de l'intensimétrie.

Toute la problématique de cette thèse va donc s'axer autour de la sensibilité de chaque méthode à cette hypothèse et de la possibilité de s'en affranchir en proposant des solutions viables dans le cadre de l'utilisation visée.

CHAPITRE 2.

Création d'un outil de simulation et d'exploitation des données de mesures : étude paramétrique de sensibilité et de performances.

Un choix de techniques ayant été effectué à l'issue de l'étude bibliographique, l'objet du chapitre ci-dessous est de décrire l'étape d'évaluation de ces techniques à partir d'un outil de simulation et d'exploitation des résultats de mesure créé lors de cette thèse (cf. fig. n°2.1). Le développement de ce dernier a pour but :

- Dans un premier temps : De réaliser une étude paramétrique pour comprendre le comportement de chaque méthode, pour valider le code par comparaison avec des résultats publiés dans la littérature et pour optimiser le dimensionnement et le placement des moyens de mesure.
- Dans un second temps : De fournir un logiciel de simulation capable d'aider au dimensionnement d'un outil de mesures (holographie et antennerie) prenant en compte le caractère confiné de l'environnement de mesure. Cette partie sera développée et validée avec les expérimentations réalisées dans le cas confiné, et en recoupant les résultats obtenus via le logiciel créé et un logiciel de type éléments finis (I-deas).

CHOIX
METHODE

HOLOGRAPHIE / ANTENNERIE / INTENSIMÉTRIE

DONNEES
D'ENTREE

MESURE : Importation des données des signaux microphoniques et des positions de la grille.

OU

SIMULATION : Définition des sources (nature, position, fréquence, amplitude) et de la grille utilisée.

CHOIX
TRAITEMENT

TRAITEMENT DU SIGNAL : Type de filtrage utilisé, méthode de résolution, apodisation ou non.

DONNEES DE
SORTIE

TRACE DES COURBES : Tracé des courbes caractéristiques de chaque méthode, étude paramétrique de sensibilité et de performances potentielles.

Fig. n°2.1 : Structure du logiciel créé.

Afin et avant de pouvoir réaliser l'étude paramétrique, il a été nécessaire de créer de toute pièce un outil de simulation et d'exploitation des données de mesures pour l'holographie, l'antennerie et l'intensimétrie. Cet outil a été réalisé sous une interface Fortran/Matlab : les programmes développés sous le logiciel Matlab servent essentiellement pour la partie ergonomique de l'outil logiciel et pour l'affichage des courbes tandis que la partie « calcul » est effectuée par des programmes conçus sous Fortran.

Ainsi, afin d'être le plus complet possible et de pouvoir réaliser une étude paramétrique complète, de nombreux paramètres peuvent être intégrés en entrée de l'outil logiciel créé tels que : dimensionnement de la grille de microphones (nombre, espacement, distance entre le plan de mesure et le plan source), positionnement et nombre de microphones de référence dans le cas de l'holographie, caractéristiques des microphones (parfait ou intégrant les différences de phases existant entre chacun d'eux), sources utilisées (nombre, positionnement, amplitude, fréquence d'émission supposée pure, corrélées ou non), filtrages utilisés, les conditions de mesure (température,...).

De même, dans un premier temps, les codes ont été réalisés en se basant sur l'utilisation de la fonction de Green en espace libre et sur l'utilisation d'ondes sphériques. Dans le cas de l'antennerie, les sources sont supposées monopolaires.

Dans un second temps, de nouvelles implémentations seront apportées au logiciel afin de pouvoir réaliser des simulations dans les environnements rencontrés lors des phases de mesures et ainsi de tester les propositions d'améliorations. Ces dernières seront traitées dans le chapitre 3.

Par la suite, de nouveaux programmes ont également été créés afin de pouvoir exploiter les mesures acquises par le boîtier d'acquisition lors de mesures de type antennerie, holographie à références multiples et intensimétrie. La validation de ces programmes appliqués aux exploitations des mesures est traitée dans l'annexe n°3.

Le choix de développer complètement tous les codes de calculs (simulations et traitement des données) a pour but de pouvoir accéder facilement aux codes, de comprendre et connaître les traitements des données et ainsi pouvoir modifier les programmes et les traitements de manière ciblée.

Ainsi, aucun outil ou code du commerce n'a été utilisé afin de pouvoir maîtriser le processus de traitement dans sa totalité. L'architecture principale du logiciel créé lors de cette thèse est décrit en annexe n°1.

Par la suite, ce logiciel de simulation et d'exploitation des mesures créé sera nommé Imagerie.

Pour conclure, ce chapitre vise à répondre aux questions suivantes : quelle(s) dimension(s) donner aux systèmes de mesures (antennerie, holographie) ? Une fois dimensionnées, quelles sont les précautions d'usage à prendre et les performances de ces méthodes ?

2.1 Préliminaires à l'étude paramétrique.

A l'aide de l'étude bibliographique et afin de se concentrer sur l'étude des paramètres les plus pertinents, certains critères sont fixés au préalable.

2.1.1 Domaine fréquentiel d'étude.

D'après l'étude bibliographique, l'espacement entre capteurs et leur nombre conditionnent la gamme fréquentielle d'étude (1000 – 5000 Hz souhaitée par Eurocopter). En effet, en se référant au paragraphe 1.2.2 c) et au paragraphe 1.4.3 c), la fréquence maximale d'étude est définie telle que :

$$f_{\max} = \frac{c}{2d}$$

Pour une fréquence $f = 5000$ Hz, un espacement entre capteurs de 3,4 cm est nécessaire. Mais, afin de ne pas avoir une quantité trop importante de capteurs à utiliser, une distance inter-microphones de 4 cm semble être un bon compromis entre les impératifs fréquentiels et le nombre de microphones disponibles (16 microphones dans le cadre de cette étude).

Ainsi, la fréquence maximale d'étude est de 4250 Hz. Elle peut être supérieure dans le cas de l'antennerie selon la dimension du plan de focalisation défini (cf. paragraphe 1.4.2 c).

De même, il existe une limite basse fréquence liée à l'envergure L de la grille de mesure (antennerie et holographie) doit au moins être égale à la longueur d'onde acoustique la plus grande. Ainsi, pour une fréquence de 1000 Hz : $\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = 0.34 \text{ m} = L$.

Par conséquent, afin de respecter la gamme fréquentielle d'étude, les simulations seront réalisées avec des microphones espacés de 4 cm et une envergure minimale de grille de l'ordre 34 cm.

2.1.2 Le placement du capteur de référence.

Dans le cadre de la méthode holographique, il est nécessaire de disposer un microphone de référence donnant une vue la plus complète possible des sources : l'idéal étant que celui-ci soit sur la source. Toutefois, d'un point de vue pratique, il est souvent impossible de mettre le microphone de référence sur la source elle-même : position exacte de la source difficilement identifiable, positionnement sur la source techniquement impossible (coller un microphone sur la membrane d'un haut parleur, etc.). Dans le cadre des simulations qui suivent, par défaut, les microphones de référence donneront une vue des plus complètes des sources, et seront ainsi placés à 5 cm de chaque source simulée par défaut.

2.1.3 Distance de focalisation / rétropropagation.

D'un point de vue pratique, un facteur important doit être pris en compte avant de choisir la distance entre la grille de capteurs et le plan source : il faut éviter de placer la grille de microphones dans le champ proche des sources (ou domaine de Rayleigh : zone instable où selon le positionnement de la grille, les résultats sont complètement différents). La distance de Rayleigh déterminant la transition entre le champ proche et le champ lointain est définie pour un piston (représentatif d'un haut parleur) tel que : $R_{Ray.} = ka^2/2$ [129] avec a le rayon du piston (cf. fig. n°2.2). Cette distance devra être prise en compte lors du choix de la distance entre les outils de mesure et le plan source.

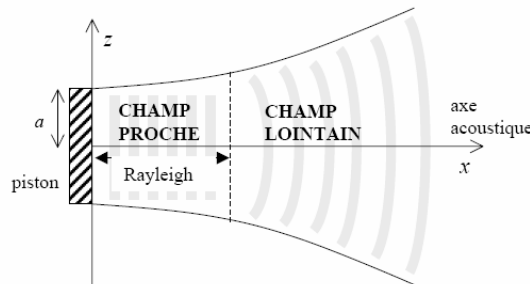


Fig. n°2.2 : Champ acoustique rayonné par un piston [129].

Pour l'holographie, la distance de rétropropagation par défaut est fixée à 8 cm. Cette distance est représentative de celle utilisée dans la plupart des expériences menées dans les articles étudiés, pour des tailles de grille proches à celle qui seront utilisées lors des prochaines expérimentations. L'holographie devant capter un maximum d'énergie rayonnée par la source, il faut donc l'utiliser au plus près des sources. Néanmoins, la distance entre la grille de microphones et le plan source ne doit pas être inférieure au pas d'échantillonnage de la grille [40] (imposé à 4 cm dans le cas des simulations).

Dans l'étude bibliographique sur l'antennerie, il est recommandé de placer l'antenne à une distance de l'ordre de l'envergure de l'antenne afin d'obtenir des performances optimales (dynamique de mesure et résolution) [95]. Or, dans le cas d'un habitacle de cabine d'hélicoptère, la présence d'obstacles et de sources parasites potentielles rentre en ligne de compte. Une distance de 30 cm, compromis entre ces deux exigences et représentative des dimensions restreintes d'une cabine d'hélicoptère et des obstacles présents, a donc été choisie. De plus, une telle distance de focalisation permet de s'éloigner de la zone de Rayleigh des sources.

2.2 Etude paramétrique sur l'holographie.

Le but de cette partie est de mettre en évidence l'influence sur les performances de l'holographie de différents paramètres tels que : la fréquence, la taille de la grille de mesure, la distance de rétropropagation, la position des microphones de référence et les déphasages pouvant exister sur les voies de mesure, afin de pouvoir dimensionner la grille de mesure, optimiser ses performances et identifier son positionnement optimal dans le cadre des futurs essais.

Les cercles blancs sur les figures suivantes représentent la position exacte de la source simulée. Un filtre de type Veronesi est utilisé par défaut, où, pour mémoire, k_{\max} est le maximum entre k_x et k_y (déterminé après la FFT spatiale bidimensionnelle, ce maximum est dépendant du nombre de points de la grille complète). Les sources utilisées sont supposées décorrélées.

2.2.1 Influence de la fréquence d'étude sur la réponse de l'holographie.

Un premier cas simple est étudié : une source large bande (500 – 5000 Hz), placée en (0;0;0) face au centre de la grille composée de 16x16 microphones, séparés entre eux d'une distance d de 4 cm. La grille de mesure est placée à 8 cm du plan source. Le microphone de référence est placé à 5 cm de la source en (0,05;0;0).

La grille utilisée dans le calcul se compose de 40x40 points : des zéros sont ajoutés autour des points de mesures pour permettre de repousser les sources virtuelles (le « zero-padding »).

Les champs de pression reconstruits (en dB) sont présentés sur la figure n°2.3 aux fréquences 500, 1000, 1500 et 2000 Hz.

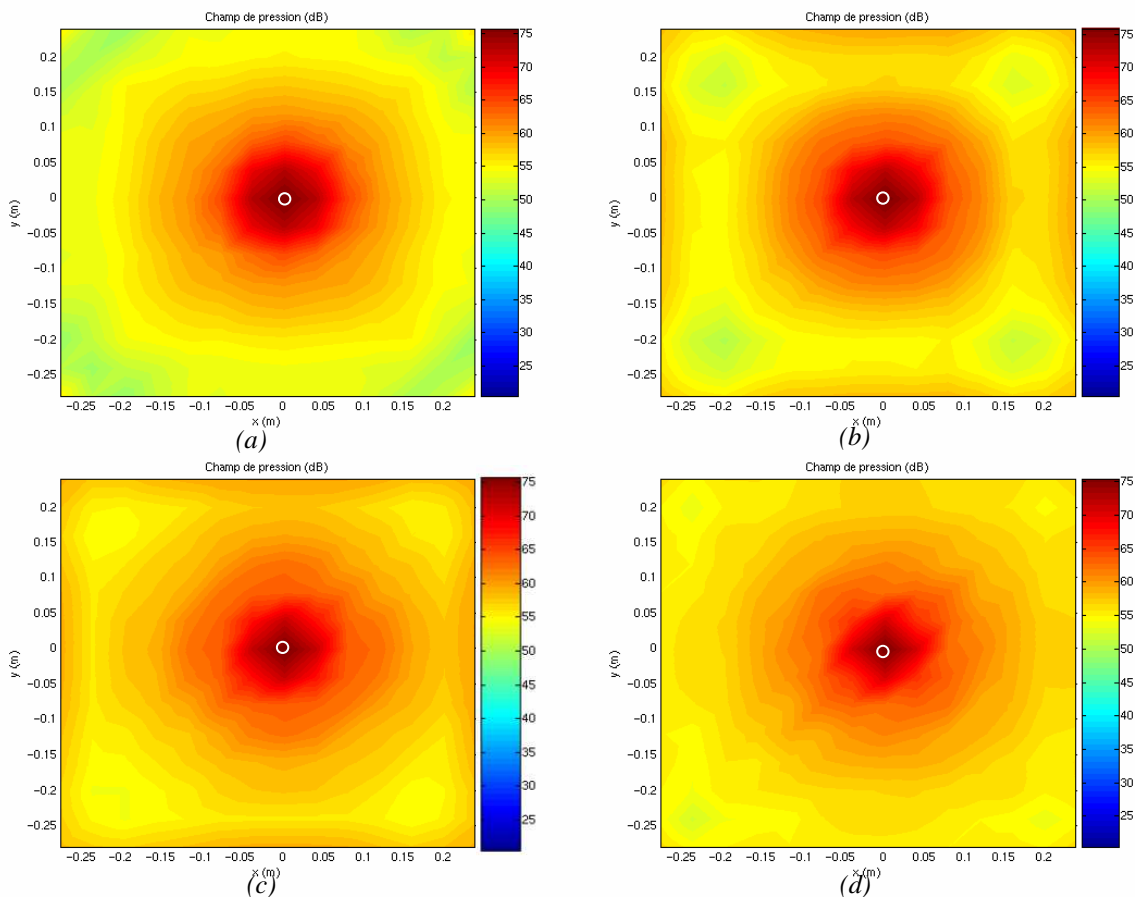


Fig. n°2.3 : Champ de pression (dB) rétropropagé dans le plan source aux fréquences $k_c=0.6k_{\max}$:
 (a) $f=500$ Hz, (b) $f=1000$ Hz, (c) $f=1500$ Hz, (d) $f=2000$ Hz.

Ainsi, quelle que soit la fréquence d'étude, la localisation de la source est exacte à ± 2 cm (cf. paragraphe 2.2.2). Le caractère monopolaire de la source simulée est également

vérifié. En effet, des cercles concentriques ayant pour centre la source (cf. fig. n°2.3) et la décroissance de 6 dB quand on double la distance (cf. fig. n°2.4), sont bien observés. Ces cercles concentriques ne sont présents que sur une zone plus limitée autour de la source à partir de 2000 Hz, ceci s'explique par l'action du filtrage qui devient de plus en plus sélectif en montant en fréquence (la fréquence de coupure du filtre de Veronesi est dépendante de la fréquence via le nombre d'onde).

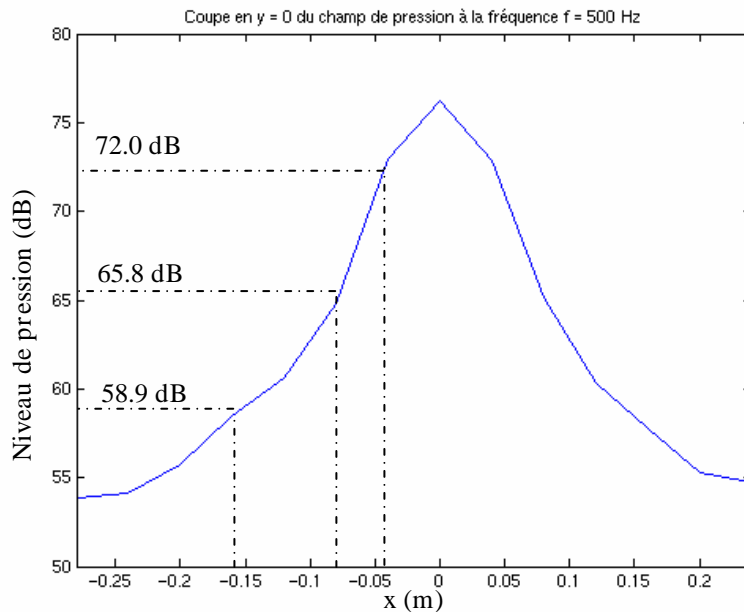


Fig. n°2.4 : Coupe du champ de pression en $y=0$, à $f = 500$ Hz.

La nature large bande de l'excitation est également retrouvée : quelle que soit la fréquence, un niveau de source identique égal à 76 dB est reconstruit (cf. fig. n°2.3 et 2.5). Toutefois, une légère diminution du niveau de pression reconstruit à partir 2500 Hz est constatée : 73.7 dB au lieu de 76.2 dB (cf. fig. n°2.5). Cette sous estimation observée est due au filtrage de Veronesi qui filtre de plus en plus, en montant en fréquence, les ondes évanescentes porteuses d'une part de l'énergie de la source.

Par contre, il apparaît que la résolution de l'holographie est extrêmement peu sensible à l'augmentation de la fréquence comme le graphe de la figure n°2.5 le montre (entre 500 et 2000 Hz, les courbes sont quasiment confondues), conformément à la théorie [36,40,41] (cf. paragraphe 1.2.2 d)). De même, en translatant la courbe à $f = 2500$ Hz au niveau des autres courbes, la courbe serait confondue avec les autres.

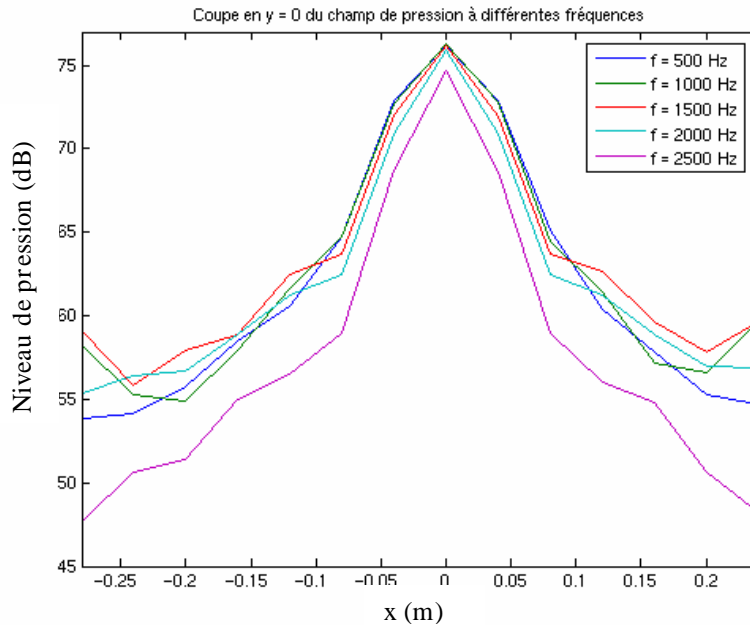


Fig. n°2.5 : Coupe du champ de pression (dB) en $y=0$, à différentes fréquences $f = 500, 1000, 1500, 2000$ et 2500 Hz

Ainsi, dans la suite de cette étude paramétrique, les résultats seront présentés à une fréquence f fixée à 2000 Hz (valeur comprise à l'intérieur de la gamme fréquentielle d'étude et valable quelle que soit l'envergure de la grille ou de l'antenne (cf. paragraphe 2.1.1)). Suite à ce qui vient d'être montré, il sera facile d'extrapoler aux autres fréquences les prochains résultats présentés à une fréquence donnée.

2.2.2 Précision sur le positionnement des sources de la méthode holographique.

Afin de pouvoir déterminer la précision de la méthode holographique, une série de simulation a été menée : une source est déplacée dans le plan source de 1cm sur l'axe x entre 2 positions de microphones.

Ainsi, par exemple, un des microphones de la grille est positionné en (0;0;0,08) et le suivant en (0,04;0;0,08). La source est alors placée en (0;0;0) puis est translatée de 1cm suivant x.

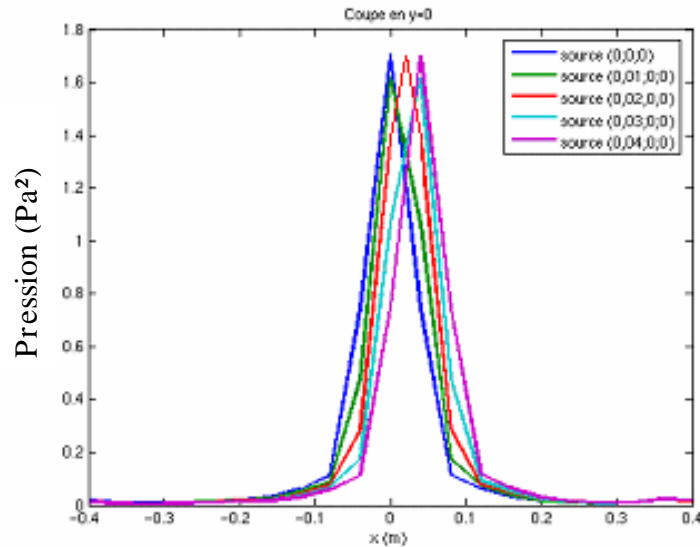


Fig. n°2.6 : Coupe du champ de pression (dB) en $y=0$, pour différentes positions de sources comprise entre 2 positions de microphones

La figure n°2.6 met en évidence la précision de la méthode. En effet, si la source n'est pas placée en face d'un microphone, elle est positionnée sur la position du microphone le plus proche d'elle (cf. fig. n°2.6). De même, si la source est exactement entre 2 microphones, l'holographie répartit de manière égale l'énergie sur les 2 microphones et positionne la source sur les 2 microphones l'entourant (cf. fig. n°2.6).

Ainsi, en conclusion, dans le cas de microphones parfaitement appariés, l'holographie donne une précision sur la position de la source x à $\pm\Delta x/2$ (où Δx est le pas d'échantillonnage de la grille de microphones). Afin d'améliorer la précision de la méthode, il est nécessaire de diminuer l'espacement entre capteurs mais en parallèle le temps de mesure est augmenté, à nombre de capteurs fixes.

Un autre facteur important doit également être pris en compte : le pouvoir de résolution (capacité à distinguer deux sources proches) qui est limité par la géométrie de la grille et le type de filtrage utilisé pour la méthode holographique (cf. paragraphe 1.2.2 d).

2.2.3 Influence de la distance de rétropropagation.

Le même cas que précédemment est étudié. La grille de mesure est placée à plusieurs distances réalistes de rétropropagation $D_{plan-source}$ pour estimer l'impact de ce paramètre sur la reconstruction du champ de pression. Les calculs sont réalisés pour 5 distances grille – plan source différentes : 4 (valeur minimale égale au pas d'échantillonnage d), 8 (valeur généralement usitée dans les articles), 12 et 16 cm (cf. fig. n°2.7).

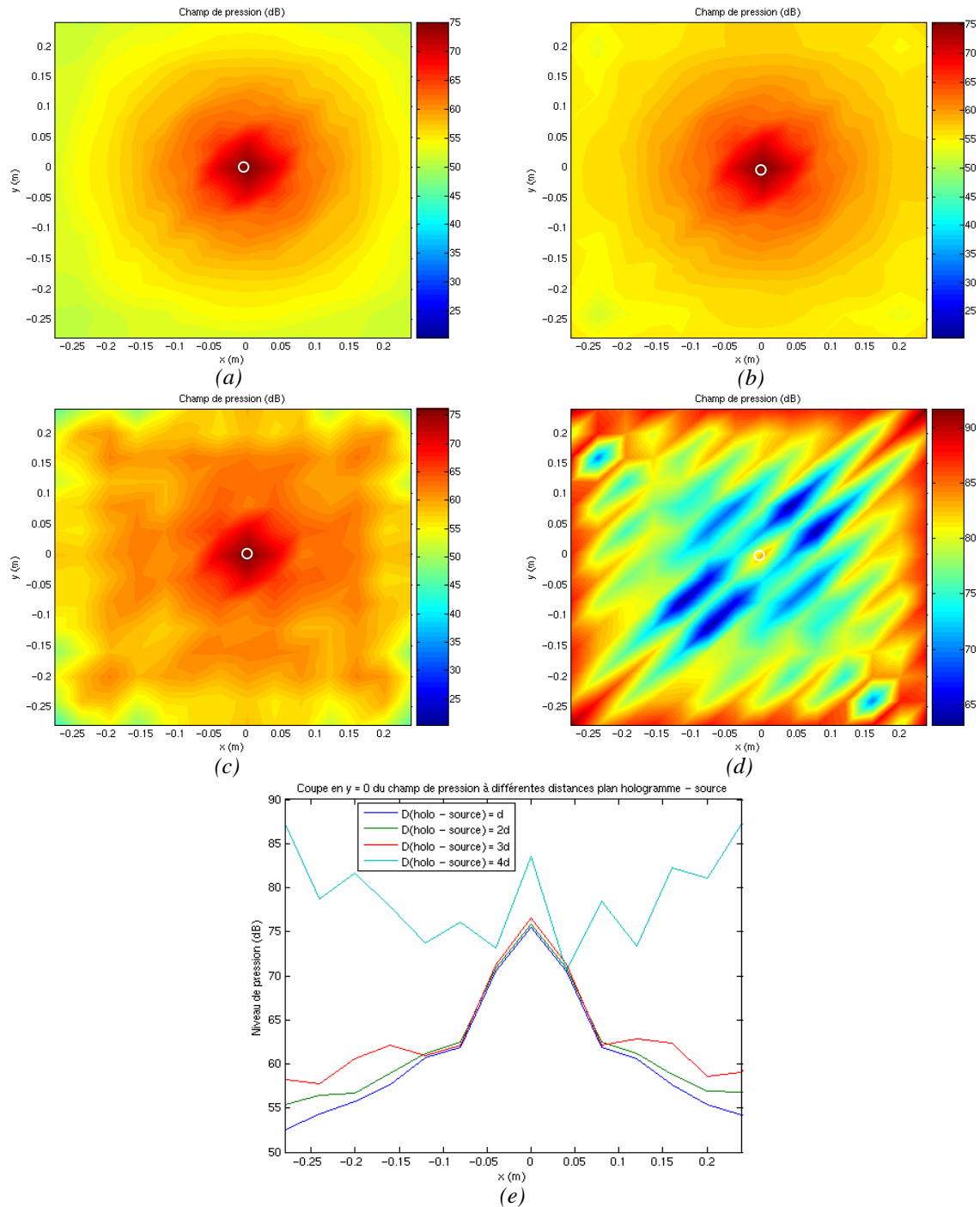


Fig. n°2.7 : Champ de pression (dB) rétropropagé, à une fréquence de 2000 Hz, dans le plan source avec $D_{\text{plan-source}}$ égale à : (a) d , (b) $2d$, (c) $3d$, (d) $4d$, et (e) Coupe en $y = 0$ du champ de pression pour les 4 distances plan – source.

En premier lieu, on constate que la source est détectée au bon endroit avec un niveau de pression constant et exact (76.2 dB) quelle que soit la distance inférieure ou égale à $3d$. Aussi, à paramètre constant, pour une distance comprise entre d et $2d$, les résultats sont relativement similaires (cf. fig. n°2.7 (e)), preuve que la grille capte un maximum d'énergie rayonnée par la source. Par contre, à partir d'une distance de l'ordre de $3d$, plus on s'éloigne de la source, plus le champ de pression est perturbé. En effet, le caractère monopolaire de la source est retrouvé seulement sur un espace restreint (sur un rayon de 6 cm autour de la source) et le niveau de pression aux bords de la grille devient significatif, si ce n'est élevé. Ainsi, à $4d$, l'amplitude de pression en périphérie devient plus importante qu'au niveau de la

source. Ceci s'explique par le fait que les ondes évanescentes ont pratiquement disparu (décroissance exponentielle suivant z) et que les distorsions liées à la troncature de l'hologramme se traduisent par des composantes à nombre d'onde élevé qui sont fortement amplifiées (cf. fig. n°2.8).

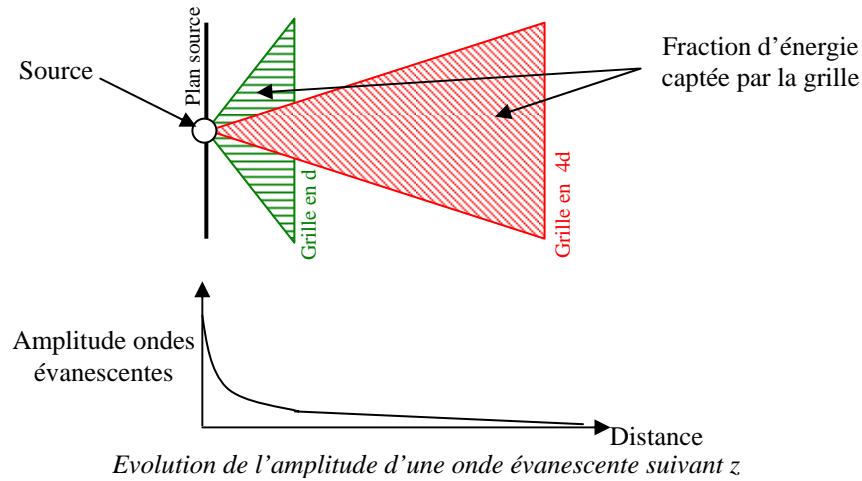


Fig. n°2.8 : Fraction d'énergie captée par une grille de microphones d'envergure constante placées à deux distances de rétropropagation différentes et exemple d'évolution de l'amplitude d'une onde évanescente en fonction de la distance.

Pour illustrer cette deuxième affirmation, une coupe sur la grille complète (incluant les zones (partie grisée) non couvertes par la grille de microphones) est effectuée en $y = 0$.

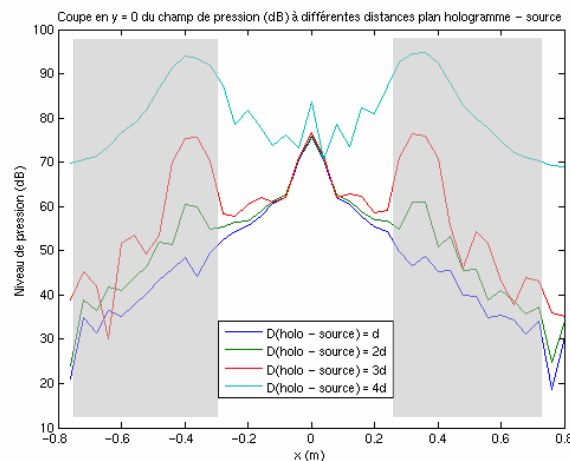


Fig. n°2.9 : Coupe du champ de pression (dB), à une fréquence de 2000 Hz, à différentes distances de rétropropagation en $y=0$

On remarque que des lobes parasites, se formant aux limites de la grille, apparaissent et deviennent de plus en plus prépondérants avec l'éloignement de la grille de mesure du plan source (cf. fig. n°2.9). Ces sources « virtuelles » atteignent même un niveau de pression supérieur à la source principale pour une distance entre le plan source et hologramme de 16 cm (93 dB pour la source virtuelle contre 76 dB pour la vraie source). D'ailleurs, la surestimation du niveau de la source constatée pour une distance de $4d$ est probablement dû à l'apport « énergétique » de ces sources « virtuelles ». Une solution possible pour améliorer les résultats serait donc d'agrandir la grille afin de pouvoir capter plus d'énergie de la source rayonnée ou d'utiliser une fenêtre dans le domaine spatial (de type Tukey à 50%).

En second lieu, on remarque que la résolution de l'holographie est indépendante de la distance de rétropropagation. En effet, le lobe situé au niveau de la source est identique quelle que soit la distance de rétropropagation (cf. fig. n°2.7 (e)).

Le choix d'une distance de rétropropagation de 8 cm paraît cohérent et adapté (soit $2d$) pour des sources de type « monopôle ». Pour des sources de type « dipôle » ou « quadripôle », il est nécessaire de prendre en compte le fait que le domaine de Rayleigh est généralement plus étendu. Ainsi, pour un « dipôle » et un « quadripôle », le champ proche dépend de la distance entre sources ponctuelles les constituant.

Ainsi, en choisissant une distance de 8 cm au lieu de 4 cm, on s'éloigne de la zone de champ proche de la source de type « monopôle » et une marge de sécurité est créée en cas de présence d'un champ proche de type « dipôle » ou « quadripôle ».

2.2.4 Influence du positionnement du microphone de référence.

Du point de vue pratique, dans le cas d'un problème de localisation de sources à étudier avec la méthode d'holographie à références multiples, il faut d'abord commencer par déterminer le nombre de sources indépendantes potentielles en présence. En premier lieu, un travail amont doit donc être effectué afin de recenser les sources potentielles.

Ensuite, il est nécessaire de placer un microphone de référence le plus près possible de chaque source indépendante ou du moins afin d'avoir une vue la plus complète des sources. Le but de ce paragraphe est donc de montrer l'influence du nombre (suffisant ou non) et du positionnement du ou des microphone(s) de référence dans un cas multi-sources. Les cas avec une source, permettant ainsi de valider l'outil développé, et avec deux sources sont simulés. Les résultats obtenus sont ensuite facilement transposables par analogie à N sources.

En premier lieu, afin de valider l'outil développé, une première série de simulations avec une seule source a été menée : le même cas que dans le paragraphe 2.2.1 est simulé et le microphone de référence est déplacé à chaque simulation à différentes positions. Et, logiquement, des résultats identiques sont obtenus (champ de pression identique quelle que soit la position du microphone de référence).

En second lieu, l'influence du nombre et du placement du ou des microphones de référence en présence de deux sources émettant à niveau égal sont mis en exergue, placées respectivement en $(0,12;0,15;0)$ appelée *source 1* (cercle blanc) et une autre en $(-0,12;-0,15;0)$ appelée *source 2* (cercle rouge). Les autres paramètres sont identiques à ceux du paragraphe 2.1.1.

Le premier cas présenté met en avant les conséquences d'un mauvais dénombrement des sources indépendantes (décorrélées) : microphones de référence en nombre insuffisant.

Le microphone de référence (représenté par une croix noire cerclée) est positionné successivement à 5 cm de la source 1 (cf. fig. n°2.10) puis de la source 2 (cf. fig. n°2.11). Ainsi, seule la source près du microphone de référence est localisée, le niveau étant conforme à la réalité. Par contre, si le microphone de référence reçoit une contribution des 2 sources, de par sa position, celles-ci apparaissent simultanément sur le champ recomposé mais leurs niveaux sont sous-estimés (cf. fig. n°2.12) : -10 dB pour la source 1 et -3 dB pour la source 2, plus proche.

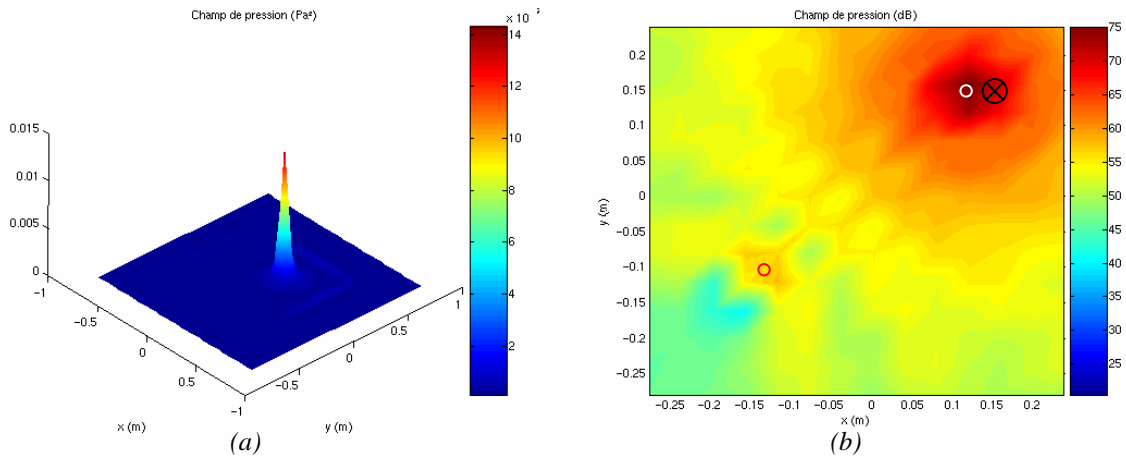


Fig. n°2.10 : Champs de pression, (a) en Pa^2 et (b) en dB, à une fréquence de 2000 Hz, pour un microphone de référence placé en $(0,17;0,15;0)$ soit à $\lambda/3$ de la source.

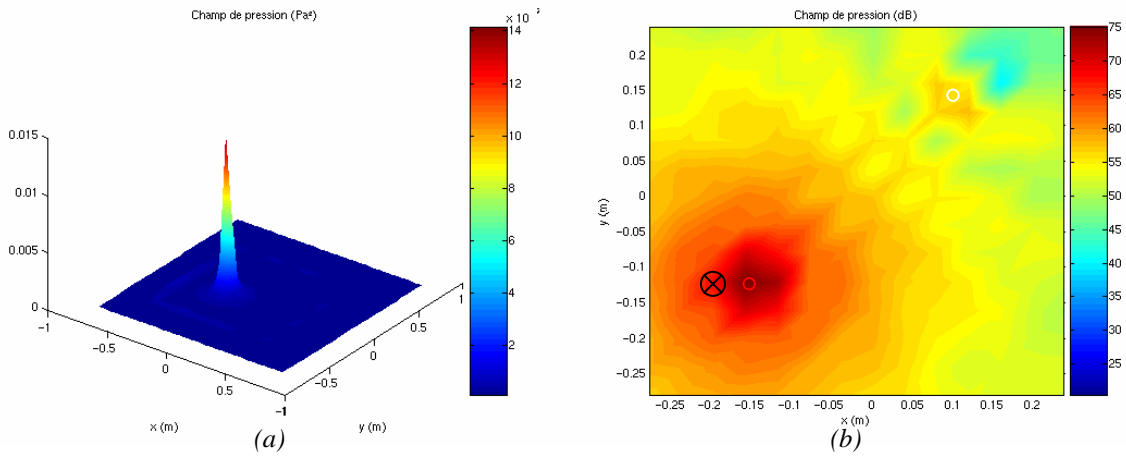


Fig. n°2.11 : Champs de pression, (a) en Pa^2 et (b) en dB, à une fréquence de 2000 Hz, pour un microphone de référence placé en $(-0,2;-0,12;0)$ soit à $\lambda/3$ de la source.

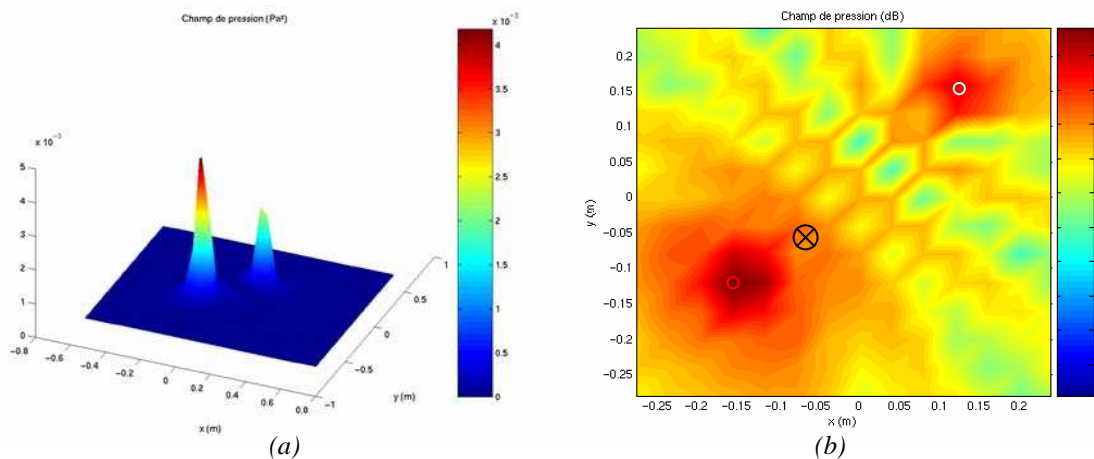


Fig. n°2.12 : Champs de pression, (a) en Pa^2 et (b) en dB, à une fréquence de 2000 Hz, pour un microphone de référence placé en $(-0,05;-0,05;0)$ soit à $\lambda/3$ de la source

Dans le cas du positionnement du microphone de référence, la question de l'évolution en fonction de la fréquence se repose. En effet, la distance de 5 cm est représentative d'une fraction de longueur d'onde ($\sim \lambda/3$ à 2000 Hz). Ainsi, en regardant les résultats du second cas

précédent (cf. fig. n°2.13 (a)) à une fréquence $f = 1000$ Hz ($\sim \lambda/6$), on remarque que la source n°1 est beaucoup mieux reconstruite qu'à 2000 Hz (56 dB à 2000 Hz et 63 dB à 1000 Hz).

De même, pour le troisième cas à une fréquence de 1000 Hz (cf. fig. n°2.13 (b)), le niveau de la source n°2 est reconstruit avec un niveau de pression exact (75 dB à 1000 Hz au lieu de 72,5 dB à 2000 Hz) et le niveau de la source n°1 est bien mieux reconstruit (68 dB à 1000 Hz au lieu de 64 dB à 2000 Hz).

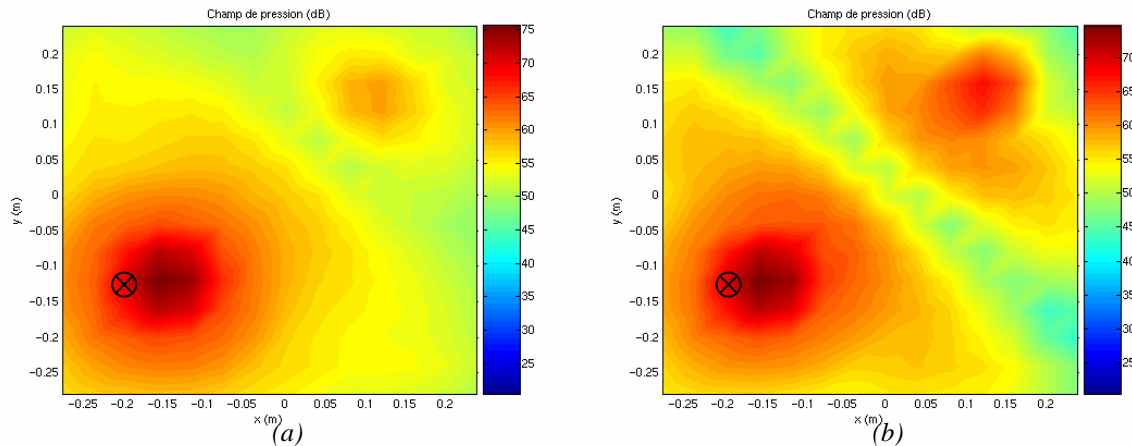


Fig. n°2.13 : Champ de pression (dB) à une fréquence f de (a) 2000 Hz (b) 1000 Hz, soit le microphone de référence placé à respectivement $\lambda/3$ et $\lambda/6$.

Il en ressort donc que la localisation de la source (et à fortiori son niveau) dépend de la contribution de celle-ci sur le signal du microphone de référence. Ensuite, plus les microphones seront positionnés près des sources présentes, plus elles seront correctement localisées avec un niveau de pression fidèle à la réalité.

En conclusion, même si ce résultat est attendu, on peut dire que le nombre de microphones de référence et leur positionnement sont deux phases importantes de la mise en place de la technique à références multiples. Elles conditionnent la qualité des résultats obtenus. On a pu voir qu'un nombre de microphones de référence insuffisant, ou non représentatif du champ global, peut entraîner une mauvaise estimation du niveau de la source voire même une non détection de la source. Ces résultats confirment et soulignent les précautions imposées dans la littérature [61,62].

Toutefois, dans le cas où aucune source n'est connue, il est toujours possible d'utiliser l'holographie à références multiples avec un seul microphone de référence. Ce microphone doit être placé en champ lointain pour que celui-ci capte la contribution des différentes sources potentielles. Il est évident que les résultats seront à prendre avec précaution, comme on a pu le voir précédemment. Il est, par la suite, conseillé de refaire la mesure en plaçant un microphone de référence près de toutes les sources repérées lors de la première mesure. Dans le cas de la cabine d'hélicoptère, les sources potentiellement génératrices de bruit sont partiellement connues (cf. introduction générale), il est donc possible de positionner correctement les microphones de référence. Néanmoins, les cohérences multiples entre sources rendent le problème plus complexe [22].

2.2.5 Influence de la taille de la grille de mesure.

Ce paragraphe vise à montrer la nécessité de capter le maximum d'énergie rayonnée par la (les) source(s) afin de reconstruire le plus fidèlement possible le champ de pression sur le plan source. Ainsi, dans la partie bibliographique (cf. paragraphe 1.2.2), il est recommandé de s'assurer que la différence de niveaux de pression entre le maximum constaté sur la grille et les bords de celle-ci soit au moins de l'ordre de 10 voire 20 dB.

La même source large bande que dans le paragraphe 2.1.1 est utilisée. La grille de mesure est placée à 8 cm du plan source. La grille complète se compose de 40x40 points, complétée par des zéros si nécessaire.

En utilisant une grille de 8x8 microphones, une différence de l'ordre de 10 dB dans le plan de mesure entre le maximum et les bords est constatée, respectant les critères précisés dans le paragraphe 1.2.2. Le fait d'ajouter des points de mesure augmente cet écart, qui atteint ainsi, respectivement pour 16x16 microphones et 32x32 microphones, 16 dB et 21 dB.

La grille en noir pointillée désigne également la zone de validité des résultats, circonscrite par le champ physique de la grille de microphones.

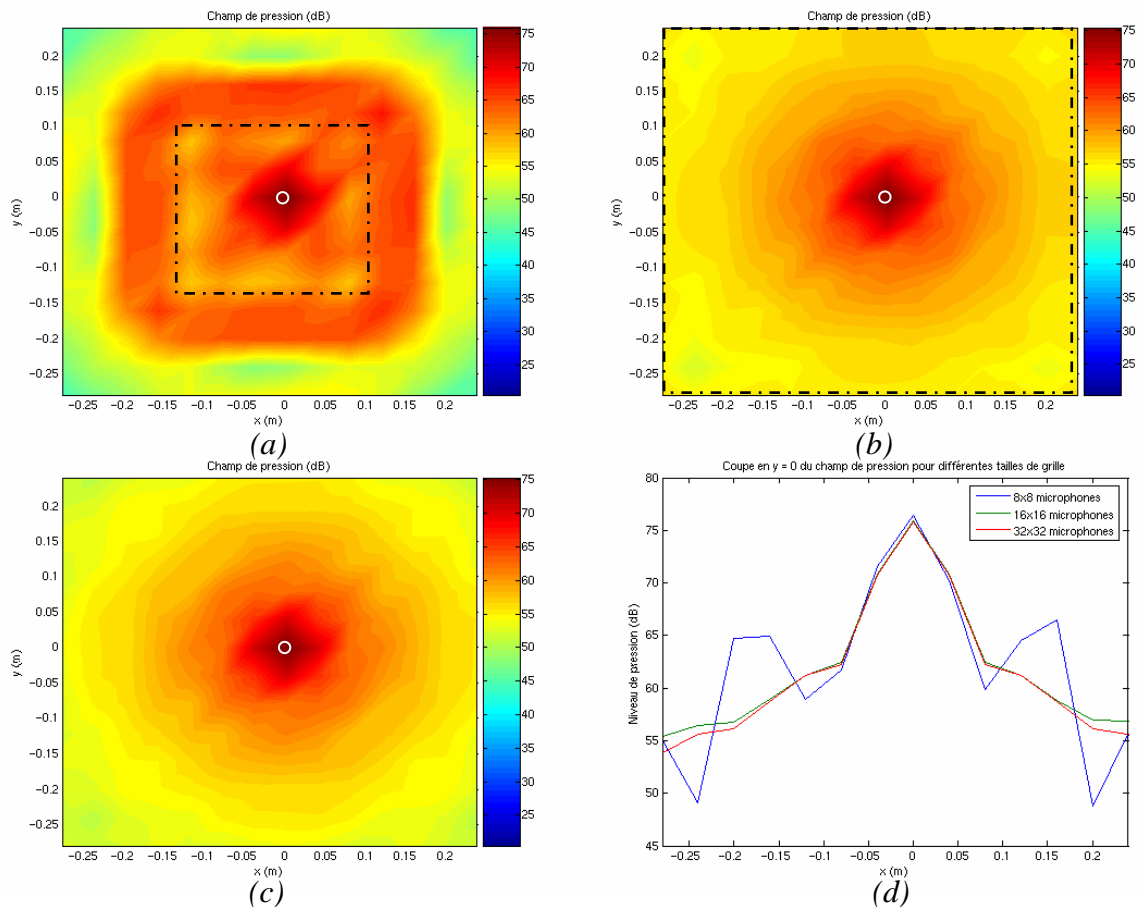


Fig. n°2.14 : Champ de pression (dB), pour une source placée en (0;0;0), avec une distance de rétropropagation de 8cm, à une fréquence de 2000 Hz : (a) réponse pour une grille 8x8 microphones (b) réponse pour une grille 16x16 microphones (c) réponse pour une grille 32x32 microphones (d) coupe en $y = 0$ pour les trois tailles de grille.

