

Le Contrôle du rayonnement appliqué à la reproduction sonore d'un instrument de musique

Rapport de Stage

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans
Promotion 2006/2009

Master Ingénierie Mécanique et Acoustique
Parcours Recherche Acoustique

Université du Maine

Encadrement :

René Caussé (IRCAM - Acoustique Instrumentale)
Nicolas Misdariis (IRCAM - Perception & Design Sonores)

Collaboration :

Markus Noisternig (IRCAM - Acoustique des Salles)

Éric BOYER - Août 2009

ericboyer@live.fr

Résumé

Outre l'intensité et le timbre, une source sonore est également caractérisée par sa directivité. Cette capacité à émettre le son dans des directions préférentielles est un élément perceptif important pour la localisation et la reconnaissance de la source par un sujet ; elle est très complexe pour un instrument à vent à trous latéraux. Les systèmes de diffusion traditionnels ne peuvent restituer cette propriété du champ de l'instrument. Une source électroacoustique à directivité contrôlée est développée ici, avec pour but de reproduire les figures de directivité d'un instrument.

Une approche par analyse sur la base des harmoniques sphériques des cibles à reproduire et de la source est choisie. La directivité de l'instrument est mesurée, ainsi que celle de la source, puis des séries de filtres sont créées afin que la source émette selon des figures de directivité choisies. Un second filtrage permettra de choisir des figures issues des mesures de l'instrument avant d'envisager une approche temps-réel de cette technique en vue d'une utilisation dans un contexte musical.

Mots-clés : acoustique, mesure, traitement de signal, système.

Summary

Natural sound sources are characterized by their intensity, spectral / temporal behavior, and sound radiation patterns. The spatial sound radiation of musical instruments is responsible for the characteristics of the direct sound and also affects the early reflections and reverberated sound field of a room ; hence it has an impact on the perception of timbre at the listener's position. It can be shown that wind instruments strongly vary their radiation pattern depending on the fingering and position of the tone holes. Traditional sound enhancement systems radiate sound very differently from acoustical instruments.

The presented project aims to develop a loudspeaker array, which allows preserving a sound source's frequency and time dependent radiation pattern. Spherical harmonics expansion of the wave field is considered as a useful tool for radiation pattern analysis and synthesis. A spatial fingerprint of a sound source can be derived from measurements of the sound pressure distribution with a spherical microphone array. From these measurements, filter banks can be developed in order to drive a spherical loudspeaker array in such a way that the reproduced sound field best matches the target sound field. This approach further allows real-time implementation for the use in music performance.

Key words : acoustics, measurement, signal processing, system.

Table des matières

1	Remerciements	5
2	Introduction	6
3	Organisme d'accueil : l'IRCAM	7
3.1	Présentation générale	7
3.2	Le département Recherche et Développement	8
3.3	Informations financières	8
4	Le projet : Théorie et mise en place	10
4.1	Le contrôle de la directivité : état de l'art	10
4.1.1	Rappels historiques	10
4.1.2	Structures actuelles : solides platoniques	10
4.2	Objectifs et description du déroulement initial du projet	12
4.3	Théorie et principes	14
4.3.1	La méthode de Weinreich	14
4.3.2	Directivité : cas du piston plan	14
4.3.3	Mesures sphériques en chambre anéchoïque	15
4.3.4	Méthodologie et traitements des mesures	17
5	Mesures du Global Source Radiator	22
5.1	Configuration	22
5.2	Résultats	23
6	Mesures sur les instruments	25
6.1	Acoustique et perception des instruments à trous latéraux	25
6.2	Mesures : configuration et hypothèses	27
6.3	Résultats	29
7	Exploitation des mesures, calculs et encodage des signaux	30
7.1	Projection dans l'espace des harmoniques sphériques	30
7.2	Système MIMO de contrôle de directivité	32
7.3	Encodage temps différé des signaux excitateurs	34
7.4	Reproduction du champ sonore à directivité contrôlée : approximations	34
7.4.1	Contrôles angulaire et radial	34
7.4.2	Limitations fréquentielles	34
8	Mesure et évaluation du résultat	36
8.1	Procédure de mesure	36
8.2	Résultats	36
8.3	Reproduction des harmoniques sphériques : conclusion	39
9	Discussions	40
10	Conclusion et perspectives	41
11	Annexes	42
11.1	Synthèse du Rapport d'Activité 2007 de l'IRCAM	42
11.2	Normes de directivité	58
11.3	Cor de basset et saxophone ténor	59
11.4	Rayonnement du piston plan	60
11.5	Directivité du GSR	62
11.6	Directivité des instruments	66
11.7	Décomposition des champs mesurés	70