On remarque que, plus la grille est grande, plus le champ de pression reconstruit est fidèle à la réalité. Par exemple, pour la grille 32x32 microphones, le caractère monopolaire de la source et la décroissance de 6 dB sont bien observés à chaque doublement de distance sur toute la surface d'étude (cf. fig. n°2.14 (c) et (d)) alors que, dans le cas de la grille 8x8, le caractère monopolaire de la source est apparent sur une toute petite zone, et les effets de bord viennent interagir sur les résultats (cf. fig. n°2.14 (a) et (d)). Toutefois, d'après les résultats précédents, le critère imposant un écart de 10 dB semble insuffisant, un écart de 16 dB au moins est recommandé entre le maximum constaté sur la grille et les bords de la grille.

Par contre, la taille de la grille n'influe pas sur la résolution de la méthode (cf. fig. n°2.14 (d)). De plus, quelle que soit la taille de la grille, le niveau de pression reconstruit de la source est identique. Ces résultats sont à rapprocher avec ceux exposés dans le paragraphe 2.2.2.

Un compromis est donc nécessaire entre la taille de la grille de mesures et la distance entre le plan source et le plan hologramme afin d'avoir une reconstruction fidèle du champ acoustique sur le plan source. Il en ressort également que, même si le champ reconstruit n'est pas toujours fidèle avec des petites tailles de grille, le niveau de pression de la source n'est pas altéré.

2.2.6 Influence d'une source placée à l'extérieur du volume de reconstruction.

Dans la partie bibliographique, il a été spécifié qu'il était seulement possible de reconstruire le champ acoustique dans le cadre physique de la grille de microphones. Il est alors intéressant d'étudier, dans le cadre de cette étude, les conséquences sur la reconstruction du champ acoustique de la présence de source(s) extérieure(s) au volume de reconstruction. En effet, lors de l'utilisation d'un tel système de mesure dans une cabine d'hélicoptère, il est évident que la grille de mesure ne va pas pouvoir être étendue indéfiniment car l'espace dévolu est contraint par les dimensions de la cabine d'hélicoptère. Et, dans ce cas, les sources situées au niveau des arêtes de l'habitacle seront en limite de grille de mesure voire à l'extérieur de la grille de mesure (cf. paragraphe 1.2.2). En effet, la première colonne de microphones ne pourra jamais être exactement sur l'arête (limite physique des microphones utilisés, de la grille,...).

Une grille de microphones 16x16 que l'on place successivement à 8 puis à 4 cm du plan source, est utilisée.

En premier lieu, une source similaire aux précédentes est placée à l'extérieur du volume de reconstruction dans le plan source en (0,32;0,15;0). Elle est donc positionnée à une distance de 4 cm de la première colonne de microphones, représentative des zones non couvertes par holographie (limite physique de la grille de microphones,...).

Sur les figures, le cercle blanc représente la position exacte de la source alors que le carré blanc représente le positionnement de la source obtenu par holographie.

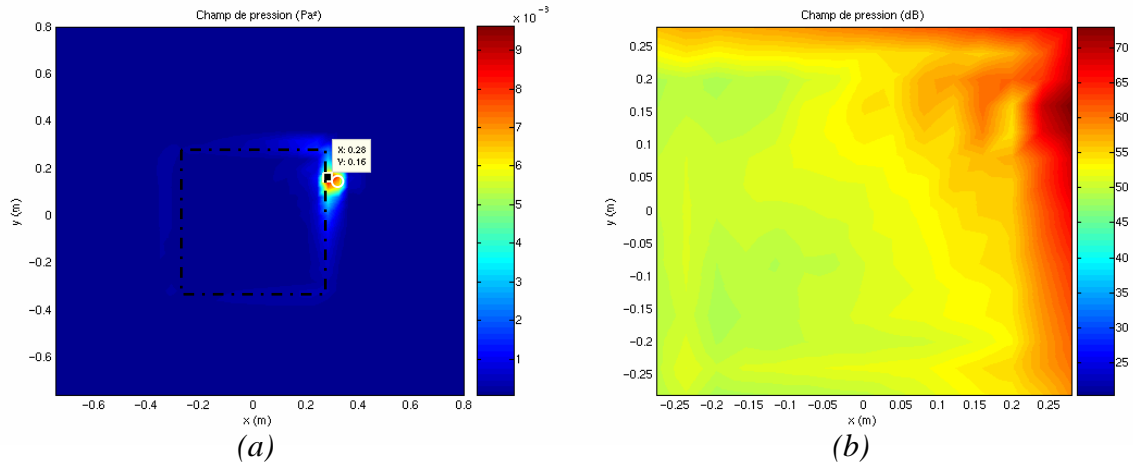


Fig. n°2.15 : Champs de pression reconstruits dans le plan source, (a) global en Pa^2 , (b) en dB, à $f = 2000 \text{ Hz}$, pour une source située à l'extérieur du champ de la grille $(0,32;0,15;0)$ avec une distance plan hologramme – source de 8 cm.

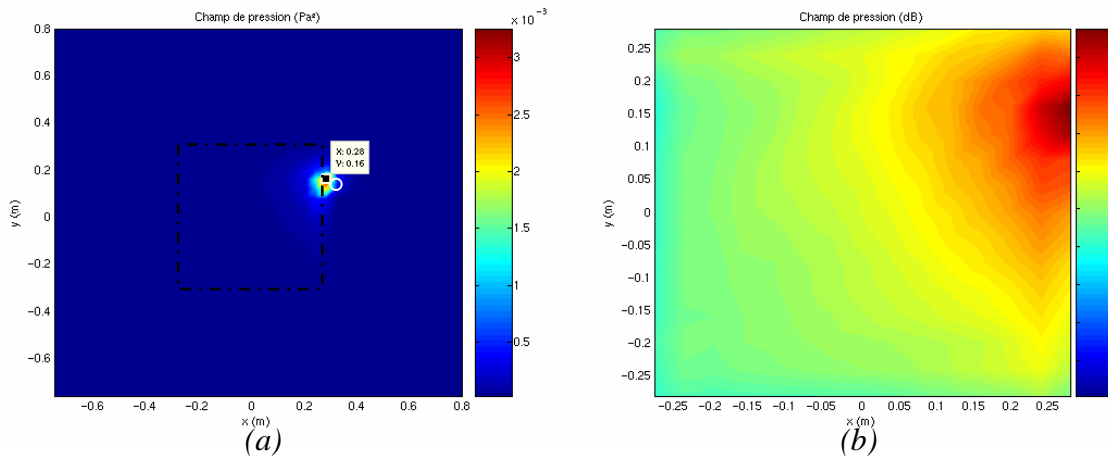


Fig. n°2.16 : Champs de pression rétropropagés, (a) global en Pa^2 , (b) en dB, à $f = 2000 \text{ Hz}$, pour une source située à l'extérieur du champ de la grille $(0,32;0,15;0)$ avec une distance plan hologramme – source de 4 cm.

Malgré le fait que la source soit placée à l'extérieur de la zone physique de la grille de capteurs, on constate qu'elle est localisée par holographie sur le bord de la grille de mesure en $(0,28;0,16;0)$ et engendre des effets de bord d'autant plus importants que la grille est éloignée du plan source (cf. fig. n°2.15 et n°2.16). De plus, le niveau de pression reconstruit varie suivant la distance de rétropropagation (73 dB à 8 cm et 68 dB à 4 cm). On observe donc qu'en se rapprochant du plan source, l'effet des sources extérieures sur le champ reconstruit est réduit, ainsi moins d'énergie rayonnée par la source est captée par la grille de mesure (l'angle existant entre la source et les deux extrémités de la grille de mesure est réduit (cf. fig. n°2.17)).

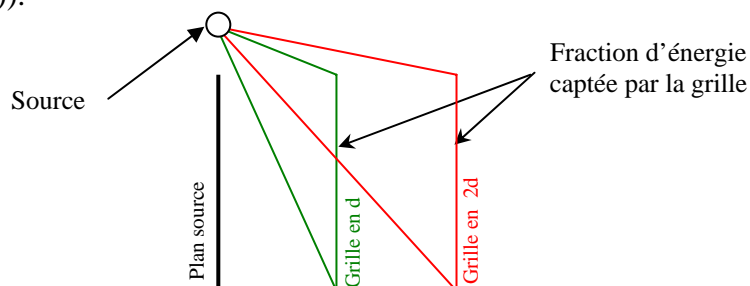


Fig. n°2.17 : Illustration de la part d'énergie rayonnée par une source, placée à l'extérieur du volume de reconstruction, captée par la grille de mesure.

Une seconde source non corrélée avec la première positionnée est maintenant positionnée en $(0;0;0)$, émettant à un niveau de pression identique à celui de la source extérieure. Le microphone de référence est placé près de la source au centre à 5 cm suivant l'axe (Ox) puis à 10 cm de celle-ci.

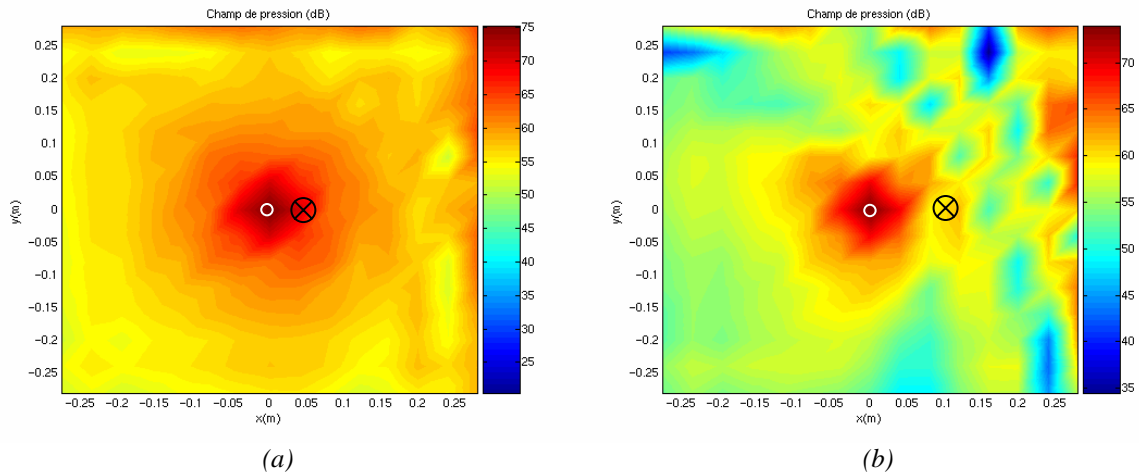


Fig. n°2.18 : Champs de pression rétropropagés, avec une source parasite située à l'extérieur du champ physique de la grille $(0,32;0,15;0)$ et une source placée en $(0;0;0)$, à la fréquence $f = 2000$ Hz et un microphone de référence en (a) $(0,05;0;0)$ et (b) $(0,1;0;0)$.

Ces résultats, similaires à ceux obtenus dans le paragraphe 2.2.3, montrent encore une fois que le placement du microphone de référence est très important. On observe que les effets de bord sont d'autant plus importants que le microphone de référence capte le champ de la source extérieure. D'autre part, le niveau de pression reconstruit pour la source centrée est exact mais le champ acoustique reconstruit est de plus en plus bruité (effets de bord importants, caractère monopolaire restreint (cf. fig. n°2.18)) par la source parasite au fur et à mesure que le microphone de référence se rapproche de la source parasite.

D'autre part, dans le cas complexe de l'habitacle d'une cabine d'hélicoptère, il est facilement imaginable que deux sources corrélées et de même niveau co-existent (sources d'origine BTP) avec une relation de phase fixée à 2π , puis $\pi/2$.

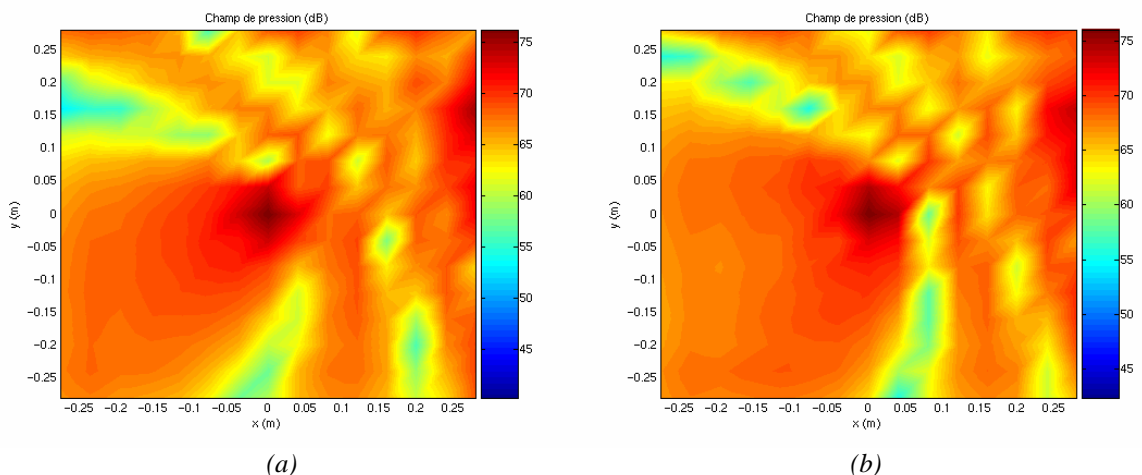


Fig. n°2.19 : Champs de pression rétropropagés, avec une source parasite située à l'extérieur du champ physique de la grille $(0,3;0,15;0)$ et une source placée en $(0;0;0)$, toutes deux corrélées à la fréquence $f = 2000$ Hz et un microphone de référence en $(0,05;0;0)$ avec un déphasage entre les sources de (a) 2π et (b) $\pi/2$.

Le champ reconstruit (cf. fig. n°2.19) est extrêmement perturbé même si les niveaux de pression reconstruits sont exacts, cela, quelle que soit la position du microphone de référence.

Ce constat rend la méthodologie de mesure très délicate à utiliser. Les précautions à prendre dans le cas d'une utilisation en milieu confiné sont donc importantes : positionnement des microphones de référence minutieux et minimisation des effets de bord liés aux sources extérieures à la grille. Cette dernière précaution est d'autant plus importante que les jointures entre les parois des cabines d'hélicoptères sont des zones non couvertes par l'holographie (limite physique de la grille) et où l'énergie acoustique risque fort potentiellement de passer.

Une solution envisageable à ce problème est de restreindre encore plus les paramètres de filtrage afin de limiter les effets de bord au détriment de la qualité de la construction des niveaux de pression. Ainsi, dans le cas des deux sources décorréélées, en modifiant le paramètre d'ajustement k_c du filtre de Veronesi de $0,6k_{max}$ à $0,4k_{max}$, la simulation reconstruit un champ acoustique moins perturbé par les effets de bord mais avec un niveau de pression moindre : source à 67 dB au lieu des 76 dB (cf. fig. n°2.20). Cette constatation va nous conduire à étudier une amélioration exposée dans le paragraphe 3.1.6.

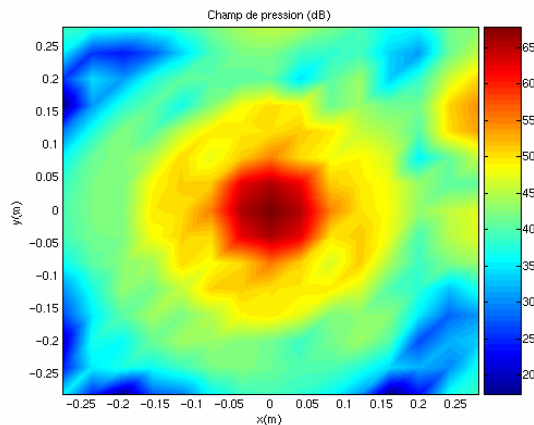


Fig. n°2.20 : Champ de pression rétropropagé dans le cas où $k_c=0.4k_{max}$ avec une source parasite située à l'extérieur du champ physique de la grille $(0,32;0,15;0)$ et une source placée en $(0;0;0)$, à la fréquence $f = 2000$ Hz et un microphone de référence en $(0,1;0;0)$.

2.2.7 Influence du déphasage des microphones.

Dans la partie bibliographique, l'importance de l'information de phase dans le traitement holographique a été soulignée. Dans le cadre de mesures holographiques, différents microphones d'une même gamme possédant des caractéristiques similaires mais non appariés en phase sont utilisés. Ce paragraphe vise à montrer l'importance de prendre en compte et de corriger les écarts de phase existant entre les différents microphones utilisés pour faire les acquisitions.

Ainsi, dans le cadre de ces simulations, un déphasage entre les microphones est introduit à partir de ceux mesurés pour les microphones électret de type Sennheiser 2280 acquis par l'ONERA et testés en laboratoire : déphasage relatif maximum de $4,5^\circ$ à 2000 Hz (cf. annexe n°2). Les simulations se basent sur l'utilisation d'une ligne de 8 microphones pour balayer la surface hologramme (configuration utilisée lors de l'expérimentation).

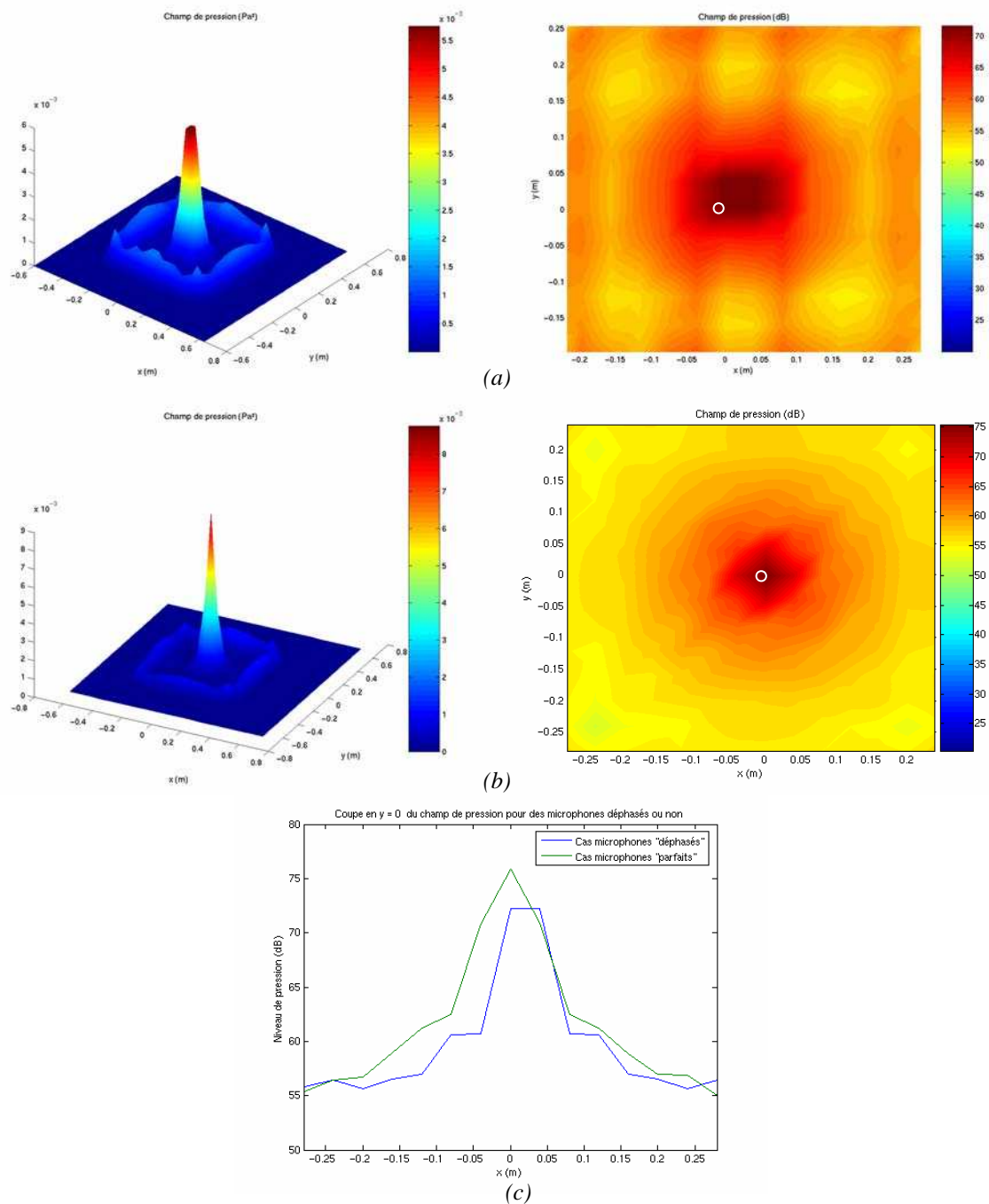


Fig. n°2.21 : Champs de pression rétropropagés avec une source placée au centre, à une distance plan hologramme – source de 8cm, à la fréquence de 2000 Hz : (a) Champs en Pa² et dB dans le cas des microphones déphasés (b) Champs en Pa² et dB dans le cas des microphones parfaits, (c) Coupe en $y=0$ des champs de pression (dB) dans le cas des microphones déphasés et parfaits.

On constate que les déphasages existants sur les voies de mesure engendrent une incertitude sur le positionnement de l'ordre de 4 cm (cf. fig. 2.21 (a) et (c)) et une sous-estimation du niveau réel de la source (72 dB au lieu de 76 dB (cf. fig. n°2.21 (c)). Cette incertitude devrait s'amplifier avec le nombre de microphones employés. Il est alors impératif de connaître les déphasages existants sur la chaîne de mesure pour éventuellement pouvoir les prendre en compte. Ceci montre la « faiblesse » théorique de l'holographie qui présente une sensibilité importante aux erreurs de phase même minimales. L'idéal serait d'utiliser des

microphones appariés en phase mais cette solution serait excessivement chère, ou encore de multiplier les interspectres par une fonction de transfert prenant en compte les déphasages de chaque microphone. Cette dernière solution permet l'utilisation de microphones standard mais elle nécessite une étape supplémentaire d'étalonnage des microphones en phase dans un tube à impédance (cf. annexe n°2)

Il est également évident que ces problèmes de déphasage entre les microphones introduisent des erreurs de précisions supplémentaires. Ainsi, pour un déphasage moyen de $4,5^\circ$ entre les microphones, une erreur de positionnement de $\pm\Delta x$ et une erreur sur l'amplitude de $\pm 3\text{dB}$ sont constatées.

2.2.8 Influence du filtrage.

Dans le premier chapitre, il a été observé que dans toutes les applications de l'holographie un filtrage était introduit pour s'affranchir des hautes fréquences spatiales porteuses de nombreuses informations bruitées.

Ce paragraphe vise à montrer la nécessité d'utiliser un filtre dans le domaine des nombres d'ondes, après la FFT spatiale bi-dimensionnelle effectuée pendant le traitement holographique, afin de minimiser les effets liés à la troncature des données. Une source est placée à 8 cm face au centre de la grille composée de 16×16 microphones. Le même cas a été simulé sans et avec filtre en appliquant le filtre de Veronesi (le plus courant) [43].

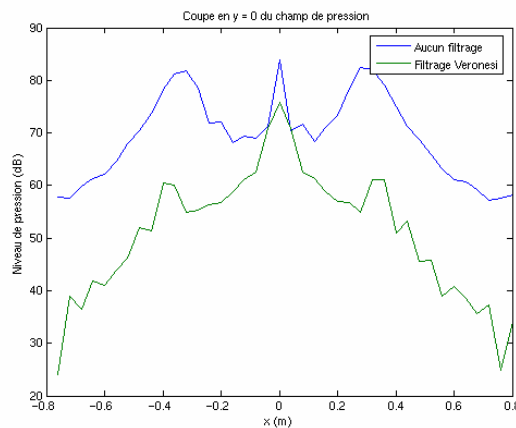


Fig. n°2.22 : Coupe en $y = 0$ du champ de pression dans le cas d'une source centrée de fréquence $f = 1000\text{Hz}$, à une distance de rétropropagation de 8cm en appliquant ou non un filtrage de Veronesi $k_c = 0.6k_{max}$.

Le résultat de la figure n°2.22 montre qu'en l'absence de filtrage, les effets de bord engendrent un « bruit » artificiel d'un niveau supérieur à la source elle-même (80 dB sur les bords contre 76 dB pour la source). Ainsi, le niveau de la source est surestimé du fait de l'influence des sources images non réduites par le filtrage. L'utilisation d'un filtrage en holographie revêt par conséquent un caractère obligatoire.

Cette dernière figure et la figure n°2.3 permettent également de mettre en avant les performances du filtre de Veronesi avec les paramètres définis dans [43] et ainsi de confirmer le choix de celui-ci : forte atténuation des sources « fantômes », caractère monopolaire de la source conservé et niveau de la source bien estimé sur une large bande de fréquence.

2.2.9 Synthèse de l'étude paramétrique pour l'holographie.

Cette étude paramétrique a permis de mettre en évidence des observations intéressantes, résumées sur le tableau n°2.1, pour le dimensionnement et le positionnement des différents éléments utilisés pour une mesure de type holographique (méthode à référence multiple).

Paramètre testé	Observation	Conclusion
<i>Espacement entre capteurs</i>	- Compromis à 4 cm	- Fréquence maximum d'étude de 4250 Hz
<i>Fréquence</i>	- Résolution spatiale de localisation indépendante de la fréquence - Niveau de reconstruction dépendant de la fréquence	
<i>Précision</i>	- Source positionnée sur la position du microphone le plus proche. - Si source exactement entre 2 microphones, répartition de l'énergie sur les 2 positions de microphones les plus proches.	- Précision position : $\pm \Delta x / 2$ \pm Erreur liée aux voies de mesure. - Précision amplitude : \pm Erreur liée aux voies de mesures \pm Erreurs dues au filtrage.
<i>Distance de rétropropagation</i>	- Résolution spatiale inchangée - Plus la grille est proche, plus le champ reconstruit est fidèle	- Compromis à 8 cm
<i>Position du microphone de référence</i>	- Plus le ou les microphone(s) est (ou sont) proche(s) de la source, plus le champ reconstruit est fidèle - Nombre de microphones de référence égal au nombre de sources pour une bonne reconstruction	- Nécessité d'avoir un champ acoustique le plus complet possible
<i>Taille de la grille</i>	- Plus la grille est grande, plus le champ reconstruit est fidèle (effets de bords minimes) - Résolution inchangée.	- Ecart de 16 dB entre le maximum constaté sur la grille et les bords de grille est recommandé
<i>Source extérieure au volume de reconstruction</i>	- Effets de bord importants - Perturbations du champ reconstruit	- Microphone de référence au plus près de la source - Filtrage spatial plus restrictif au détriment de la qualité de la reconstruction des niveaux de pression.

<i>Déphasage relatif entre microphones</i>	- Positionnement imprécis - Niveau de pression mal reconstruit	- Prendre en compte les déphasages dans le traitement des données
<i>Filtrage</i>	- Effets de bord importants	- Filtrage obligatoire (Veronesi...)

Tableau n°2.1 : Influences des différents paramètres sur la reconstruction du champ de pression

Le pouvoir de résolution de l'holographie est donc très élevé et indépendant de nombreux paramètres (fréquence, distance de rétropropagation, taille de la grille). Mais, l'holographie reste très délicate d'utilisation car très sensible aux écarts de phase entre microphones et aux effets de bord engendrés par des paramètres mal choisis.

Pour un champ libre, en utilisant des microphones non appariés et en présence d'une source monopolaire, l'holographie, moyennant certaines précautions (cf. tableau n°2.1), permet d'identifier les sources à $\pm\Delta x / 2$ (+Erreur liée aux voies de mesure) et de donner leur niveau d'amplitude à \pm Erreur liée aux voies de mesures et filtrage. Le pouvoir de résolution est défini tel que :

$$R = \frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 + \left(\frac{D \ln(10)}{20(z_H - z_S)}\right)^2}}$$

Ainsi, dans l'exemple suivi durant ce chapitre, à une fréquence de 2000Hz, la source est positionnée à ± 6 cm et le niveau estimé à $\pm 4,5$ dB.

2.3 Etude paramétrique sur l'antennerie.

Le but de cette partie est d'apporter des critères pour le dimensionnement, le positionnement optimal et les performances (dynamique de mesure et résolution) d'une antenne. Le logiciel qui a été développé prend en compte deux types de méthodes : classique et Elias. Les performances de la méthode Elias étant bien meilleures, cette méthode a été utilisée dans les simulations suivantes.

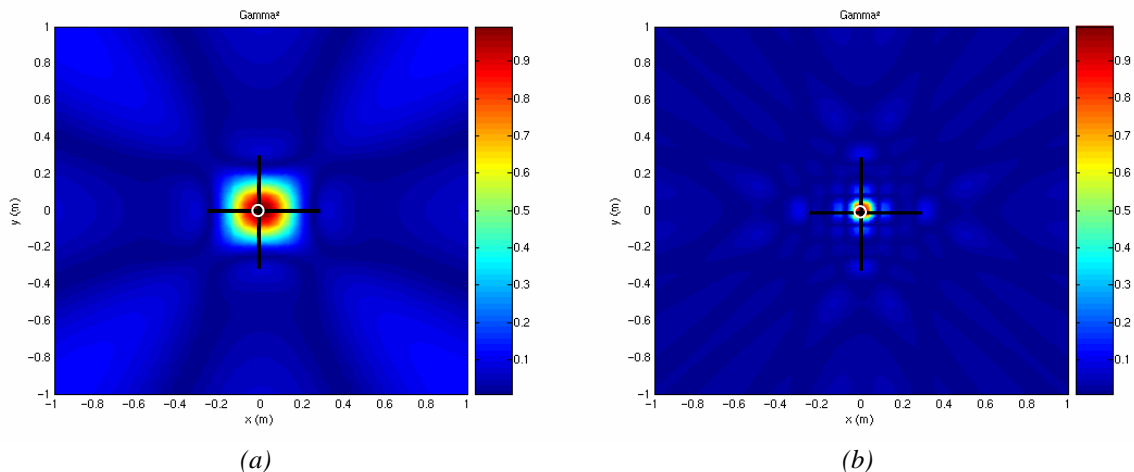
L'influence sur les performances de l'antennerie est simulée en considérant différents paramètres tels que : la fréquence, la taille de l'antenne, la distance de rétropropagation, les déphasages entre voies de mesure.

Par la suite, sur les figures présentées, les positions exactes des sources simulées et l'antenne sont représentées respectivement par le biais de cercles blancs et d'une croix noire. Une apodisation de type Hanning est utilisée par défaut. Les sources utilisées sont supposées décorréliées.

2.3.1 Influence de la fréquence d'étude sur la réponse de l'antenne acoustique.

D'après l'étude bibliographique, la résolution de l'antenne (capacité de l'antenne à différencier deux sources proches) est dépendante de la longueur d'onde donc de la fréquence.

Afin de vérifier ce comportement et de tester les performances d'une antenne, une source placée en (0;0;0) est simulée. Une antenne en croix composée de 16 microphones sur chaque bras est placée à 30 cm du plan source. Les microphones sont espacés de 4 cm les uns des autres.



*Fig. n°2.23 : Fonction de cohérence dans le plan source situé à 30 cm de l'antenne pour une source centrée à :
(a) $f = 1000$ Hz, (b) $f = 3000$ Hz*

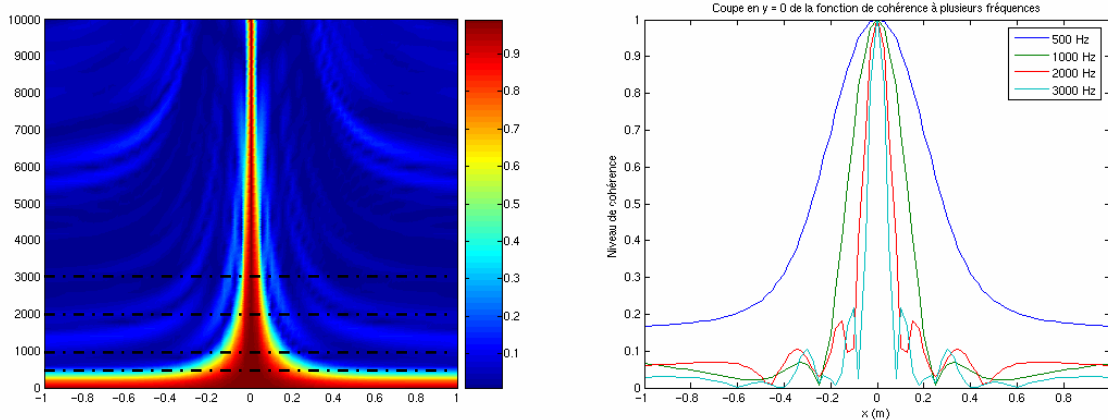


Fig. n°2.24 : Evolution de la fonction de cohérence en fonction de la fréquence dans le plan $y = 0$: (a) évolution globale, (b) Coupe en de la fonction de cohérence à 500, 1000, 2000 et 3000 Hz.

Dans un premier temps, l'observation des figures n°2.23 et 2.24 montre un affinement du pic central quand la fréquence augmente. Ce résultat est cohérent avec la théorie (cf. paragraphe 1.4.2).

Par contre, une perte de dynamique de mesure de l'antenne est constatée quand la fréquence augmente (rapport existant entre le lobe principal et son premier lobe secondaire). Ainsi, on observe que le lobe secondaire a une amplitude de 0,11 à 1000 Hz, et une amplitude de 0,22 à 3000 Hz (cf. fig. n°2.24).

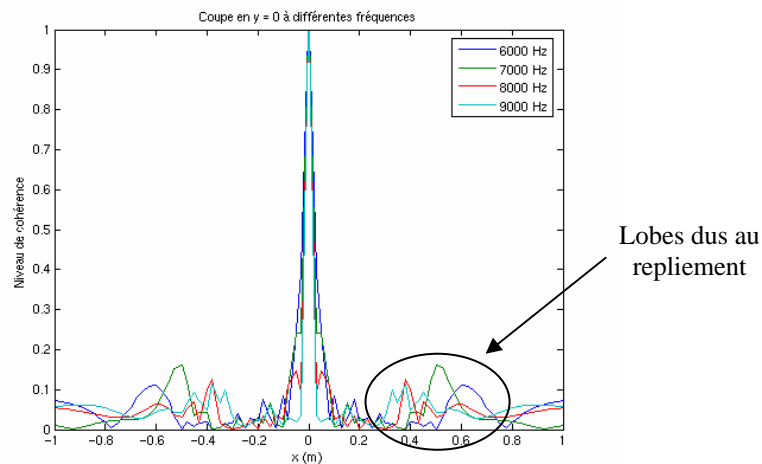


Fig. n°2.25 : Coupe en $y = 0$ de la fonction de cohérence aux fréquences 6000, 7000, 8000 et 9000 Hz.

De même, aux fréquences plus hautes, des pics dus au repliement spatial apparaissent (cf. fig. n°2.25). Ces pics, qui introduisent une ambiguïté puisqu'ils peuvent être interprétés comme la présence d'une source, sont dus à des problèmes d'échantillonnage (liés à l'écart entre les microphones) et s'amplifient avec l'augmentation de la fréquence. Pour être sûr de ne pas avoir ce phénomène de repliement, il faut respecter le critère de Shannon (cf. paragraphe 2.1.1) ou si le champ d'observation se limite à une zone comprise entre $\pm \theta_m$, la

condition suivante : $f_{\max} = \frac{c}{2d \sin(\theta_m)}$ (cf. paragraphe 1.4.2 c)).

Dans le cas de configuration simulée, la limite du repliement se situe ainsi à 4437 Hz. Or, on remarque que l'estimation est encore inférieure à la limite observée en figure n°2.23 : jusqu'à 10000 Hz, la fonction de localisation n'est que peu perturbée par les phénomènes de repliement. En effet, le repliement existe mais reste à des niveaux très faibles (cf. fig. n°2.25).

Ainsi, lorsque la source est située au niveau des bords du plan de focalisation, les ondes acoustiques perçues aux différents points de l'antenne se propagent dans des directions relativement proches. L'hypothèse d'ondes planes, bien que non parfaitement réalisée, est néanmoins acceptable.

Pour illustrer ce phénomène, la source est maintenant déplacée en (1;0;0) soit en bord de plan de focalisation. Le repliement spatial apparaît désormais à partir de 4400 Hz (cf. fig. n°2.26).

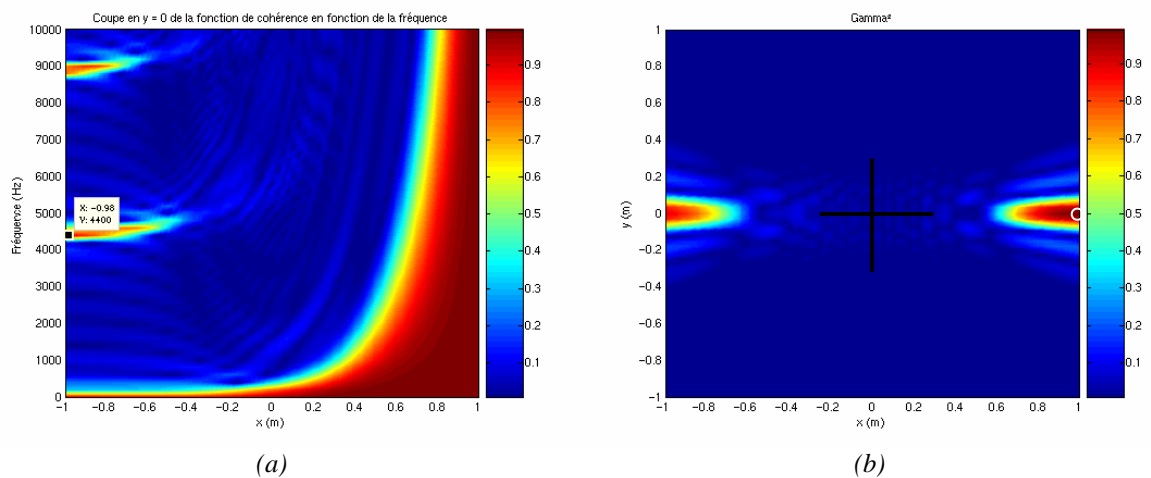


Fig. n°2.26 : (a) Coupe en $y = 0$ de la fonction de localisation en fonction de la fréquence, (b) Champ de cohérence à la fréquence $f = 4400$ Hz.

On peut montrer également que, en faisant tendre l'angle d'ouverture vers $\pm \frac{\pi}{2}$, la limite fréquentielle de repliement tend logiquement vers la valeur théorique f_{\max} définie par Shannon. En tout état de cause, cette fréquence maximale doit être interprétée comme une valeur « seuil » maximale au-delà de laquelle les résultats ne sont plus valables (dans l'hypothèse de sources monopolaires).

Par la suite, les résultats seront donnés à une fréquence $f = 2000$ Hz, afin d'avoir une base de comparaison avec les résultats obtenus lors de l'étude sur l'holographie, sans perdre de vue qu'en augmentant la fréquence, la résolution est sensiblement améliorée pour une perte de dynamique de mesure faible.

2.3.2 Précision sur le positionnement des sources de l'antenerie.

Contrairement à l'holographie, la précision de l'antenerie n'est pas dépendante de la position des microphones mais du pas de maillage choisi pour le plan de focalisation. Ainsi, la source est positionnée sur le point du maillage du plan de focalisation le plus proche.

Finalement, la précision est finalement limitée par la puissance de calculs de la machine. Pour améliorer la précision, il suffit juste de raffiner le maillage en diminuant l'espace entre 2 points de calcul de la fonction de cohérence pour améliorer la précision.

Pour conclure, une position de source pour l'antennerie est définie à $x \pm d_{\text{pas}}/2$ (où d_{pas} est le pas choisi pour le balayage du plan de focalisation) mais un autre facteur important doit être pris également en compte : la résolution (capacité à distinguer deux sources proches) qui est limitée par l'envergure, la géométrie et le traitement d'antenne choisi (cf. paragraphe 1.4.2 a). En pratique, cela signifie que la distance entre deux points de focalisation doit être très inférieure au pouvoir de résolution de l'antenne.

2.3.3 Influence de la taille de l'antenne.

D'après l'étude théorique, on sait que l'antenne peut explorer une surface plus étendue que sa surface physique (propriété très intéressante dans le cadre de cette étude). Maintenant, il est tout de même important de dimensionner l'antenne de manière à avoir des performances optimales avec un nombre de microphones raisonnable.

Le même cas de configuration que précédemment est simulé. Pour une distance constante de 4cm entre microphones, à 2000 Hz, une longueur variable de bras d'antenne est proposée, soit : $L/4$, $L/2$, L , $2L$ et $3L$.

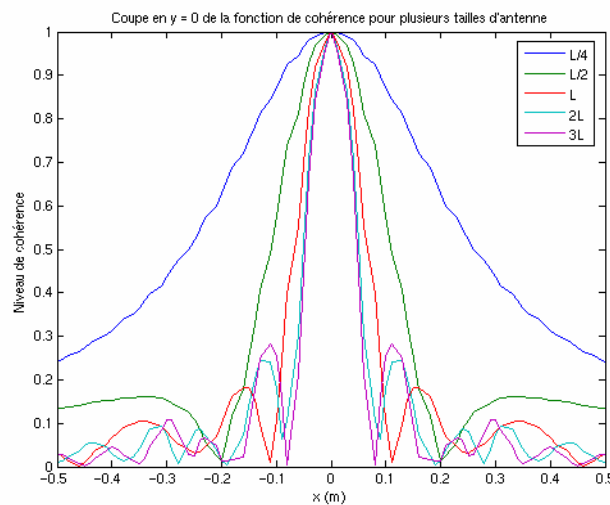


Fig. n°2.27 : Coupe en $y = 0$ de la fonction de cohérence pour 5 tailles d'antenne différentes à la fréquence $f = 2000$ Hz.

Il apparaît que, plus la taille de l'antenne est grande, plus la résolution, représentée par la finesse du lobe principale, est améliorée (cf. fig. n°2.27).

Par contre, on remarque que lorsque la taille de l'antenne est supérieure à L , le gain en résolution est très faible : les lobes principaux des courbes pour une taille d'antenne de L , $2L$ et $3L$ sont presque confondus. De plus, une perte de dynamique de mesure est constatée : les lobes secondaires ont une amplitude de plus en plus grande : 0,17 pour une taille d'antenne de L , 0,23 pour $2L$ et 0,25 pour $3L$ (cf. fig. n°2.27).

Il est donc important de noter que le dimensionnement de l'antenne n'est pas un acte anodin. L'augmentation de l'envergure de l'antenne améliore la résolution de l'antenne, mais

peut entraîner au-delà d'une certaine limite une dégradation de la dynamique de mesure de l'antenne.

2.3.4 Influence de la distance de focalisation.

Il est important également d'adapter la distance entre l'antenne et le plan source.

La figure suivante montre l'évolution de la fonction de cohérence en fonction de la distance de focalisation D , variant entre $L/4$ et $4L$ (cf. fig. n°2.28). La source reste positionnée sur le plan de focalisation et les autres paramètres sont conservés par ailleurs.

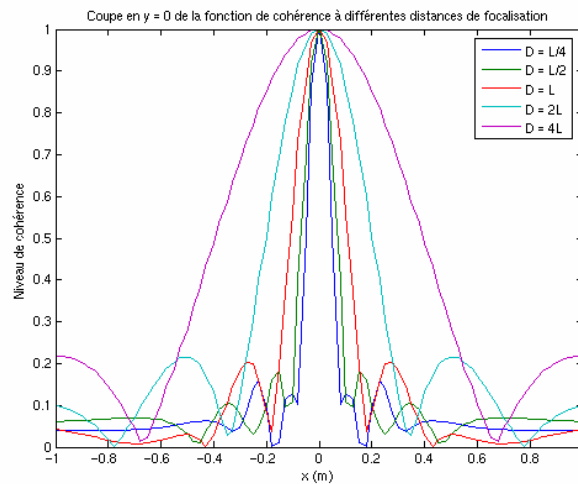


Fig. n°2.28 : Coupe en $y = 0$ de la réponse de l'antenne pour différentes distances de focalisation pour une fréquence $f = 2000$ Hz.

On remarque que, pour améliorer le pouvoir de résolution d'une antenne acoustique, un rapprochement de l'antenne de la région source est conseillé (cf. fig. n°2.28). De même, à partir d'une distance de focalisation $D = L/2$, le gain en résolution est nul.

Une analyse large-bande montre que le repliement intervient plus rapidement en fréquence au fur et à mesure que le plan de focalisation (à dimension constante) se rapproche du plan d'antenne, ce qui s'explique par le fait que l'angle d'observation θ_m devient plus grand.

Le placement de l'antenne par rapport au plan source est donc très important également pour optimiser ses performances : en la rapprochant du plan source, la résolution est améliorée mais la fréquence maximale d'étude est diminuée.

Ainsi, une distance de focalisation comprise entre L et $L/2$ semble un bon compromis. Après, le choix exact de la position de l'antenne est lié à la fréquence maximale acceptée par l'utilisateur. Plus la fréquence d'étude est basse, plus l'antenne doit être approchée de la distance de focalisation $L/2$.

2.3.5 Evolution de la réponse de l'antenne en fonction de l'angle d'observation.

Par contre, il est important de connaître quelle est l'influence de la position de la source sur la réponse de l'antenne. En effet, puisqu'on peut explorer des surfaces étendues, la directivité des ondes rayonnées par les sources arrivant sur l'antenne change selon la position de la source.

Afin d'étudier l'influence de ce facteur, 4 positions successives de sources sont simulées : $(0;0;0)$, $(0,5;0;0)$, $(1;0;0)$, $(1,5;0;0)$.

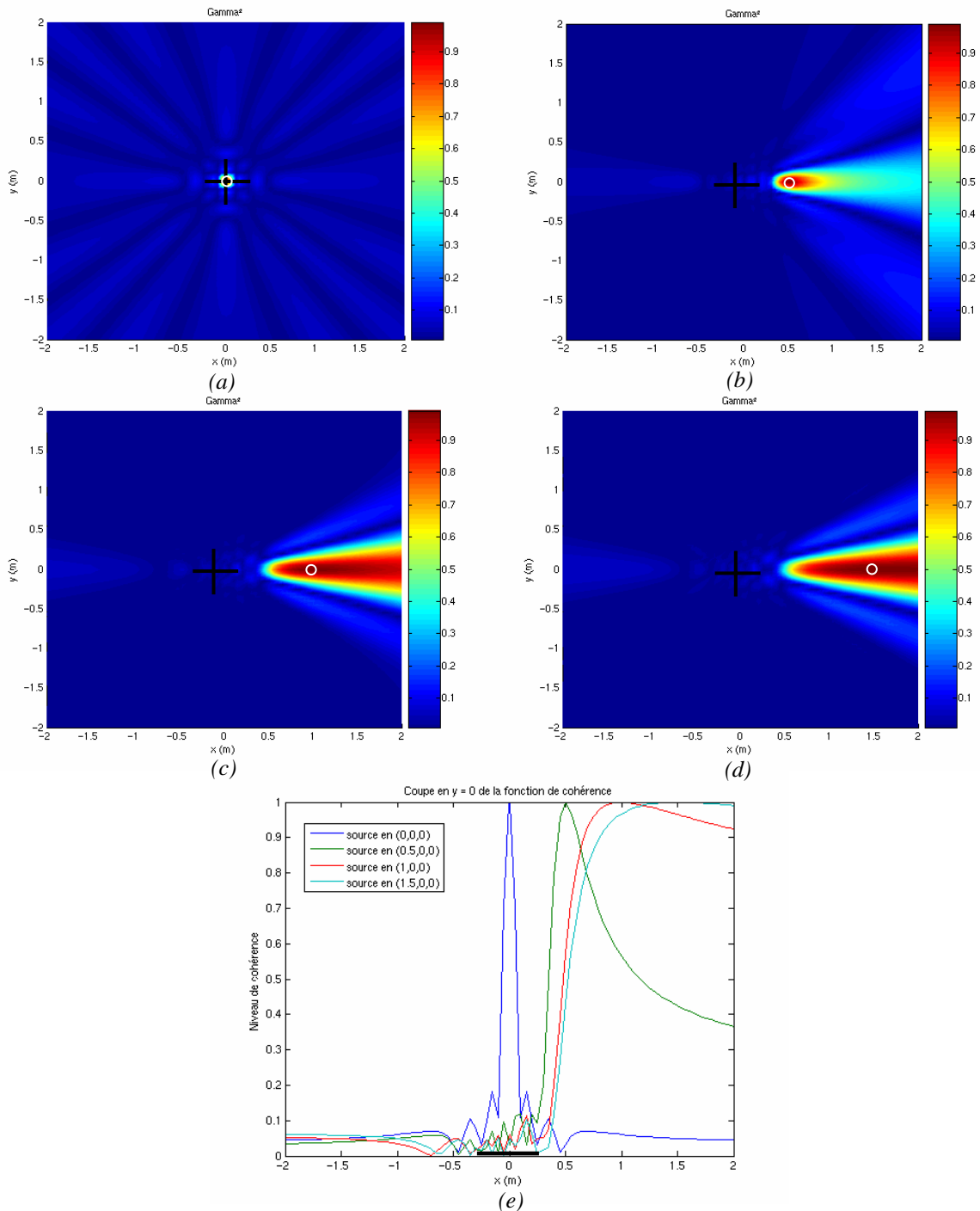


Fig. n°2.29 : Réponse de l'antenne pour une fréquence de 2000 Hz : (a) pour une source placée en $(0;0;0)$, (b) pour une source placée en $(0,5;0;0)$, (c) pour une source placée en $(1;0;0)$, (d) pour une source placée en $(1,5;0;0)$, (e) coupe en $y = 0$ des différentes réponses.

On constate que, plus l'angle d'observation augmente, plus la résolution de l'antenne se dégrade (élargissement du lobe principal (cf. fig. n°2.29)). Mais, la position de la source (au maximum de la fonction de cohérence) est toutefois correcte et la dynamique de mesure toujours bonne.

Ceci permet également de mettre en évidence une des propriétés extrêmement intéressante de l'antenne : sa capacité à explorer au-delà de ses limites physiques. Ainsi, une source placée à plus 2 fois la longueur de l'antenne est toujours positionnée convenablement (cf. fig. n°2.29 (d)).

En outre, il est nécessaire de voir si cette affirmation est vraie quelle que soit la fréquence. Pour cela, une coupe en $y = 0$ est effectuée à plusieurs fréquences pour la source placée en $(1,5;0;0)$.

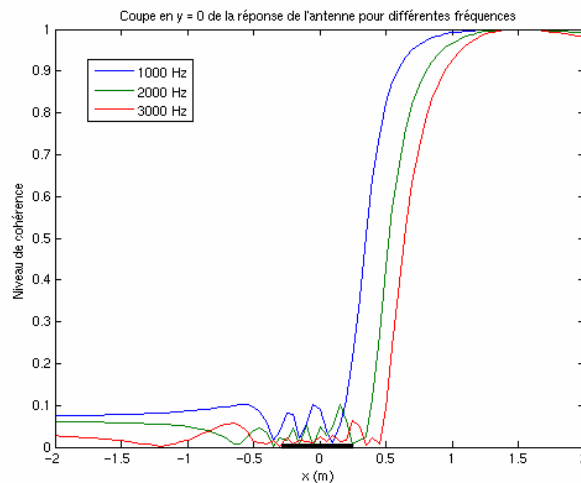


Fig. n°2.30 : Coupe en $y = 0$ de la réponse de l'antenne à une source placée en $(1,5;0;0)$.

Le positionnement observé sur la figure n°2.30 est exact quelle que soit la fréquence. Les mêmes conclusions que pour l'influence de la fréquence sont retrouvées à savoir une résolution qui s'améliore avec l'augmentation de la fréquence (cf. fig. n°2.30).

2.3.6 Evolution de la réponse de l'antenne dans le cas où la source n'est pas dans le plan de focalisation.

Dans le cas pratique, des erreurs de positionnement de l'antenne (plan source mal estimé, erreur dans la distance entre l'antenne et le plan source...) peuvent se produire. Il est alors intéressant de voir comment évolue la réponse de l'antenne suivant cette erreur de positionnement.

Pour mettre en évidence l'influence de la présence de la source dans le plan de focalisation, la source est approchée ou éloignée de l'antenne tout en conservant une distance de focalisation de 30 cm. Selon les simulations réalisées, il est nécessaire de distinguer trois cas : source parfaitement centrée et source non centrée à droite du centre, source non centrée à gauche du centre.

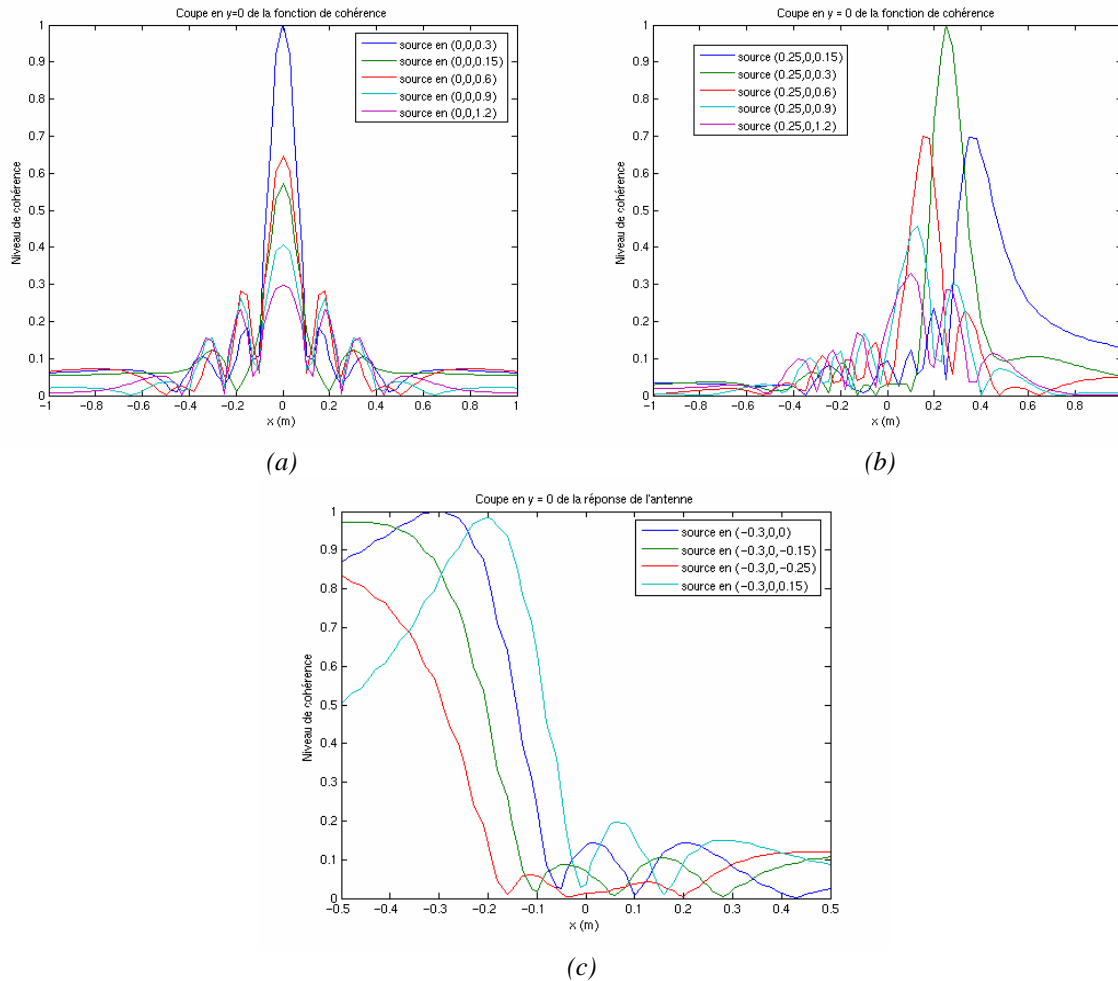


Fig. n°2.31 : Coupe en $y = 0$ de la réponse de l'antenne pour 5 positions de sources, pour une fréquence de 2000Hz, dans le cas où celle-ci est (a) centrée, (b) non centrée à droite du centre (c) non centrée à gauche du centre.

Dans le cas d'une source centrée, on remarque que le maximum de cohérence se situe toujours à la position de la source quelle que soit sa position. Par contre, de manière assez logique, la valeur de ce maximum est beaucoup moins élevée au fur et à mesure que la source est éloignée du plan de focalisation : 1 quand la source est sur le plan de focalisation, 0,62 quand la source est à 30 cm du plan, 0,38 quand elle est à 60 cm, etc. De plus, l'amplitude des lobes secondaires augmente également avec la distance entre la source et le plan de focalisation (cf. fig. n°2.31 (a)).

Dans le cas d'une source excentrée à droite, le maximum de cohérence n'est plus situé à la position de la source et reste inférieur à 1. De plus, il se décale au fur et à mesure que la distance entre la source et le plan de focalisation augmente. Ainsi, il a tendance à se décaler vers la gauche quand la source est positionnée au-delà du plan de focalisation et vers la droite quand il est placé entre le plan de focalisation et le plan de l'antenne (cf. fig. n°2.31 (b)).

Dans le cas de la source excentrée à gauche, les remarques sont les mêmes sauf que le décalage ne se fait pas dans le même sens que précédemment : le maximum se déplace vers la droite quand la source se trouve au-delà du plan de focalisation et vers la gauche quand la source est entre le plan de l'antenne et le plan de focalisation.

Par analogie, on remarque que les mêmes phénomènes se produisent selon l'axe (Oy).

Les résultats obtenus dans ces simulations (fig. n°2.31) peuvent être rapprochés avec la figure n°1.23 du paragraphe 1.4.2 b) de la tâche focale en forme d'ellipse. En effet, on remarque, en focalisant sur une droite telle que le centre F_0 (position exacte de la source) soit légèrement au-dessus ou en dessous de cette droite, que le maximum de la fonction de localisation est décalé par rapport à la position de la source en F_0 et que ce maximum décroît au fur et à mesure que la distance augmente entre la droite de focalisation et la position de la source (cf. fig. n°2.32). Ceci est dû à la forme ellipsoïdale de la tâche focale.

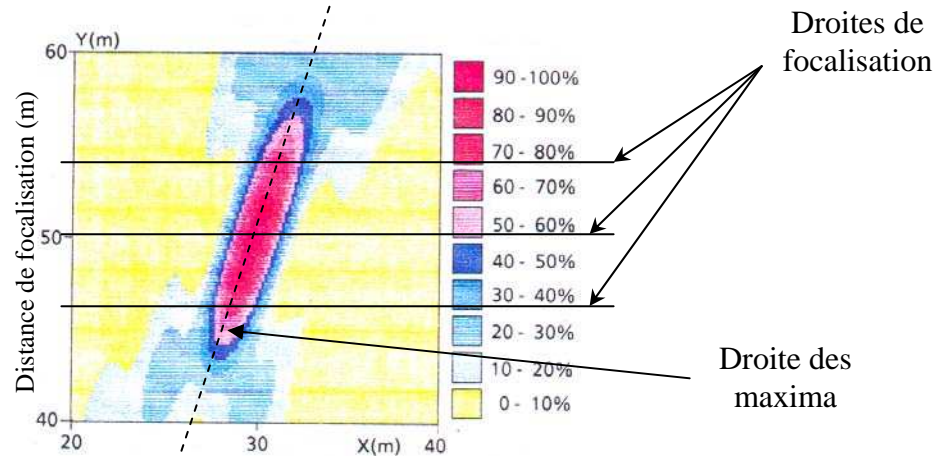
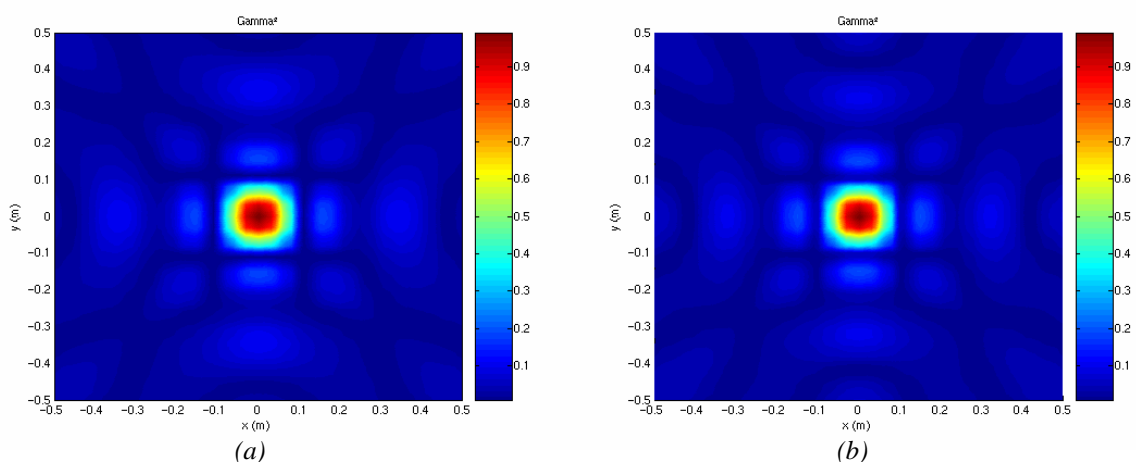


Fig. n°2.32 : Evolution de la tâche focale et de ses maxima en fonction de la droite de focalisation choisie.

2.3.7 Influence du déphasage des microphones.

Dans le cas pratique, comme il l'a déjà été écrit dans le paragraphe 2.2.6, les microphones utilisés ne sont pas appariés en phase, il existe donc des erreurs relatives de phase entre eux.

L'influence du déphasage pouvant exister entre les microphones est étudiée. Les déphasages introduits sont identiques à ceux utilisés dans les simulations d'holographie (cf. paragraphe 2.2.6) à savoir $4,5^\circ$ à 2000 Hz. Le cas d'une antenne 16 + 16 microphones détectant une source centrée est simulé.



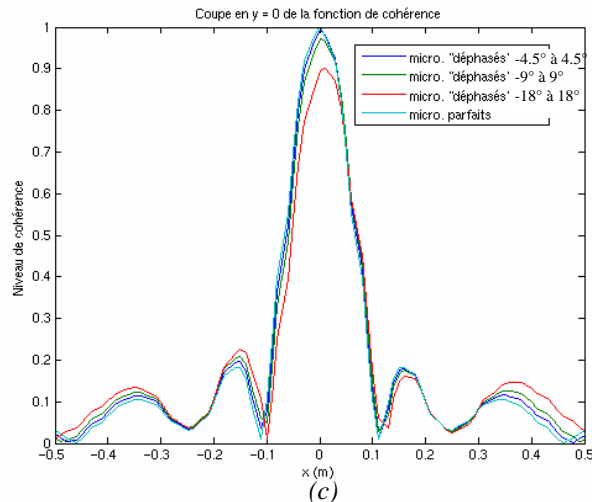


Fig. n°2.33 : Réponse de l'antenne à une source centrée, à une fréquence $f = 2000$ Hz : (a) dans le cas de microphones appariés, (b) dans le cas de microphones déphasés de $4,5^\circ$ à 2000 Hz, (c) Coupe en $y = 0$ de la réponse de l'antenne pour plusieurs déphasages.

On constate que, pour les microphones déphasés, l'erreur sur le maximum de cohérence est minimale (cf. fig. n°2.33 (c)) : cohérence de 0,986 au lieu de 1 soit une erreur de 1,4% ; et, le champ de cohérence reste inchangé : positionnement de la source toujours exacte (cf. fig. n°2.33 (a) et (b)).

Afin, de montrer la robustesse de l'antenne face aux erreurs de phase. L'erreur de phase sur les microphones est amplifiée. Ainsi, on constate que l'erreur devient vraiment significative 10% (cohérence de 0.90 au lieu de 1) lorsque le déphasage relatif entre les microphones atteint 18° (cf. fig. n°2.33 (c)).

2.3.8 Influence du filtrage spatial : apodisation.

Afin d'étudier l'influence de l'introduction d'un filtrage spatial dans le traitement d'antenne, trois types de filtrage sont introduits : Blackman, Hanning et Hamming. La configuration précédente est conservée. Les filtres utilisés sont essentiellement celui de Hanning et de Hamming (cf. fig. n°2.34).

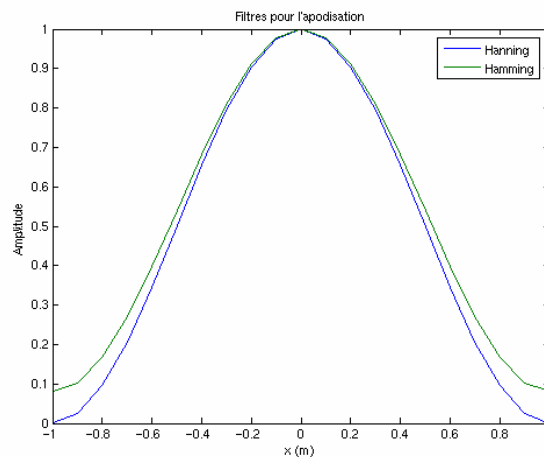


Fig. n°2.34 : Représentation des filtres de Hanning et de Hamming.

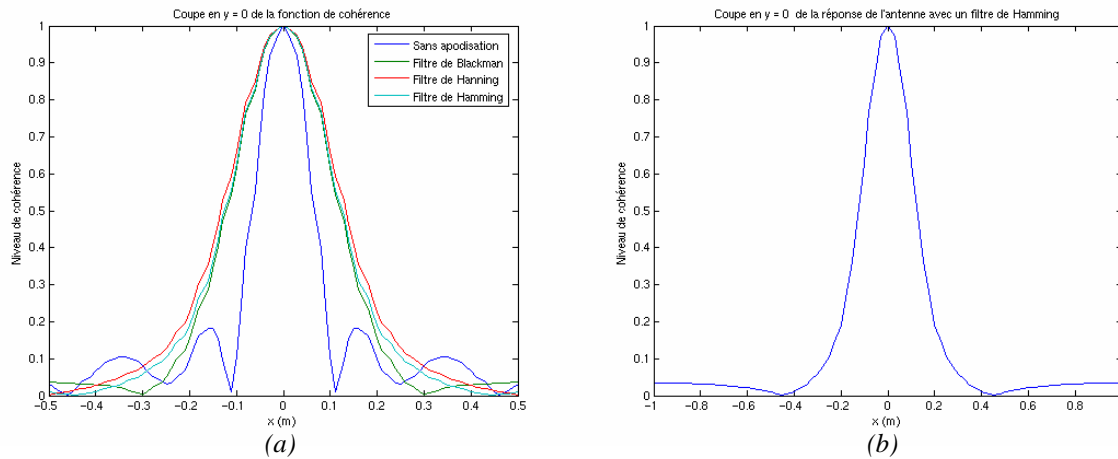


Fig. n°2.35 : Coupe en $y = 0$ de la réponse de l'antenne, à une fréquence $f = 2000$ Hz : (a) en fonction de différents type de filtrage, (b) avec un filtre de Hamming.

On constate que les 3 filtres agissent de la même façon sur la réponse de l'antenne (cf. fig. n°2.35 (a)) : une perte de résolution au profit d'une meilleure dynamique est observée. En effet, les lobes secondaires sont réduits à une amplitude de 0,03 au lieu de 0,2 quand aucune apodisation n'est réalisée (cf. fig. n°2.35 (b)). De plus, la position du second lobe est repoussée très loin du lobe principal ($x = 0,17$ sans apodisation, $x = 1$ m avec un filtre de Hamming).

Sans être obligatoire, l'apodisation est un processus de traitement d'antenne intéressant car il permet de s'affranchir des lobes secondaires. Par exemple, en se référant au paragraphe 2.3.3, l'apodisation permet d'utiliser l'antenne à des distances "antenne – plan source" plus petites car, grâce à la minimisation des lobes secondaires, on s'affranchit des problèmes de perte de dynamique constatés lorsque la distance plan source à l'antenne diminue (cf. paragraphe 2.3.3). Toutefois, il faut éviter de se placer dans le champ proche de la source (grande instabilité du niveau de pression). Cette conclusion est intéressante dans le cas du milieu confiné car on a intérêt à se placer près du plan source pour éviter que les sources parasites (celle positionnées sur les autres parois de la cabine d'hélicoptère par exemple) viennent trop bruyamment les mesures.

2.3.9 Synthèse de l'étude paramétrique de l'antennerie.

Tout comme l'holographie, les simulations faites pour l'antennerie permettent de tirer des conclusions sur le dimensionnement et le positionnement de l'antenne, résumées sur le tableau n°2.2.

Paramètre testé	Observation	Conclusion
<i>Espacement entre capteurs</i>	- 4 cm est un bon compromis	- Fréquence maximum dépendant du plan de focalisation défini (mini : 4250 HZ)
<i>Fréquence</i>	- Résolution spatiale dépendante de la fréquence. - Dynamique de mesure modifiée	- Résolution suffisante pour avoir de bonnes tendances dans la gamme de fréquence 1000 – 4000 Hz
<i>Pouvoir de résolution</i>	-	- $0,38\lambda$ au mieux.
<i>Précision</i>	- Liée au pas de balayage choisi pour le plan de focalisation	- Précision position: $\pm d_{\text{pas}}/2$ - Précision amplitude : \pm Erreur sur voies de mesure.
<i>Taille de l'antenne</i>	- Résolution spatiale dépendante de l'envergure de l'antenne - Dynamique de mesure modifiée	- Envergure à partir de laquelle le gain en résolution est faible et la dynamique de mesure amoindrie.
<i>Distance de focalisation</i>	- Résolution spatiale dépendante. - Dynamique de mesure modifiée	- Distance de focalisation D recommandée entre $L/2$ et L
<i>Angle d'observation</i>	- Détérioration de la résolution avec l'éloignement de la source du réseau de microphones. - Positionnement exact quelque soit la fréquence.	- Permet d'explorer des zones étendues.
<i>Source extérieure au plan de focalisation</i>	- Résolution spatiale inchangée. - Détection de la source mais à un maximum de cohérence différent de 1. - Mauvais positionnement de la source	- Possibilité de trouver le vrai plan de focalisation en refaisant le calcul dans plusieurs de ces plans.
<i>Déphasage relatif entre microphones</i>	- Méthode robuste peu sensible aux erreurs de phase.	- Non nécessaire d'intégrer les écarts relatifs.
<i>Filtrage</i>	- Filtrage non obligatoire	- Permet d'améliorer la dynamique de mesure.

Tableau n°2.2 : Influences des différents paramètres sur la réponse de l'antenne.

Il en ressort que le dimensionnement et le positionnement de l'antenne est un savant compromis entre différents paramètres. En effet, les performances de l'antenne dépendent simultanément de plusieurs paramètres (fréquence, taille de l'antenne et distance de focalisation), ce qui rend difficile une optimisation. Toutefois, l'antennerie a l'avantage certain de pouvoir explorer des zones étendues et d'être extrêmement peu sensible aux erreurs de phase.

En conclusion, pour un champ libre, en présence de sources de type « monopôle », l'antennerie, moyennant certaines précautions (cf. tableau n°2.2), permet d'identifier la source avec une précision de $\pm d_{\text{pas}}/2$ et de donner le niveau de cohérence à $\pm 0,03$ avec les microphones à disposition. Par contre, le pouvoir de résolution est lui de $0,38\lambda$, soit à une fréquence de 2000Hz, un pouvoir de résolution de 6,5cm.

2.4 Synthèse globale des résultats obtenus.

Pour un fonctionnement optimal de l'holographie, il est nécessaire de connaître un minimum le champ étudié et notamment les sources principales de bruit afin de pouvoir placer un microphone de référence le plus près possible de chacune de ces sources afin de reconstruire le champ acoustique le plus fidèlement possible. De plus, la grille de microphones doit être placée au plus près de la zone source (8cm dans le cas de sources monopolaires est un bon compromis) afin que celle-ci capte le maximum d'énergie émis par les sources.

On a mis également en évidence la nécessité de filtrer spatialement les mesures (Veronesi) mais aussi de régulariser les matrices utilisées lors du calcul (Nouals). Sinon les champs reconstruits sont bruités et génèrent des sources artificielles de niveau conséquent (pouvant être 5 à 10dB au dessus du niveau de la source réelle).

D'autre part, l'holographie ne permet pas de détecter les sources extérieures au champ physique de la grille de microphones. Ces sources non détectables viennent même perturber plus ou moins fortement les résultats en générant des perturbations sur les bords de la grille. Il est donc important que la grille incorpore toute la zone source pour pallier à ces problèmes. Il est évident qu'une grande zone source va entraîner un nombre important de mesures supplémentaires. D'ailleurs, un compromis entre le temps de mesure (lié au nombre de microphones disponibles et à la taille de la zone source à explorer) et la gamme fréquentielle d'étude souhaitée (liée à l'espacement entre capteurs) est nécessaire.

Ainsi, par exemple, pour un plan de mesure de 1m², si l'antenne est composée de 8 microphones espacés de 4cm, la mesure met une heure à être réalisée.

Il en ressort également l'intérêt de connaître les microphones utilisés et notamment la différence relative de phase pouvant exister entre eux-ci. La non prise en compte des caractéristiques des microphones engendre des erreurs de positionnement des sources (± 4 cm pour des différences de phase de l'ordre de $4,5^\circ$ à 2000Hz), et une reconstruction moins performante des niveaux de bruit réellement engendrés par la source (± 3 dB pour l'amplitude pour le même type de déphasage).

De même, pour un fonctionnement optimal de l'antenne en champ proche, il faut disposer d'une antenne qui soit un bon compromis entre nombre de capteurs et résolution (liée à la taille et à la distance de focalisation) et qui s'affranchisse éventuellement des problèmes de lobes secondaires pour augmenter la dynamique de mesure (utilisation de l'apodisation). Une antenne allant de la dimension de la distance de focalisation jusque deux fois celle-ci est un bon compromis.

En outre, l'antenne permet de détecter des sources situées nettement en dehors de l'espace délimité par la longueur d'antenne : si la source est incluse dans le plan source, lorsque l'angle d'observation augmente, la résolution de l'antenne se dégrade mais la position de la source est conservée. Par contre, dans le cas d'une mauvaise appréciation de la distance de la source (source non incluse dans le plan de focalisation), la source est mal positionnée et la cohérence est inférieure à 1. Ainsi, en faisant varier la distance de focalisation, il est possible de déterminer à posteriori la distance réelle de la source correspondant à un maximum de cohérence de 1 (dans le cas d'une source monopolaire).

On constate également que l'antennerie est très robuste face aux différences relatives de phase pouvant exister entre les différents microphones composant l'antenne. Les résultats obtenus sont encore convenables pour un déphasage entre microphones compris entre -18° et $+18^\circ$. Les déphasages constatés sur les microphones Sennheiser sont donc tout à fait acceptables pour les résultats d'antenne.

Par ailleurs, un compromis entre la résolution voulue (liée à la taille de l'antenne) et la gamme fréquentielle souhaitée (liée à l'espacement entre deux capteurs consécutifs) va être nécessaire pour dimensionner l'antenne.

Dans le cas de cette étude, les premières expériences sont menées avec une antenne 8 + 8 microphones espacés de 4cm. La distance de focalisation utilisée est de 25cm soit la dimension d'un bras de l'antenne.

CHAPITRE 3.

Expérimentations et améliorations proposées.

Suite à l'étude paramétrique, la troisième étape de cette étude a été de dimensionner les outils de mesure à l'aide de simulations et de définir une étude paramétrique permettant de mettre en évidence les faiblesses et les avantages de chaque méthode dans un milieu confiné, et, ensuite, d'améliorer les techniques afin de les adapter à ce type d'environnement.

D'autre part, étant donnée la complexité des phénomènes observés dans une cabine d'hélicoptère, il a été nécessaire dans un premier temps de réaliser un ensemble d'expériences de laboratoire de complexité croissante avec pour objectif final l'utilisation de l'outil dans des conditions réelles. Cette démarche progressive permet ainsi de faire des diagnostics intermédiaires et de comprendre les phénomènes physiques en jeu. Elle peut se résumer à l'aide du schéma synoptique représenté sur la figure n°3.1.

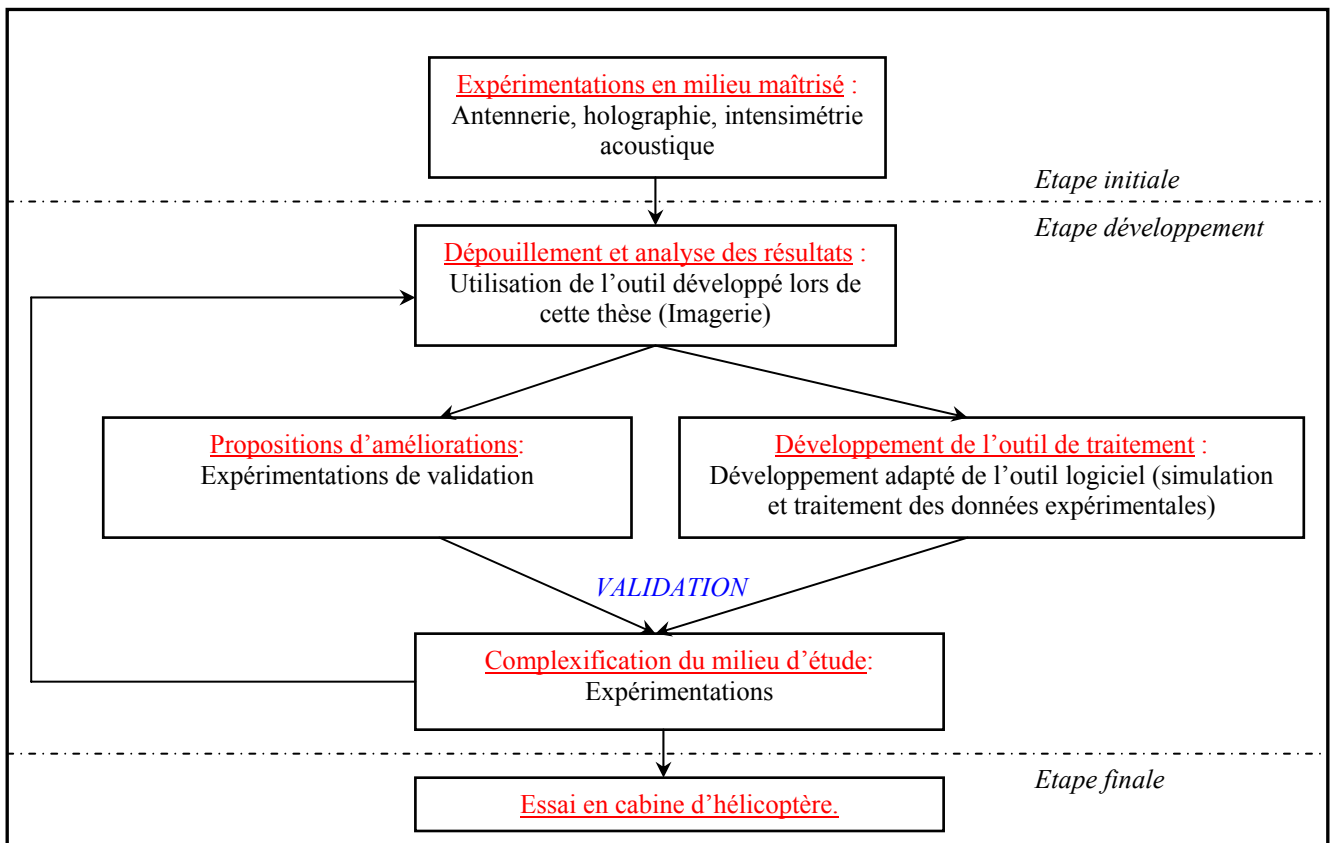


Fig. n°3.1 : Démarche suivie pour la réalisation de cette étude.

A chaque fin de « cycle », deux objectifs sont visés :

- Comprendre l'effet du milieu confiné sur la réponse des outils de mesure, apporter une amélioration éventuelle, puis augmenter la complexité de la configuration.
- Améliorer et valider l'outil de simulation développé.

La première étape, qui ne sera développée qu'en annexe, consiste à valider les programmes développés pour le traitement des données acquises pour chacune des techniques. Une série de mesures a donc été effectuée avec un haut parleur mobile dans la chambre anéchoïque de l'ONERA émettant dans la gamme de fréquence 500 – 5000 Hz, qui constitue un environnement parfaitement maîtrisé de champ libre pour lequel chaque technique est adaptée. Cette étape étant réalisée, les effets du milieu confiné sur la réponse de ces différentes techniques peuvent être étudiés.

3.1 Deux plans réfléchissants placés en angle droit.

3.1.1 Position du problème, description de l'expérience et de ses préliminaires.

Dans un milieu confiné telle qu'une cabine d'hélicoptère, deux types de « perturbations » peuvent venir bruyter les mesures : l'une correspondant à des ondes émises par une source placée sur la paroi étudiée se réfléchissant sur les autres parois et l'autre liée à des sources dites « parasites » (sources placées sur une autre paroi qui rayonnent en direction des capteurs de mesure).

a) Présentation du milieu créant les perturbations.

Afin d'étudier l'influence de ces deux types de perturbations sur les différentes techniques de localisation, deux plans purement réfléchissants en Médit (cf. fig. n°3.2) d'épaisseur 2 cm, de dimension 1 m x 1 m sont placés à angle droit et possèdent donc une arête commune afin de pouvoir créer des réflexions (cf. fig. n°3.3). Chaque panneau peut être muni de plusieurs sources compactes affleurantes (haut-parleurs) grâce à différents trous positionnés comme indiqués sur la figure n°3.3.

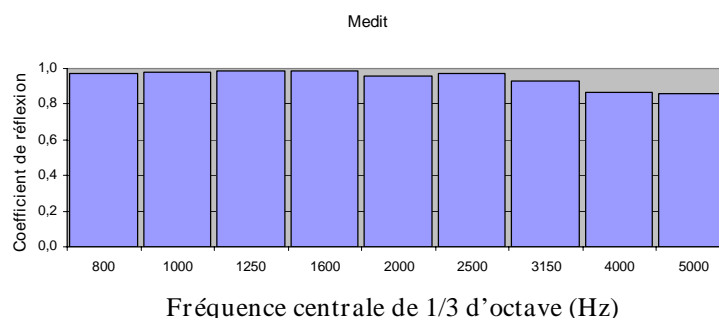
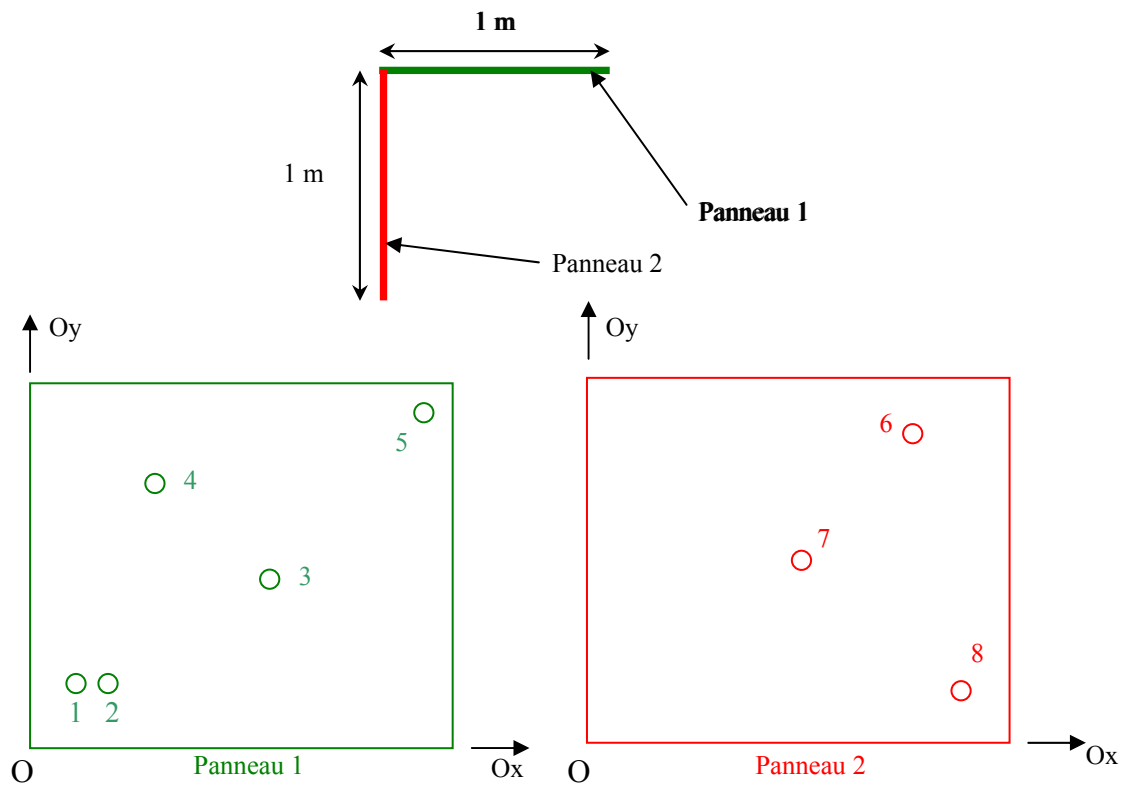


Fig. n°3.2 : Coefficient de réflexion d'une plaque de Médit mesuré en chambre réverbérante.



Position trou	x (m)	y (m)
Trou n°1	0,1	0,2
Trou n°2	0,2	0,2
Trou n°3	0,55	0,45
Trou n°4	0,3	0,65
Trou n°5	0,9	0,9
Trou n°6	0,65	0,85
Trou n°7	0,5	0,5
Trou n°8	0,85	0,2

Fig. n°3.3 : Plan et schéma des deux panneaux utilisés pour l'expérience, localisation des trous réalisés pour positionner les haut-parleurs.

Dans le cadre des essais présentés dans ce chapitre, seules cinq sources sont disposées, respectivement dans les trous n°1, 3, 4, 7 et 8. Ces positions ont été choisies afin de pouvoir créer les perturbations souhaitées avec une amplitude plus ou moins grande : les sources en 1, 3, 4 placées sur le plan d'étude sont à localiser, et celles positionnées en 7 et 8 sont des sources « parasite ». De plus, le panneau 2 est un plan réfléchissant créant des sources virtuelles

Afin d'exciter l'environnement précédent, cinq haut-parleurs de la marque Visaton n°2231, de diamètre 5 cm, quasi-omnidirectionnels sur toute la gamme de fréquence 1000 – 5000 Hz (cf. annexe n°4), sont utilisés.

b) Le dispositif de mesure.

Afin de maîtriser l'environnement de mesure, les deux plans perpendiculaires sont suspendus à l'intérieur de la chambre anéchoïque de l'ONERA (cf. fig. n°3.4). La suspension des panneaux permet d'éviter les réflexions éventuelles des ondes sur le sol en caillebotis.

Le panneau d'étude, supposé source du rayonnement acoustique, est le panneau 1 (encadré en rouge sur la figure n°3.4)

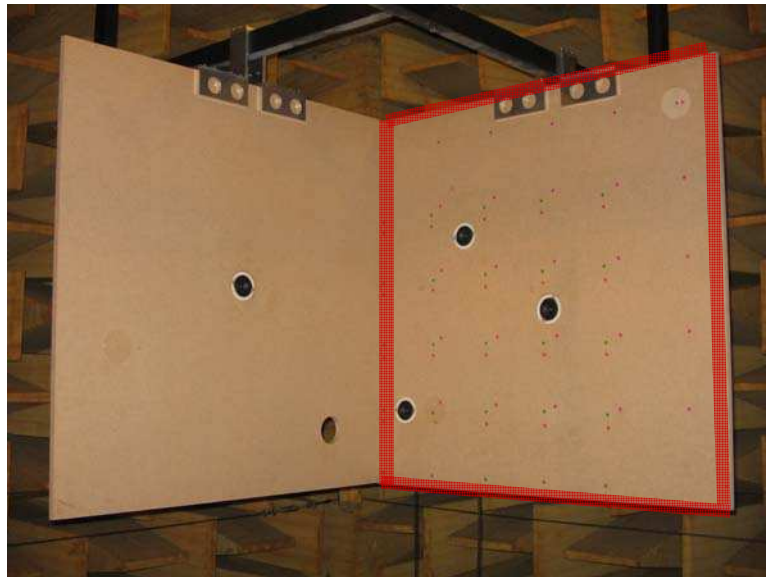


Fig. n°3.4 : Photo des panneaux placés à angle droit dans la chambre anéchoïque et des cinq sources encastrées.

Les caractéristiques du matériel d'acquisition disponible (notamment le nombre de voies d'acquisition synchrone disponibles) constituent également un facteur important à prendre en compte lors du dimensionnement de l'outil de mesure. L'ONERA dispose d'un boîtier d'acquisition MKII, développé par la société Muller-BBM. Il est équipé de 16 voies de mesure.

Enfin, un système de déplacement automatique est utilisé pour acquérir les champs de pression (STSF) ou d'intensité acoustique.

3.1.2 Dimensionnement des outils de mesure.

L'objectif des trois paragraphes suivants est de présenter les choix qui ont été faits pour l'expérimentation suite à l'étude bibliographique et à l'étude paramétrique.

Du point de vue du traitement du signal, la fréquence d'échantillonnage utilisée est de 32768 Hz et les blocs sont composés de 1024 points soit une résolution fréquentielle Δf de 32 Hz.

a) L'holographie acoustique (STSF).

En premier lieu, le champ hologramme doit couvrir le plan source étudié pour pouvoir reconstruire le champ sur toute la surface. Au vu des dimensions du plan source et de

l'espacement entre capteurs défini à 4 cm (cf. paragraphe 2.1.1), le plan hologramme maillé est composé de 24x25 points (soit 600 points de mesure).

Prenant en considération d'une part le nombre de voies de mesure disponibles, et d'autre part la disposition des points de maillage et la nécessité d'ajouter un (ou des) microphone(s) de référence, une antenne linéaire composée de 8 microphones électrets Sennheiser 2280 espacés de 4 cm est utilisée.

Par ailleurs, il est important de vérifier que l'antenne ne se trouve pas dans le domaine de Rayleigh des sources. Le haut-parleur fonctionnant tel un piston, sa distance de Rayleigh associée peut être calculée (cf. paragraphe 2.1.3). Elle est de 3 cm à 5000 Hz ($\lambda=0,068$ m) (cas le plus critique). Dans le cadre de cette étude, la technique holographique, préconisée à proximité du champ source, est utilisée à 8 cm donc bien au-delà du champ proche.

Un système de déplacement automatique est utilisé pour couvrir l'ensemble de la surface de mesure. Des microphones de référence sont également placés à 5 cm des sources.

Enfin, les résultats obtenus via la STSF sont présentés sous forme de champs de pression quadratique, mettant mieux en évidence que l'échelle logarithmique les écarts de niveaux entre les points de la grille.

b) L'antennerie.

Disposant d'un nombre de capteurs et de voies d'acquisition limités, une antenne en croix dont chaque bras est composé de 8 microphones espacés de 4 cm est retenue. Ce dispositif de mesure permet ainsi de réaliser une cartographie complète du plan source étudié en une unique mesure. Ce dispositif présente l'avantage d'être compact et peu encombrant (cf. annexe n°5)

La distance de focalisation est fixée à 25 cm, après les études préliminaires réalisées au chapitre 2. Le pas de focalisation (distance définie entre deux points composant le maillage du plan de focalisation) utilisé est de 2cm. De plus, l'angle solide, par rapport au centre de l'antenne est alors de 63° imposant une fréquence maximale d'étude de 4900 Hz ($\lambda=0,07$ m).

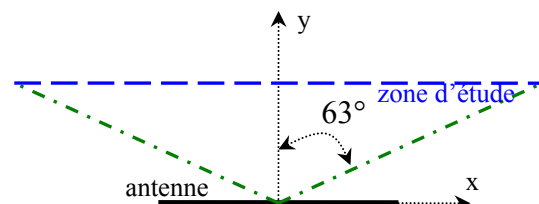


Fig. n° : Zone d'étude utilisée (angle solide de 63°)

Par ailleurs, une apodisation de type Hanning est appliquée.

c) L'intensimétrie acoustique.

Pour cette technique de localisation, une sonde 3D composée de 6 microphones B&K (appariés deux à deux) est employée permettant de reconstruire le vecteur intensité suivant les 3 directions (x,y,z) à chaque position du maillage. L'espace entre 2 microphones appariés est de 12 mm, permettant ainsi de travailler sur une gamme de fréquences allant de 125 Hz ($\lambda=2,72$ m) à 5000 Hz ($\lambda=0,068$ m).

La distance entre le plan de mesure maillé et le plan source étudié est fixée à 10 cm. Elle est le résultat d'un compromis entre les critères théoriques d'estimation d'intensité en champ proche et les critères d'encombrement matériel.

De plus, il est nécessaire de couvrir une surface équivalente à la surface source étudiée. Un pas de maillage de 4 cm est choisi en accord avec les écarts existants entre les microphones dans les techniques d'holographie et d'antennerie.

Il est également important de noter que les vecteurs « intensité », pour tous les plans tangentiels (x,y), sont représentés, dans ce rapport, par leur symétrie afin qu'ils convergent vers la source.

d) Résumé du dispositif de mesure.

Le tableau suivant (cf. tableau n°3.1) résume le dispositif de mesure utilisé pour chaque technique de localisation et fait apparaître le temps nécessaire pour acquérir l'ensemble des données.




	Holographie	Antennerie	Intensité
Géométrie			
Nombre de points	24 x 25 (600 points)	8 + 8	24 x 25 (600 points)
Espacement entre mailles	4 cm	4 cm	4 cm
Distance / panneau	8 cm	25 cm	10 cm
Temps de mesure	1 h	2 min	3 h

Tableau n° 3.1 : Dispositif expérimental et dimensions caractéristiques

De nombreuses configurations ont été testées tels que le nombre de sources en fonctionnement, la corrélation entre sources... Afin de ne pas alourdir ce mémoire, seuls les résultats déterminants seront présentés dans la suite de ce chapitre.

3.1.3 Premier cas d'étude : une source excitée dans le plan d'étude (effet d'une réflexion).

Afin d'étudier l'influence d'une réflexion créée sur une autre paroi par une source placée dans le plan source (encadré en rouge), le haut-parleur positionné dans le trou n°1 est excité par un signal aléatoire de type bruit blanc entre 500 et 5000 Hz.

A la vue du dispositif de mesure, ce cas de configuration est le plus critique car la source est très proche du plan réfléchissant (cercle blanc) : la proximité de la source avec le panneau réfléchissant n°2 est susceptible de produire une source virtuelle provoquée par la réflexion des ondes incidentes.

a) L'holographie acoustique (STSF).

Les résultats suivants montrent l'évolution en fonction de la fréquence du champ de pression quadratique reconstruit dans le plan source à partir de la mesure par holographie (cf. fig. n°3.5). Le cercle blanc sur chaque champ représente la position exacte de la source.

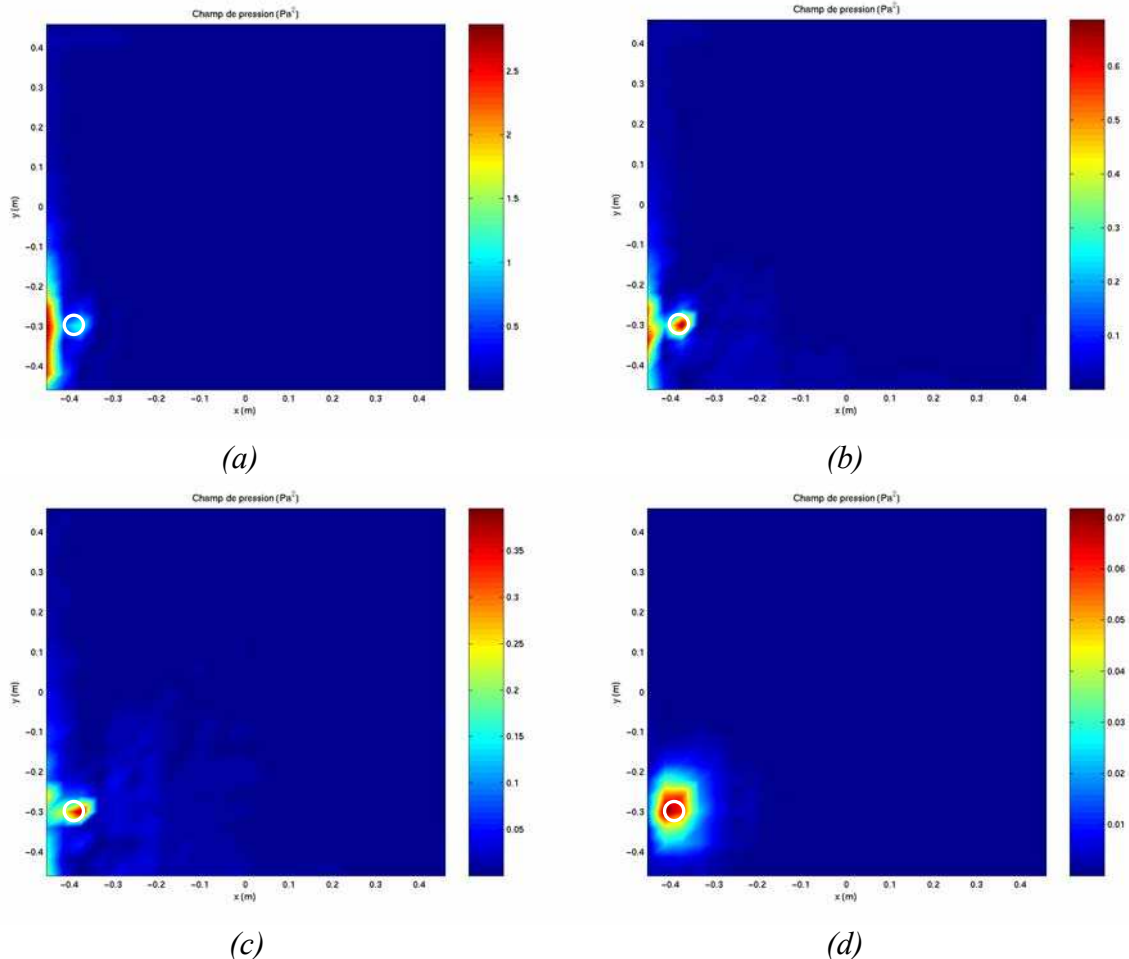


Fig. n°3.5 : Champ de pression quadratique (Pa^2) reconstruit sur le plan source à une fréquence f de (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), (b) 2048 Hz ($\lambda=0,167$ m), (c) 2496 Hz ($\lambda=0,136$ m) et (d) 3008 Hz ($\lambda=0,113$ m), avec le filtrage de Veronesi paramétré avec $k_c = 0,6k_{max}$.

On constate, en basses fréquences, que la réflexion est répartie spatialement le long de l'angle des panneaux et est prépondérante par rapport à la source principale. Plus la fréquence croît, plus l'effet de la réflexion diminue, devenant négligeable à partir de 2500 Hz ($\lambda=0,136$ m).

En comparant le niveau de pression mesuré par le microphone de référence (situé à proximité de la source) avec le niveau reconstruit au même point, à 1024 ($\lambda=0,33$ m) et 2048 Hz ($\lambda=0,167$ m), les différences de niveaux sont de l'ordre de 1 dB, alors qu'aux fréquences supérieures, le filtrage de Veronesi pour $k_c = 0,6k_{x_{max}}$ introduit une perte de niveau de 4 à 10 dB. Cette observation, également constatée lors des simulations (cf. paragraphe 2.2.1), s'explique par le caractère de plus en plus restrictif du filtre de Veronesi.