11.8	Reproduction des harmoniques sphériques	71
------	---	----

Table des figures

1	Pierre Boulez	7
2	Ventilation analytique des charges d'exploitation de l'IRCAM	9
3	Prototype et réalisation de la Timée	11
4	Sources à architectures avancées	12
5	Le Global Source Radiator, source de notre étude	13
6	Montage expérimentale de G. Weinreich [20]	14
7	Facteur de directivité d'un piston plan en fonction de θ	15
8	Illustration du système de mesure en chambre anéchoïque	16
9	Schéma des contrôles du système de mesure et échantillonnage spatial	16
10	Système de coordonnées sphériques	18
11	Partie réelle des harmoniques sphériques des 4 premiers degrés	19
12	Exemple d'une vérification d'alignement de phase	20
13	Surfaces de Voronoï sur la sphère et selon une ligne de microphones	22
14	Champ mesuré du GSR pour le HP n°7	24
15	Singularités du rayonnement, HP n°7	24
16	Mesures pour la configuration omnidirectionnelle	25
17	Mesures pour la configuration pseudo-dipolaire	26
18	Dispositif pour la mesure du saxophone et système excitateur ouvert	27
19	Directivité du saxophone pour un doigté libre (B 246 Hz)	29
20	Décomposition du champ sonore du hp n°7, à 1 kHz	31
21	Directivité du saxophone ouvert, à 200 Hz	31
22	Décomposition du champ sonore du saxophone ouvert, à 600 Hz	32
23	Plages fréquentielles autorisées des processus	35
24	Mesures de directivité la source reproduisant les patterns d'harmoniques sphériques, à 1 kHz	36
25	Evolution du spectre mesuré au point (5,10) pour les configurations 'OMNI' et pattern 1 (reproduction de l'harmonique de degré 0) du GSR	37
26	Reproduction : erreur quadratique moyenne fréquentielle	38
27	Répartition des phases pour les mesures des patterns 3 (400 Hz), 6 (650 Hz) et 7 (650 Hz)	39
28	Normes et directivité du GSR	58
29	Cor de basset et saxophone ténor	59
30	Cor de basset en conditions de mesure	59
31	Piston plan rayonnant	60
32	Répartition du champ de pression - GSR - HP N°7 - 500 Hz	62
33	Répartition du champ de pression - GSR - HP N°7 - 6000 Hz	62
34	Directivité du GSR avec phase du champ - HP n°7	63
35	Répartition du champ de pression - GSR - OMNI - 6000 Hz	63
36	Directivité du GSR avec phase du champ - OMNI	64
37	Directivité du GSR avec phase du champ - DIPO	64
38	Répartition du champ de pression - GSR - DIPO - 500 Hz	65
39	Répartition du champ de pression - GSR - DIPO - 6000 Hz	65
40	Directivité du saxophone, doigté fermé (Ab 104 Hz)	66
41	Directivité du saxophone, doigté semi-fermé (F 175 Hz)	66
42	Directivité du saxophone, doigté aigu (Eb 622 Hz)	67
43	Directivité du cor de basset, doigté ouvert (C 261 Hz)	67
44	Directivité du cor de basset, doigté fermé (F 87 Hz)	68
45	Directivité du cor de basset, doigté semi-fermé (F 175 Hz)	68
46	Directivité du cor de basset, doigté semi-fermé (B 494 Hz)	69

47	Décomposition du champ sonore pour le hp n°7, à 5 kHz	70
48	Décomposition du champ sonore pour le saxophone semi-fermé, à 1,7 kHz	70
49	Cartes de niveau relatif pour le pattern 2	71
50	Cartes de niveau relatif pour le pattern 3	71
51	Cartes de niveau relatif pour le pattern 5	72

1 Remerciements

Je tiens ici à remercier du plus chaleureusement qui soit René Caussé et Nicolas Misdariis, mes encadrants durant ce stage. En me confiant ce projet, ils m'ont permis de développer mes qualités d'ingénieur-chercheur au sein d'un laboratoire de pointe, accueillant et stimulant pour un étudiant. Je les remercie pour cet accueil, pour leur aide précieuse et la confiance qu'ils m'ont accordée sur ce travail.

J'adresse également des remerciements sincères à Markus Noisternig pour son aide, ses conseils et sa sympathie. Markus s'est rendu disponible pour suivre mon travail malgré ses nombreuses activités à l'IRCAM, et n'a pas hésité à faire partager ses connaissances pour le projet.

Je n'oublie pas Hugues Genevois et Fábio Leão de l'équipe LAM de l'Institut Jean Le Rond D'Alembert qui nous ont aimablement prêté la source GSR, objet de cette étude.

Merci à Van Nguyen et Joseph Sanson, doctorants à l'IRCAM pour leur aide et leur accueil dans le laboratoire.

Enfin, un grand merci -et bravo- à Gérard Bertrand et Alain Terrier, les deux techniciens du laboratoire, qui ont apporté beaucoup de solutions techniques au projet.