En réduisant encore le nombre d'onde de coupure du filtre ($k_c = 0,5k_{x_{\max}}$), les réflexions ne sont plus visibles aux basses fréquences. La source placée en "1" est, par conséquent, bien localisée mais le niveau de pression est fortement sous-estimé (cf. fig. n°3.6). Ainsi, le paramètre de filtrage k_c privilégie soit la détection de la source acoustique, soit le niveau de pression reconstruit.

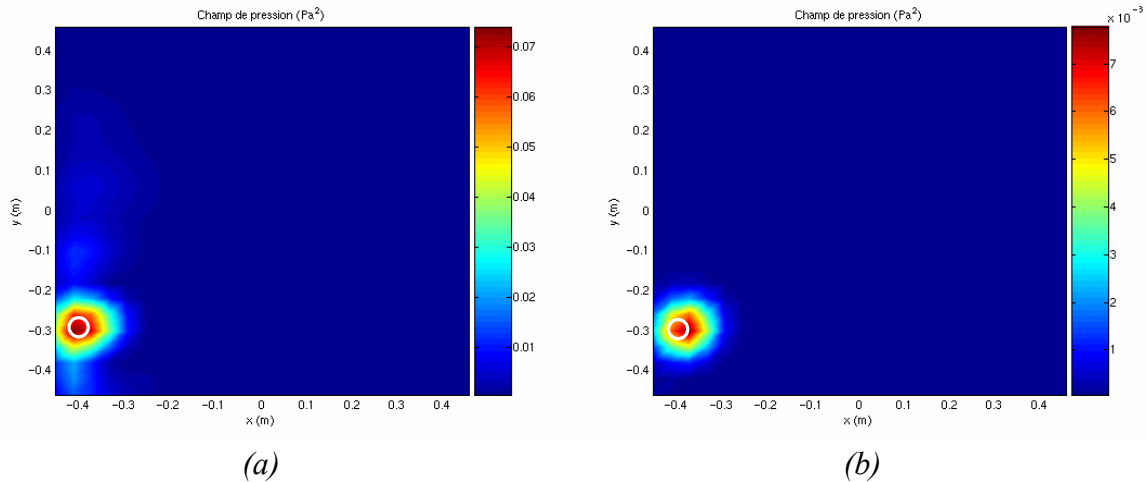


Fig. n°3.6 : Champ de pression quadratique (Pa^2) reconstruit sur le plan source à une fréquence de (a) 1024Hz ($\lambda=0,33$ m) et (b) 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m), avec le filtrage de Veronesi paramétré avec $k_c = 0.5k_{\max}$.

A présent, on s'intéresse à la zone dans laquelle le phénomène de réflexion observé va être présent. Les sources placées en "4" et "3" sont excitées successivement par le même bruit blanc que précédemment.

Dans un premier temps, les positions de sources observées sont moins critiques que pour la configuration précédente en raison de leur éloignement par rapport au panneau réfléchissant n°2.

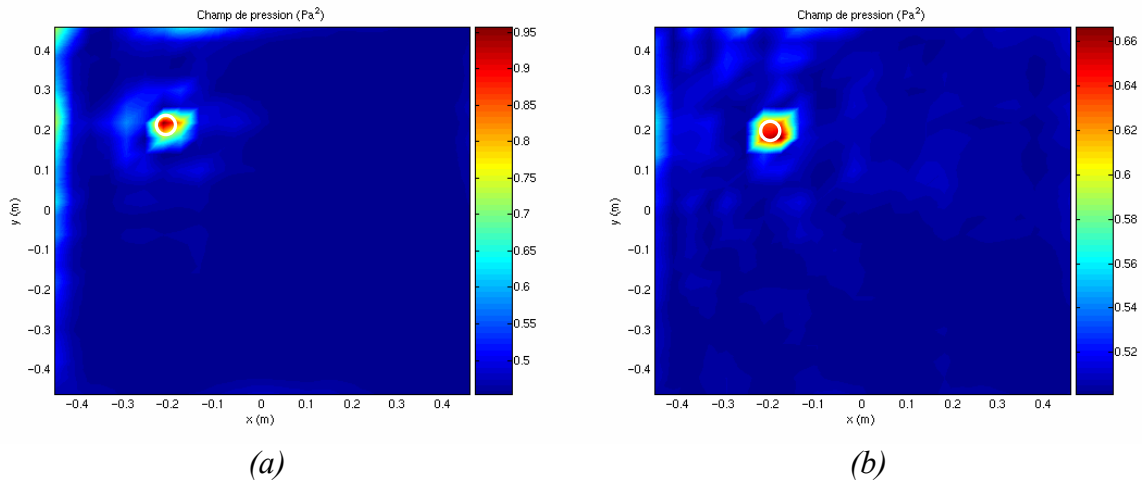


Fig. n°3.7 : Champ de pression quadratique (Pa^2) reconstruit sur le plan source à une fréquence de (a) 1024Hz ($\lambda=0,33$ m) et (b) 1504 Hz ($\lambda=0,226$ m), quand la source placée en "4" fonctionne.

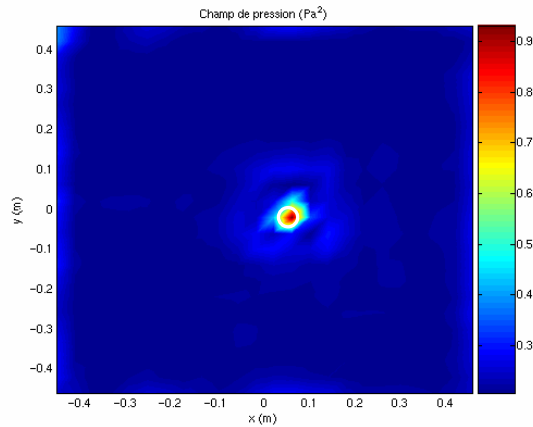


Fig. n°3.8 : Champ de pression quadratique (Pa^2) reconstruit sur le plan source à une fréquence de 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), quand la source placée en "3" fonctionne.

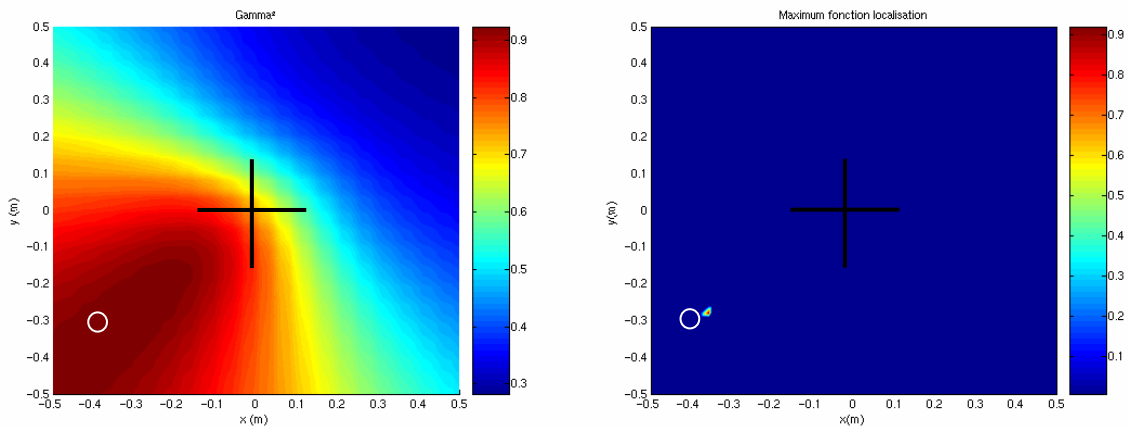
De plus, les réflexions sont présentes sur une gamme de fréquence beaucoup plus restreinte (cf. fig. n°3.7 et 3.8). En effet, dans le cas de la source placée en "4", le phénomène est mineur à 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), et disparaît dès 1504 Hz ($\lambda=0,226$ m). En éloignant la source en "3", aucun phénomène lié à une quelconque réflexion n'est plus constaté, ceci quelle que soit la fréquence.

En résumé, plus la fréquence croît, plus la zone où des phénomènes de réflexion se produisent se réduit. Mais, lorsqu'elles se produisent, les interférences sont susceptibles de bruyé le traitement en masquant la source réelle.

b) L'antennerie acoustique.

Les figures suivantes présentent le niveau de cohérence obtenu spatialement ainsi que le maximum local de cohérence (cf. fig. n°3.9), ceci dans les mêmes conditions expérimentales que précédemment.

La croix noire représente l'antenne utilisée et le rond blanc, la position exacte du haut-parleur.



(a)

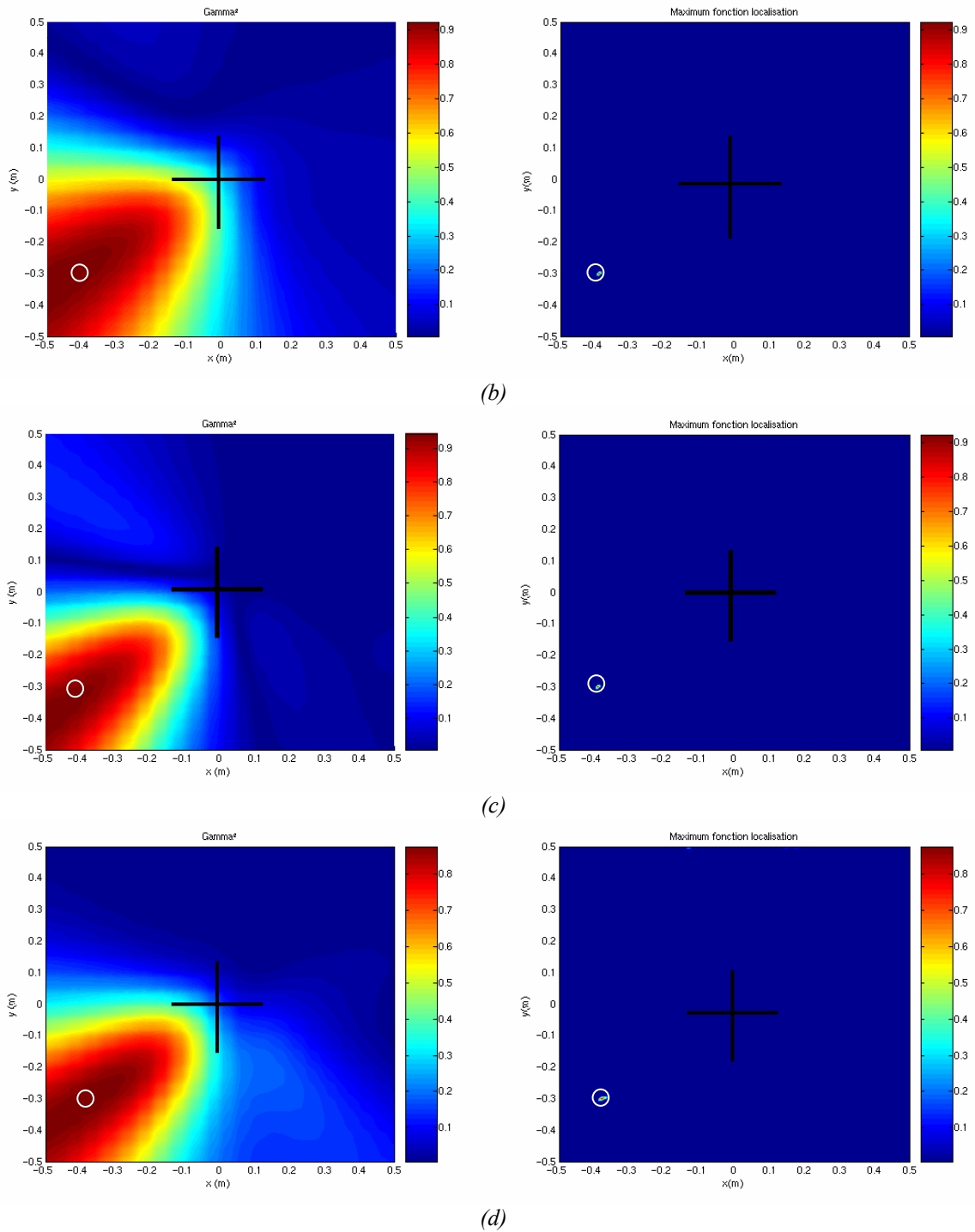


Fig. n°3.9 : Cohérence (gauche) et maximum de cohérence (droite) à une fréquence de (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), (b) 2048Hz ($\lambda=0,168$ m), (c) 2496 Hz ($\lambda=0,136$ m) et (d) 3008 Hz ($\lambda=0,113$ m).

La position de la source constatée est identifiée de façon précise au maximum de cohérence (cf. tableau n°3.2), quelle que soit la fréquence. La (ou les) position(s) du (ou des) maximum(a) sont calculées à l'aide d'un programme qui identifie tous les maxima locaux et la position de ceux-ci à l'aide du pas d'échantillonnage donné pour le plan de focalisation. Il en ressort donc que la réflexion n'induit aucune modification sur la réponse de l'antenne.

Fréquence (Hz)	Position exacte	Position constatée
1000 ($\lambda=0,34$ m)	(-0,4;-0,3)	(-0,36;-0,28)
2000 ($\lambda=0,17$ m)	(-0,4;-0,3)	(-0,4;-0,3)
2500 ($\lambda=0,136$ m)	(-0,4;-0,3)	(-0,4;-0,3)
3000 ($\lambda=0,113$ m)	(-0,4;-0,3)	(-0,4;-0,3)

Tableau n°3.2 : Comparaison entre la position exacte de la source et sa position constatée en antennerie.

Ceci peut s'expliquer par le fait que l'antenne est :

- éloignée du panneau réfléchissant : les ondes acoustiques réfléchies ont plus de chemin à parcourir que les ondes directes.
- située à proximité du plan source : une faible fraction de l'énergie acoustique réfléchi atteint celle-ci.

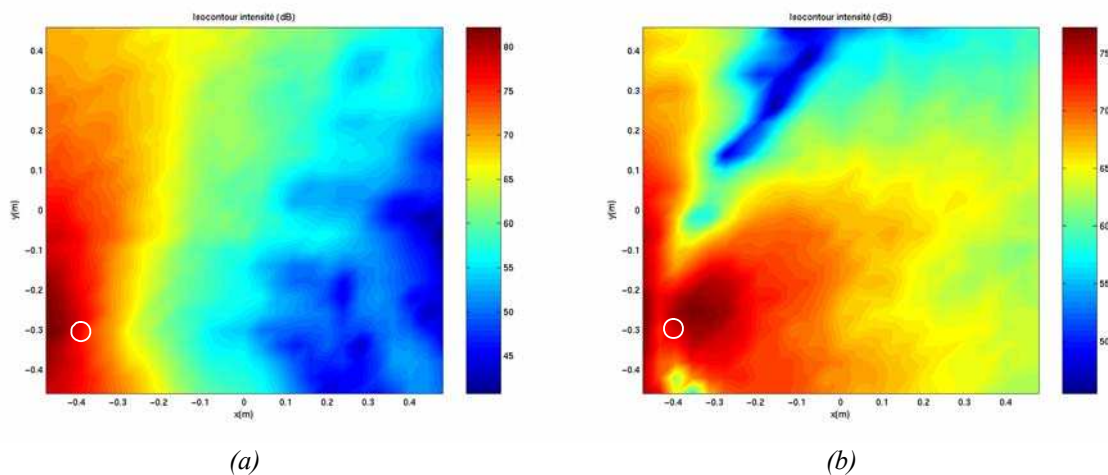
Le même type de phénomène a pu être observé pour les sources placées en "3" et "4".

Contrairement à l'étude menée par le NLR [122] (cf. paragraphe 1.4.4) qui concluait à un effet de la source « miroir » jusqu'à 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m), la réponse de l'antenne n'est pas influencée par la présence d'une réflexion dans ce cas d'étude.

On peut alors se demander pourquoi les résultats obtenus sont différents. En [122], l'antenne circulaire, composée de 96 microphones, était placée à 1,5 m de la source, soit à une distance comparable vis-à-vis de la source réelle et du plan réfléchissant. Deux explications sont envisageables : on peut supposer que l'antenne n'était pas assez proche de la source par rapport au plan réfléchissant (1,5 m au lieu de 0,25 m), et, de plus, le traitement du signal effectué est différent.

c) L'intensimétrie acoustique.

Les figures présentées ci-dessous (cf. fig. n°3.10 et fig. n°3.11) correspondent au champ d'amplitude d'intensité globale obtenu à partir de la mesure 3D et au champ vectoriel 2D dans le plan de mesure.



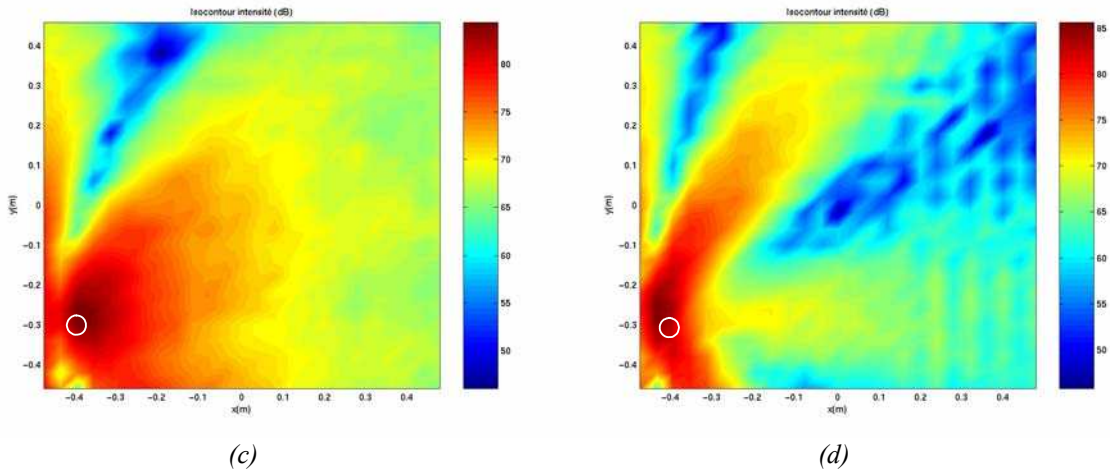


Fig. n°3.10 : Intensité globale (somme des contributions dans les 3 directions) à la fréquence (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), (b) 2048Hz ($\lambda=0,168$ m), (c) 2496 Hz ($\lambda=0,136$ m) et (d) 3008 Hz ($\lambda=0,113$ m).

Les vecteurs représentent l'opposé des vecteurs d'intensité acquis, de façon à converger vers la position de la source.

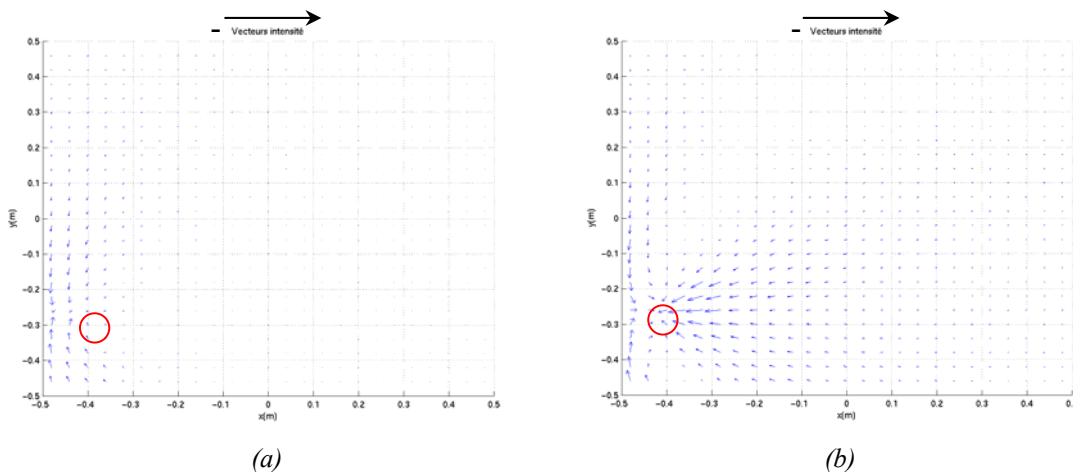


Fig. n°3.11 : Champs de vecteur intensité dans le plan de mesure (x,y) à la fréquence (a) 1024Hz ($\lambda=0,33$ m) et (b) 2496Hz ($\lambda=0,136$ m).

Les conclusions sont les mêmes que pour l'holographie, à savoir, que la réflexion est prédominante devant la source réelle aux basses fréquences et qu'elle devient négligeable aux hautes fréquences.

3.1.4 Second cas d'étude : une source en dehors du plan d'étude (source « parasite »).

Le but de cette expérimentation est de mettre en évidence l'effet de sources « parasites » sur les réponses des différentes méthodes de localisation. Les haut-parleurs placés en "8", et "7" sur le panneau réfléchissant n°2, sont successivement excités par un signal aléatoire de type bruit blanc avec le même générateur et amplificateur que précédemment. Ainsi, la proximité de chaque source avec le panneau réfléchissant n°1 (plan d'étude) est susceptible de produire une source virtuelle provoquée par la réflexion des ondes incidentes à laquelle s'ajoute la contribution « directe » de la source.

a) L'holographie acoustique multi-références.

Ainsi, sur le plan hologramme rétropropagé, la présence d'une source image sur le champ pression est remarquée, source qualifiée de « parasite » et cela quelle que soit la fréquence (cf. fig. n°3.12).

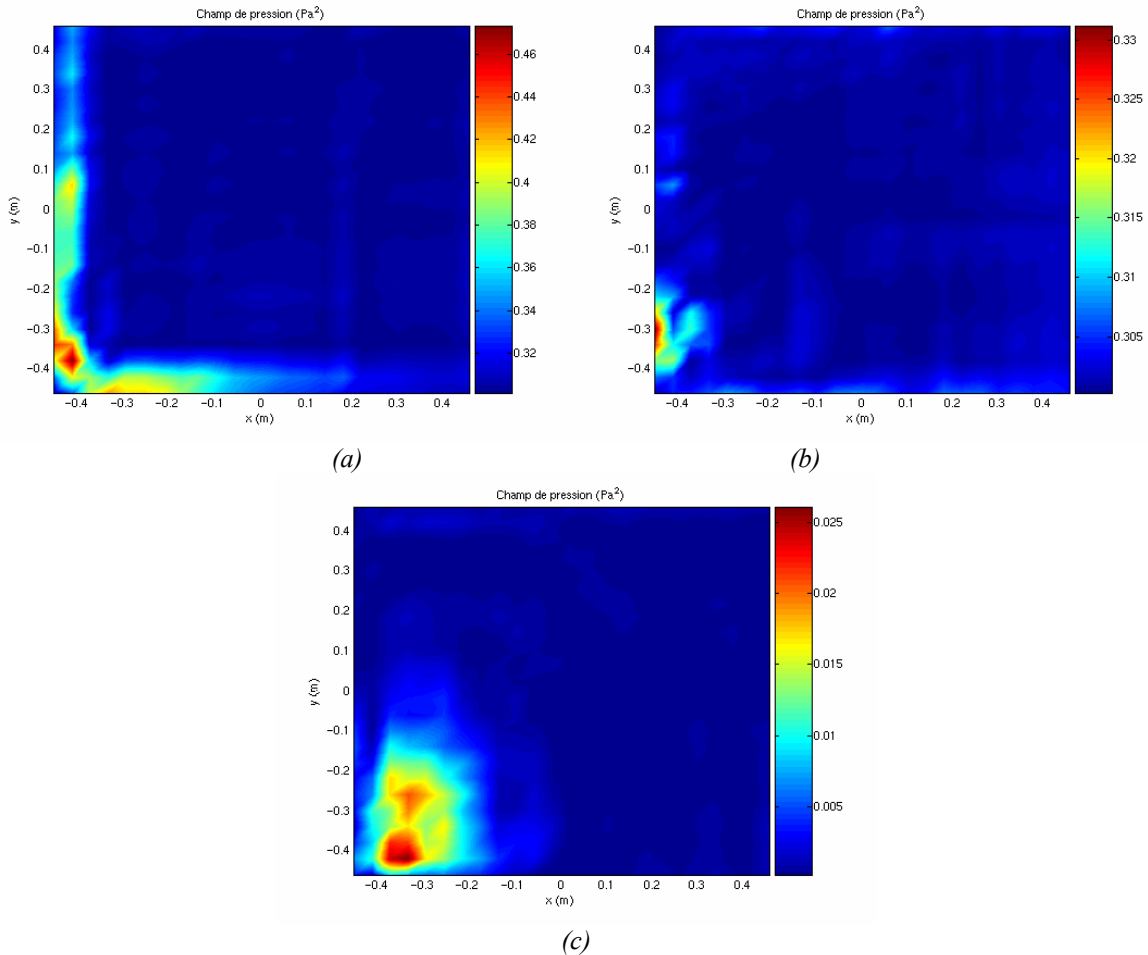
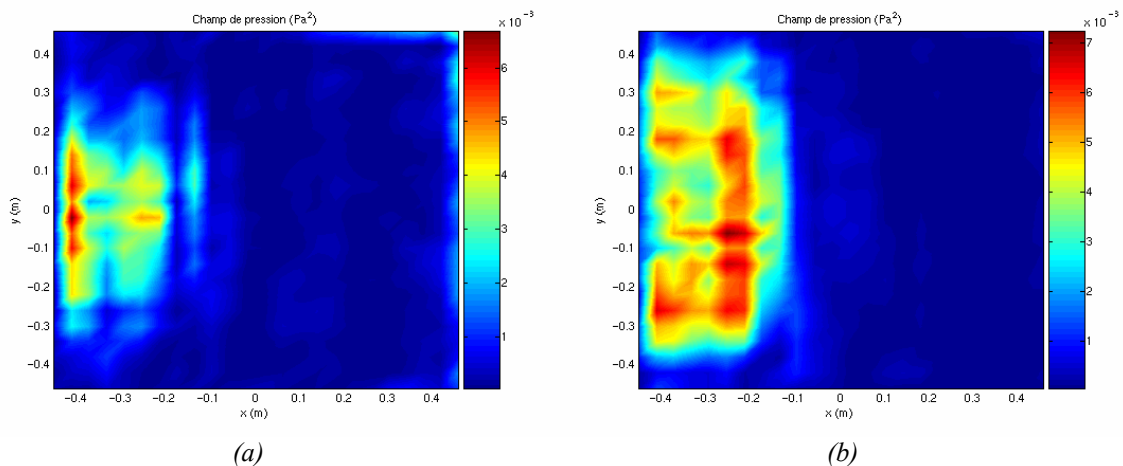
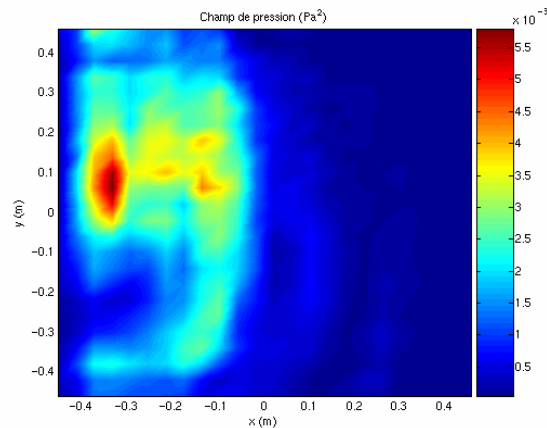


Fig. n°3.12 : Champ de pression quadratique reconstruit sur le plan source fréquence pour le haut parleur placé en "8" fonctionnant seul à la fréquence (a) 1000 Hz ($\lambda=0,34$ m), (b) 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m) et (c) 3000 Hz ($\lambda=0,11$ m).

En traitant les données obtenues avec la source « parasite » "7" plus éloignée du plan d'étude que précédemment, il est intéressant de voir l'évolution de celle-ci sur le champ de pression reconstruit.





(c)

Fig. n°3.13 : Champ de pression quadratique reconstruit sur le plan source à la fréquence de (a) 1000 Hz (b) 2000 Hz et (c) 3000 Hz dans le cas où la source du trou n°7 est excitée.

Ces deux figures (cf. fig. n°3.12 et 3.13) permettent d’identifier les effets d’une source « parasite » et de quantifier la contribution perturbatrice de celle-ci selon sa fréquence d’émission et son éloignement de la grille de mesure. Les mêmes phénomènes sont observés, même si la répartition spatiale de la source « parasite » est plus diffuse (cf. fig. n°3.13) avec l’éloignement de la source parasite au plan source, mais les niveaux de pression reconstruits sont plus faibles. Ainsi, de manière logique, plus la source « parasite » est éloignée de la grille de mesure, moins les données sont perturbées. Cette perte d’effet peut se chiffrer en regardant les niveaux de pression reconstruits constatés pour chaque source (cf. tableau n°3.3).

Fréquence (Hz)	Source en " 3" sur le plan source (Pa ²)	Source parasite en " 8" à 0,15m (Pa ²)	Source parasite en " 7" à 0,5m (Pa ²)
1000 ($\lambda=0,34\text{ m}$)	0,95	0,47	0,006
2000 ($\lambda=0,17\text{ m}$)	0,7	0,33	0,007
3000 ($\lambda=0,11\text{ m}$)	0,5	0,0255	0,0055

Tableau n°3.3 : Niveau de pression quadratique mesuré pour les sources sur le plan reconstruit.

Ainsi, la source virtuelle créée par la source « parasite » "8" placée à 15 cm du panneau d’étude, provoque une perturbation de niveau important (facteur 2 entre le niveau réel et l’image soit un écart de seulement 3 dB). Par contre, on peut estimer que la source placée en "7" n’affectera que très peu les résultats.

b) L’antennerie acoustique.

Les champs de cohérence (cf. fig. n°3.14) montrent également la présence de la source "8" placée en périphérie du plan d’étude. Les maxima de cohérence, qui, par définition, positionnent exactement les sources, sont pointés par une flèche blanche.

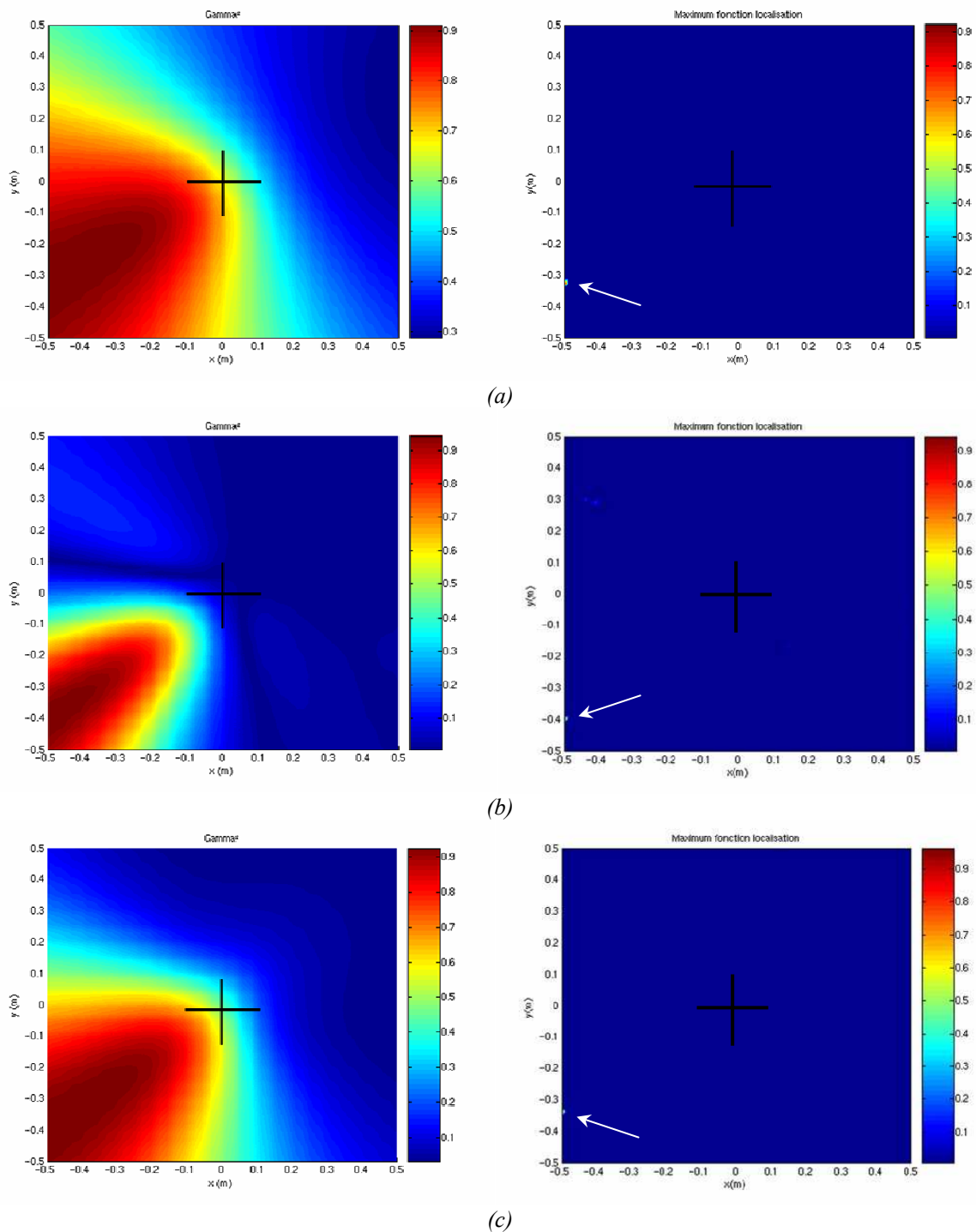


Fig. n°3.14 : Cohérence (gauche) et maximum de cohérence (droite) à une fréquence de (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), (b) 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m) et (c) 3008 Hz ($\lambda=0,11$ m), pour la source placée en "8".

Comme réalisé précédemment avec la technique holographique, les résultats pour la source placée en "7" sont présentés. Du point de vue de l'antennerie, ce cas est doublement intéressant car il met en évidence la "cécité" de l'antenne (cf. paragraphe 1.4.3 c)) vis-à-vis d'une source "parasite". En effet, les plans d'étude et de la source sont placés de façon symétrique par rapport au plan de l'antenne (25 cm de chaque côté). Donc, dans la mesure, en focalisant dans un plan à 25 cm, la source « parasite » se retrouve dans le même plan de focalisation. Ceci explique le niveau de cohérence élevé constaté sur la figure n°3.15 dont le maximum est représenté par le carré blanc.

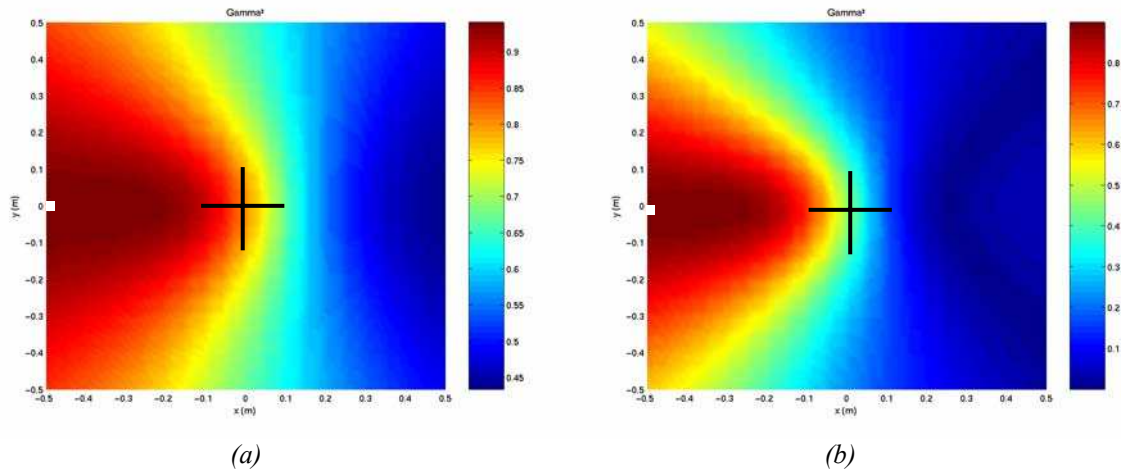


Fig. n°3.15 : Cohérence à une fréquence de (a) 1024Hz ($\lambda=0,33$ m) et (b) 2048Hz ($\lambda=0,168$ m), pour la source placée en "7".

En outre, les conclusions concernant l'effet de la source « parasite » sont les mêmes que dans le cas précédent.

Toutefois, il est important de noter que la source « parasite » n'est pas forcément positionnée sur les bords du plan de focalisation. Pour comprendre ce fait, il faut se ramener à l'étude paramétrique du paragraphe 2.3.5 où a été montrée l'influence d'une mauvaise estimation de la distance de focalisation.

Ainsi, dans le cas où la source est positionnée entre le plan de l'antenne et le plan de focalisation d'étude (cf. fig. n°3.16), le maximum de cohérence positionnant la source a tendance à se déplacer sur la gauche. Le maximum correspondant à une source placée en $x = -50$ cm se situe en fait à l'extérieur des limites du plan de focalisation étudié.

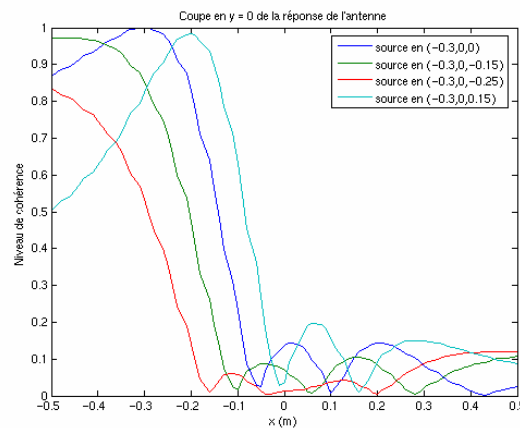


Fig. n°3.16 : Coupe en $y = 0$ de la réponse de l'antenne focalisant à 25cm du plan d'étude pour 3 sources positionnée successivement en $(-0,3;0;0)$, $(-0,3;0;-0,15)$ et $(-0,3;0;-0,25)$ (SIMULATION).

Dans le cas où la source serait située au-delà du plan de focalisation (source en $(0,3;0;0,15)$ par exemple), un déplacement de la position de la source serait observé, non plus vers la gauche, mais vers la droite. Le maximum serait donc placé sur le plan de focalisation étudié.

Dans le cas de la cabine, la focalisation ne peut pas se faire au-delà de la paroi (limite physique inamovible) et la seule possibilité d'avoir un déplacement du maximum de cohérence vers la droite serait une source placée à l'arrière de l'antenne à une distance supérieure à la distance de focalisation (cf. célérité de l'antenne et fig. n°3.17).

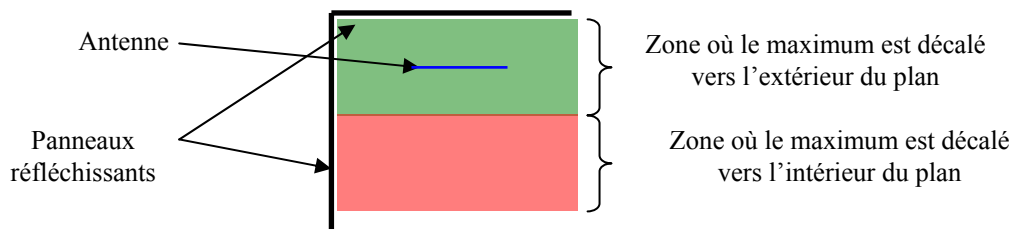


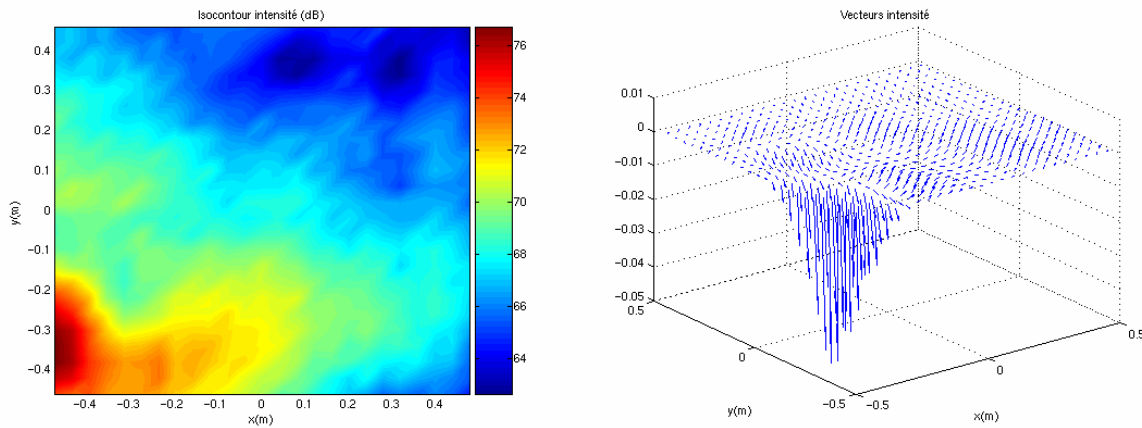
Fig. n°3.17 : Illustration des zones de déplacement du maximum de cohérence.

Enfin dans le cas où la source est située à droite du centre de l'antenne (soit une coordonnée en abscisse positive dans notre référentiel), les déplacements des maxima sont inversés (cf. paragraphe 2.3.5).

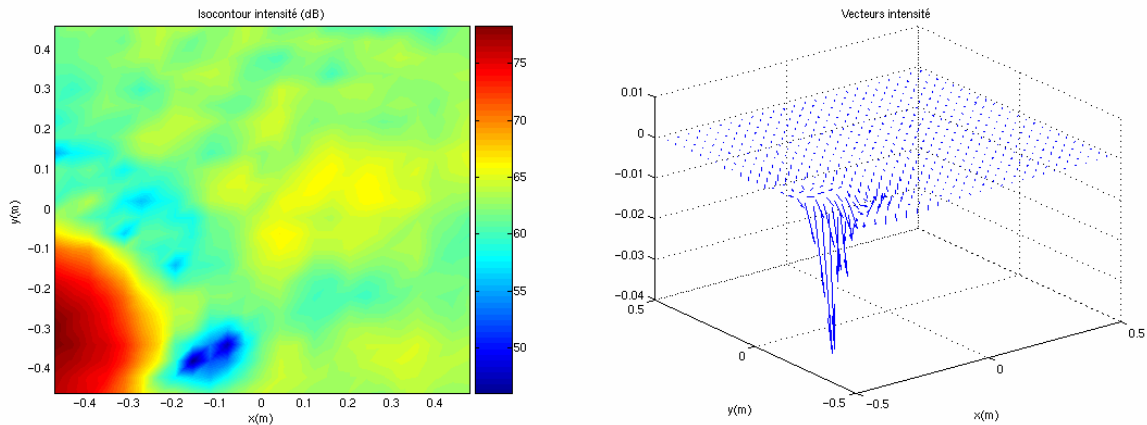
En conclusion, une source positionnée sur la paroi réfléchissante et comprise entre le plan d'étude et 2 fois la distance de focalisation, aura son maximum de cohérence positionné sur le bord du plan de focalisation. Par contre, dans le cas d'une source, sur le plan réfléchissant, placée à l'arrière de l'antenne et à une distance supérieure à celle de focalisation, le maximum est positionné à l'intérieur du plan d'étude.

c) L'intensimétrie acoustique.

Contrairement aux deux autres méthodes de localisation, l'intensimétrie permet de différencier les sources « parasites ». Même si l'intensité globale fait apparaître une forte quantité d'énergie sur le bord de la grille (cf. fig. n°3.18), les vecteurs intensité apportent évidemment une information complémentaire en convergeant non pas vers le panneau mais dans la direction opposée (composante suivant Z négative), traduisant la présence de la source parasite "arrière".



(a)



(b)

Fig. n°3.18 : Champ d'intensité globale (gauche) et champ de vecteur intensité globale (droite) à la fréquence de (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m) et (b) 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m), pour la source placée en "8".

d) Premier bilan.

Suite à la présentation de ces premiers résultats expérimentaux, un certain nombre de conclusions capitales pour la suite de cette étude peut être tiré (cf. tableau n°3.4).

Type de perturbations	Holographie	Antennerie	Intensimétrie
<i>Réflexion</i>	Réflexion prépondérante jusque 2500 Hz	Pas d'effets dus aux réflexions	Réflexion prépondérante jusque à 2500 Hz
<i>Source « parasite »</i>	Source image détectée	Source image détectée	Source image détectée mais différenciable grâce à la direction des vecteurs intensité

Tableau n°3.4 : Conclusions sur les effets des perturbations sur la réponse des méthodes de localisation.

3.1.5 Développement du logiciel Imagerie créé lors de cette thèse.

Comme il a été précisé dans le chapitre 2 et rappelé sur la figure n°3.1, un des objectifs est également de développer un outil de simulation capable d'estimer la réponse des moyens de mesure dans un milieu confiné.

De même, dans le cadre de l'amélioration de la partie antennerie du logiciel d'exploitation des données (cf. fig. n°2.1), il a été implanté l'option permettant d'estimer le niveau de la source.

Toutes ces améliorations sont apportées au logiciel Imagerie créé pendant cette thèse et présenté dans l'annexe n°1.

a) Simulation de la réflexion.

La présence du panneau de réflexion a été modélisée puis codée dans le logiciel créé durant cette thèse (cf. fig. n°2.1 et annexe n°1) en estimant que la pression reçue par un microphone était la somme d'une onde directe incidente et d'une onde réfléchie suivant un modèle géométrique du type Snell-Descartes (cf. fig. n°3.19).

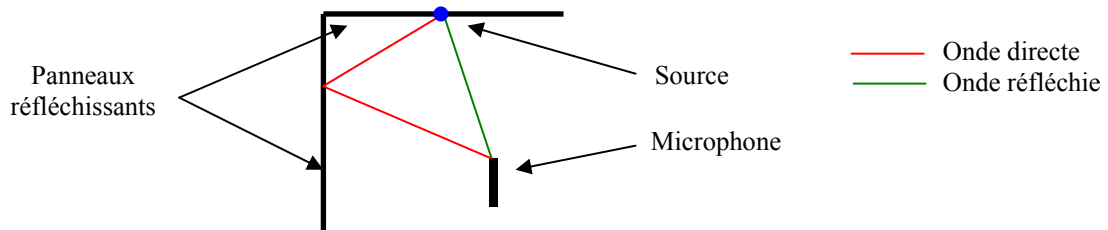


Fig. n°3.19 : Modèle utilisé pour simuler la réponse des différentes méthodes de localisation.

Pour valider les résultats obtenus, des champs de pression reconstruits expérimentalement par holographie sont comparés avec des résultats simulés (cf. fig. n°3.20 et n°3.5, et fig. n°3.6 et n°3.21) dans le cas de la source placée en "1", avec les mêmes paramètres de filtrage.

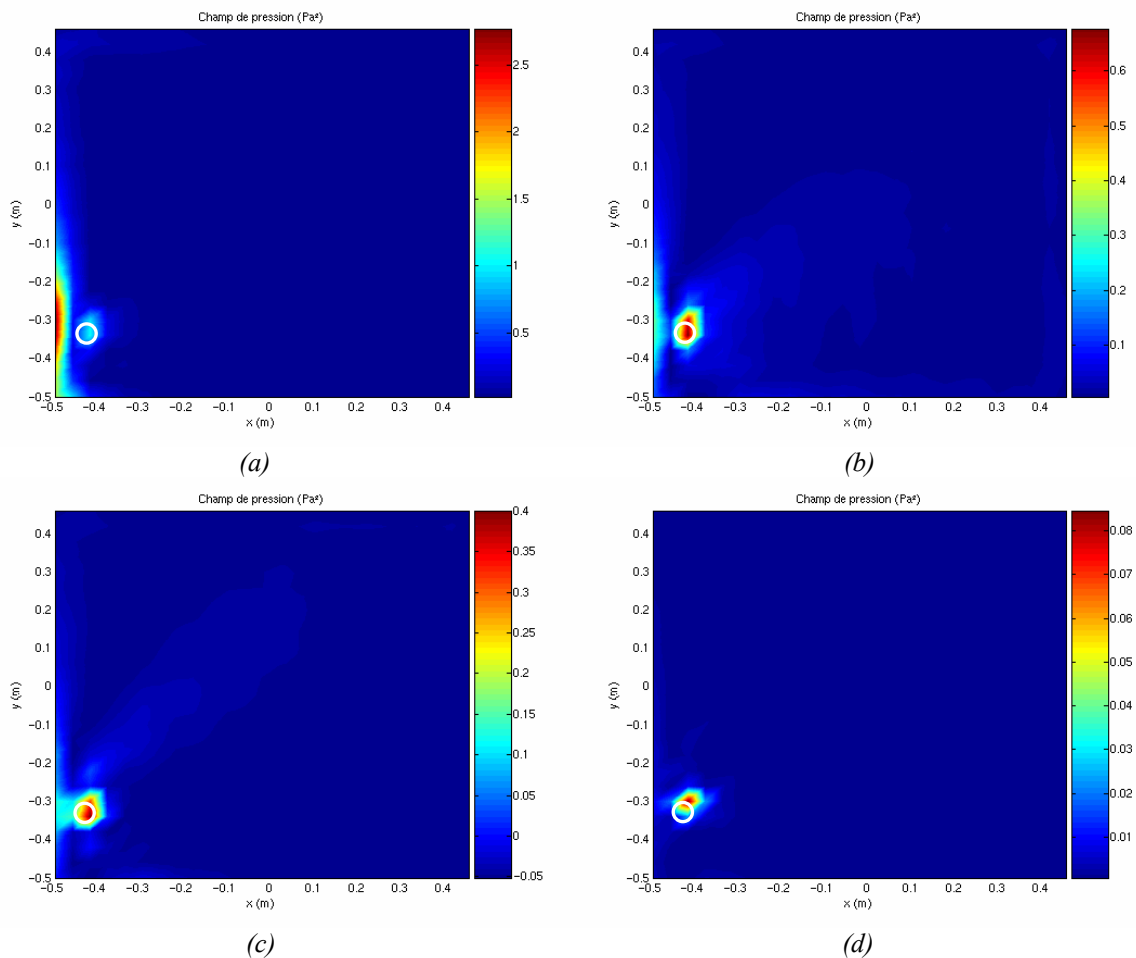


Fig. n°3.20 : Champ de pression quadratique reconstruit par simulation sur le plan source à la fréquence de (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), (b) 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m), (c) 2496 Hz ($\lambda=0,136$ m) et (d) 3008 Hz ($\lambda=0,11$ m), avec une valeur de $k_c = 0,6 k_{max}$.

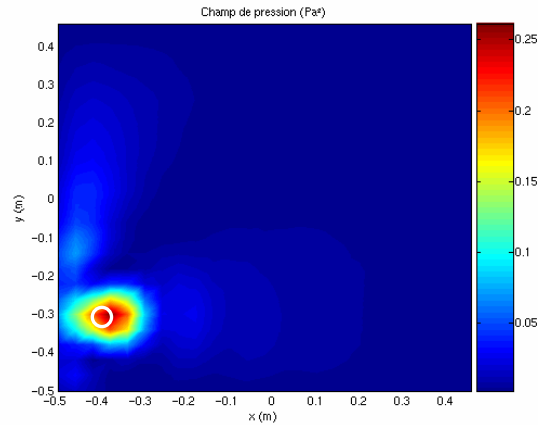


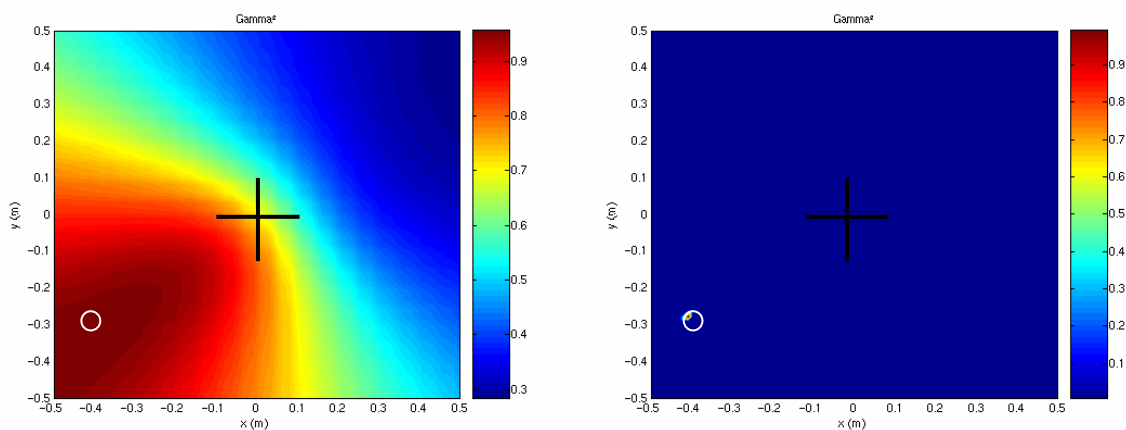
Fig. n°3.21 : Champ de pression quadratique reconstruit par simulation sur le plan source à la fréquence de 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m) avec une valeur de $k_c = 0,3 k_{max}$.

Bien que le modèle incorporé au logiciel de simulation soit basé sur des hypothèses simples, les mêmes phénomènes sont constatés en simulation et en expérimentation, ce qui valide le dispositif de mesure et de traitement et conforte les hypothèses physiques. En effet, les mêmes phénomènes sont constatés : positions des sources et perturbations (cf. fig. n°3.5 et 3.21 puis n°3.21 et 3.6), niveaux reconstruits (cf. tableau n°3.5).

Fréquence	Expérimentation	Simulation	Ecart (dB)
1024 Hz ($\lambda=0,33$ m)	1,02	1	0,1
2048 Hz ($\lambda=0,168$ m)	0,71	0,66	0,31
2496 Hz ($\lambda=0,136$ m)	0,39	0,4	-0,1
3008 Hz ($\lambda=0,11$ m)	0,07	0,082	-0,6

Tableau n°3.5 : Comparaison des niveaux de pression reconstruits sur la source.

Comme pour l'holographie, les simulations de cohérence (cf. fig. n°3.22) fournissent des résultats comparables validant ainsi la chaîne de mesures, le traitement associé et les hypothèses physiques (cf. fig. n°3.9 et 3.22).



(a)

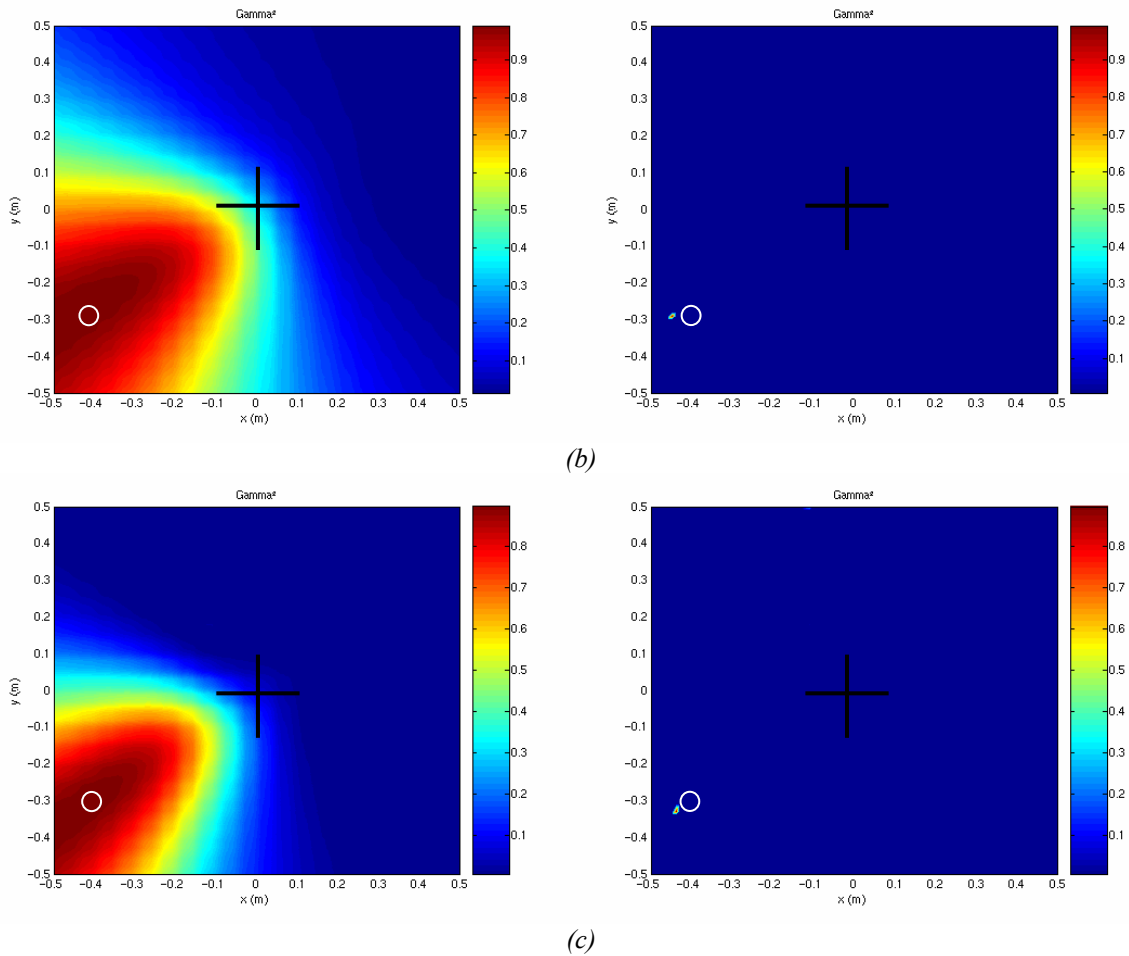
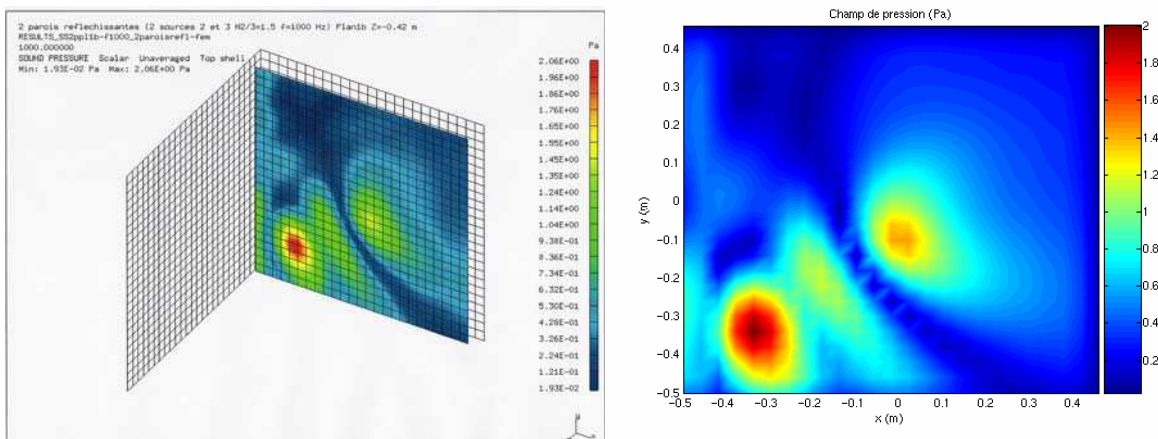


Fig. n°3.22 : Cohérence (gauche) et maximum de cohérence (droite) à la fréquence de (a) 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m), (b) 2048Hz ($\lambda=0,168$ m) et (c) 3008 Hz ($\lambda=0,11$ m), reconstruit par simulation.

De plus, une validation supplémentaire a été apportée grâce à un logiciel de calcul numérique par éléments de frontière « I-deas vibro-acoustics » développé par STRACO.

La simulation suivante a été menée avec les 2 méthodes, celle du logiciel Imagerie et celle programmée dans I-deas : deux sources corrélées sont placées respectivement en $(-0,3;-0,3;0)$ et en $(0,05;-0,05;0)$, avec un rapport de débits de 1,5 à 1000 Hz ($\lambda=0,34$ m), et 1,22 à 1500 Hz ($\lambda=0,227$ m) (rapport représentatif des écarts constatés sur les haut-parleurs). Les champs de pression obtenus dans le plan hologramme sont ainsi comparés.



(a)

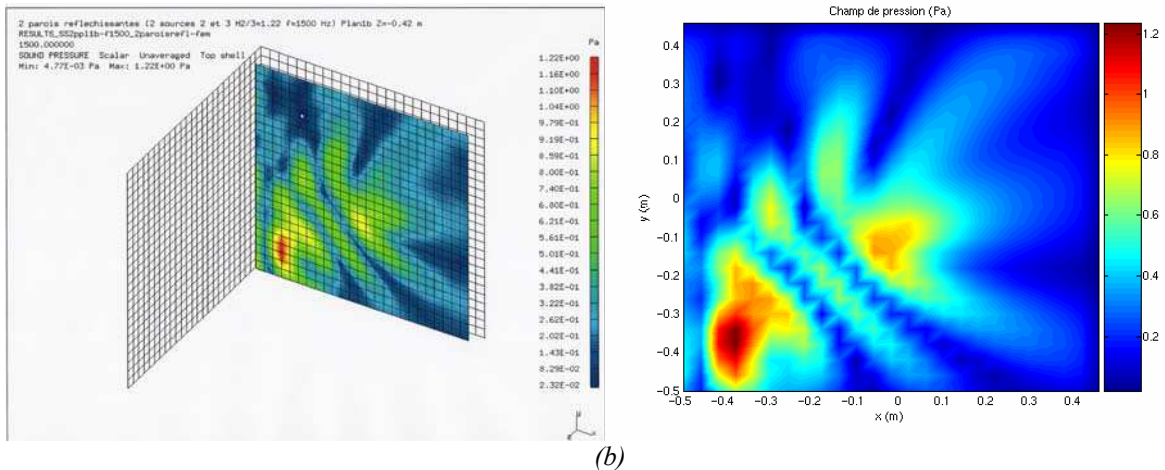


Fig. n°3.23 : Champ hologramme reconstruit simulé via I-deas (gauche) et le logiciel créé (droite) à la fréquence de (a) 1000 Hz ($\lambda=0,34$ m) et (b) 1500 Hz ($\lambda=0,227$ m).

Là encore une très bonne adéquation entre les résultats obtenus (cf. fig. n°3.23) est constatée : les deux champs de pression calculés sont similaires dans leur forme et dans leur comportement.

Par exemple, à 1000Hz, trois zones principales de rayonnement sont détectées avec les deux logiciels : zone 1 en (-0,32;-0,3), zone 2 en (-0,15;-0,2) et zone 3 en (0,05;-0,1), les valeurs du champ de pression sont résumées dans le tableau n°3.6.

Niveau de pression max. (Pa) à une fréquence $f = 1000$ Hz.	Ideas	Outil développé
Zone 1	2.06	2.01
Zone 2	1.35	1.31
Zone 3	1.55	1.51

Tableau n°3.6 : Niveau de pression maximum (Pa) local des 3 zones de rayonnement à $f=1000$ Hz ($\lambda=0,34$ m).

De même, à la fréquence de 1500Hz, trois zones de rayonnement sont encore détectées : zone 1 en (-0,4;-0,35), zone 2 en (-0,3;-0,05) et zone 3 en (-0,05;-0,1), les valeurs du champ de pression sont résumées dans le tableau n°3.7.

Niveau de pression max. (Pa) à une fréquence $f = 1500$ Hz.	Ideas	Outil développé
Zone 1	1,22	1,21
Zone 2	0,80	0,80
Zone 3	0,92	0,91

Tableau n°3.7 : Niveau de pression maximum (Pa) local des 3 zones de rayonnement à $f=1500$ Hz ($\lambda=0,227$ m).

Les niveaux de pression reconstruits par les deux logiciels sont similaires aux deux fréquences étudiées (cf. tableau n°3.6 et 3.7) et plus généralement à toutes les fréquences, ce qui permet de valider le fonctionnement de l’outil développé pour le cas de deux plaques perpendiculaires réfléchissantes.

b) Critère d'existence de la réflexion sur les résultats holographiques.

Afin d'approfondir les résultats obtenus expérimentalement dans le cas d'une réflexion créant une source « image » avec l'holographie, il peut être intéressant d'essayer de définir un critère fréquentiel lié aux paramètres de la grille tels que la distance de rétropropagation et l'espacement entre capteurs, permettant de conclure à la présence d'une source réfléchie.

Pour étudier l'influence de chaque paramètre, une série de simulations est alors menée à différentes distances de rétropropagation avec une source placée à une position identique à celle de l'expérimentation en chambre sourde $(-0,4;-0,3;0)$ soit la source "1" et une grille de microphones aux dimensions similaires en gardant une distance entre la paroi réfléchissante (panneau "2") et la première colonne de la grille de microphones constante de 2 cm.

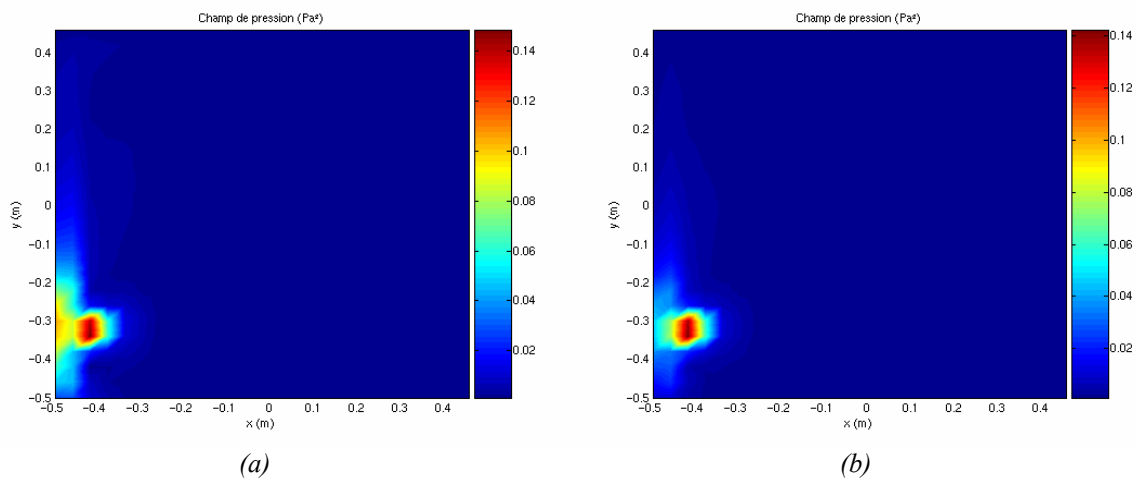
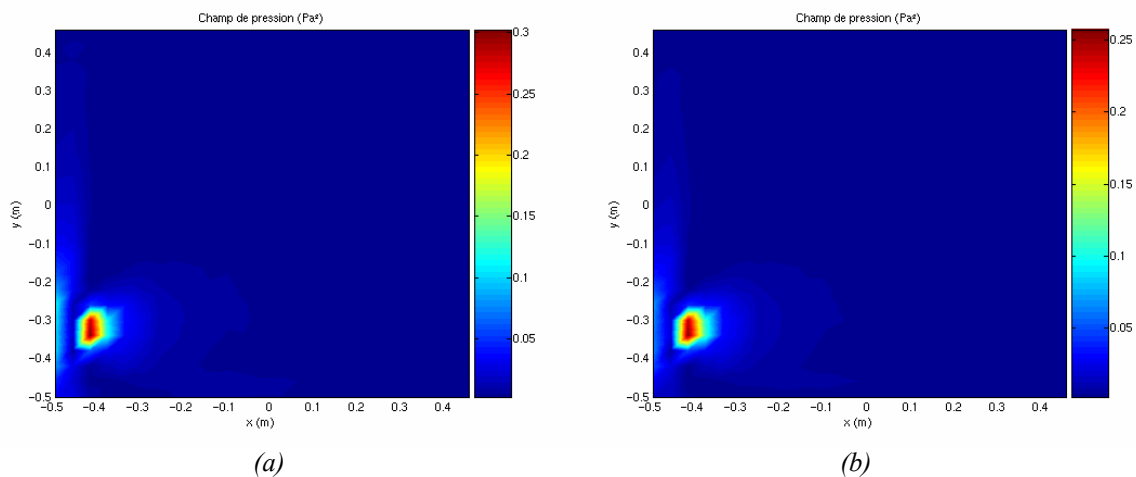
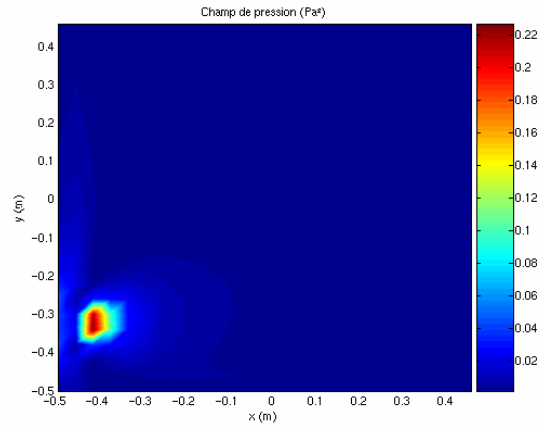


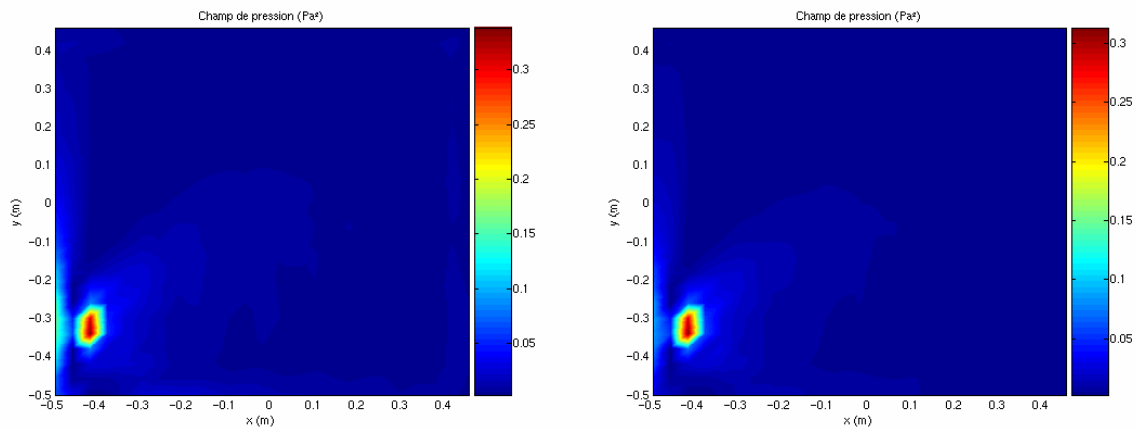
Fig. n°3.24 : Champ de pression pour une fréquence de 1000 Hz ($\lambda=0,34$ m) reconstruit sur le plan source pour une distance plan de mesure/ plan source de (a) 5 cm et (b) 4 cm, pour une distance entre capteurs sur la grille de 4cm.





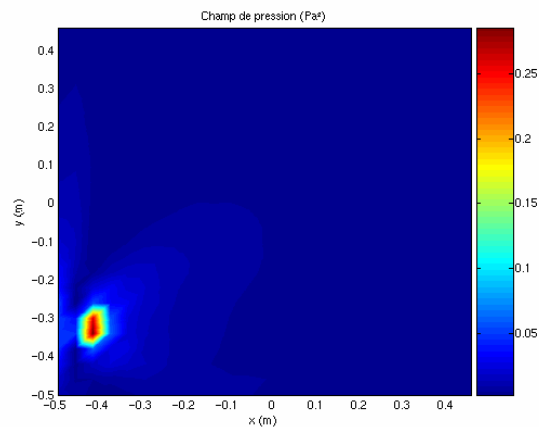
(c)

Fig. n°3.25 : Champ de pression pour une fréquence de 1500 Hz ($\lambda=0,227$ m) reconstruit sur le plan source pour une distance plan de mesure/ plan source de (a) 6 cm, (b) 5 cm et (c) 4 cm, pour une distance entre capteurs sur la grille de 4cm.



(a)

(b)



(c)

Fig. n°3.26 : Champ de pression pour une fréquence de 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m) reconstruit sur le plan source pour une distance plan de mesure/ plan source de (a) 8 cm, (b) 7 cm et (c) 6 cm, pour une distance entre capteurs sur la grille de 4cm.

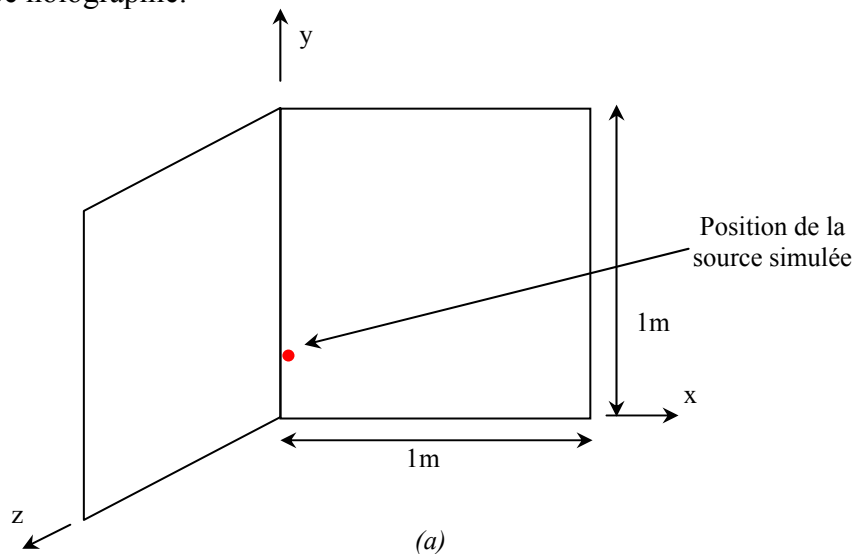
Lors des expérimentations, on concluit à une action perturbante de la réflexion jusqu'à 2500 Hz ($\lambda=0,136$ m).

Les simulations (cf. fig. n°3.24, 3.25 et n°3.26) montrent que, plus on approche du plan d'étude, plus la réflexion disparaît rapidement d'un point de vue fréquentiel. Ainsi, en avançant de 2 cm la grille, la gamme de fréquences dans laquelle la réflexion est gênante, est diminuée de 500 Hz. Il est donc possible d'assimiler, à paramètres constants, une distance de rétropropagation à une bande de fréquences dans laquelle la réflexion va créer une source « image ». Ce critère est résumé dans le tableau n°3.8. Dans le cadre de cette étude, la réflexion est supposée « non perturbatrice » quand son niveau est inférieur d'au moins 5dB par rapport au niveau de la source principale reconstruite.

Fréquence (Hz)	Distance de rétropropagation maximale pour éviter les réflexions (cm)
1000 ($\lambda=0,34$ m)	4
1500 ($\lambda=0,227$ m)	5
2000 ($\lambda=0,17$ m)	7
2500 ($\lambda=0,136$ m)	9

Tableau n°3.8 : Distance de rétropropagation nécessaire pour s'assurer d'un effet nul de la source « image » selon la fréquence d'étude.

Afin de valider les résultats du tableau n°3.8, des simulations ont été conduites dans le cas le plus critique pour la réflexion avec une source placée à 2 centimètres de la paroi réfléchissante en (-0,48;-0,3;0). Cette distance est représentative d'une zone ne pouvant pas être atteinte pour des raisons physiques (support des microphones,...) avec les moyens de mesure de type holographie.



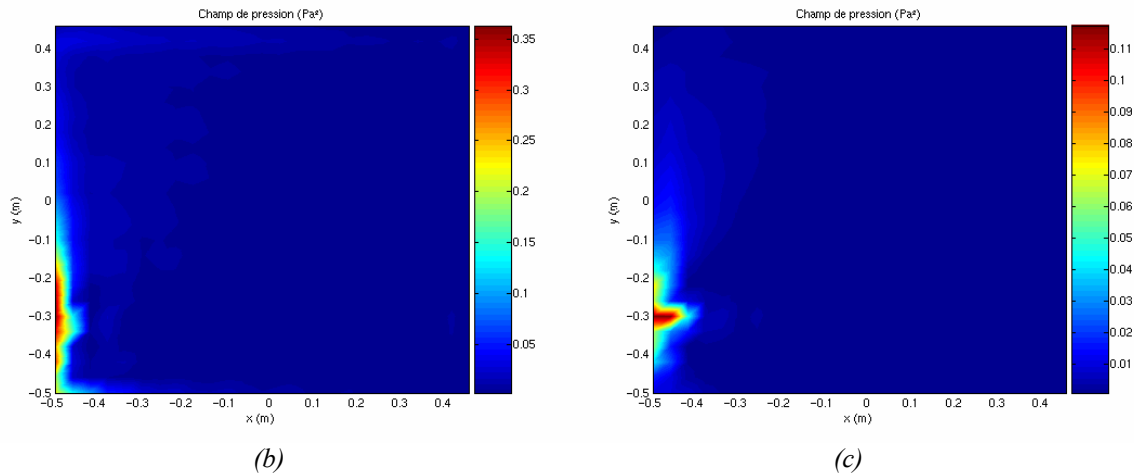


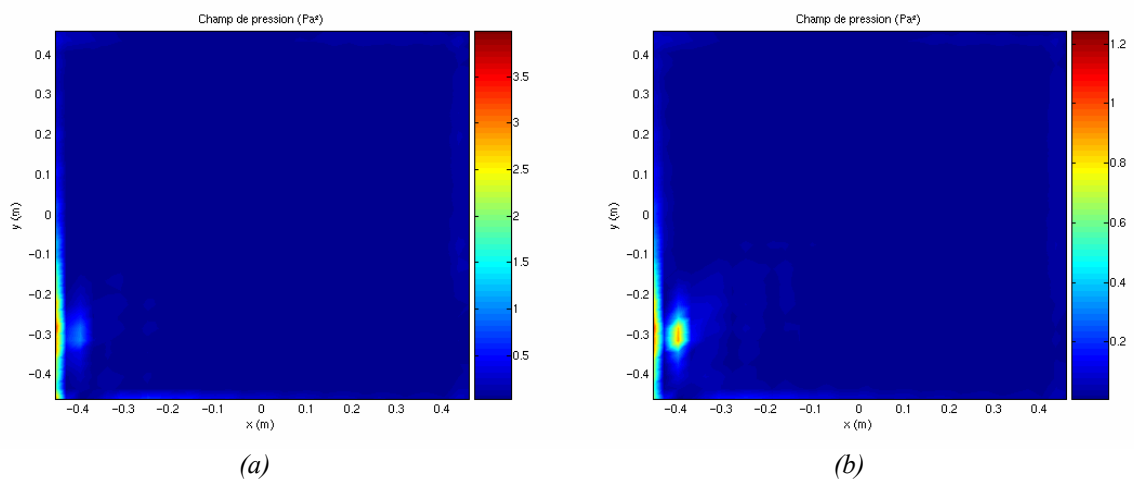
Fig. n°3.27 : Géométrie de la simulation (a) et champs de pression pour une fréquence de 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m) à la distance de rétropropagation de (b) 8 cm et (c) 7 cm

Ces derniers résultats simulés (cf. fig. n°3.27) confirment le critère défini précédemment. En effet, pour une distance de rétropropagation de 7 cm et une fréquence d'étude de 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m), la réflexion ne crée pas de source « image » malgré la grande proximité entre la source et le plan réfléchissant, alors qu'il en existe une pour une distance de 8 cm.

En pratique, il n'est pas possible par contre de s'approcher indéfiniment du plan source car, du point de vue de la physique, on risque de se trouver dans la zone de Rayleigh de la source et, du point de vue de la mesure, il existe une distance minimale entre le plan de mesure et le plan source (égale à la distance entre chaque capteur).

Dans un deuxième temps, l'influence de l'espacement entre capteurs est étudiée, à paramètres constants, sur les résultats en présence d'une source « image » à travers d'une nouvelle série de simulations menée pour une fréquence de 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m).

La source simulée est de nouveau positionnée en (-0.4;-0.3;0), trou "1".



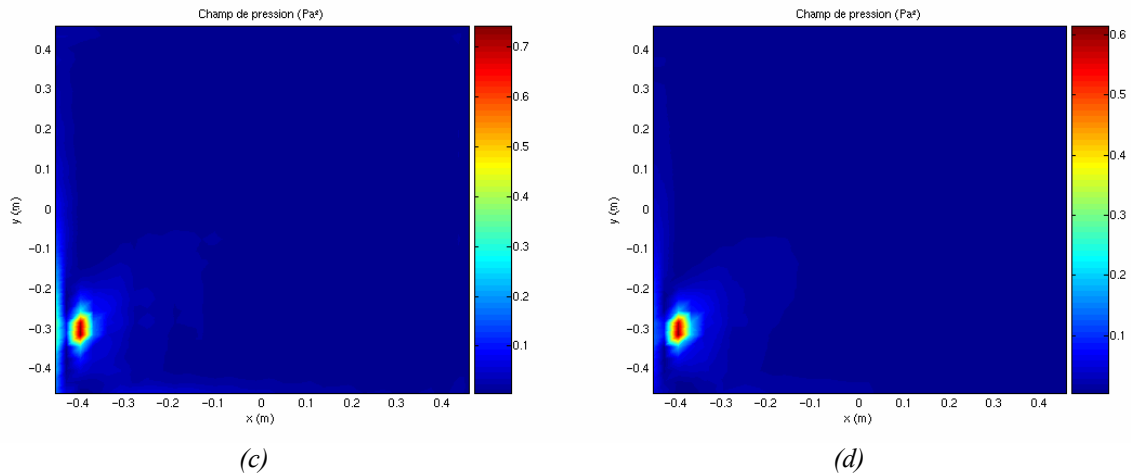


Fig. n°3.28 : Champ de pression reconstruit à la fréquence de 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m) pour un espacement entre capteurs de 3 cm et avec une distance entre le plan source et le plan de mesure de (a) 8 cm, (b) 7 cm, (c) 6 cm et (d) 5 cm, pour une source simulée placée en "1".

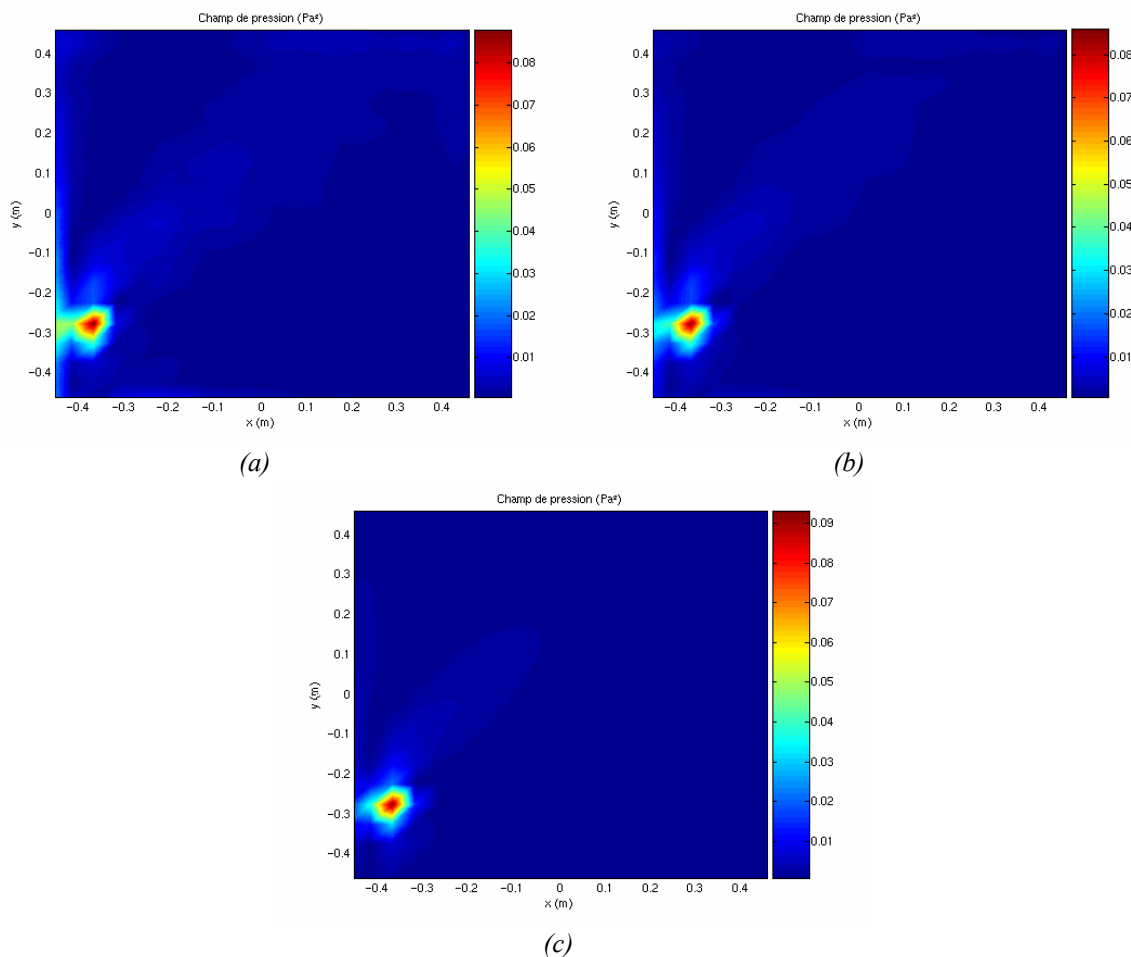


Fig. n°3.29 : Champ de pression à la fréquence de 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m) pour un espacement entre capteurs de 5 cm et avec une distance entre le plan source et le plan de mesure de (a) 11 cm, (b) 10 cm et (c) 9 cm, pour une source simulée placée en "1".

Ainsi, l'espacement entre capteurs influence la distance de rétropropagation minimale à partir de laquelle la source « image » ne perturbe plus la réponse de l'holographie (cf. fig. n°3.28 et n°3.29, tableau n°3.4). A 2000 Hz, pour un espacement de 5 cm entre capteurs, une

distance de rétropropagation de 10 cm est suffisante pour que la source « image » n’influence pas la réponse holographique, alors que pour un espacement de 3 cm, il faut une distance maximale de 5 cm (cf. tableau n°3.9).

Espacement entre capteurs (cm)	Distance de rétropropagation maximale pour éviter les réflexions (cm)
3	5
4	7
5	11

Tableau n°3.9 : Distance de rétropropagation nécessaire pour s’assurer d’un effet nul de la source « image » selon l’espacement entre capteurs.

Toutefois, dans le second cas simulé, comme l’atteste le tableau n°3.10, le niveau de pression quadratique observé est moins bien reconstruit du fait de la plus faible densité de microphones.

	Théorique	Espacement 3 cm	Espacement 5 cm
Valeur moyenne reconstruite (Pa^2)	0,8	0,75	0,085
Ecart amplitude		9 dB	

Tableau n°3.10 : Comparaison des valeurs de pression reconstruites pour deux espacements entre capteurs

En conclusion, le critère permettant de certifier si la source « image » sera perturbatrice ou non dépend à la fois de la distance de rétropropagation et de l’espacement entre capteurs (cf. fig. n°3.30).

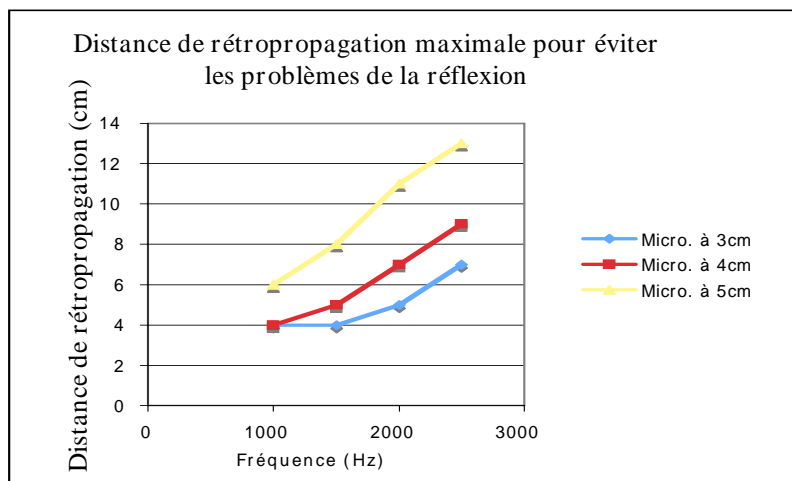


Fig. n°3.30 : Critère d’existence des réflexions pour l’holographie selon l’espacement entre les microphones.

Un compromis entre les performances de la grille de mesure (fréquences maximales, fidélité de la reconstruction du niveau de pression...) et l’apparition de perturbations dues aux sources « image » va être nécessaire car leurs exigences sont contradictoires.

c) Estimation du niveau de la source par antennerie acoustique.

Dans le cadre de cette étude, il est également important de pouvoir extraire le niveau de pression des sources ou des surfaces rayonnantes, afin de reconstituer leur contribution dans le niveau sonore global de la cabine dans le cas de l'antennerie.

Une fois la source localisée expérimentalement, son amplitude est estimée par un processus de minimisation (cf. paragraphe 1.4.3 b)) intégrant les niveaux de pression mesurés par l'antenne. Suite au codage de cette option supplémentaire dans le logiciel créé, la figure n°3.31 montre ainsi des niveaux de pression reconstruits par antennerie, via les programmes codés, et ceux mesurés avec la source "3" sur deux microphones composant l'antenne. Une barre d'incertitude sur les niveaux de pression reconstruit est également ajoutée.

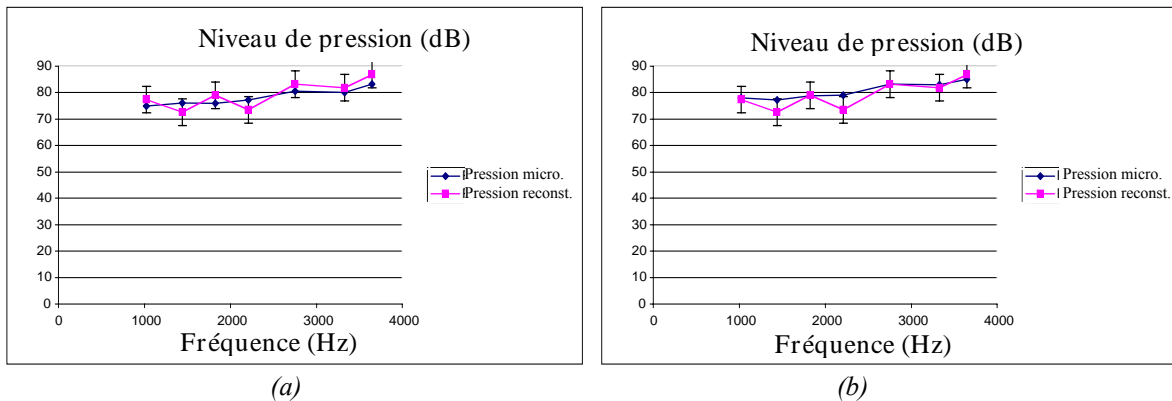


Fig. n°3.31 : Comparaison entre les niveaux reconstruits théoriquement et les pressions réellement constatées sur les microphones n°4 (a) et n°8 (b) du bras horizontal.

Les champs observés sont proches, les écarts constatés étant dus à une chute de cohérence entre microphones (en moyenne de 0.8 à 1500 Hz ($\lambda=0,227$ m), par exemple). Ces résultats sont confirmés avec la source "4" (cf. fig. n°3.31).

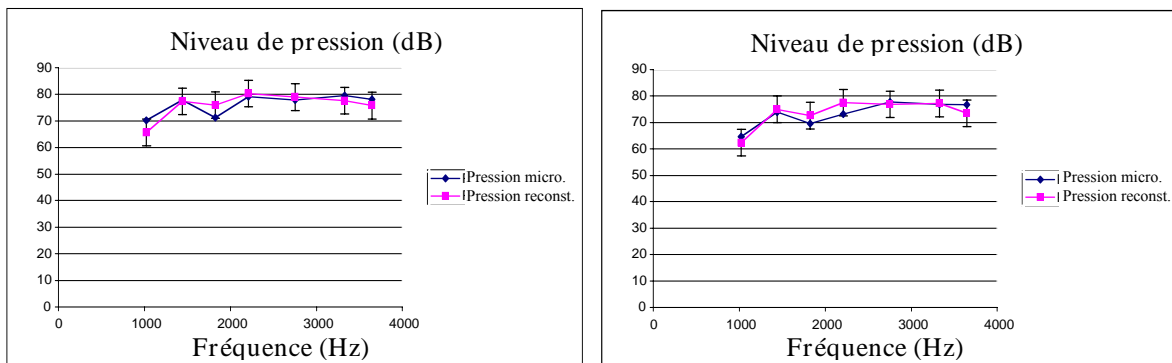


Fig. n°3.31 : Comparaison entre les niveaux reconstruits théoriquement et les pressions réellement constatées sur les microphones n°4 (a) et n°8 (b) du bras horizontal.

La reconstruction des niveaux sonores via l'antennerie est validée par ces différents essais. L'accès à ces données est très intéressant car il permet maintenant de quantifier les sources détectées.

Après avoir codé, implémenté puis validé ces nouvelles fonctionnalités au logiciel Imagerie, une première réflexion sur les solutions envisageables pour améliorer les techniques de mesures en milieu confiné a été menée.

3.1.6 Propositions d'amélioration pour l'holographie.

Il n'est pas aisé d'apporter une solution aux deux problèmes inhérents à cette méthode à savoir :

- l'impossibilité de reconstruire à l'extérieur du champ physique de l'antenne.
- le temps de mise en œuvre de la méthode.

Une solution envisageable au vu des résultats précédents serait de traiter les données en 2 fois :

- La première avec un k_c peu restrictif pour avoir les niveaux de pression corrects.
- La deuxième avec un k_c plus restrictif permettant de s'affranchir des réflexions et de positionner les sources exactement.

Mais ceci implique également que les zones situées aux extrémités de la grille (à savoir, par exemple, les jointures entre parois dans le cas d'une cabine d'hélicoptère) ne soient pas prises en compte.

Une solution prenant en compte les deux dernières remarques peut être proposée. Il serait envisageable d'étalonner le filtre de Veronesi pour qu'en fonction du nombre d'onde critique k_c choisi, un correctif de l'atténuation qu'il produit soit introduit.

Afin de quantifier cette atténuation, il faut étalonner ce filtre par le biais d'un cas référence ou de simulations. Dans la suite, il est supposé que la grille de mesure capte suffisamment d'énergie de la source pour en avoir une représentation fidèle. Sinon, il serait envisageable d'étalonner ce facteur correctif avec des sources en limite de grille.

Une source positionnée en $(-0,4;-0,3;0)$ puis en $(0;0;0)$ émettant un bruit blanc est simulée. La grille, représentative de celle utilisée lors des essais, est composée de 24×25 points espacés chacun de 4 cm et se situe à 8 cm du plan source.

Les simulations sont réalisées avec quatre nombres d'onde critique différents : $0,6k_{\max}$, $0,5k_{\max}$, $0,4k_{\max}$ et $0,3k_{\max}$ (cf. fig. n°3.32).

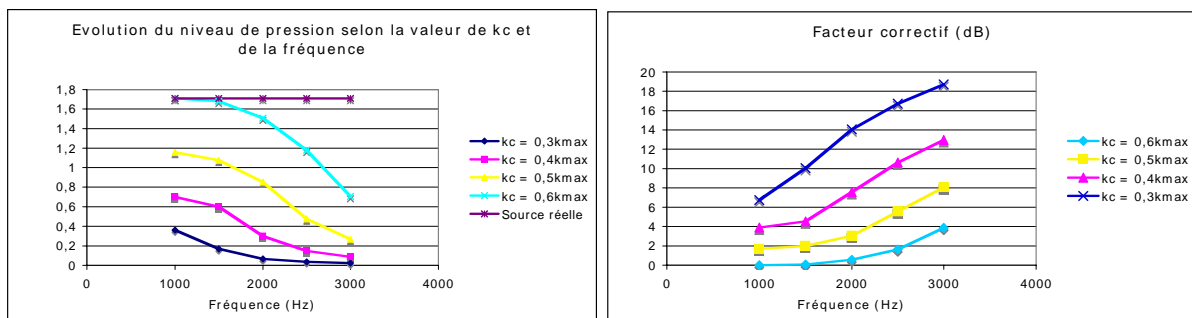


Fig. n°3.32 : Etalonnage du filtre pour plusieurs valeurs de nombre d'onde critique.

L'étalonnage est appliqué sur la figure n°3.21, correspondant au cas exposé dans le paragraphe 3.1.5 a) (filtre avec $k_c=0,3k_{\max}$), et les résultats sont exposés dans le tableau n°3.11.

Fréquence (Hz)	Niv. source réelle (Pa ²)	Niv. Source $k_c=0,3k_{max}$ (Pa ²)	Niv. Source $k_c=0,3k_{max} + \text{étalonnage}$ (Pa ²)	Ecart relatif Pa ² /dB
1000 ($\lambda=0,34$ m)	1,153	0,2656	1,2616	0,1 / + 0,4

Tableau n°3.11 : Niveau de pression reconstruit par holographie en appliquant le correctif $0,3k_{max}$ de filtre défini.

Le niveau reconstruit auquel le filtre est appliqué donne un niveau de pression quadratique identique à celui trouvé pour la source réelle. Ce résultat tend à valider le choix de ce facteur correctif.

Le facteur correctif proposé est ensuite utilisé sur des cas de mesures réelles (cas où la source est placée dans le trou "1"). Les tableaux n°3.12 et 3.13 résument les résultats obtenus par ce biais.

Fréquence (Hz)	Niv. source réelle (Pa ²)	Niv. Source $k_c=0,3k_{max}$ (Pa ²)	Niv. Source $k_c=0,3k_{max} + \text{étalonnage}$ (Pa ²)	Ecart relatif Pa ² /dB
1000 ($\lambda=0,34$ m)	1,21	0,23	1,1112	- 0,1 / -0,4
2000 ($\lambda=0,17$ m)	1,1	0,09	0,9750	-0,125 / -0,5
2500 ($\lambda=0,136$ m)	1,05	0,0203	0,9541	-0,1 / -0,4

Tableau n°3.12 : Niveau de pression reconstruit par holographie en appliquant le correctif de filtre $0,3k_{max}$ défini.

Fréquence (Hz)	Niv. source réelle (Pa ²)	Niv. Source $k_c=0,6k_{max}$ (Pa ²)	Niv. Source $k_c=0,6k_{max} + \text{étalonnage}$ (Pa ²)	Ecart relatif Pa ² /dB
2000 ($\lambda=0,17$ m)	1,1	0,69	0,98	-0,12 / -0,5
2500 ($\lambda=0,136$ m)	1,05	0,4	0,86	-0,19 / -0,9
3000 ($\lambda=0,11$ m)	1,1	0,09	0,9750	-0,125 / -0,5

Tableau n°3.13 : Niveau de pression reconstruit par holographie en appliquant le correctif de filtre $0,6k_{max}$ défini.

Les résultats de mesure présentés dans les tableaux n°3.12 et 3.13 permettent de valider que, quelle que soit la position de la source, le facteur correctif est adéquat. Par contre, son application à d'autres types de source et d'autres configurations expérimentales n'est pas démontrée (nécessité de validations complémentaires).

La mise en place d'un tel étalonnage est recommandée pour augmenter les performances de reconstruction de la méthode. Toutefois, l'utilisation d'un filtre plus strict condamne la localisation de sources sur les zones proches des bords.

3.1.7 Propositions d'améliorations pour l'antennerie.

Afin d'améliorer le traitement d'antenne notamment en présence de sources parasites, 3 solutions sont envisagées : la réalisation de la mesure en deux étapes, l'utilisation d'une propriété de la fonction de localisation, mais également l'utilisation d'un masque acoustique [128].

a) Mesure en deux étapes.

En se basant sur l'idée de l'utilisation d'un microphone de référence comme dans la STSF [129], il est envisageable de réaliser la mesure en 2 fois : une mesure standard suivie d'une mesure à l'aide de microphones de référence placés sur chaque position de sources détectées précédemment.

Ci-dessous, les cas où les sources placées en "1" et "4" sont décorréées, puis corrélées (cf. fig. n°3.32), sont présentés.

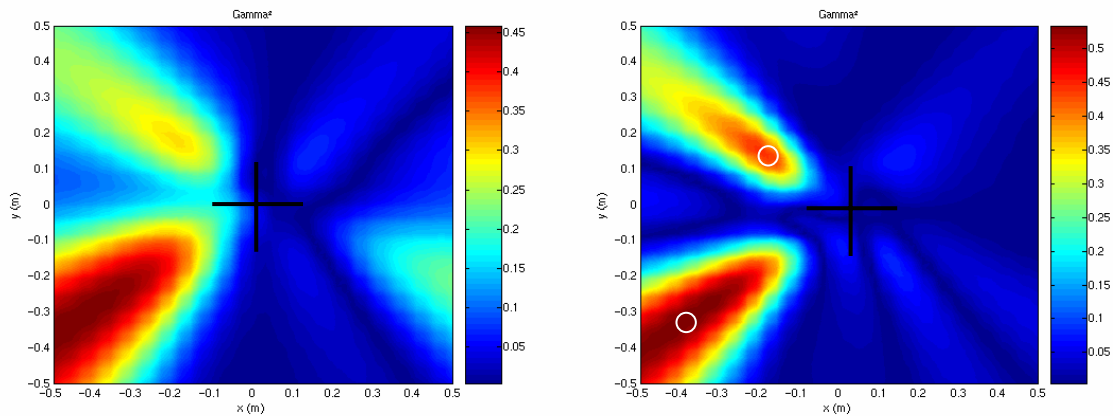


Fig. n°3.32 : Cohérence pour les 2 sources décorréées (gauche) et corrélées (droite) à 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m) pour les sources "1" et "4".

Dans le 1^{er} cas, chaque source est localisée de façon satisfaisante mais apparaît également une 3^{ème} zone de forte cohérence. Dans le 2^{ème} cas, les interférences entre les ondes rayonnées ont pour effet de réduire la surface des lobes de localisation et de faire disparaître la zone citée précédemment.

En plaçant un microphone de référence près des sources 1 et 4 décorréées (cf. fig. n°3.33), seule la position de chaque source réelle est confirmée, ceci avec une résolution spatiale améliorée.

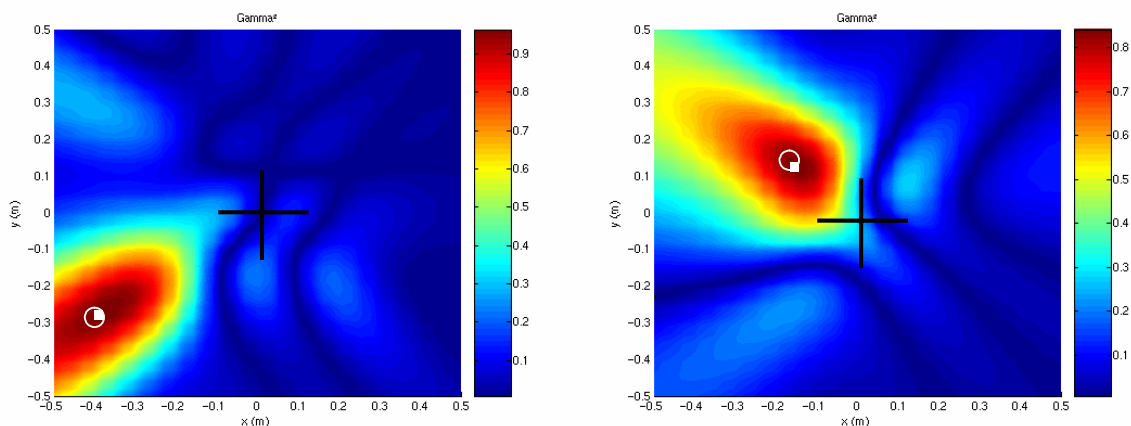


Fig. n°3.33 : Cohérence avec microphone de référence placé à côté de la source 1 (gauche) et à côté de la source 4 (droite) à 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m).

Cette méthode reste peu coûteuse en temps de mesure (une dizaine de minutes, le temps de traiter la première mesure). Elle peut être encore améliorée en incorporant un traitement des données en temps réel pour la première mesure afin de pouvoir placer les microphones sur les sources supposées.

b) Utilisation d'une propriété de la fonction de localisation.

La propriété de focalisation par antennerie, décrite aux paragraphes 2.3.5 et 3.1.4 b), est employée suivant le processus suivant :

- Focalisations dans 3 plans de focalisation (cf. fig. n°3.34).
- Calcul des maxima de cohérence.
- Analyse comparative.

Deux configurations d'excitation sont ici étudiées : source placée en "1" (configuration 1), située dans le plan du panneau n°1, ou source positionnée en "7" (configuration 2), située dans le plan du panneau n°2. Afin de s'affranchir du cas particulier où la source serait placée à l'arrière de l'antenne à une distance égale à la distance de focalisation (cf. cécité de l'antenne), l'antenne est placée à 30 cm du plan source.

La photo suivante (cf. fig. n°3.34) montre les 3 plans de focalisation où les données de chaque mesure sont exploitées, ainsi que les positions des sources considérées.

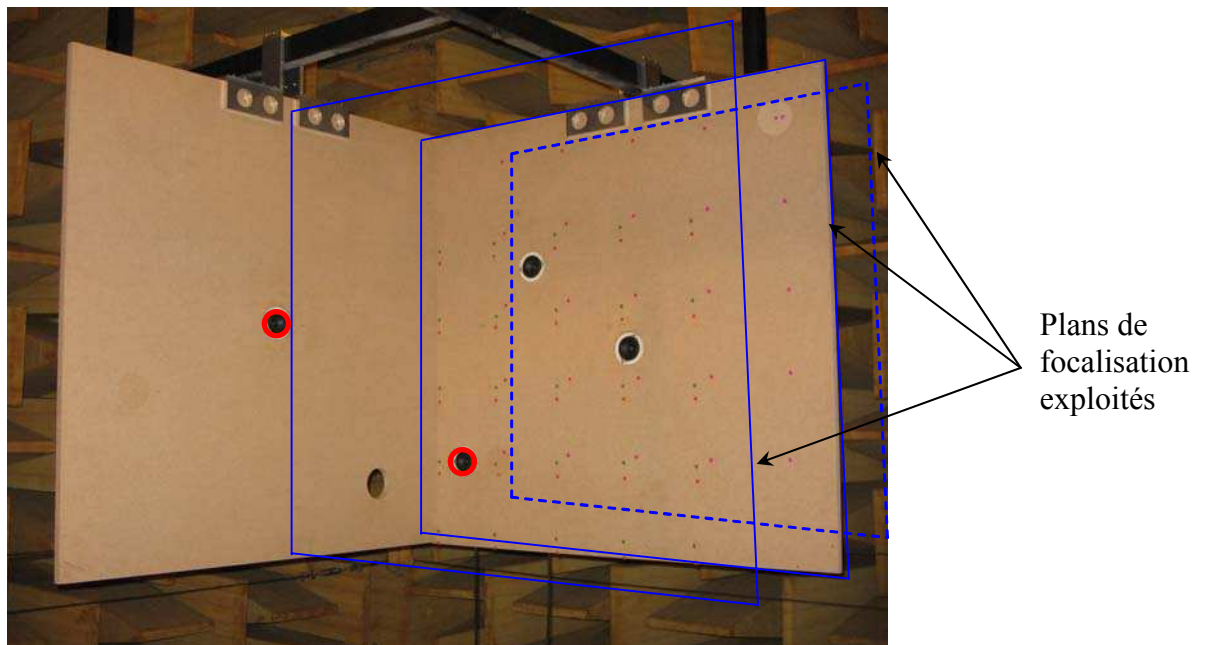


Fig. n°3.34 : Plans de focalisation d'étude pour l'évolution des maxima de cohérence.

Le tableau suivant (cf. tableau n°3.14) résume les résultats pour les 3 distances de localisation.

$D_{\text{foc}}/D_{\text{source plane}}$	Configuration 1	Configuration 2
0.4	0.88	0.91
1	0.90	0.88
2.5	0.82	0.86

Tableau n°3.14 : Cohérences maximales en fonction du plan de focalisation

Ainsi, dans le cas où la source est placée sur le plan de focalisation (configuration 1), le maximum des maxima de cohérence est calculé sur le plan d'étude, alors que, dans le cas d'une source extérieure, ce maximum est trouvé sur un plan de focalisation différent du plan étudié (dans le plan le plus proche de la source). En conclusion, l'analyse de ces maxima rend possible la discrimination des sources réelles et parasites, à l'exception du cas particulier lié à la cécité de l'antenne.

c) Utilisation d'un masque acoustique.

A défaut de mettre en œuvre une solution intrinsèque au traitement, une solution externe peut être envisagée. L'antenne n'étant pas sensible aux perturbations de type « réverbérations », il est possible de s'affranchir des sources « parasites » par l'utilisation d'un masque acoustique.

Afin de tester cette solution, une plaque de mousse absorbante, composée de mélamine de dimensions : $0.8 \times 0.5 \times 0.045 \text{ m}^3$, est positionnée comme suit (cf. fig. n°3.35), de façon à former un masque acoustique vis-à-vis de sources parasites potentielles.

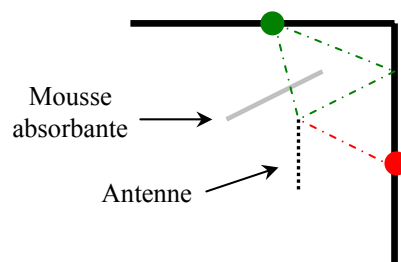


Fig. n°3.35 : Disposition de l'antenne munie du masque acoustique.

Afin d'étayer les propos tenus dans le paragraphe 3.1.5 b) sur le déplacement du maximum de cohérence (source placée dans la zone rouge de la figure n°3.17), l'antenne est placée à 20 cm du plan source.

La figure suivante (cf. fig. n°3.36) présente les résultats obtenus avec et sans mousse absorbante, en présence des sources positionnées en "3" (source devant être localisée), et en "7" (source « parasite »).

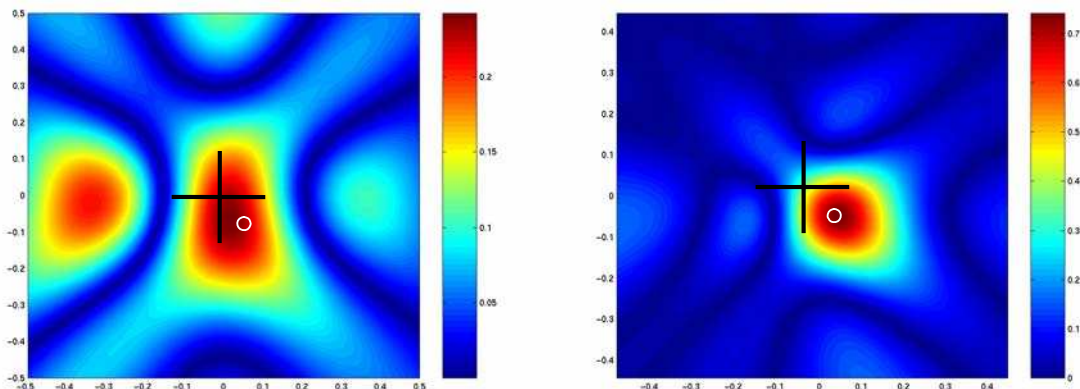


Fig. n°3.36 : Cohérence sans (gauche) et avec (droite) masque acoustique à 2048 Hz ($\lambda=0,168 \text{ m}$).

Ainsi, en l'absence de masque acoustique, la source parasite produit une zone de forte cohérence centrée en (-0,35;0) et un décalage de la zone de cohérence liée à la source principale. En présence du masque acoustique, seule subsiste la zone de forte cohérence de la source principale.

Afin de montrer l'efficacité de cette solution, la source placée en "4" délivre un niveau de 10 dB inférieur à celui de la source parasite placée en "7". Sur la figure n°3.37, sans masque acoustique, la source "4", source principale, n'est pas localisée en présence de la source parasite (effet de proximité "source parasite/antenne" et de rapport de niveau défavorable à la source principale). Par contre, avec le masque acoustique, seule la source principale est localisée.

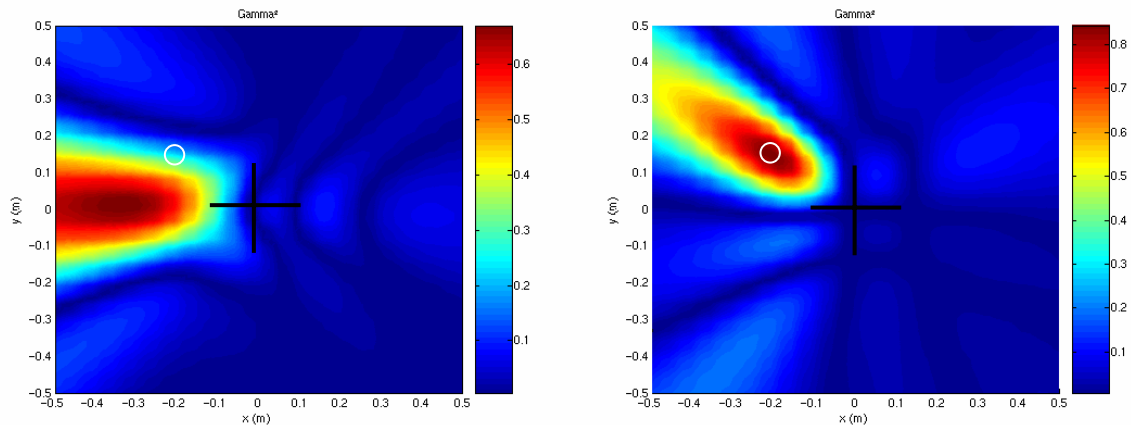


Fig. n°3.37 : Cohérence sans (gauche) et avec (droite) masque acoustique à 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m).

Cette solution permet donc de s'affranchir d'une grande partie des sources « parasites » placées à l'arrière du plan de mesure.

d) Bilan des solutions.

Une solution intéressante se dégage des expérimentations précédentes : une combinaison entre le masque acoustique et l'utilisation de la propriété de la fonction de localisation.

En effet, la présence du masque acoustique permet d'éliminer une grande partie des sources « parasites » situées à l'arrière de l'antenne. Toutefois, dans la pratique, il n'est pas question de créer un masque acoustique qui engloberait la totalité de la surface étudiée sinon le système deviendrait trop encombrant et difficile d'utilisation. C'est là qu'intervient la propriété de la fonction de localisation. Avec un masque partiel tel celui schématisé en figure n°3.38, il est possible de s'affranchir des sources « parasites » situées dans la zone 1, les autres situées dans la zone 2 potentiellement perturbatrices, étant identifiables par l'utilisation de la propriété de la fonction de localisation.

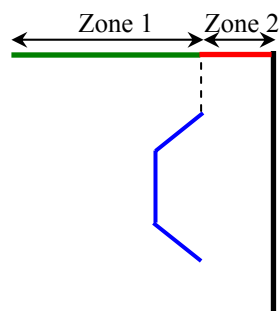


Fig. n°3.38 : Principe de la solution préconisée avec un masque acoustique partiel.

3.2 Essais réalisés dans le tronçon VASCo.

Dans le but de s'approcher des conditions réelles d'utilisation finale des outils développés (essais au sol rotor tournant et essais en vol dans une cabine d'hélicoptère), une nouvelle campagne de mesure est menée dans le tronçon VASCo.

3.2.1 Présentation du tronçon VASCo et dispositif expérimental.

Le tronçon VASCo, dont dispose l'ONERA Toulouse, est une maquette en composite à l'échelle 1, représentative d'une partie de la cabine de l'hélicoptère NH90 (cf. fig. n°3.39).



Fig. n°3.39 : Photo de l'intérieur du tronçon VASCO.

De par sa composition et du fait que les parois sont nues, la cabine est extrêmement réverbérante comme le montrent les temps de réverbération (cf. fig. n°3.40) mesurés lors d'une campagne d'essais [130].

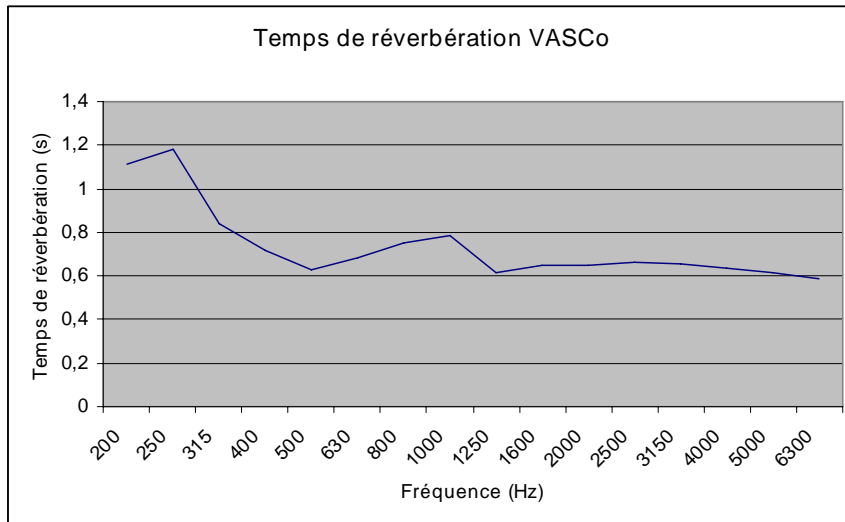


Fig. n°3.40 : Temps de réverbération (s.) mesurés dans le tronçon VASCo.

Afin de simuler au mieux les sources de type "acoustique", deux haut-parleurs sont placés à l'extérieur de la cabine : un au dessus du plancher mécanique (cf. fig. n°3.41) et l'autre en face d'une fenêtre (cf. fig. n°3.42).

De même, pour simuler les sources "vibratoires", quatre pots vibrants sont placés au niveau des barres d'attache de la BTP sur le plancher mécanique (cf. fig. n°3.41).



(a)

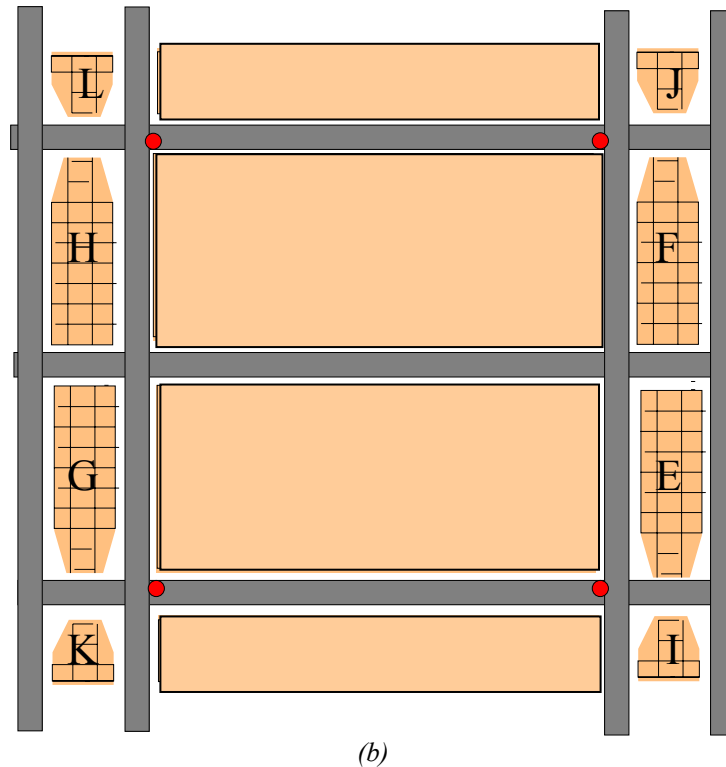


Fig. n°3.41 : (a) Photo du dessus du tronçon VASCo équipé des sources et (b) schéma du plafond intérieur de VASCo avec les points d'excitation vibratoire.

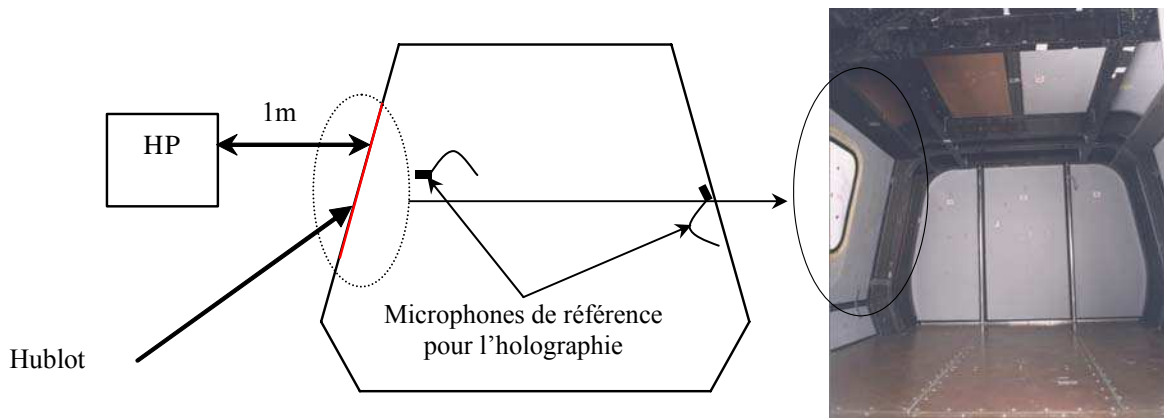


Fig. n°3.42 : Schéma et photo du tronçon VASCo avec source d'excitation.

3.2.2 Premiers essais réalisés sans capotage au niveau de la paroi avec le hublot.

Des essais préliminaires ont été menés sur le tronçon VASCo afin de connaître les caractéristiques « acoustiques » du tronçon telles que la temps de réverbération [131] et certains résultats seront mentionnés dans la suite du texte.

Le haut parleur, positionné à 1m de la cabine face à la fenêtre est excité par un bruit blanc (simulant une source aéro-acoustique), produit un champ de pression réparti sur la structure externe de VASCo (cf. fig. n°3.42). La paroi du tronçon se compose d'une structure de type sandwich composite (nid d'abeille + peaux en fibres de verre et carbone) au milieu de laquelle se trouve un hublot en plexiglass.

Les dispositifs expérimentaux employés pour l'holographie et l'intensimétrie sont les mêmes que ceux employés en chambre anéchoïque. Par contre, le nombre de microphones utilisés pour l'antenne en croix a été doublé (16 + 16 microphones). Cette nouvelle configuration d'antenne nécessite l'utilisation d'un microphone de référence (placé sur l'antenne elle-même) de façon à compenser le nombre de voies d'acquisition insuffisant.

Pour l'holographie, deux microphones de référence sont mis en place : l'un au centre de la grille complète de microphones et l'autre est placé au centre du hublot opposé (microphone placé en champ lointain) comme le précise la figure n°3.42.

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales des trois méthodes testées (cf. tableau n°3.15).




	Holographie	Antennerie	Intensimétrie
Geometrie			
Nombre de points	24 x 25 (600 points)	16 + 16	24 x 25 (600 points)
Espacement entre microphone	4 cm	4 cm	4 cm
Distance plan de mesure/étude	8 cm	25 cm	12 cm
Temps de mesure	1 h	2 min	3 h

Tableau n°3.15 : Résumé des paramètres utilisés pour chaque méthode de mesure.

En raison du temps de réverbération élevé (cf. fig. n°3.40), la cohérence spatiale au-delà de 500 Hz entre les microphones de l'antenne et de la grille holographique est extrêmement faible. De fait, les résultats de localisation sont peu convaincants. En deçà, les signaux microphoniques de l'antenne sont en partie corrélés du fait de la faible expansion géographique des microphones, ce qui n'est pas le cas pour l'holographie dont les microphones sont très éloignés. Enfin, les microphones de la sonde intensimétrique, distants seulement de 1,2 cm, procurent des signaux corrélés quelle que soit la fréquence. Les vecteurs sont donc cohérents dans tout l'espace de mesure : l'intensimétrie constitue en ce sens la technique de référence.

A 500 Hz ($\lambda=0,68$ m), une bonne similitude entre les résultats d'intensimétrie (cf. fig. n°3.43) et d'antennerie (cf. fig. n°3.44) est constatée, contrairement à l'holographie (cf. fig. n°3.45). Avec les deux premières techniques, trois zones rayonnantes sont détectées : une au coeur du hublot (représenté par les pointillés bleus), et deux externes, en périphérie de la surface d'intérêt (l'une en haut à gauche et l'autre sur la droite). Tandis que pour l'holographie, seules les deux zones externes sont reconstruites. La mise en place de microphones de références supplémentaires aurait peut être permis une meilleure reconstruction.

Un léger décalage des positions des zones de rayonnement entre le champ d'intensité normal, représentant le flux généré par les sources en paroi, et le champ de cohérence en

antennerie est observé. Ceci s'explique par le fait que la représentation du champ normal doit être recomposée avec le champ tangentiel pour avoir la position exacte des sources (ce qui n'est pas le cas ici). Toutefois, le champ d'intensité normal donne une première information importante puisqu'il permet de mettre en évidence que les trois zones rayonnent du plan d'étude vers le plan de mesure (cf. fig. n°3.43).

D'autre part, le champ d'intensité tangentiel (cf. fig. n°3.43), permet lui de localiser précisément les zones de rayonnement (représentées par des zones rouges sur la figure) en étudiant la convergence des vecteurs intensité. Ainsi, les zones de convergence des vecteurs intensité correspondent aux positions détectées par l'antennerie acoustique (cf. fig. n°3.44).

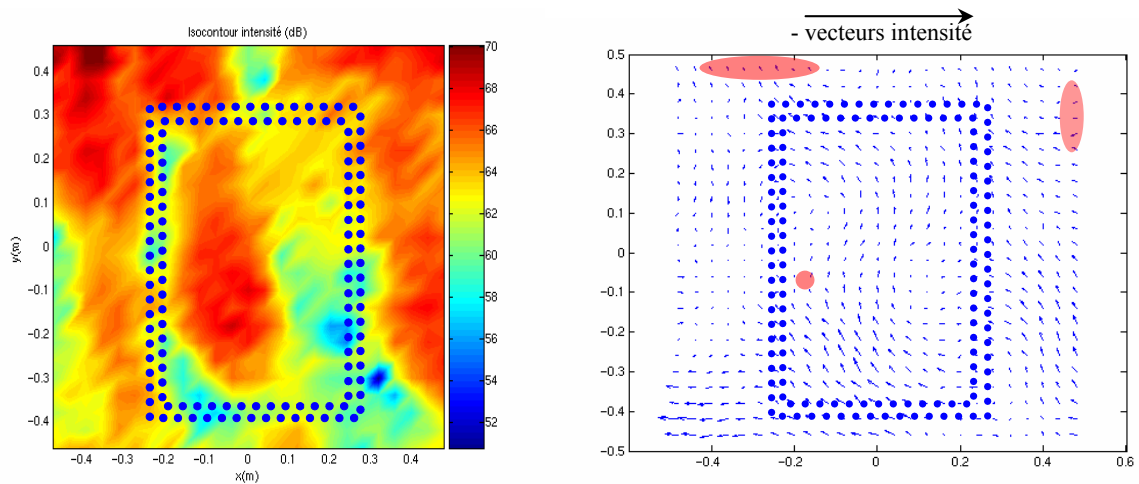


Fig. n°3.43 : Champ d'intensité normal (dB) et le champ d'intensité vectoriel tangentiel à 500 Hz ($\lambda=0,68$ m).

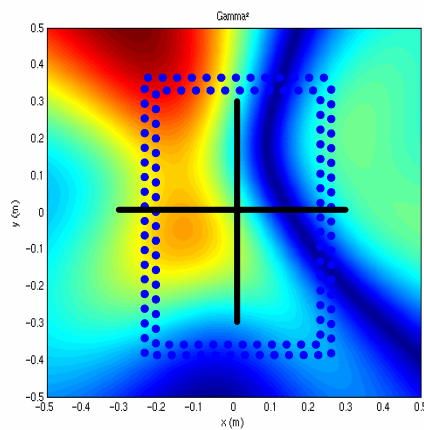


Fig. n°3.44 : Réponse de l'antennerie pour une fréquence de 500 Hz ($\lambda=0,68$ m).

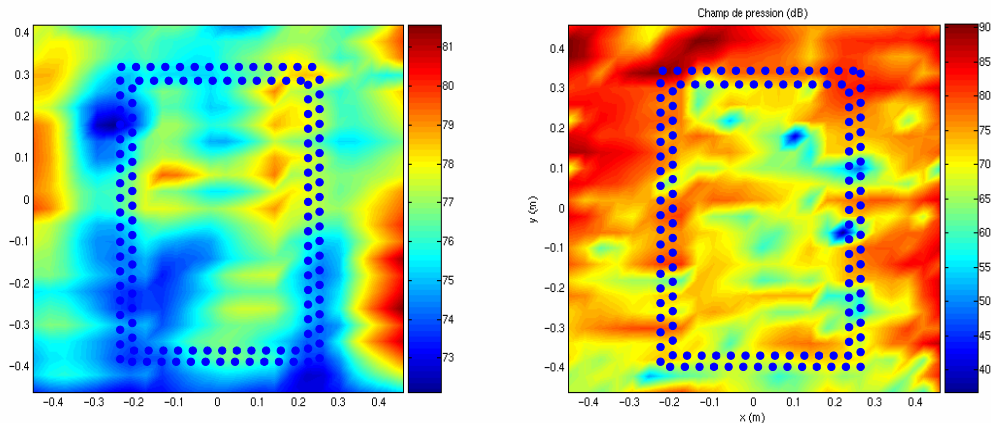


Fig. n°3.45 : Champ de pression dans le plan hologramme (dB) et champ de pression rétropropagé (dB) à une fréquence de 500 Hz ($\lambda=0,68$ m).

3.2.3 Premiers essais réalisés à l'aide d'un capotage au niveau de la paroi avec le hublot.

Un premier capotage composé d'un panneau extérieur réfléchissant en Médit et de plaques de mousse absorbante (mélamine de 4 cm) internes a été réalisé.

De même, afin d'avoir une expansion géographique minimale des microphones, l'espacement entre les microphones est réduit à 2 cm pour une antenne en croix composée de 16 microphones sur chaque bras.

Une expérimentation similaire (cf. fig. n°3.46) à la précédente est menée afin de tester les performances d'un tel masque acoustique [133]. La configuration diffère de la précédente puisque l'antenne est décentrée par rapport au centre du hublot (cf. croix noires sur la figure n°3.47).



Fig. n°3.46: Configuration de l'expérimentation : tronçon VASCo (gauche), haut-parleur placé à 1m (centre), masque acoustique placé dans la cabine (droite).

En premier lieu, une nette amélioration des cohérences aux hautes fréquences entre les microphones composant l'antenne est observée. Ainsi, à 5000 Hz ($\lambda=0,068$ m), la cohérence entre les microphones les plus éloignés est encore de 0.91.

A 500 Hz, les résultats montrent la présence de deux zones de rayonnement principale : une placée en limite haute du plan de focalisation et une autre au niveau du hublot (cf. fig. n°3.47).

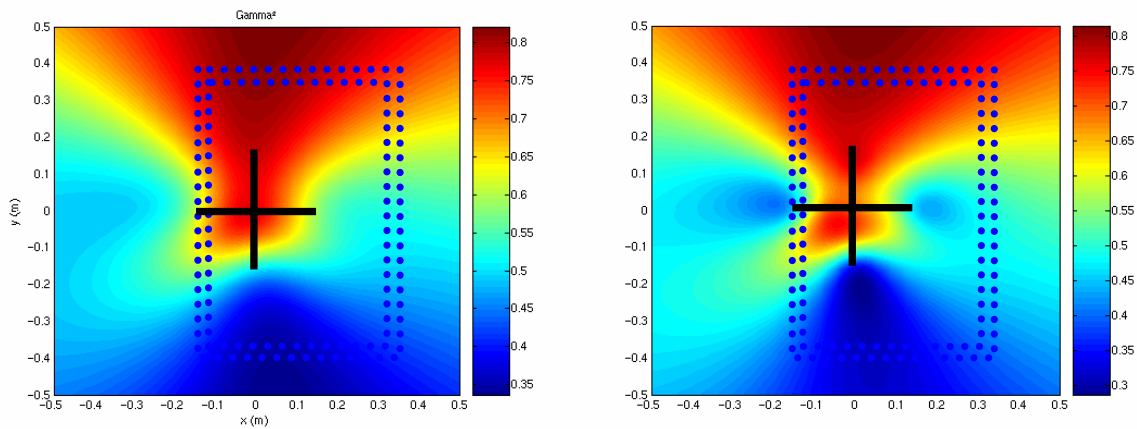


Fig. n°3.47: Cohérence à la fréquence de 500 Hz ($\lambda=0,68$ m) pour une distance de focalisation de 0.25 m (à gauche) et de 0.15 m (à droite).

Afin de s'assurer que la zone de rayonnement supérieure n'est pas liée à la présence d'un panneau perpendiculaire à la fenêtre (cf. fig. n°3.46), le traitement des données est effectué sur un autre plan de focalisation (15 cm). Pour identifier si cette source est une source « parasite » ou non, il suffit d'utiliser le critère présenté dans le paragraphe 3.1.7 b). Ainsi, pour les deux positions détectées à 25 cm, le niveau de cohérence maximum est obtenu pour une distance de focalisation de 25 cm correspondant à la position de paroi de la cabine d'hélicoptère étudiée (cf. tableau n°3.16).

Distance focalisation (m)	Zone centrale	Zone supérieure
0,25	0,756	0,831
0,2	0,742	0,825
0,15	0,728	0,819

Tableau n°3.16 : Cohérences maximales en fonction du plan de focalisation.

En observant cette partie de la paroi, on remarque que la zone émissive correspond à la jointure entre deux panneaux constituant la paroi. Il en est déduit qu'il y a probablement des fuites acoustiques entre ces deux panneaux, à l'origine d'un rayonnement acoustique.

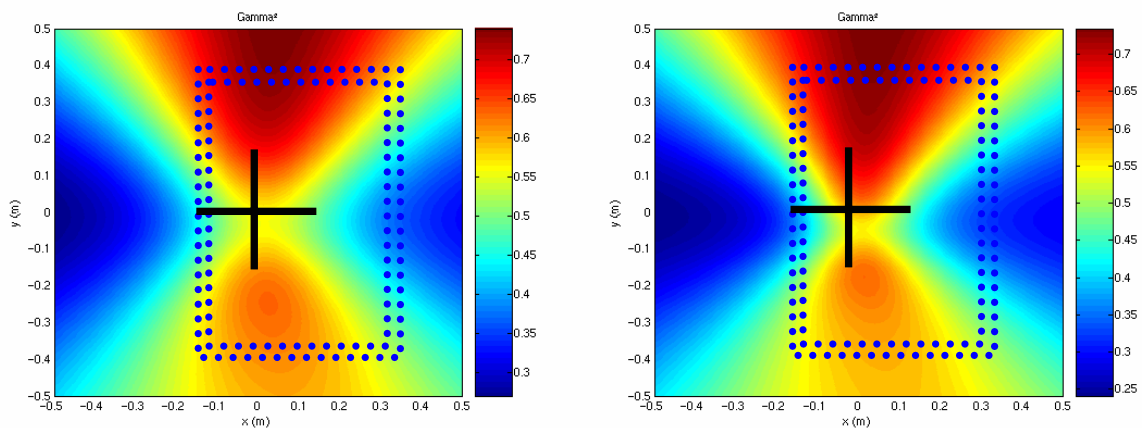


Fig. n°3.48 : Cohérence à la fréquence de 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m) pour une distance de focalisation de 0.25 m (à gauche) et de 0.15 m (à droite).

Comme l'atteste la figure n°3.48, une zone de rayonnement acoustique, encore apparentée à une fuite acoustique, est observée dans la partie supérieure à 2048 Hz ($\lambda=0,168$ m), confirmée par le calcul de champ de cohérence en deux plans de focalisations différents (cf. tableau n°3.16).

De même, en étudiant l'évolution des maxima (cf. tableau n°3.17), la zone de rayonnement détectée en (0;0,25), appelée « zone centrale », représente bien une source sur la paroi du tronçon.

Distance focalisation (m)	Zone centrale	Zone supérieure
0,25	0,621	0,739
0,2	0,608	0,726
0,15	0,598	0,712

Tableau n°3.17 : Cohérences maximales en fonction du plan de focalisation.

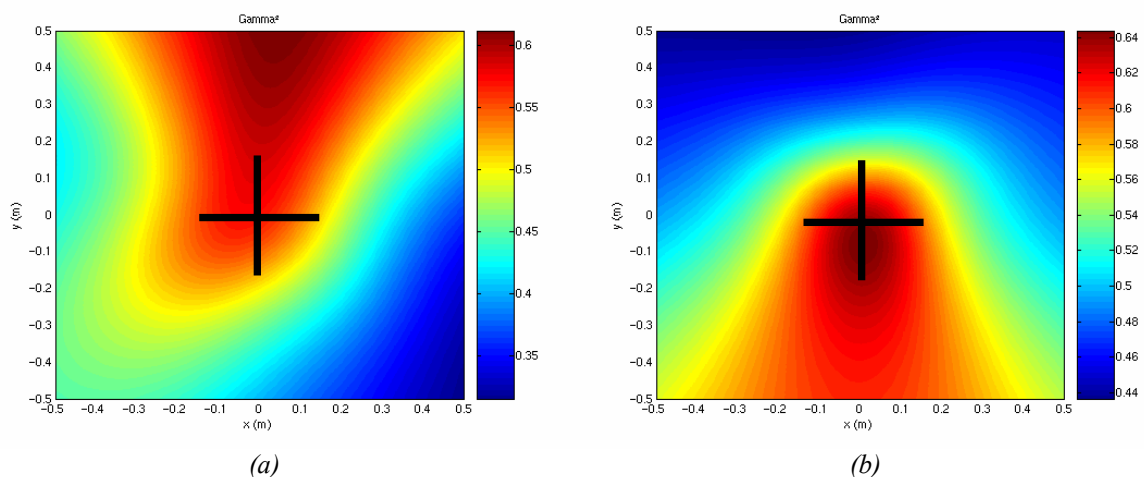
3.2.4 Essais sur le plafond du tronçon VASCo (ou plancher mécanique).

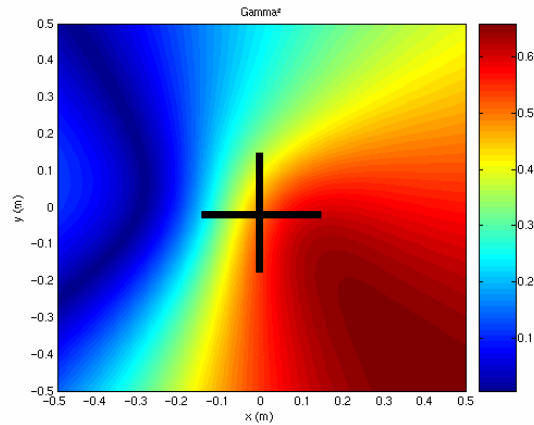
Disposant d'un nouveau capotage optimisé défini en annexe n°6, une nouvelle campagne de mesure est réalisée pour localiser les sources acoustiques sur le plancher mécanique (cf. fig.n°3.41). Seule l'antennerie est utilisée comme moyen de localisation.

De même, le pas d'échantillonnage fréquentiel change à 2 Hz.

Deux configurations sont étudiées : dans la 1^{ère} configuration, 4 pots vibrants excitent la structure en large bande (simulant les attaches des barres BTP), et dans la 2^{ème} configuration, le haut parleur excite le plancher mécanique avec un bruit sinusoïdal à la fréquence de 1024 Hz soit $\lambda=0,33$ m (simulant le rayonnement acoustique de la BTP).

L'antenne, placée à 25 cm de la paroi d'étude, est composée de 16 + 16 microphones espacés de 2 cm chacun.



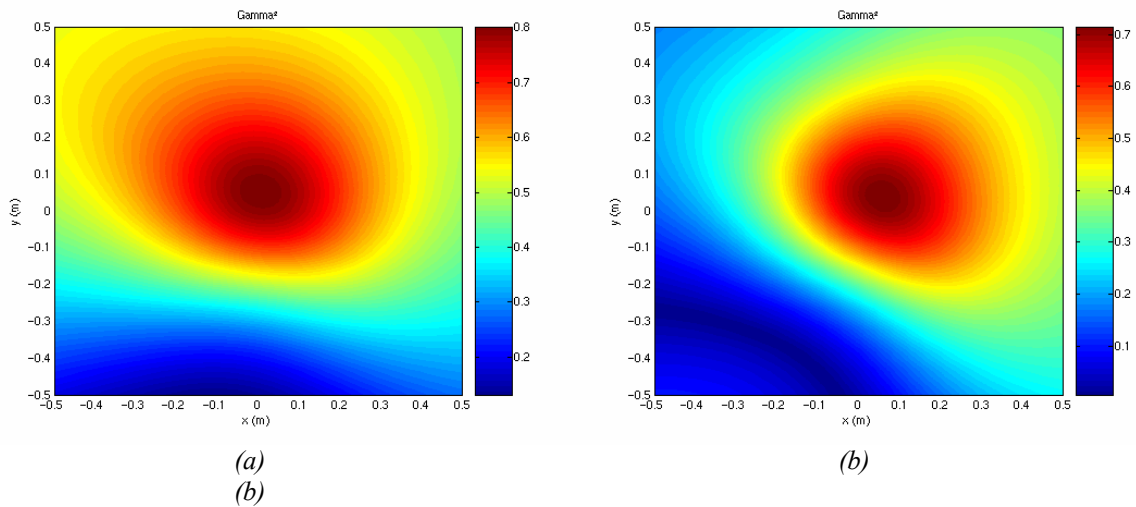


(c)

Fig. n°3.49 : Cohérence pour une fréquence de (a) 992 Hz ($\lambda=0,343$ m), (b) 1012 Hz ($\lambda=0,336$ m) et (c) 1020 Hz ($\lambda=0,333$ m).

Les champs de cohérence calculés dans la bande de fréquence proche de 1000 Hz (990 – 1020 Hz), fréquence particulière de BTP d'hélicoptère Dauphin, montrent successivement, selon les fréquences étudiées, 3 zones de fort rayonnement acoustique : une centrale, une supérieure et une en coin (cf. fig. n°3.49). Dans cette bande de fréquence, la position des sources acoustiques est très variable.

Par contre, à plus hautes fréquences (1500, 2000, 2500 et 3000 Hz), les résultats, à proximité du centre du plancher mécanique, montrent un fort rayonnement acoustique (cf. fig. n°3.50).



(a)
(b)

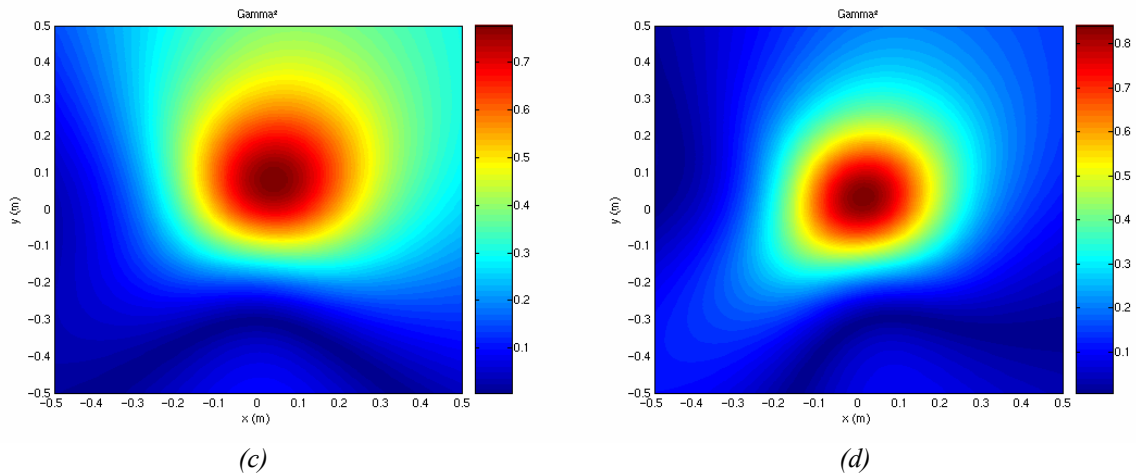


Fig. n°3.50 : Cohérence calculée à la fréquence de (a) 1500 Hz ($\lambda=0,227$ m), (b) 2000 Hz ($\lambda=0,17$ m), (c) 2500 Hz ($\lambda=0,136$ m) et (d) 3000 Hz ($\lambda=0,11$ m).

Afin d'essayer d'apporter une explication à ces résultats, le champ d'intensité de structure obtenu lors d'une précédente campagne d'essais réalisée dans le tronçon VASCo [126,133] est examiné à 1012 Hz ($\lambda=0,336$ m). Les résultats présentés sur la figure n°3.51 sont obtenus avec une excitation bruit blanc à l'aide d'un pot vibrant (point orange sur la figure) placé en une des positions des attaches de la barre BTP.

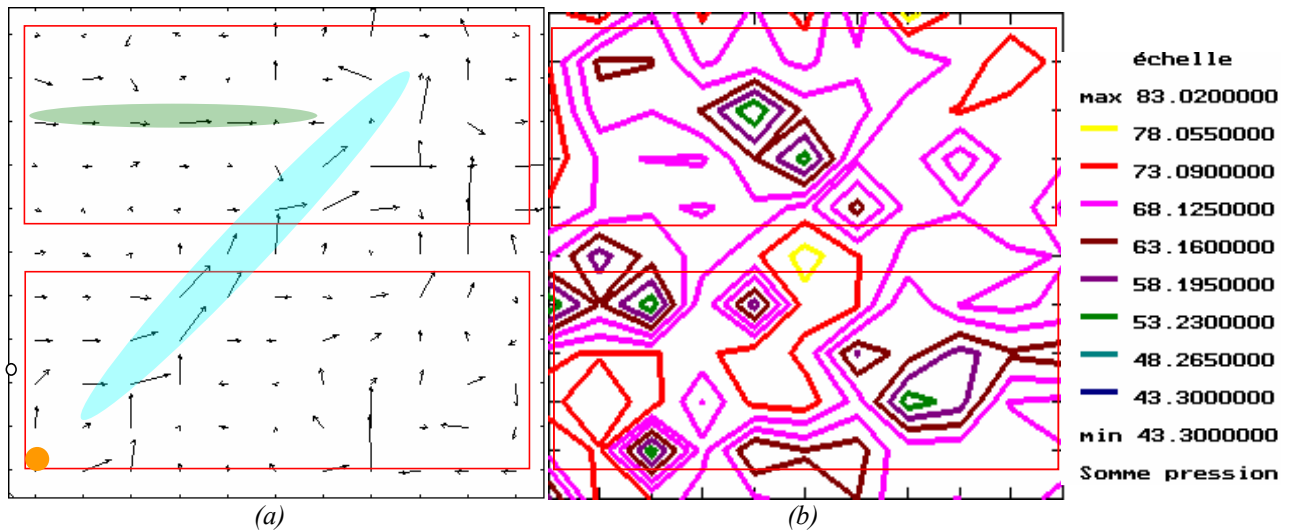


Fig. n°3.51 : (a) Champ d'intensité (W/m) à 1012 Hz ($\lambda=0,336$ m) (b) Champ de pression (dB) à 20 cm du panneau à 1012 Hz ($\lambda=0,336$ m).

Ainsi, l'énergie acoustique se propage dans le plancher mécanique le long de la diagonale (zone bleue) mais une résurgence importante dans le champ d'intensité dans la zone supérieure (zone verte) est également observée. Sur la carte du champ de pression (cf. fig. n°3.51), un rayonnement central important est observé.

En se référant à l'étude menée en [133] où 4 pots vibrants excitent la structure indépendamment les uns des autres, le champ acoustique global entre 500 et 3000 Hz, à 20 cm du plancher mécanique, apparaît également essentiellement au centre du plancher mécanique (cf. fig. n°3.52).

Ces résultats permettent de supposer que 4 pots vibrants excités de façon corrélée engendrent également un rayonnement acoustique central ce qui expliquerait les résultats de la figure n°3.49 (b) et de la figure n°3.50.

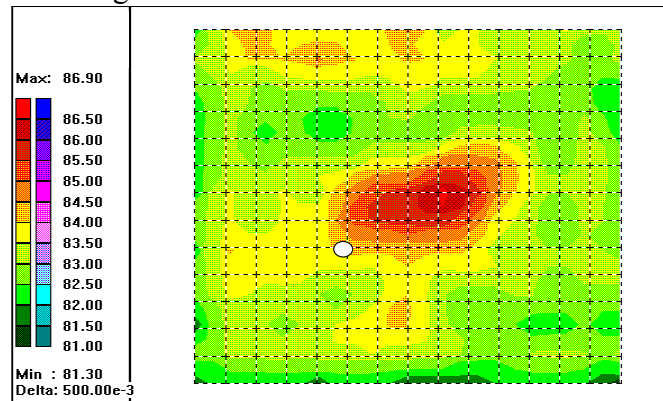


Fig. n°3.52 : Champ de pression sur la bande de fréquence 500 – 3000 Hz à une distance de 20 cm du plancher mécanique pour 4 pots vibrants excités indépendamment.

La deuxième configuration est ensuite testée, elle permet de simuler la réponse du plancher mécanique à un bruit d'origine aérodynamique. Une seule zone de fort rayonnement est alors observée sur le plancher mécanique qui est détectée en (0,1;0,15) (cf. fig. n°3.53).

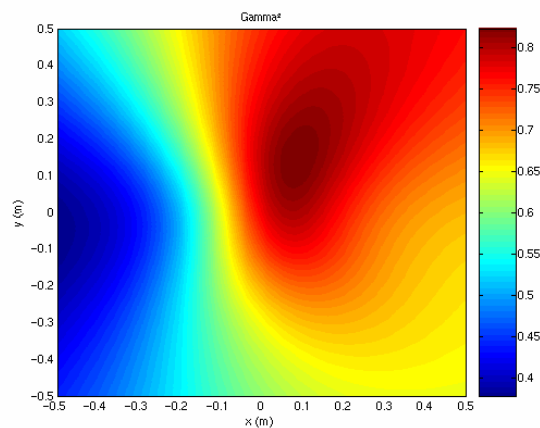


Fig. n°3.53 : Cohérence calculée à la fréquence de 1024 Hz ($\lambda=0,33$ m)..

Au final, une forte zone de rayonnement est détectée au centre du plancher mécanique pour les deux types d'excitation qu'il serait intéressant de pouvoir diminuer pour améliorer le confort acoustique de la cabine.

Toutefois, cette première campagne d'essais sert de préliminaire à une série de nouvelles expérimentations plus complètes et plus approfondies mettant en œuvre toutes les techniques de localisation et qui doit permettre de valider les résultats obtenus.

On peut tout de même être confiant dans la pertinence des résultats du fait de la comparaison faite avec les quelques études menées même si les conditions de mesure n'étaient pas identiques.

Afin d'apporter plus de crédit à cette approche, il est important de rappeler que la technique d'antennerie a également été testée avec succès dans le cas de mesures de transmission acoustique d'un panneau optimisé. Ce panneau était installé entre une chambre réverbérante excitée par une excitation de type champ diffus et une chambre assourdie [135]. Les mesures d'intensimétrie et d'antennerie sont alors réalisées dans la chambre assourdie.

Les résultats comparatifs entre les résultats d'intensité acoustique et d'antennerie sont concluants puisque les mêmes zones de rayonnement sont détectées.

3.2.5 Conclusions sur les essais dans le tronçon VASCo.

Les premiers essais menés sur le tronçon VASCo ont permis de valider les améliorations proposées pour l'antennerie : combinaison d'un capotage et de l'utilisation d'une propriété de la fonction de localisation. Il en ressort que cette solution semble appropriée pour une utilisation en milieu confiné.

Du point de vue de l'holographie, il a été mis en évidence la complexité de mener des mesures holographiques dans un milieu confiné. En effet, la dispersion des microphones étant trop importante, il est souvent difficile d'obtenir une bonne cohérence entre les signaux (cohérence inférieure à 0,1 dès que la distance entre deux microphones est supérieure à 4cm). Par contre, l'utilisation de cette technique dans une cabine d'hélicoptère « habillée » semble moins problématique du fait de temps de réverbération moins importants (cf. [22]).

D'autre part, l'intensimétrie a joué un rôle déterminant pour estimer la pertinence des résultats obtenus lors des premiers essais menés dans VASCo. En effet, lorsque les réponses de l'antenne et de l'holographie étaient différentes voire contradictoires, l'intensimétrie a permis de trancher et de conclure sur les performances des deux autres techniques de localisation.

Au final, les dernières expérimentations menées sur le tronçon VASCo ont également permis de montrer les premières tendances sur la réponse du plancher mécanique à des excitations de type vibratoires et aériennes. Même si ces données expérimentales semblent aller dans la bonne direction, ces résultats doivent encore faire l'objet de complément de validation. Ainsi une campagne d'essais complète doit encore être menée.

Conclusion générale et perspectives.

Ce mémoire de thèse est consacré à la résolution des problèmes de localisation de sources acoustiques dans un milieu confiné. Cette étude se place dans un cadre concret puisqu'elle a pour but de permettre l'amélioration du confort acoustique des cabines d'aéronefs (hélicoptère plus particulièrement) et une meilleure compréhension des phénomènes de transferts vibratoire et acoustique entre l'extérieur et l'intérieur des habitacles.

Afin de traiter cette problématique, une démarche progressive a été menée. Initialement, il a été nécessaire de faire un inventaire des techniques existantes de localisation des sources acoustiques et de choisir les plus pertinentes à mettre en œuvre. Une étude bibliographique approfondie, a donc été réalisée dans un premier chapitre. Elle a permis de faire émerger deux techniques de localisation de sources potentiellement applicables en milieu confiné et répondant aux critères exigés lors d'essais en vol sur hélicoptère : l'antennerie acoustique et l'holographie à références multiples (STSF).

Néanmoins, une troisième méthode a été sélectionnée : l'intensimétrie acoustique. Cette méthode, bien que peu adaptée à notre problématique du fait de son temps de mise en œuvre, montre l'avantage d'être parfaitement maîtrisée, de fournir une bonne localisation des sources (après satisfaction de certaines précautions d'utilisation en milieu confiné) et d'apporter de nombreuses informations sur le champ acoustique au niveau du plan de mesure. Dans le cadre de cette thèse, elle sert de méthode de localisation de référence.

Il ressort de ce premier chapitre que, bien que moins résolutive, l'antennerie requiert une mise en œuvre moins contraignante que l'holographie (ou l'intensimétrie) et les risques d'erreurs sont plus faibles (déphasage intrinsèque des voies de mesure, erreur de positionnement des capteurs engendrant des déphasages factices...). Cette technique présente également l'avantage de permettre de viser des domaines étendus, à partir de grilles de faible surface, en une seule acquisition, contrairement à l'holographie qui suppose un déplacement de la grille de mesure pour couvrir une surface "source" équivalente. L'antennerie a également la particularité de pouvoir identifier des sources situées sur une surface quelconque.

Toutefois, l'antennerie présente quelques inconvénients puisqu'elle privilégie les sources compactes aux sources étendues et elle possède une résolution inférieure à celle de l'holographie. De plus, une estimation précise de l'amplitude des sources détectées nécessite une phase de post-processing (méthodes inverses).

Ces deux techniques présentent un défaut commun : elles se basent sur l'utilisation d'une fonction de Green pour la modélisation de la propagation des ondes. Ainsi, à moins de

connaître la fonction de Green associée au milieu étudié, une hypothèse de champ libre doit être faite. Cette hypothèse nécessite alors une adaptation du traitement du signal associé à chaque méthode ou de l'environnement de mesure pour que ces méthodes restent valables.

Suite à cette étude bibliographique, un outil de simulation a été créé afin de pouvoir réaliser une étude paramétrique de sensibilité et de performances et ainsi permettre d'aider à optimiser le dimensionnement de chaque outil de mesure mis en œuvre.

Cette étude paramétrique a permis de déterminer que, pour un fonctionnement optimal de l'holographie, il est nécessaire de faire un postulat sur la position des sources principales de bruit, ce qui nécessite des études en amont sur les sources potentiellement génératrices de bruit. Cette étude préliminaire est nécessaire car elle permet de placer un microphone de référence le plus près possible de chacune de ces sources et ainsi reconstruire le champ acoustique le plus fidèlement possible. La grille de microphones doit également être placée au plus près de la zone source (8 cm dans le cas de sources monopolaires par exemple) pour que celle-ci capte le maximum d'énergie émis par les sources tout en évitant les problèmes de champ proche des sources.

De même, pour un fonctionnement optimal de l'antenne en champ proche, il faut disposer d'une antenne qui soit un bon compromis entre nombre de capteurs et résolution (liée à la taille et à la distance de focalisation) et qui s'affranchisse éventuellement des problèmes de lobes secondaires pour augmenter la dynamique de mesure (utilisation de l'apodisation). Une antenne d'une taille comprise entre la distance de focalisation jusque deux fois celle-ci est recommandée pour répondre à cette exigence. Néanmoins, un second compromis entre la résolution voulue (liée à la taille de l'antenne) et la gamme fréquentielle souhaitée (liée à l'espacement entre deux capteurs consécutifs) est nécessaire pour dimensionner l'antenne.

De plus, le caractère discret et fini de la grille utilisée pour l'holographie impose l'utilisation de filtres spatiaux (Veronesi). Un second filtre doit être également utilisé afin de régulariser les matrices (Nouals) utilisées lors des calculs réalisés pour traiter les données. L'absence de ces filtres engendre une reconstruction de champs de pression bruités et génèrent des sources artificielles de niveau conséquent (pouvant être 5 à 10 dB au dessus du niveau de la source réelle). Le filtrage des données dans le cas de l'antennerie (apodisation) n'est pas obligatoire mais il permet tout de même d'améliorer les performances de dynamique de mesure notamment lorsque l'antenne est placée à une faible distance du plan source.

Contrairement à l'antennerie, l'holographie est incapable de détecter des sources situées à l'extérieur du champ physique de la grille de microphones. Ces sources non détectées viennent même perturber plus ou moins fortement les résultats en générant des perturbations sur les bords de la grille. Il est donc important que la grille incorpore toute la zone source pour pallier à ces problèmes. Il est évident qu'une grande zone source va entraîner un nombre important de mesures supplémentaires. D'ailleurs, un compromis entre le temps de mesure (lié au nombre de microphones disponibles et à la taille de la zone source à explorer) et la gamme fréquentielle d'étude souhaitée (liée à l'espacement entre capteurs) est nécessaire.

Il ressort également de cette étude l'intérêt de connaître les microphones utilisés et notamment la différence relative de phase pouvant exister entre ceux-ci. Dans le cas de l'holographie, la non prise en compte des caractéristiques des microphones engendre des erreurs de positionnement des sources (± 4 cm pour des différences de phase de l'ordre de $4,5^\circ$)

à 2000 Hz), et une reconstruction moins performante des niveaux de bruit réellement engendrés par la source (± 3 dB pour l'amplitude pour le même type de déphasage). A contrario, l'antennerie est très robuste face à ces mêmes différences relatives de phase puisque les résultats sont jugés performants pour des erreurs de phase comprises entre -18° et $+18^\circ$.

Par la suite, le logiciel de simulation développé pour ce chapitre évolue afin qu'il puisse permettre le dimensionnement de ces mêmes outils dans un milieu confiné de nature plus complexe. De même les codes nécessaires au traitement des données acquises lors d'expérimentations ont été développés et validés.

Il ressort des premières expériences que l'antennerie, de par sa robustesse face aux erreurs de phase et sa rapidité de mise en œuvre, est la plus intéressante des deux méthodes utilisées. En effet, celle-ci est la seule à être peu sensible aux perturbations liées aux réflexions des sources positionnées sur le plan d'étude. Toutefois, à l'image de l'holographie, elle présente une sensibilité aux sources parasites.

Le temps de mesure est également un critère important à prendre en compte dans le cadre d'essais en vol. Par exemple, les temps de mesure pour l'antennerie et l'holographie sont mesurés. Pour l'holographie, dans le cas d'un plan source de 1 m^2 et de maille 4 cm, en utilisant une antenne linéaire composée de 8 microphones, la mesure met une heure à être réalisée, alors que, pour cette même configuration, elle est effectuée en 3 minutes pour l'antennerie.

Afin d'améliorer le traitement d'antenne notamment en présence de sources parasites, trois solutions sont envisagées : la réalisation de la mesure en deux étapes, l'utilisation d'une propriété de la fonction de localisation, mais également l'utilisation d'un masque acoustique. Après une série d'essais menés en chambre sourde puis dans le tronçon VASCo, une solution optimisée pour l'antennerie a été proposée : la combinaison d'un masque acoustique le moins encombrant possible (composé d'un panneau optimisé avec un indice d'affaiblissement élevé et d'une mousse absorbante performante) et l'utilisation d'une propriété de la fonction de localisation a été choisie. Elle présente l'avantage de ne nécessiter qu'une série de mesure en conservant des performances satisfaisantes.

Cette solution a été mise en œuvre dans une configuration d'essai plus complexe et plus représentative des conditions futures d'utilisation, soit un démonstrateur de cabine hélicoptère. La solution choisie a ainsi pu être validée avec succès en se basant notamment sur les résultats obtenus par l'intensimétrie acoustique, choisie comme méthode référence.

Grâce aux évolutions du logiciel de simulation développé, un critère d'utilisation de l'holographie dépendant de la fréquence et de la distance de rétropropagation en milieu confiné a été défini afin d'assurer une influence nulle des réflexions créées par les sources du plan de rétropropagation. Par la suite, un étalonnage du filtre de Veronesi a également été proposé afin de compenser les erreurs de reconstruction en amplitude liées à son utilisation.

Dans le premier cas, il a été montré, à une fréquence donnée, qu'il existe une distance de rétropropagation à partir de laquelle les sources de type « réflexion » ne perturbent plus la réponse de l'holographie.

Dans le second cas, pour une configuration donnée, il a été constaté qu'en utilisant un filtre spatial de Veronesi plus strict, les sources de type « réflexion » disparaissaient pour une

fréquence plus basse mais le niveau de pression reconstruit était largement sous-estimé. L'étalonnage du filtre de Veronesi proposé afin de corriger les valeurs de pression a montré de bonnes performances (erreur de reconstruction de l'ordre d'1dB). Toutefois, l'utilisation d'un filtre plus strict perturbe la localisation de sources sur les zones proches des bords et, de ce fait, réduit la zone de validité des résultats.

La complexité de mener des mesures holographiques dans un milieu confiné a également été mise en évidence avec la méthode utilisée lors de cette thèse. En effet, la dispersion des microphones étant importante, il est souvent difficile d'obtenir une cohérence spatiale suffisante entre signaux pour des milieux extrêmement réverbérant. Toutefois, l'utilisation de cette technique dans une cabine d'hélicoptère « habillée » est probablement moins problématique du fait de la présence de matériaux absorbants dans la cabine.

Enfin, une dernière série d'essais a été menée sur le plancher mécanique de tronçon VASCo en utilisant seulement l'antennerie et son masque acoustique. Des premières tendances sur la réponse de ce plancher à des excitations de type vibratoires et aérodynamiques ont pu ainsi être montrées. Toutefois, ces résultats doivent encore faire l'objet de complément de validation. Ainsi, une campagne d'essais complète doit encore être menée.

Pour conclure, la méthodologie mise en place, dans le cadre de cette thèse, pour la localisation de sources acoustiques basée sur l'antennerie acoustique, dans un environnement confiné, s'est montrée concluante lors des différentes phases d'essai. Elle semble donc adaptée à son utilisation future comme outil opérationnel de diagnostic en milieu réverbérant. De plus, elle possède plusieurs avantages cruciaux par rapport à l'holographie tels que la rapidité d'exécution, la robustesse par rapport aux erreurs de positionnement de l'antenne et de phase entre microphones.

Ainsi, dans un futur proche, une campagne d'essais complète sur le plancher mécanique du tronçon VASCo devra être menée en mettant en œuvre l'antennerie, l'intensimétrie acoustique et l'intensimétrie de structure. Cette campagne permettra de valider les options d'évolution choisies.

Du point de vue de l'antennerie, quelques solutions d'améliorations futures peuvent être proposées. Tout d'abord, il pourrait être intéressant de tester et éventuellement d'implémenter une technique de type SOAP afin, d'une part, d'améliorer les performances de l'antenne dans les basses fréquences et, d'autre part, de tester le système de double antenne qui présente plusieurs avantages (différenciation des ondes « avant » et des ondes « arrière », calcul de l'intensité acoustique possible grâce à la double antenne...). Cette solution pourrait permettre de s'affranchir du capotage (cf. annexe n°4) en introduisant un facteur correctif dans le traitement des données prenant en considération l'incidence de l'onde.

Une autre piste à développer serait de reconstruire le champ acoustique sur tout le volume entre l'antenne et la paroi source afin de détecter la position de tous les maxima et ainsi de différencier facilement les sources « parasites » des sources présentes sur la paroi étudiée mais ceci nécessite des ressources informatiques importantes.

De même, une solution envisagée pour l'antennerie se base sur l'utilisation de microphones de référence et de méthodes de cohérence partielle ou conditionnelle pour l'adapter au cas des sources partiellement cohérentes.

Ensuite, il ne faut pas oublier l'objectif final : incorporer les données obtenues en amplitude dans des codes de calculs numériques pour pouvoir prédire les niveaux sonores et la propagation des ondes dans l'habitacle. Cette possibilité est déjà implémentée dans le logiciel Imagerie mais l'algorithme de calculs doit encore être amélioré par l'utilisation notamment de méthodes inverses.

Pour l'holographie, l'étalonnage du filtre de Veronesi, défini lors de cette thèse, doit être affiné du point de vue fréquentiel mais aussi du point de vue des configurations de la grille de mesure. En effet, l'étalonnage du filtre se fait dans le cas d'un espacement entre capteurs de 4 cm, avec une géométrie expérimentale donnée et un seul type de sources. Celui-ci doit être redéfini et validé pour prendre en compte ces paramètres supplémentaires.

De même, afin d'améliorer l'exploitation de l'holographie telle que développée lors de cette thèse, il serait intéressant de pouvoir coder des méthodes récentes plus performantes telles que la « Patch Nearfield Acoustical Holography » [138-141]. Les algorithmes proposés dans cette méthode permettent d'atténuer l'influence des sources situées en dehors du domaine de reconstruction et ainsi d'améliorer les performances de l'holographie dans un milieu réverbérant.

De même, l'ajout d'un filtre supplémentaire, telle qu'une fenêtre de Tukey 50%, proposé par E.G. Williams [142], peut également améliorer l'efficacité de la méthode.

Au final, idéalement, aussi bien pour l'holographie et l'antennerie, la connaissance de la fonction de propagation dans le cas de la cabine d'hélicoptère serait un atout majeur pour l'exécution du traitement du signal.

Bibliographie.

- [1] Samokhin V.F., Rozdestvensky M.G. “*Noise certification of MI-8 helicopter family*”, 24th European Rotorcraft Forum, p.OP12.1 – OP12.8, Marseille (1998).
- [2] Edwards B., Cox C. “*Revolutionary concepts for helicopter noise reduction – SILENT program*”, NASA CR 2002 – 211650 (2002).
- [3] Bézard H. “*Optimisation numérique de profils de pale d’hélicoptère par des calculs aérodynamiques instationnaires*”, ONERA TP 1991-187 (1991).
- [4] Bézard H. “*Rotor blade airfoil design by numerical optimization and unsteady calculations*”, AHS forum, p.1283 – 1294, Washington (1992).
- [5] Hicks R.M., Collins R.J. “*An evaluation of three helicopter rotor sections*”, NASA TM 86719 (1985).
- [6] Recker O., Neuwerth G. “*Noise reduction of fenestrans using integrated Helmholtz resonators*”, 24th European Rotorcraft Forum, p.AC10.1 – AC10.12, Marseille (1998)
- [7] Noburu K. and al., “*A research program for helicopter noise reduction*”, American Helicopter Society Aerodynamics, Acoustics and Test and Evaluation technical specialists meeting, 50-1 – 50-10, San Francisco (2002).
- [8] Pike A.C., Leverton J.W. “*Understanding helicopter noise – implications on design and operation*”, 24th European Rotorcraft Forum, p. AC03.1 – AC03.12, Marseille (1998).
- [9] Cenedese F. and al. “*Prediction of the human response to acoustic and vibration features in a helicopter cabin by ANN’s*”, AHS Aerodynamics, Acoustics and Test and Evaluation, Acoustics p.3.1 – 3.8, San Francisco (2002).
- [10] Simon F., Pauzin S., Biron D. “*Conception et essai en vol d’un panneau d’habillage pour réduction par voie passive du bruit interne d’hélicoptère*”, RF 8/05639 DMAE (2001).
- [11] Simon F., Pauzin S., Biron D. “*Optimisation of sandwich trim panels for reducing helicopter internal noise*”, 30th European Rotorcraft Forum, p.280 – 288, Marseille (2004).
- [12] Eslami A., Hou G. “*Noise reduction for structural-acoustic interaction problems using design optimization*”, AIAA 2000, A00-31079, Lahaina (2000)
- [13] Simon F., Biron D. “*Active minimization of structural intensity applied to a sandwich composite panel*”, 12th International Congress on Sound and Vibration, Paper 177, Lisbonne (2005).

- [14] Petitjean B., Legrain I., Simon F., Pauzin S. “*Active control experiments for acoustic radiation reduction of a sandwich panel: feedback and feedforward investigations*”, Journal of Sound and Vibration (JSV) 252(1) p19-36 (2002).
- [15] Simon F., Biron D. “*Mise au point de techniques de contrôle actif acoustique par intensité de structure*”, RT2/08933 DMAE (Juin 2005)
- [16] O’Connell J. and al. “*Helicopter cabin noise reduction using active structural acoustic control*”, AHS Forum, Acoustics – Forum 57, Washington (2001).
- [17] Simon F. “*Contrôle actif appliqué à la réduction du bruit interne d’aéronefs*”, Mémoire de thèse de l’ENSAE (septembre 1997).
- [18] Bebesel M., Maier R., Hoffmann F. “*Reduction of interior noise by using active gearbox struts – Results of flight tests*”, 27th European Rotorcraft Forum, p.1.1 – 1.8, Moscou (2001).
- [19] Mathur G.P. and al. “*Smart foam lined trim panels for aircraft cabin noise control*”, AIAA 2000, A00-31009, Lahaina (2000).
- [20] Foller C.R. and al. “*Active-passive control of an aircraft interior boundary layer noise using smart foam*”, AIAA 2000, A00-31073, Lahaina (2000).
- [21] Caillet J. and al. “*Nearfield Acoustical Holography measurement inside a helicopter cabin*”, European Test & Telemetry Conference, p.ASA.1.1 – ASA.1.6, Marseille (2005).
- [22] Caillet J. “*Analyse et modélisation du bruit et des chemins de bruit dans les cabines d’hélicoptère en vue de leur contrôle*”, Thèse de doctorat de l’ENSAM (janvier 2006).
- [23] Dussac M. and al. “*A finite element method to predict internal noise levels at discrete frequencies for a partially composite helicopter fuselage*”, Proc. Of the American Helicopter Society Annual Forum, TP no. 1989-49, Boston (1989).
- [24] Fahy F.J. “*Measurements of acoustic intensity using the cross-spectral density of the two-microphones signals*”, Journal of the Acoustic Society of America 62 (4), p. 1057 – 1059 (1977).
- [25] Thompson J.K., Tree D.R. “*Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements*”, Journal of Sound and Vibration 75(2), p. 229 – 238 (1981).
- [26] Gade S. “*Sound intensity (theory)*”, Technical review Brüel & Kjaer n°3 (1982).
- [27] Pope J. “*Validity of sound power determination using sound intensity measurements*”, 2nd International Congress on Acoustic Intensity, p. 353 – 360, France (1985).
- [28] Gade S., Petersen E.C., Kjaergaard N. “*Sound power according to ISO 9614-2*”, Euro’noise 95, p. 951 – 956, Lyon (1995).
- [29] Vaquero M., Recuero M., Gil C., Sobreira M. “*A measurement method to analyse the railway vehicle noise*”, Inter-noise 93, Leuven (1993).
-

-
- [30] Elliot S.J. “*Errors in acoustic intensity measurements*”, Journal of Sound and Vibration 78(3), p. 439 – 445 (1981).
- [31] Jacobsen F., Bree H.E. “*Measurement of sound intensity: $p - u$ probes versus $p - p$ probes*”, NOVEM, Paper n°45, Saint Raphaël (2005).
- [32] Jacobsen F., Jaud V. “*Calibration of $p-u$ intensity probes*”, Euronoise 2006, p.CS39.250.1 – CS39.250.6, Tampere (2006).
- [33] Gade S. “*Validity of intensity measurements in partially diffuse sound fields*”, Technical review Brüel & Kjaer n°4 (1985).
- [34] Shibayama H., Yamada K., Aoki T. “*Detection of reflected waves in acoustic fields scattered from acoustic materials*”, Internoise 2004, Paper n°845, Prague (2004).
- [35] Williams E.G., Maynard J.D., Skudrzyk E.J. “*Sound source reconstruction using a microphone array*”, Journal of the Acoustic Society of America 68 (1), p.340 – 344 (1980).
- [36] Maynard J.D., Williams E.G., Lee Y. “*Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH*”, Journal of the Acoustic Society of America 78 (4), p. 1395 – 1413 (1985).
- [37] Pascal J.C., Loyau T. “*Etude du rayonnement acoustique de structures à partir d’une analyse intensimétrique en champ proche : simulation numérique du champ acoustique rayonné*”, Rapport CETIM n°102650 – 1 (1997).
- [38] Williams E.G., Dardy H.D., Washburn K.B. “*Generalized nearfield acoustical holography for cylindrical geometry: Theory and experiment*”, Journal of the Acoustic Society of America 81 (2), p. 389 – 407 (1986).
- [39] Williams E.G., Houston D.H., Bucaro J.A. “*Broadband nearfield acoustical holography for vibrating cylinders*”, Journal of the Acoustic Society of America 86 (2), p. 674 – 679 (1989).
- [40] Béguet B. “*Le point sur l’holographie acoustique*”, Acoustique et technique n°11 (1997).
- [41] Dumbacher S.M. and al. “*Practical aspects of making NAH measurements*”, Society of Automotive Engineers, vol. 108 (2) n°6, p. 3081 – 3090 (1999).
- [42] Hald J. “*Time domain acoustical holography and its application*”, Sound and Vibration magazine, vol. 35, n°2, p. 16 – 25 (2001).
- [43] Veronesi W.A., Maynard J.D. “*Nearfield Acoustic Holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation*”, Journal of the Acoustic Society of America 81 (5), p. 1307 – 1322 (1986).
- [44] Dumbacher S.M., Hallman D.L. “*Errors due to violations of assumptions in acoustic array techniques*”, 14th International Modal Analysis Conference vol.2, p. 1313 – 1321 (1996).
-

- [45] Nam K.-U., Kim Y.-H. “*Errors due to sensor and position mismatch in planar acoustic holography*”, Journal of the Acoustic Society of America 106 (4), p. 1655 – 1665 (1999).
- [46] Grätz P. “*Optimization of nearfield acoustical holography algorithm with K-space filter*”, www.feec.vutbr.cz/dokumenty.
- [47] Grätz P. “*Acoustical holography for visualization of sound fields*”, International Carpathian Control Conference (ICCC) 2002, Paper 51, Malenovice (2002).
- [48] Kim B.-K., Ih J.-G. “*Design of an optimal wave-vector filter for enhancing the resolution of reconstructed source field by nearfield acoustical holography*”, Journal of the Acoustic Society of America 107 (6), p. 3289 – 3297 (2000).
- [49] Ohshima S.I., Houjouch H. “*A study of utilizing a handy 2D microphone array for noise source localization based on the nearfield acoustic holography*”, Internoise 2000, Vol. 2, p.1182 – 1185, Nice (2000).
- [50] Vaucher de la Croix D., Chevret P., Perrin F. “*Use of acoustical holography in 3D interiors measurements*”, Internoise 2002, Dearborn (2002).
- [51] Escuder E., Ramis J., Alba J. “*Analysis of the acoustic behaviour of different materials with nearfield acoustic holography*”, 12th International Congress on Sound and Vibration, Paper 814, Lisbonne (2005).
- [52] Photiadis D.M. “*The relationship of singular value decomposition to wave-vector filtering in sound radiation problems*”, Journal of the Acoustical Society of America 88 (2), p.1152 – 1159 (1990).
- [53] Saijyou K., Yoshikawa S. “*Reduction methods of the reconstruction error for large-scale implementation of nearfield acoustical holography*”, Journal of the Acoustical Society of America 110 (4), p. 2007 – 2023 (2001).
- [54] Charbit M. “*Filtre de Wiener*”, Support de cours de l’ Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (2002).
- [55] Nelson P.A., Yoon S.H. “*Estimation of acoustic source strength by inverse methods: Part i, conditioning of the inverse problem*”, Journal of Sound and Vibration 233 (4), p. 643 – 668 (2000).
- [56] Nelson P.A., Yoon S.H. “*Estimation of acoustic source strength by inverse methods: Part ii, experimental investigation of methods for choosing regularization parameters*”, Journal of Sound and Vibration 233 (4), p. 669 – 705 (2000).
- [57] Williams E.G. “*Regularization methods for nearfield acoustical holography*”, Journal of the Acoustical Society of America 110 (4), p. 1976 – 1988 (2001).
- [58] Seghouani N., Nouals C. “*Regularization methods applied to acoustic holography*”, International Conference on Theoretical & Computational Acoustic, p.257 – 270, Mystic (1993).
-

-
- [59] Scholte R., Roozen B., Lopez I. “*On spatial sampling and aliasing in acoustic imaging*”, 12th International Congress on Sound and Vibration, Paper 404, Lisbonne (2005).
- [60] Hald J. “*STSF – a unique technique for scan-based nearfield acoustic holography without restriction on coherence*”, Technical Review Brüel & Kjaer n°1 (1989).
- [61] Hald J., Ginn K.B. “*STSF – practical instrumentation and applications*”, Technical Review Brüel & Kjaer n°2 (1989).
- [62] Hald J. “*Use of references for inclusion and exclusion of partial sound sources with the STSF technique*”, 2nd international congress on recent developments in air- and structure-borne sound and vibration, Auburn university (1992).
- [63] Hald J. “*Use of Spatial Transformation of Sound Fields (STSF) techniques in the Automotive industry*”, Technical Review Brüel & Kjaer n°1 (1995).
- [64] El-Khoury Z. “*Holographie acoustique*”, Rapport de DEA de l’ENSICA (1990).
- [65] Soulié J.M. “*Validation de l’holographie acoustique en champ proche pour la caractérisation du champ acoustique et localisation des sources et des puits*”, Rapport de DEA de l’ENSICA (1991).
- [66] Jacquin T., Rupy S. “*Holographie acoustique en champ proche*”, Rapport de Projet de Fin d’Etudes de l’ENSICA (1992).
- [67] Jacobsen F., Liu Y. “*Near field acoustic holography based on an array of particle velocity sensors*”, Inter-noise 2005, Paper NT07, Rio de Janeiro (2005).
- [68] Jacobsen F., Liu Y. “*Near field acoustic holography with particle velocity transducers*”, Journal of the Acoustical Society of America 118 (5), p. 3139 – 3144 (2005).
- [69] Pascal J.-C., Loyau T., Gaillard P. “*Broad-band Acoustic Holography reconstruction from Acoustic Intensity Measurements. I: principle of the method*”, Journal of the Acoustical Society of America 84(5), p. 1744 – 1750 (1988).
- [70] Pascal J.-C. “*Etude du rayonnement acoustique par intensimétrie : rapport de synthèse finale*”, Rapport CETIM n°110400 – 3 (1989).
- [71] Pascal J.-C., Li J.-F. “*L’holographie acoustique: un outil pour le contrôle et le diagnostic des machines et équipements industriels*”, 2nd International Conference on Acoustical and vibratory surveillance methods and diagnostic techniques, Senlis (1995).
- [72] Mitjavila A. “*Intensité de structure sur des plaques: développement et limites d’une sonde de mesure*”, Thèse de Doctorat de l’ENSAE, Toulouse (mars 1993).
- [73] Steiner R., Hald J. “*Nearfield acoustical holography without the errors and limitations caused by the use of spatial DFT*”, International Journal of Acoustics and Vibration 6 (2), p. 843 – 850 (2001).
- [74] Hald J. “*SONAH*”, Technical Review n°1 (2005).
-

- [75] Cho Y. T., Bolton J.S., Hald J. “*Source visualization by using statistically optimized nearfield acoustical holography in cylindrical coordinates*”, Journal of the Acoustical Society of America 118 (4), p. 2355 – 2364 (2005).
- [76] Gade S., Dirks G., Hald J. “*The use of Nearfield Acoustical Holography for leak detection objects, such as hearing aids*”, Internoise 2005, Paper NT12, Rio (2005).
- [77] Maynard J.D., Veronesi W.A. “*Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces*”, Journal of the Acoustical Society of America 85 (2), p.588 – 598 (1988).
- [78] Bai M.R. “*Application of BEM (boundary element method)-based acoustic holography to radiation analysis of sound sources with arbitrarily shaped geometries*”, Journal of the Acoustical Society of America 92 (1), p. 533 – 549 (1992).
- [79] Kim B.-K., Ih J.-G. “*On the reconstruction of the vibro-acoustic field over the surface enclosing an interior space using the boundary element method*”, Journal of the Acoustical Society of America 100 (5), p. 3003 – 3016 (1996).
- [80] Kang S.-C., Ih J.-G. “*The use of partially measured source data in near-field acoustical holography based on BEM*”, Journal of the Acoustical Society of America 107 (5), p. 2472 – 2479 (2000).
- [81] Kang S.-C., Ih J.-G. “*Use of non-singular boundary integral formulation for reducing errors due to near-field measurements in the boundary element method based near-field acoustic holography*”, Journal of the Acoustical Society of America 109 (4), p. 1320 – 1328 (2001).
- [82] Schumacher A.P., Hansen P.C. “*Sound source reconstruction using Inverse BEM*”, Internoise 2001, Paper 541, Session C8-1, La Hague (2001).
- [83] Williams E.G. and al. “*Interior nearfield acoustical holography in flight*”, Journal of the Acoustical Society of America 108 (4), p. 1451 – 1463 (2000).
- [84] Raveendra S.T., Sureshkumar S., Williams E.G. “*Noise source identification in an aircraft using Nearfield Acoustical Holography*”, 6th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit 2000, A00 – 31098, Lahaina (2000).
- [85] Kim S.-M., Kim Y.-H. “*Structural acoustic coupling in a partially opened plate-cavity system: experimental observation by using nearfield acoustic holography*”, Journal of the Acoustical Society of America 109 (1), p. 65 – 74 (2001).
- [86] Villot M., Chavériat G., Roland J. “*Phonoscopy: an acoustical holography technique for plane structures radiating in enclosed spaces*”, Journal of the Acoustical Society of America 91 (1), p. 187 – 195 (1992).
- [87] Dumbacher S.M., Brown D.L. “*Source imaging using acoustic inverse FRF array technique*”, 14th International Modal Analysis Conference, p.1322 – 1330, Dearborn (1996).
-

-
- [88] Nelson P.A., Yoon S.H. “*Estimation of acoustic source strength by inverse methods: Part I: conditioning of the inverse problem*”, Journal of Sound and Vibration 233 (4), p. 643 – 668 (2000).
- [89] Jeon I.-Y., Ih J.-G., Kim J., Kang Y.-J. “*Noise source identification using the Inverse Frequency Response Function*”, 17th International Congress on Acoustics, Rome (2001).
- [90] Jeon I.-Y., Ih J.-G., Kim B.-H., Park B.-H. “*Noise source ranking in an automotive vehicle using the Inverse FRF method*”, 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Paper n°673, Seogwipo (2003).
- [91] Julliard E. “*Modélisation du champ acoustique interne d’une cabine d’hélicoptère*”, Rapport de DEA/PFE de l’Université de Technologie de Compiègne (2003).
- [92] Simon F., Piet J.F., Julliard E. “*Détection de sources acoustiques par antenne focalisée : application au milieu réverbérant*”, RT 1/07797 DMAE (2004).
- [93] Elias G., Malmarmey C. “*Utilisation d’antennes focalisées pour la localisation des sources acoustiques*”, 11^{ème} Congrès International d’Acoustique, p.163 – 166, Paris (1983).
- [94] Bertrand P., Brenot D. “*Traitement d’antenne acoustique focalisée appliqué aux sources acoustiques étendues*”, 11^{ème} Colloque d’Acoustique Aéronautique et Navale, p.160 – 173, Saint Louis (1988).
- [95] Elias G. “*Localisation par antenne focalisée des sources de bruit en vue de leur réduction*”, Entretiens « Science et Défense » (1990).
- [96] Fournier G., Alais P., Elias G. “*Noise measurements with phased or delayed focused arrays*”, International Noise and Vibration Control Conference, Paper n°57, Saint Petersburg (1993).
- [97] Elias G. “*Source localization with a two-dimensional focused array : optimal signal processing for a cross-shaped array*”, Internoise 95, p.1175 – 1178, Newport Beach (1995).
- [98] Piet J.F., Elias G. “*Airframe noise source localization using a microphone array*”, 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, A97 – 26698, Atlanta (1997).
- [99] Boone M.M., Kinneging N., Van den Dool T. “*Two-dimensional noise imaging with a T-shaped cross array*”, Journal of the Acoustical Society of America 108 (6), p. 2884 – 2890 (2000).
- [100] Christensen J.J., Hald J. “*Beamforming*”, Technical Review n°1 (2004).
- [101] Haddad K., Volle O., Schevin O. “*Adaptation d’un système de détection et de localisations des sources aéroacoustiques par mesures hors flux pour une utilisation dans la soufflerie du GIE S2A*”, Congrès de la Société des Ingénieurs Automobile : Confort Automobile et Ferroviaire, www.acb-engineering.fr/pub/Article_GIE_ACB_SIA2004.pdf (2004).
-

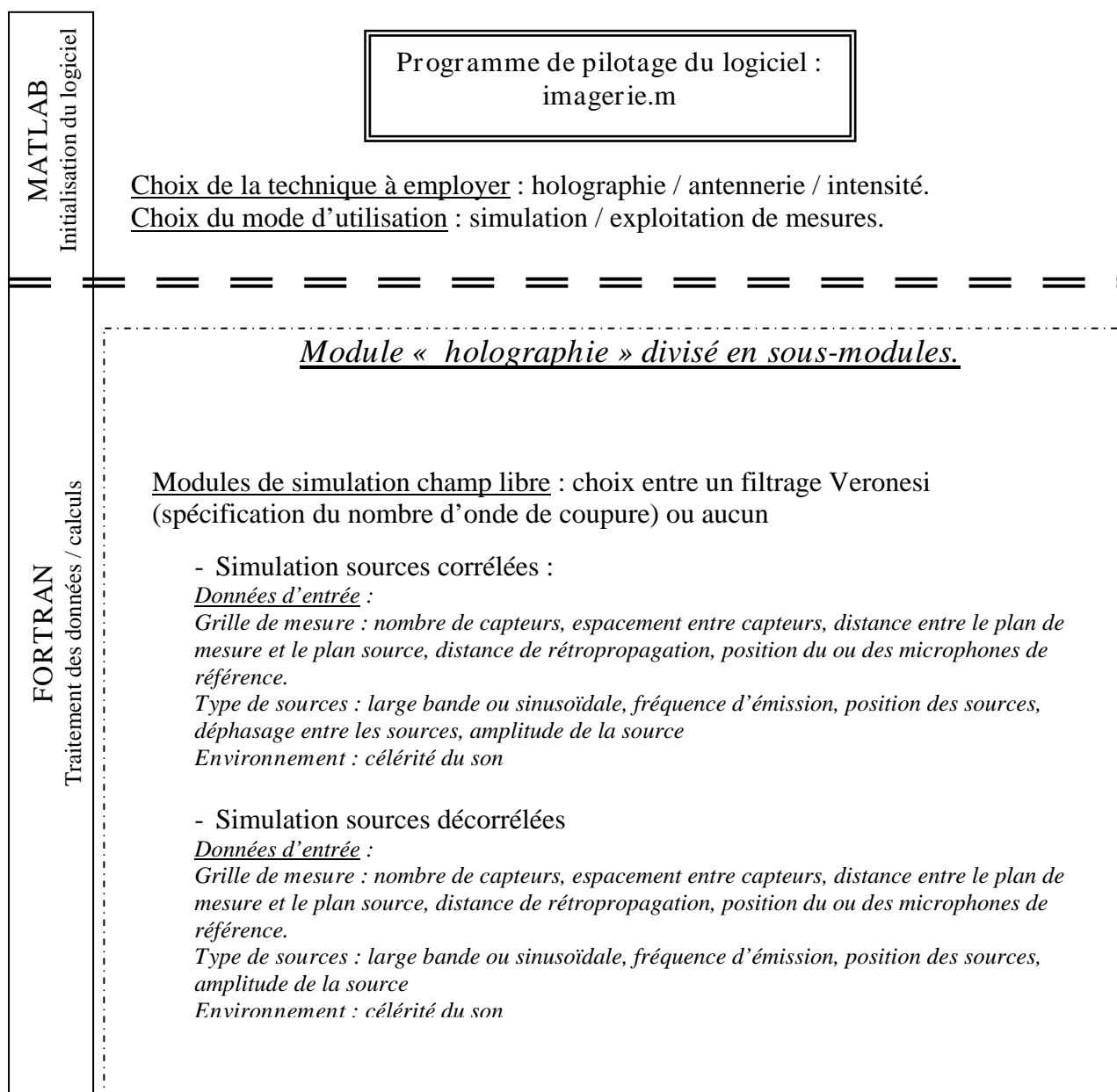
-
- [102] Hald J. “*Array designs optimized for both low-frequency NAH and high-frequency beamforming*”, Internoise 2004, Paper n°425, Prague (2004).
- [103] Jaeger S.M. and al. “*Microphone array assessment of an isolated, 26%-scale, high-fidelity landing gear*”, AIAA 2002, AIAA 2002 – 2410, Monterrey (2002).
- [104] Schulze C., Sarradj E., Zeibig A. “*Characteristics of microphone arrays*”, Internoise 2004, Paper n°524, Prague (2004).
- [105] Backman J. “*Microphone array beam forming for multichannel recording*”, 114th convention of the Audio Engineering Society, Paper n°5721, Amsterdam (2003).
- [106] Döbler D., Heilmann G. “*Perspectives of the acoustic camera*”, Internoise 2005, Paper NT09, Rio (2005).
- [107] Bondant L., Malbéqui P. “*Localisation de sources acoustiques complexes par antenne focalisée à l’aide d’un modèle à deux sources*”, 14^{ème} colloque GRETSI sur le traitement du Signal et des Images, TAP – 94-109, Juan-les-Pins (1993).
- [108] Elias G. “*Cours interne ONERA – DSNA : les Antennes*” (1991).
- [109] Piet J.F., Elias G. “*Modélisation du champ acoustique incident sur la coiffe d’Ariane 5 par des sources simples*”, Colloque CNES/ONERA « ambiance acoustique et vibratoire des systèmes de transport spatial », TAP – 94-062, Jouy-en-Josas (1994).
- [110] Blacodon D., Elias G., Prieur J., Papillier D. “*Noise source localization on a Dauphin helicopter in flight*”, Journal of the American Helicopter Society vol.49 n°4, p. 425 – 435 (2003).
- [111] Julliard E., Simon F., Pailhas G., Biron D. “*Métriologie acoustique pour la détection de sources / chemins de bruit sur parois internes de cabine d’hélicoptère*”, RT 3/09657 DMAE (2006).
- [112] Oerlemans S., Sijtsma P. “*Determination of absolute levels from phased array measurements using spatial source coherence*”, AIAA 2002, AIAA 2002 – 2464, Monterey (2002).
- [113] Elias G. “*Reconstitution du spectre des sources sonores d’un avion en survol : aspect théorique*”, RT 2/6187 DSNA (1998).
- [114] Elias G. “*RAIN : Acoustic source amplitude on aircraft*”, RT 20/6189 DSNA (1999).
- [115] Blacodon D., Elias G. “*Level estimation of extended acoustic sources using an array of microphones*”, 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit, AIAA 2003 – 3199, Hilton Head (2003).
- [116] Elias G. “*Méthode du périodigramme pour l’estimation de la densité spectrale de puissance d’un bruit, détection et estimation d’une sinusoïde en présence de bruit*”, RT 1/06959 DSNA (2002).
-

-
- [117] Hald J. “*Estimation of partial area sound power data with beamforming*”, Internoise 2005, Paper NT02, Rio (2005).
- [118] Matsunaga T. and al. “*Estimation of arrival direction by expansion errors of phase difference among the receiver signals*”, 12th International Congress on Sound and Vibration, Paper 300, Lisbonne (2005).
- [119] Quaranta V., Lece L., D’Altrui G. “*Sound source localization and tracking: theory and applications*”, Internoise 2004, Paper n°804, Prague (2004).
- [120] Chen J.C., Yao K., Hudson R.E. “*Source localization and beamforming*”, IEEE Signal processing magazine, p30 – 39 (2002).
- [121] Saradj E., Schulze C. “*Practical application of orthogonal beamforming*”, Euronoise 2006, SS05-208, Tampere (2006).
- [122] Jan E.E., Flanagan J. “*Sound source localization in reverberant environments using an outlier elimination algorithm*”, 4th International Conference on Spoken Language Processing, p. 1321 – 1324, Philadelphia (1996).
- [123] Sijtsma P., Holthusen H. “*Corrections for mirror sources in phased array processing techniques*”, 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics & Exhibit, AIAA 2003 – 3196, Hilton Head (2003).
- [124] Guidati S., Brauer C., Wagner S. “*The reflection canceller – phased array measurements in a reverberating environment*”, AIAA 2002, AIAA2002 – 2462, Monterrey (2002).
- [125] Noël C., Planeau V., Habault D. “*A new temporal method for the identification of source directions in a reverberant hall*”, Journal of Sound and Vibration 296, p.518 – 538 (2006).
- [126] Pascal J.-C., Li J.-F. “*Use of a double layer beamforming antenna to identify and locate noise sources in cabins*”, Euronoise 2006, SS05-385, Tampere (2006).
- [127] Haddad K., Benoît V. “*Capabilities of a beamforming technique for acoustic measurements inside a moving car*”, Internoise 2002, Paper n°271, Dearborn (2002).
- [128] Simon F., Pauzin S., Biron D. “*Intensimétrie de structure sur tronçon VASCo*”, RT 5630/03 DMAE (1999).
- [129] Auger T. “*Modélisation et simulation numérique de la focalisation d’ondes de choc acoustiques en milieu en mouvement. Application à la focalisation du bang sonique en accélération*”, Thèse de Doctorat de l’Université Paris VI, Paris (2001).
- [130] Julliard E., Simon F., Pauzin S., Biron D. “*Acoustic sources’ localization in presence of reverberation*”, Noise Con’ 2005, Paper n°14, Minneapolis (2005).
- [131] Bertrand P. “*Localisation sélective de sources acoustiques*”, 1^{er} Congrès Français d’Acoustique, TAP – 90-029, Lyon (1990).
-

- [132] Ballet M. “*Caractéristiques acoustiques intrinsèques de la cabine d’hélicoptère NH90*”, Rapport 448.092/92 (1991).
- [133] Julliard E., Simon F., Pauzin S., Biron D. “*Acoustic localization into a generic helicopter cabin*”, Euronoise 2006, SS05-088, Tampere (2006).
- [134] Simon F., Julliard E. “*Méetrologie acoustique pour identification de sources/chemins de bruit sur parois internes de cabine hélicoptère*”, RIA 2/09657 DMAE (2005).
- [135] Simon F. “*Contrôle de bruit en cabine*”, ONERA RF 5300 31 DMAE (1999).
- [136] Simon F., Biron D. “*Contrôle actif vibroacoustique sur un panneau d’habillage optimisé passivement : optimisation passive*”, RT 3/09412 DDSS/DMAE (2005).
- [137] Simon F., Biron D., Nennig B. “*Contrôle actif basé sur l’intensimétrie de structure : application plancher mécanique hélicoptère*”, RT 2/11079 DMAE (2006).
- [138] Williams E.G., Houston B.H., Herdic P.C. “*Fast Fourier transform and singular value decomposition formulations for patch nearfield acoustical holography*”, Journal of the Acoustical Society of America 114 (3), p.1322 – 1333 (2003).
- [139] Hald J. “*Patch near-field acoustical holography using a new statistically optimal method*”, Technical review n°1 Brüel et Kjaer, p.40 – 50 (2005).
- [140] Saijyou K., Uchida H. “*Data extrapolation method for boundary element method based near-field acoustical holography*”, Journal of Acoustical Society of America 115 (2), p.785 – 796 (2004).
- [141] Saijyou K. “*Regularization method for the application of K-space data extrapolation to near-field acoustical holography*”, Journal of the Acoustical Society of America 116 (1), p. 396 – 404 (2004).
- [142] Williams E.G. “*Fourier Acoustics: Sound radiation and Nearfield Acoustical Holography*”, Elsevier Academic Press (1999).

Annexe n° 1: Architecture globale du logiciel développé.

La figure suivante (fig. n°1) résume la structure du logiciel créé lors de cette thèse. Cet outil permet de réaliser à la fois des simulations (champ libre / panneaux réverbérants, sources corrélées ou non,...) et des exploitations de données acquises par le boîtier d'acquisition, pour les trois techniques sélectionnées : antennerie, holographie à références multiples et intensimétrie.



Modules de simulation avec plan(s) réfléchissant(s) : filtrage Veronesi (spécification du nombre d'onde de coupure)

- Simulation sources corrélées :

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Type de sources : large bande ou sinusoïdale, fréquence d'émission, position des sources, déphasage entre les sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son, position du plan réfléchissant

- Simulation sources décorrélées

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Type de sources : large bande ou sinusoïdale, fréquence d'émission, position des sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son, position du plan réfléchissant

Modules d'exploitation des mesures : choix entre un filtrage Veronesi (spécification du nombre d'onde de coupure) ou aucun

Données d'entrée :

Résultats de mesure : Import des interspectres entre le microphone de référence et les microphones de la grille (fichier.txt), import des interspectres des microphones de référence (fichier.txt), fréquence d'échantillonnage, taille des blocs FFT.

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Environnement : célérité du son.

SORTIES HOLOGRAPHIE :

Simulation : Positions capteurs et des sources, fréquences étudiées, champ de pression à toutes les fréquences.

Mesures : Positions capteurs, champ de pression à toutes les fréquences, paramètres de l'essai.

Module « antennerie » divisé en sous-modules.

Modules de simulation champ libre : choix entre le traitement antenne classique ou traitement antenne Elias et choix de la reconstruction de l'amplitude de la source ou non.

- Simulation sources corrélées :

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de focalisation, position du ou des microphones de référence.

Type de sources : large bande ou sinusoïdale, fréquence d'émission, position des sources, déphasage entre les sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son

Apodisation : rectangulaire, Hanning, Hamming, Blackman

- Simulation sources décorréées

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Type de sources : large bande ou sinusoidale, fréquence d'émission, position des sources, amplitude de la source

Modules de simulation avec plan(s) réfléchissant(s) : choix entre le traitement antenne classique ou traitement antenne Elias.

- Simulation sources corrélées :

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de focalisation, position du ou des microphones de référence.

Type de sources : large bande ou sinusoidale, fréquence d'émission, position des sources, déphasage entre les sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son, position plan réfléchissant

Apodisation : rectangulaire, Hanning, Hamming, Blackman

- Simulation sources décorréées

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Type de sources : large bande ou sinusoidale, fréquence d'émission, position des sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son, position du plan réfléchissant

Apodisation : rectangulaire, Hanning, Hamming, Blackman

Modules d'exploitation des mesures : Choix de reconstruire ou non l'amplitude.

- Exploitation classique sans microphone de référence :

Données d'entrée :

Résultats de mesure : Import des signaux temporels (fichier.txt), fréquence d'échantillonnage, taille des blocs FFT.

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Environnement : célérité du son.

Apodisation : rectangulaire, Hanning, Hamming, Blackman

- Exploitation classique avec microphone de référence (dans le cas où on serait au-delà des limites du nombre de voies) :

Données d'entrée :

Résultats de mesure : Import des interspectres entre le microphone de référence et les microphones de l'antenne (fichier.txt), fréquence d'échantillonnage, taille des blocs FFT.

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Environnement : célérité du son.

Apodisation : rectangulaire, Hanning, Hamming, Blackman

- Exploitation de l'antennerie via la méthode en 2 étapes (exploitation classique + utilisation de microphones de référence dans un second temps) :

Données d'entrée :

Résultats de mesure : Import des interspectres entre le microphone de référence et les microphones de l'antenne (fichier.txt), fréquence d'échantillonnage, taille des blocs FFT.

Grille de mesure : nombre de capteurs, espacement entre capteurs, distance entre le plan de mesure et le plan source, distance de rétropropagation, position du ou des microphones de référence.

Environnement : célérité du son.

Apodisation : rectangulaire, Hanning, Hamming, Blackman

SORTIES ANTENNERIE :

Simulation : Positions capteurs et des sources, fréquences étudiées, réponse de l'antenne à toutes les fréquences et amplitude (optionnel), paramètres de l'essai.

Mesures : Positions capteurs, réponse de l'antenne et amplitude (optionnel) à toutes les fréquences, paramètres de l'essai.

Module « intensimétrie » divisé en sous-modules.

Modules de simulation champ libre : choix entre construction d'un champ d'intensité 2 dimensions ou 3 dimensions :

Données d'entrée :

Grille de mesure : nombre de points de mesures, écartement entre les capteurs de la sonde, espacement entre les points de mesure, distance entre le plan de mesure et le plan source.

Type de sources : large bande ou sinusoïdale, fréquence d'émission, position des sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son

Module d'exploitation des mesures : choix entre construction d'un champ d'intensité 2 dimensions ou 3 dimensions :

Données d'entrée :

Résultats de mesure : Import des interspectres entre le microphone de référence et les microphones de l'antenne (fichier.txt), fréquence d'échantillonnage, taille des blocs FFT.

Grille de mesure : nombre de points de mesures, écartement entre les capteurs de la sonde, espacement entre les points de mesure, distance entre le plan de mesure et le plan source.

Type de sources : large bande ou sinusoïdale, fréquence d'émission, position des sources, amplitude de la source

Environnement : célérité du son

SORTIES INTENSIMETRIE :

Simulation : Positions capteurs et des sources, fréquences étudiées, coordonnées des vecteurs intensité

Mesures : Positions capteurs, coordonnées des vecteurs intensité, paramètres de l'essai.

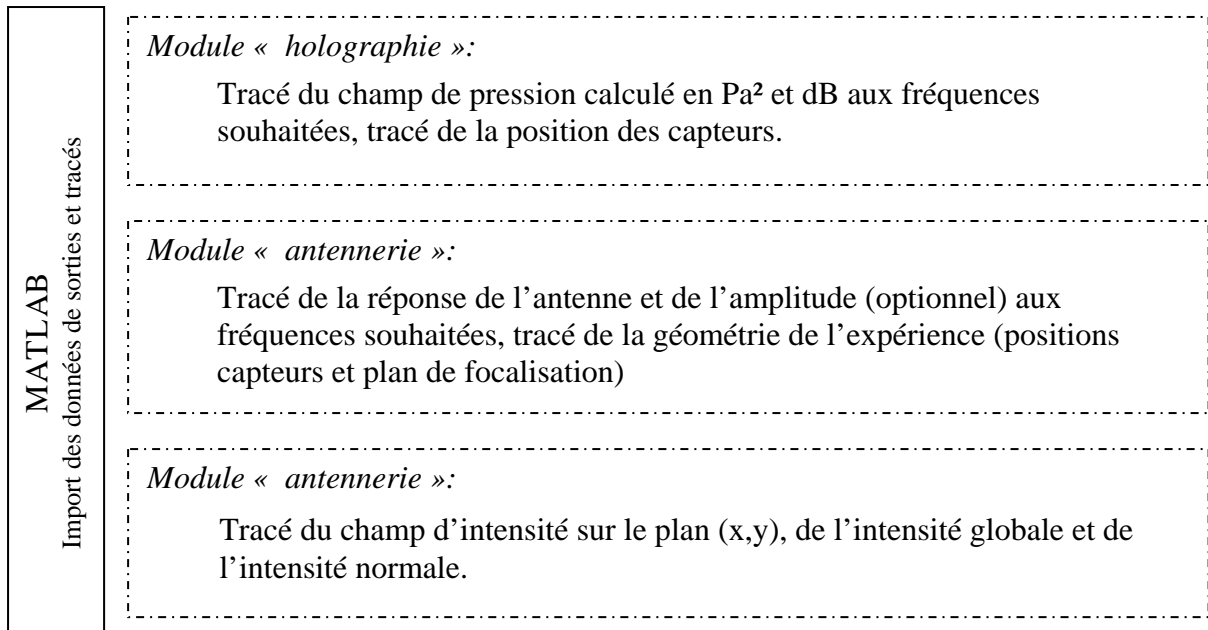


Fig. n°1 : Architecture du programme créé pour la simulation et l'exploitation des données expérimentales.

Annexe n°2 : Les microphones Sennheiser.

1) Les besoins.

Pour réaliser les outils de mesure, les microphones devaient satisfaire le cahier des charges suivant :

- une dynamique de mesure permettant de mesurer des niveaux autour de 120 - 130dB.
- une réponse en fréquence constante jusqu'à 5000 Hz (écart inférieur à 2dB).
- des écarts de phase relatifs entre micros inférieurs à 10°.
- un prix raisonnable.

Suite à une étude des caractéristiques des microphones de type électret de différents fournisseurs (Sennheiser, SPKL, Panasonic, LEM industrie, GENTEX), le modèle KE 4-211-2 (réf. 2280) produit par Sennheiser a été choisi car il présentait toutes les spécificités voulues.

Etant doté d'un boîtier d'acquisition BBM 16 voies, 16 microphones de type électret compatibles avec le système d'acquisition BBM sont sélectionnés.

2) Les tests de validation.

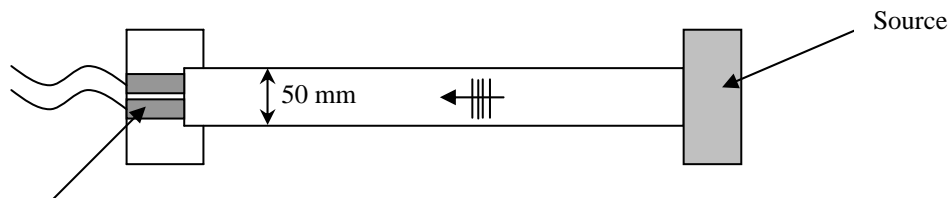
Avant de mener les premières expérimentations, un ensemble de tests a été réalisé afin de les caractériser.

En effet, il a été ainsi nécessaire de :

- S'assurer que les phases relatives étaient conformes à nos exigences. Pour cela, les microphones ont été testés dans un tube à impédance afin de connaître l'écart de phase relatif existant entre les micros.
- Tester différents montages pour optimiser le gain en sortie afin d'augmenter le rapport signal/bruit mais en réduisant le niveau maximum mesurable en contrepartie.
- Tester la réponse en fréquence du micro par rapport à un microphone à capacité de référence B&K.
- Tester l'évolution de la réponse du capteur en fonction de la température du boîtier d'acquisition BBM.

a) L'écart de phase relatif entre les microphones.

Pour s'assurer que les phases relatives des micros respectent nos critères de validité, un tube à impédance est utilisé. Les seize microphones sont placés successivement au fond du tube rigide, à côté d'un microphone Sennheiser de référence dans le même plan de phase (perpendiculaire au tube). Le tube à impédance utilisé, de diamètre 50mm, engendre des ondes planes jusqu'à 5500 Hz. Le principe de cette expérience peut se résumer par ce schéma :



2 microphones testés Principe de l'expérience en tube à impédance

On obtient alors des résultats comme celui de la figure n°1.

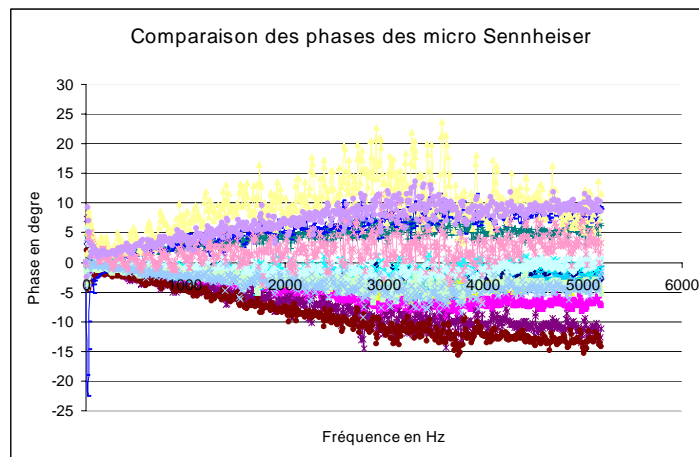


Fig. n°1 : Phase relative des microphones par rapport à un des microphones pris en référence

Souhaitant un écart de phase relatif moyen existant entre les microphones inférieur ou égal à 10° à 5000 Hz, deux microphones Sennheiser ont été écartés car leurs performances ne répondaient pas aux critères de validité (courbe jaune clair et rouge bordeaux de la figure n°1)

b) Réponse en fréquence du microphone.

Afin de vérifier la réponse en fréquence d'un microphone Sennheiser, dans une chambre anéchoïque, un microphone à capacité de référence B&K 4190 et un microphone Sennheiser sont placés en face d'une source émettant un bruit blanc jusqu'à 12800 Hz, tout en minimisant les risques liés à la diffraction. Le module de la fonction de transfert entre les deux microphones est présenté sur la figure n°2.

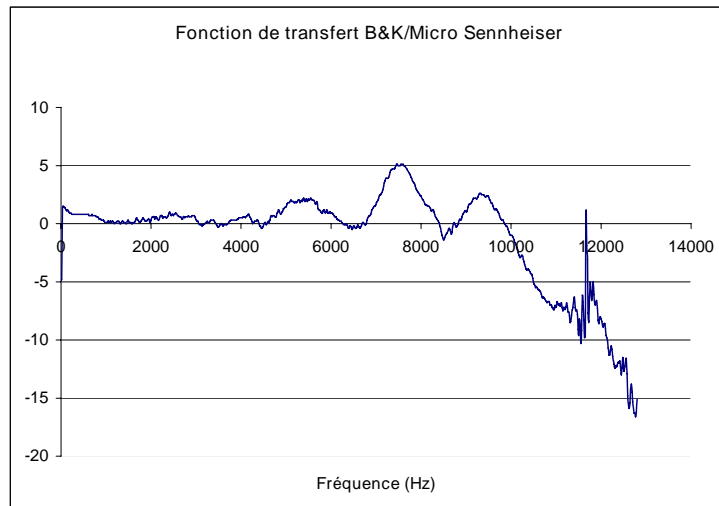


Fig. n°2 : Module de la fonction de transfert entre un microphone à capacité de référence B&K et le microphone Sennheiser étudié. Excitation par une source de type bruit blanc jusqu'à 12 800 Hz

Ainsi, dans la gamme fréquentielle d'étude (1000 – 5000 Hz), la fonction de transfert a un module proche de 0 dB ce qui signifie que les deux microphones ont des réponses quasi identiques et donc, à fortiori, que le microphone Sennheiser possède une courbe de réponse satisfaisante dans cette gamme de fréquence. Plus globalement, ce microphone a une réponse avec un écart d'amplitude inférieur de 2dB jusqu'à une fréquence de 7500 Hz (cf. fig. n°2).

Par ailleurs, la dynamique des microphones satisfait les niveaux potentiels à mesurer (60 – 120dB).

c) L'effet de la montée en température de l'appareillage BBM sur la réponse des microphones.

Enfin, il est nécessaire de s'assurer que l'échauffement naturel du boîtier d'acquisition BBM n'influe pas sur la réponse des microphones. Pour se faire, une série de mesures a été réalisée avec deux microphones Sennheiser devant une source émettant un bruit blanc jusqu'à 6400 Hz. La mesure est effectuée à chaque fois que la température du boîtier d'acquisition BBM, mesurée par un capteur interne au boîtier, augmente de 2 degrés (variation de 41°C à 55°C). Sur la figure n°4, la courbe pour trois températures (41, 47 et 55°C) est tracée pour les deux microphones testés.

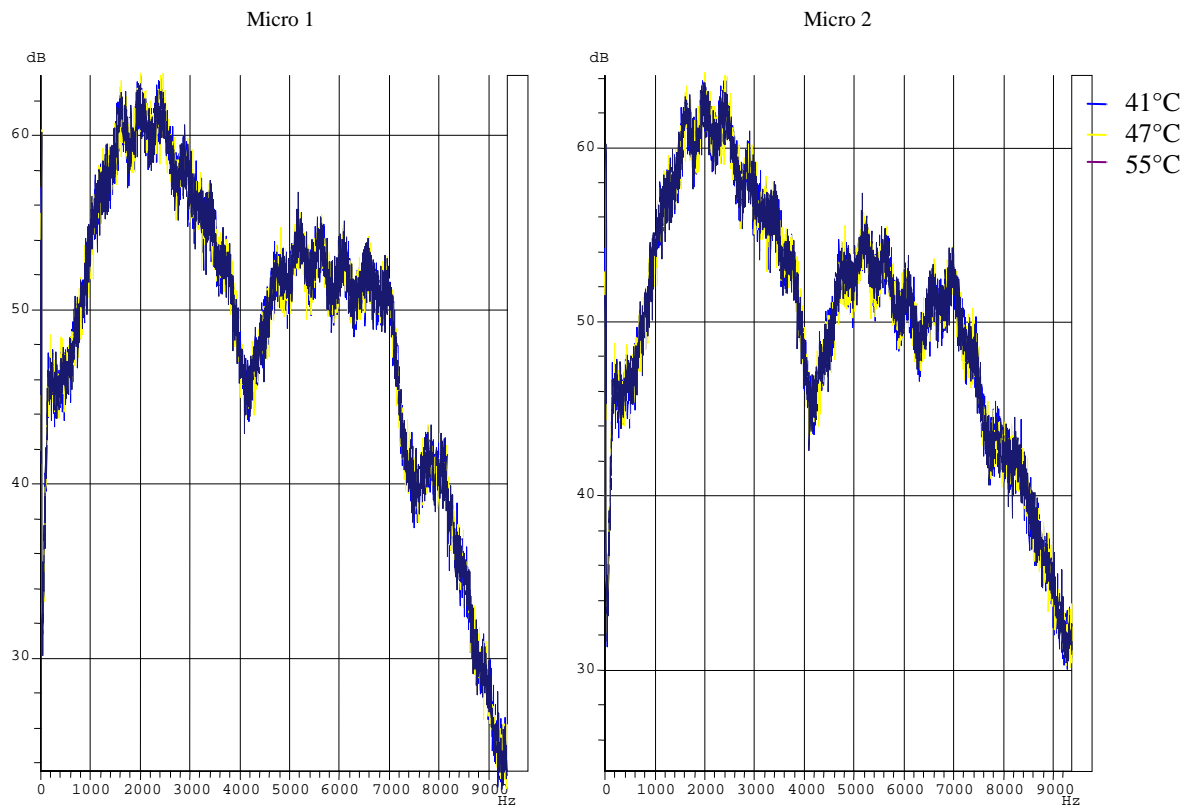


Fig. n°4 : Réponses en fréquence de deux microphones Sennheiser pour les températures 41°C, 47°C et 55°C

Il apparaît que les deux microphones ont une réponse qui n'évolue pas en fonction de la température (écart maximum entre les différentes courbes de 1 dB). L'échauffement du boîtier d'acquisition BBM n'engendre donc aucune modification sur les caractéristiques du microphone dans la plage de température testée.

e) Conclusion.

A la vue de la série d'essais effectués, le microphone de type électret Sennheiser KE 4-211-2 convient pour la chaîne de mesure. Il est un bon compromis entre les exigences souhaitées : en phase, en réponse fréquentielle et en prix.

Annexe n°3 : Validation des outils d'exploitation des données sur un cas simple.

Afin de vérifier le bon fonctionnement des outils développés, une phase de tests simples a été mise en œuvre. Seules quelques mesures réalisées sont présentées dans cette annexe afin d'alléger le mémoire.

Dans un premier temps, le cas de l'holographie est étudié.

Dans la chambre anéchoïque, une source émettant un bruit blanc est placée dans le plan d'étude en (0,02;-0,01;0).

La grille de microphones utilisée pour l'holographie se compose de 8x8 points. Une ligne de 8 microphones est utilisée pour reconstruire la totalité de la surface. Elle est positionnée à 8cm du plan source. Les microphones sont espacés de 4cm. Le microphone de référence est placé à 2 cm de la source.

Les croix blanches sur la figure n°1 représentent l'emplacement exact de la source.

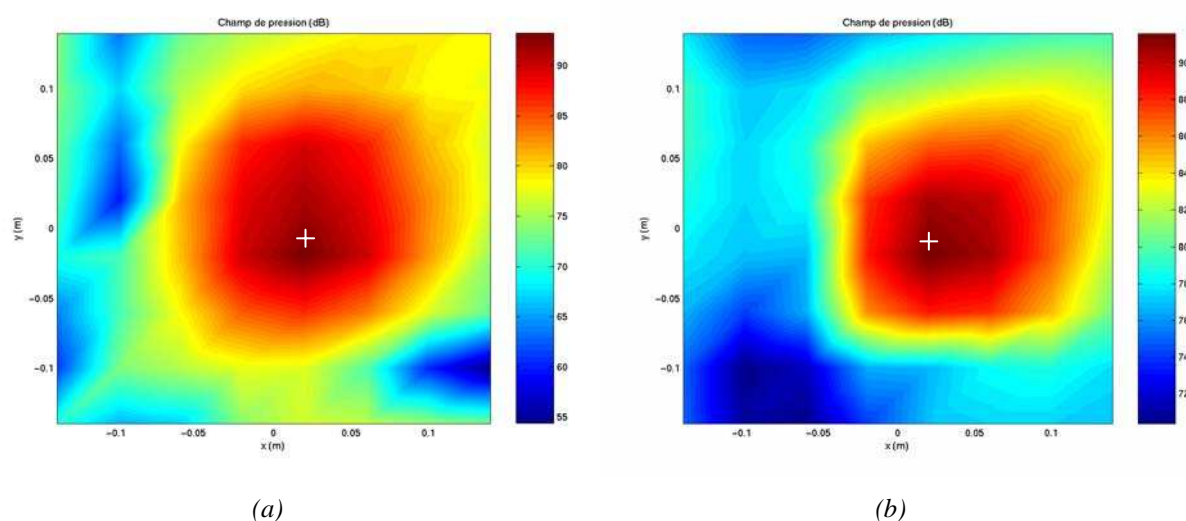


Fig n°1 : Champ de pression reconstruit (dB) à une fréquence $f = 2000\text{Hz}$ (a) pour une mesure en chambre sourde, (b) pour une simulation avec les mêmes caractéristiques.

Un niveau de pression de 93dB est relevé sur le microphone de référence à 2000Hz. Or, les niveaux de pression reconstruits sur le point source par le biais des mesures et de la simulation sont respectivement de 92dB et 94dB (cf. fig. n°1).

Dans un second temps, le cas de l'antennerie est examiné.

L'antenne en croix utilisée se compose de deux bras comportant chacun 8 microphones espacés de 4cm. Elle est placée à 40cm de la source.

Le premier cas présenté est identique à celui réalisé pour l'holographie.

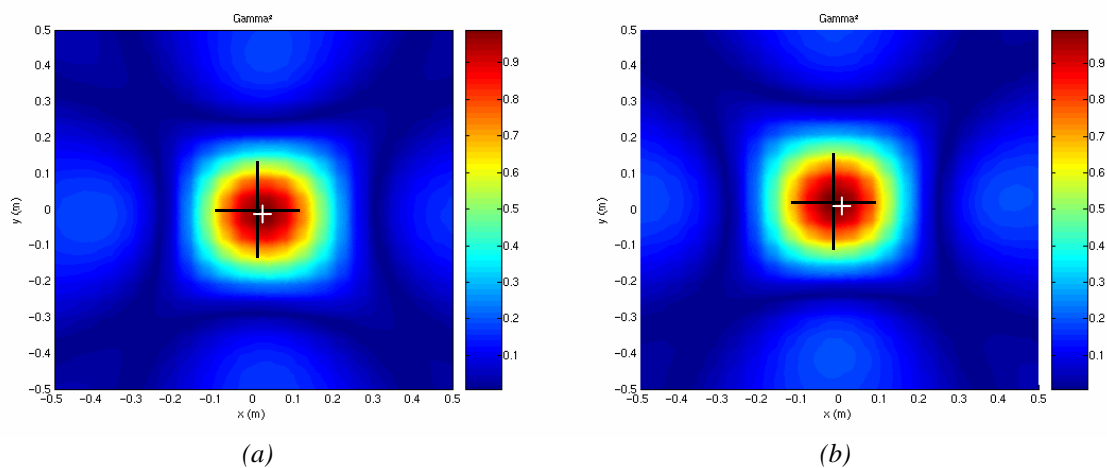


Fig. n°2 : Réponse de l'antenne à une fréquence $f=2000\text{Hz}$ (a) pour une mesure en chambre sourde, (b) pour une simulation avec les mêmes caractéristiques.

Les niveaux de cohérence constatés pour la position de la source sont de 1 dans le cas de la simulation et de 0,985 dans le cas de la mesure en chambre sourde (cf. fig. n°2).

Un autre exemple de résultat obtenu par antennerie est présenté en figure n°3.

Deux sources émettant un bruit blanc sont placées en chambre anéchoïque respectivement en $(-0,15;0,15;0)$, appelée source n°1, et en $(0,25;-0,2;0)$, appelée source n°2, avec un niveau de pression global inférieur de 3dB à 2000Hz.

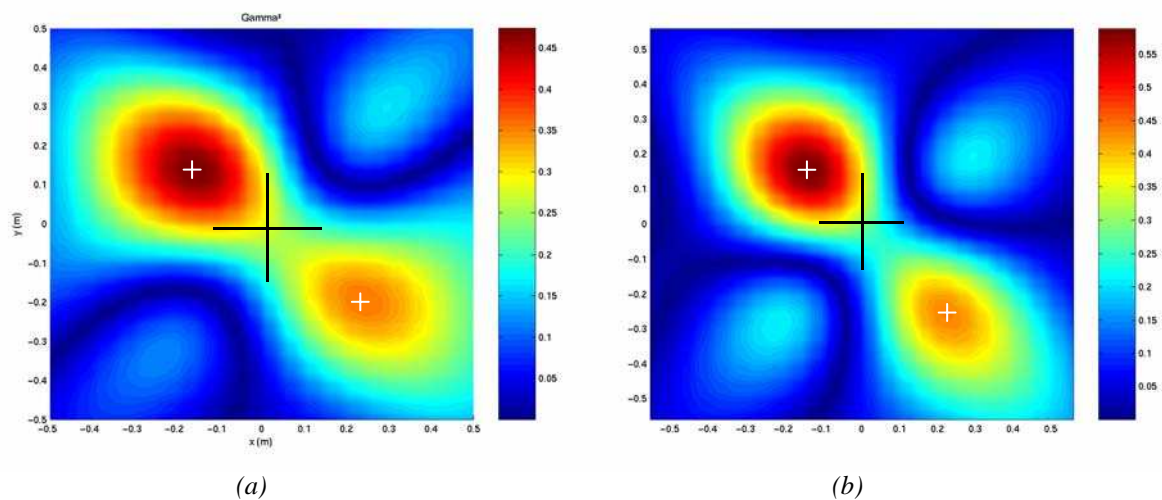


Fig n°3 : Fonction de cohérence obtenue par antennerie pour une antenne à 40cm et pour une fréquence de 2000Hz calculée (a) pour une mesure en chambre sourde, (b) par simulation.

Les résultats obtenus à cette fréquence par le biais de la mesure et de la simulation sont similaires et les deux sources sont bien détectées (cf. fig. n°3). De plus, la hiérarchisation des sources est bien effectuée puisque la source placée en $(0,25;-0,2;0)$ émettant avec un niveau inférieur à l'autre, est détectée avec un niveau de cohérence inférieur.

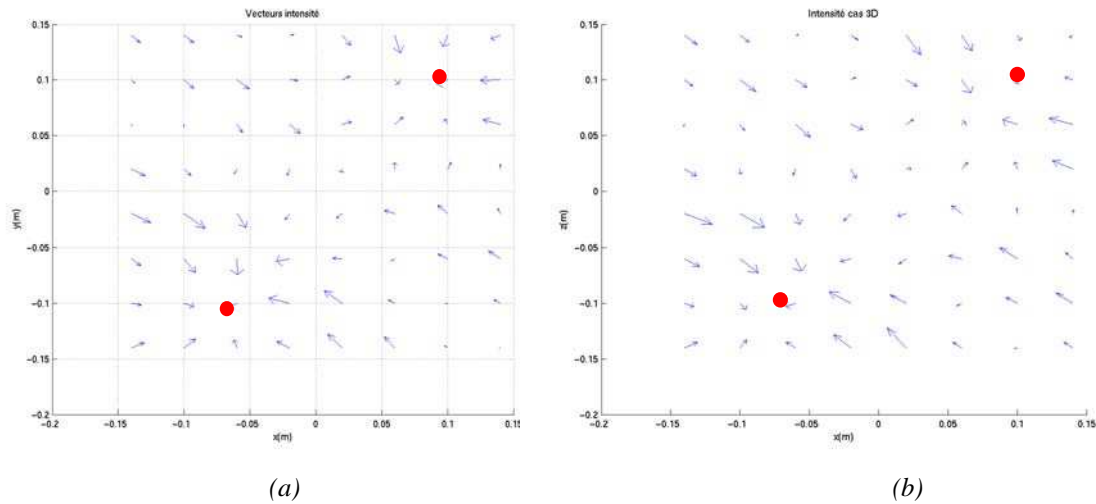
Rapport de niveaux de cohérence	Mesure	Simulation
Source 1 / source 2	1,3	1,27

Tableau n°1 : Niveaux de cohérence pour les 2 sources dans le cas de la mesure et de la simulation.

Enfin, le cas de l'intensimétrie est présenté.

Une sonde d'intensité 3D dont les microphones sont espacés de 12mm, est utilisée. Une grille de 8x8 points de mesure est balayée avec un espacement de 4cm entre chacun d'eux.

Deux sources placées en $(0,1;0,1;0)$ et en $(-0,07;-0,1;0)$ émettent un bruit blanc.



(a) (b)
Fig n°4 : Champ d'intensité, à $f=2000\text{Hz}$, dans le plan de mesure suivant les axes (x,y) (a) pour une mesure en chambre sourde, (b) par simulation.

Du point de vue des écarts de direction et d'amplitude, les résultats obtenus par le biais de la mesure et de la simulation permettent de valider les codes développés pour le traitement des données intensimétriques (cf. fig. n°4).

Annexe n°4 : Les haut-parleurs Visaton.

Dans le cadre des expérimentations, cinq haut-parleurs n°2231 de la marque Visaton, de diamètre 50 mm, quasi-omnidirectionnels sur toute la gamme de fréquence 1000 – 5000 Hz (cf. fig. n°1), sont utilisés. Un écart maximum de 4dB est ainsi observé à 5000Hz pour un angle de 90°.

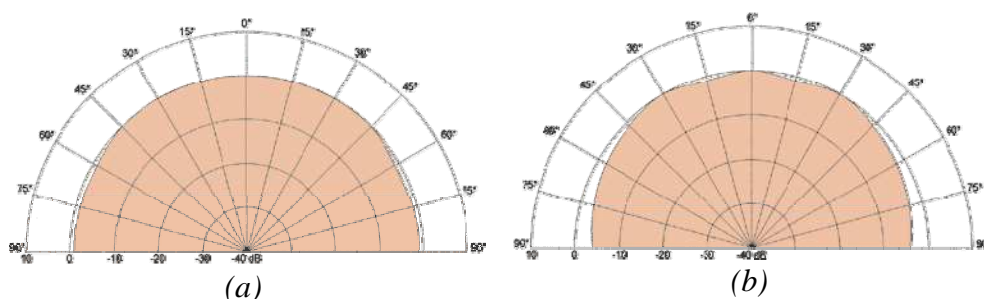


Fig. n°1 : Caractéristiques directionnelles des haut-parleurs Visaton 2231 à la fréquence (a) 2000 Hz et (b) 5000 Hz

De même, deux générateurs (fonction générateur de l'analyseur B&K type 2032, B&K type 1405), associés chacun à un amplificateur de puissance B&K 2706, capables d'exciter en bruit blanc sont employés pour créer des sources décorréelées.

Afin de fixer un niveau d'excitation produisant un niveau global de pression identique pour chaque générateur, un microphone est placé à 50 centimètres d'un haut parleur dans une chambre anéchoïque(cf. fig. n°2). Le haut-parleur est excité avec un bruit blanc successivement avec les deux générateurs. Il en ressort alors les deux autospectres tracés sur la figure n°3.

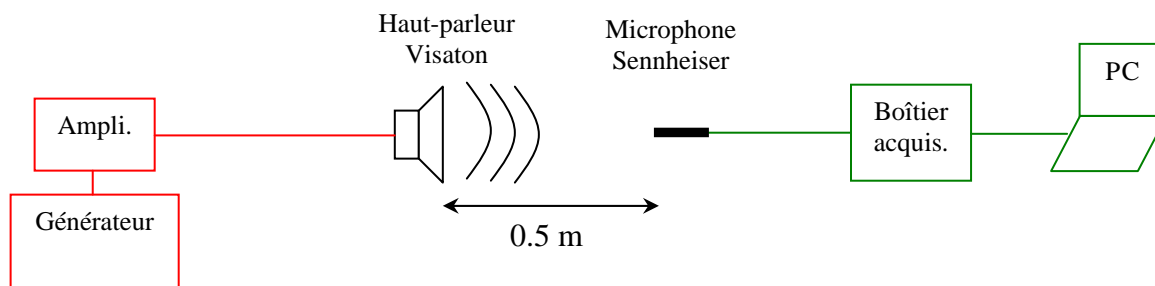


Fig. n°2 : Schéma de la calibration des deux sources sonores.

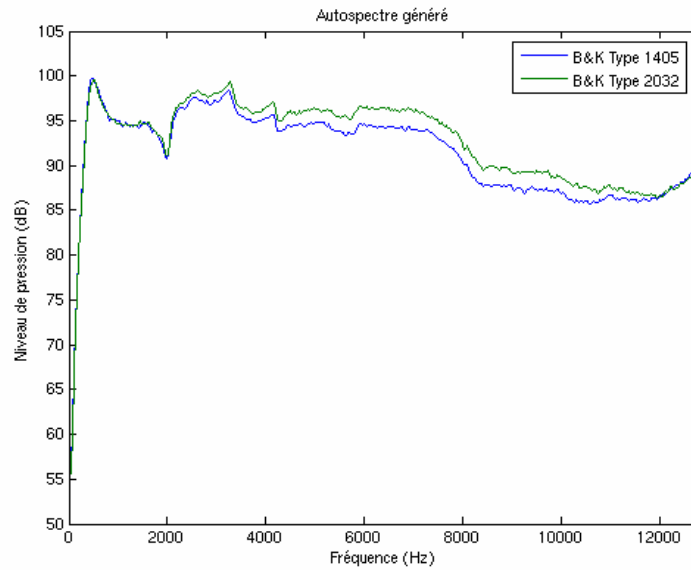


Fig. n°3 : Niveau de pression délivré par le haut-parleur alimenté par les générateurs de type 1405 et 2032 excitant en bruit blanc.

Ainsi, sur la gamme de fréquence 0 – 2500Hz, les deux voies de génération de sources émettent à un même niveau. Sur la gamme 2500 – 5000Hz, les haut parleurs excités par la fonction générateur de l'analyseur B&K 2032 ont un niveau supérieur à ceux excités par le B&K 1405 de 1dB au maximum.

Annexe n°5 : Présentation de la chaîne d'acquisition de l'antennerie acoustique.

Le dispositif de mesure utilisé pour l'antennerie acoustique se compose :

- d'un support d'antenne en croix (cf. fig. n°1).
- de 16 microphones Sennheiser (cf. fig. n°1).
- d'un boîtier d'acquisition Müller BBM (cf. fig. n°2).
- d'un PC portable pour piloter le boîtier (cf. fig. n°2).



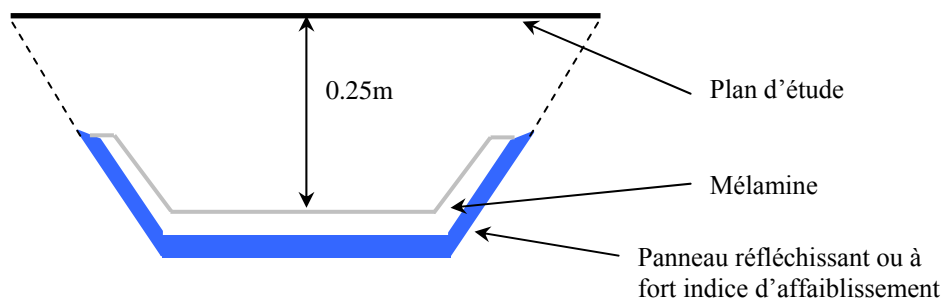
Fig. n°1 : Support de l'antenne en croix équipé par les microphones Sennheiser.



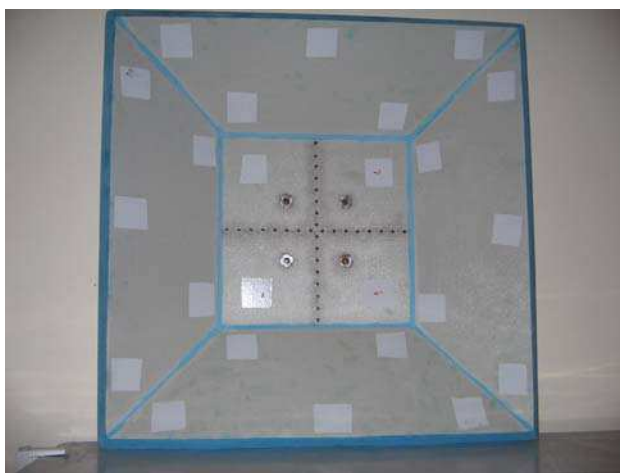
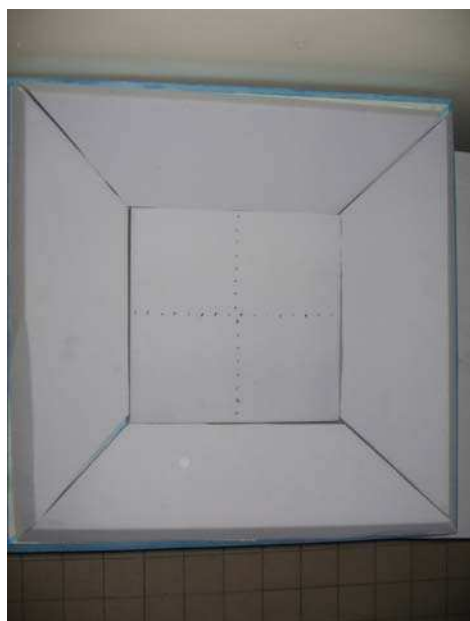
Fig. n°2 : Système d'acquisition BBM : boîtier + PC portable.

Annexe n°6 : Présentation du masque acoustique optimisé.

Il est important d'optimiser le masque acoustique en poids, dimension et efficacité. Lors du premier essai présenté dans le chapitre 3, une plaque de mélamine seule a été utilisée. Il est possible d'améliorer le masque acoustique (cf. fig. n°1) en associant un matériau réverbérant (voire encore mieux un matériau avec un indice d'affaiblissement élevé), et un matériau absorbant interne (mélamine).



(a)



(b)

Fig. n°1 : (a) Schéma de principe du capotage acoustique, (b) Photo du capotage avec et sans mélamine.

L'angle d'ouverture du capotage est défini tel que le prolongement des battants du capotage soit aligné avec l'extrémité du plan d'étude le plus critique et tel que la distance de focalisation soit égale à 25 cm. Le capotage est dimensionné de façon à permettre une

focalisation dans les différentes parois du démonstrateur de tronçon d'hélicoptère VASCo ou plus largement d'un espace cabine.

Ainsi, à l'aide du logiciel Piamco [11], un panneau avec un indice d'affaiblissement optimisé a été réalisé (cf. fig. n°2) à l'aide de matériaux certifiés aéronautiques.

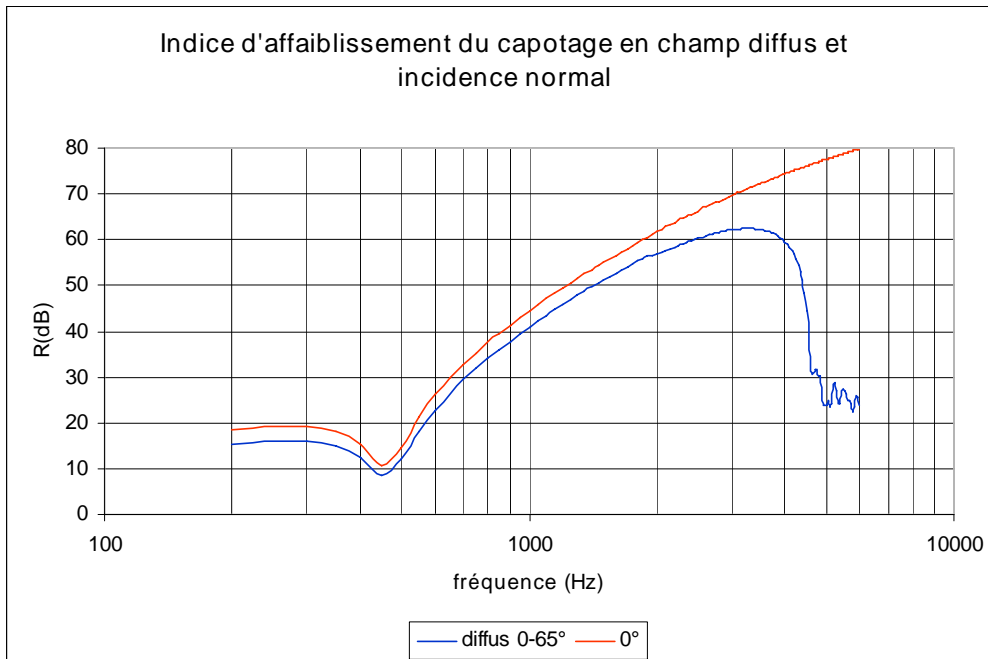
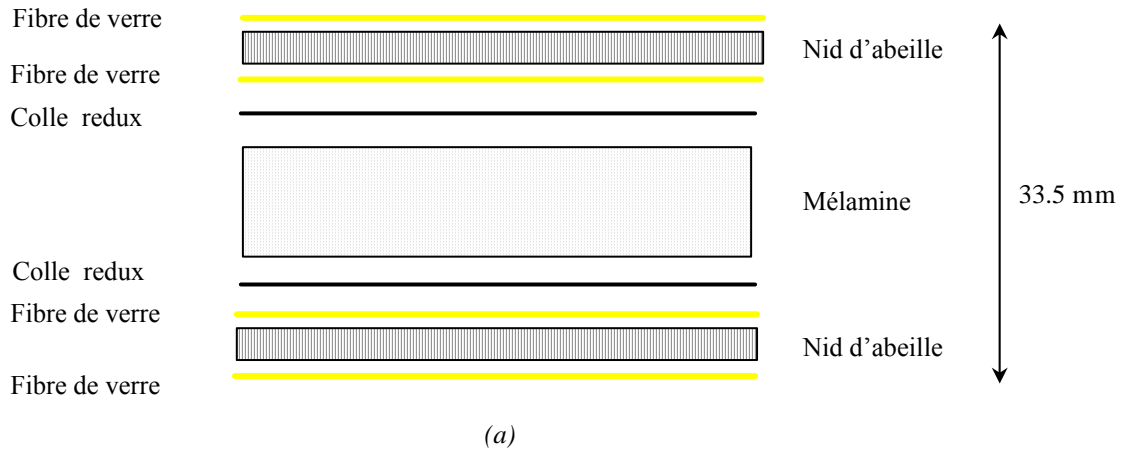


Fig. n°2 : (a) Composition du panneau affaiblissant du capotage et (b) indice d'affaiblissement de ce panneau.

Ainsi, dès 1000 Hz, l'indice d'affaiblissement atteint plus de 40 dB et cela, pour une masse surfacique faible (6.8kg/m^2).

Le capotage est ensuite garni de plaques de mélamine (mousses à pores ouverts) de 40 mm d'épaisseur de coefficient d'absorption élevé (cf. fig. n°3).

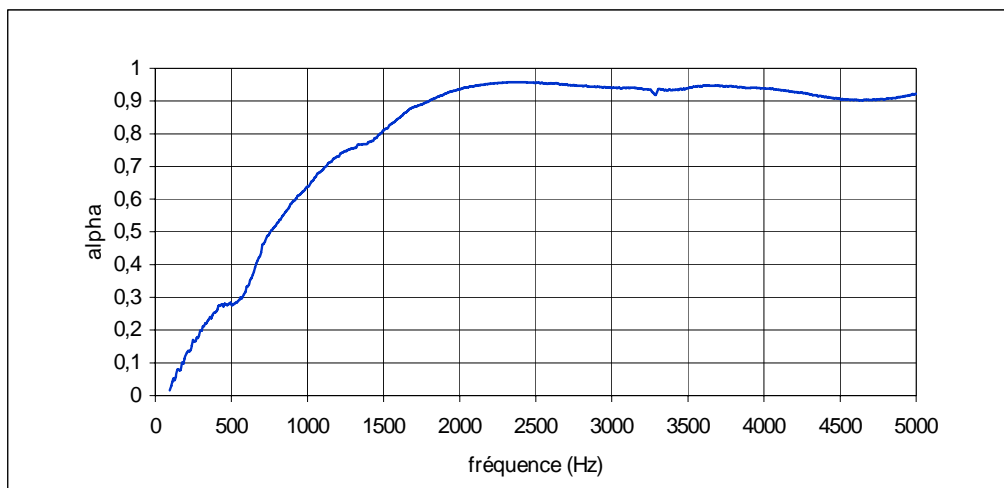


Fig. n°3 : Coefficient d'absorption de la mélamine de 40mm d'épaisseur calculé par la méthode du tube à impédance.

La combinaison des panneaux affaiblissants et du matériau absorbant fait de ce capotage un ensemble hautement performant qui permet de s'affranchir des perturbations potentielles arrières tout en limitant l'influence du capotage sur le champ de pression.

En effet, sur la figure n°3, une absorption de 0,65 est observée à 1000Hz pour croître jusque 0,95 à 2000Hz. Après 2000Hz, l'absorption reste comprise entre 0,9 et 0,95. Un coefficient de réflexion peut donc en être déduit :

$$0,65 < \alpha < 0,95 \Leftrightarrow 0,22 < r < 0,59$$

Avec :

- α le coefficient d'absorption.
- $r = \sqrt{1 - \alpha}$ le coefficient de réflexion.

Maintenant, en calculant le niveau de pression totale selon si on se place sur un minimum ou un maximum de pression, l'inégalité suivante est obtenue :

$$\text{Si } \alpha = 0,95 \text{ alors } p_i - 2,1dB < p_{Totale} < p_i + 1,7dB$$

$$\text{Si } \alpha = 0,65 \text{ alors } p_i - 7,7dB < p_{Totale} < p_i + 4,0dB$$

Ainsi, au dessus de 2000Hz, l'écart de pression est acceptable (écart de 2dB), mais, pour la gamme de fréquence 1000 – 2000Hz, il est important d'essayer de prendre en compte ces différences de niveaux de pression. La position de la source sur le plan d'étude est alors importante pour déterminer cet écart de pression. Ainsi, il est possible d'intégrer dans le calcul de la fonction de localisation une correction sur les microphones suivant le point de focalisation étudié.

Résumé :

Depuis deux décennies, des efforts considérables ont été accomplis par les constructeurs d'aéronefs afin de diminuer les nuisances acoustiques externes dues aux appareils. Les progrès réalisés dans ce domaine mettent maintenant en avant le besoin d'amélioration du confort interne pour, d'une part, réduire les effets de fatigue des passagers et des membres d'équipage et, d'autre part, répondre aux critères de compétitivité entre les différents industriels du marché. Ce besoin demande de disposer d'outils de métrologie capables de renseigner sur les zones sources de bruit et cheminement associés, en cabine d'aéronefs, afin de cibler les traitements adaptés (passifs et/ou actifs).

Dans le cadre de cette thèse, différentes techniques de localisation de sources (antennerie, holographie, intensité acoustique) sont présentées et utilisées pour repérer des zones de fort rayonnement acoustique en milieu confiné. Il s'avère que ces différentes méthodes de mesure sont soit, théoriquement inadéquates ou utilisables avec restrictions dans ce type de milieu (production de "sources virtuelles" par réflexions parasites, présence de sources extérieures au plan d'étude), soit inadaptées à des conditions de mesures rapides ou à des signaux non stationnaires.

Suite à l'identification et à la sélection des techniques les plus pertinentes, un outil de simulation, spécifiquement développé lors de cette thèse, a été employé afin de conduire une étude paramétrique permettant de déterminer l'influence des conditions de mesure et d'optimiser les performances des techniques retenues. Enfin, une démarche expérimentale a été menée dans des environnements de complexité croissante. Après une analyse détaillée des résultats, des propositions d'amélioration des techniques les plus appropriées sont données.

Mots clés :

Localisations sources acoustiques, traitement du signal, antennerie, holographie, intensimétrie, milieu confiné, simulations, expérimentations

Abstract :

Since two decades, aircraft manufacturers have achieved significant efforts in order to decrease external noise pollution due to helicopters. Technological progresses in this field put now the improvement of the internal noise forward, in order to, on the one hand, decrease the tiredness effects of passengers and crew members, and, on the other hand, to answer to competitiveness requirements between different manufacturers. This need requires having a metrological tool able to give information on acoustic radiating area in aircraft cabin in order to target appropriate acoustic treatments (passive or/and active).

Framework this thesis, different acoustic sources localization techniques (beamforming, holography, acoustical intensimetry) are introduced and used to detect high acoustic radiating area in an enclosed environment. These different measurements methods are either, theoretically inadequate or usable with restrictions in this kind of environment (creation of "virtual" sources due to reflections, existence of sources outside the studied plane), or, unsuitable with fast measurements conditions or non-stationary signals.

Further to the identification and the selection of pertinent localization methods, a simulation tool specifically developed during this thesis was used in order to make a parametric study. This study allows determining the influence of measurements conditions and optimising the performances of each chosen technique. Then, an experimental approach was led in an environment more and more complex. Finally, after a detailed analysis of the results, improvements for these techniques are suggested.

Keywords :

Acoustic sources localizations, signal processing, beamforming, holography, intensimetry, enclosed environment, simulations, experimentations