2 Introduction

Une source sonore est souvent caractérisée par trois propriétés physiques : son intensité, son timbre et sa directivité. On entend par directivité les propriétés d'une source à émettre de manière préférentielle suivant une ou plusieurs directions de l'espace. Cette caractéristique dépend aussi de la fréquence. Les systèmes de diffusion conventionnels (haut-parleurs) permettent une restitution maîtrisée des deux premiers paramètres, mais possèdent une directivité propre ne leur permettant pas de reproduire les caractéristiques spatiales de la source dont ils diffusent le son. Cet écart à la réalité est en outre relayé par l'acoustique de la salle dans le cas d'une diffusion en espace fermé. Il peut devenir encore plus perceptible lorsque des sources électroacoustiques et acoustiques (instruments) coexistent dans une même scène sonore.

C'est notamment le cas en musique mixte, musique comprenant une partie électroacoustique et une partie instrumentale. Dans le cadre d'une commande pour le festival de Donaueschingen pour 2010, le compositeur Marco Stroppa a pour projet d'écrire un concerto pour cor de basset amplifié et orchestre. L'instrument soliste étant loin du public (et donc amplifié), il a paru intéressant à M. Stroppa d'utiliser les possibilités offertes par le contrôle de la directivité pour reproduire au mieux l'instrument et le faire co-exister avec l'orchestre.

Les instruments de musique possèdent une directivité intrinsèque, souvent variable et complexe. Les instruments à vent à trous latéraux (comme le cor de basset) présentent un intérêt particulier car leur rayonnement dépend de la géométrie et de la disposition des trous ouverts ou bouchés par le musicien. C'est notamment sur ces instruments que va se concentrer notre étude.

Les recherches concernant le contrôle de la reproduction de champs acoustiques tentent de répondre aux enjeux du développement de l'industrie et du savoir-faire en reproduction sonore (extension du format 5.1, télévision numérique, jeux vidéos, cinéma 3D, etc.) mais également des créations musicales.

Ce stage d'une durée de 25 semaines constitue mon expérience professionnelle de fin d'étude, comptant pour mes diplômes de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans et du Master Recherche Acoustique de l'Université du Maine. En collaboration avec trois équipes de l'IRCAM, ce stage fut l'occasion de faire converger à nouveau les compétences des équipes autour de cette problématique ([10] [11] [12]).

3 Organisme d'accueil : l'Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM)

3.1 Présentation générale

C'est en 1969 que Georges Pompidou initie la création d'un institut spécialisé dans la recherche musicale, ayant pour but de développer cette recherche ainsi que les liens entre la technologie grandissante et la musique. Il en confie les rênes et le développement au compositeur et chef d'orchestre Pierre Boulez (figure 1). En 1976, ce dernier crée l'Ensemble Intercontemporain (EIC), orchestre spécialisé dans les musiques du XX^e siècle à aujourd'hui. Avec l'IRCAM et l'EIC, Pierre Boulez a les moyens de développer des activités de recherche et d'expérimentation sur la musique contemporaine, l'écriture musicale et les techniques sonores.

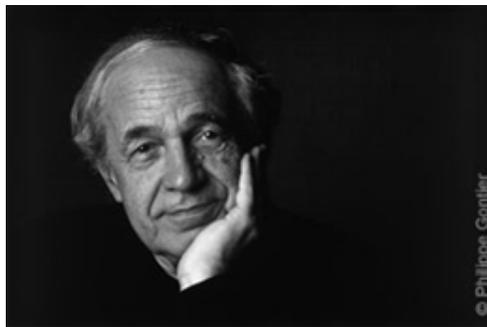


FIGURE 1 – Pierre Boulez

L'IRCAM est devenu depuis un centre unique au monde dédié à la recherche et la création musicale contemporaine. Associé au Centre National d'Art Contemporain Georges Pompidou (CGP, voisin de l'IRCAM), placé sous tutelle du Ministère de la Culture et de la Communication, l'IRCAM est depuis 1995 partenaire du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) dans le cadre d'une Unité Mixte de Recherche STMS (Sciences et Technologies de la Musique et du Son - UMR 9912).

A la fin des années 70, l'IRCAM se trouve aux avant-postes mondiaux de l'informatique musicale, qui deviendra une de ses spécialités. Parmi ses missions, l'IRCAM procède à toutes recherches fondamentales et appliquées abordant la création musicale, notamment via des projets mêlant artistes, scientifiques et techniciens.

Depuis 1992, l'IRCAM organise et produit son propre festival, AGORA, gage de l'ouverture à d'autres formes artistiques et à de nouveaux publics. Le savoir-faire IRCAM est également exporté auprès du public grâce au Forum, qui permet un partage des connaissances et des outils développés par l'IRCAM en matière d'informatique musicale et de réseaux (les équipes réseau de l'IRCAM gèrent également les réseaux pour le CGP et la Bibliothèque Publique d'Information). Outre les concerts, tournées, publications et enregistrements, de nombreux compositeurs sont également en formation à l'IRCAM (notamment au Cursus). L'association des mondes artistique et scientifique fait de cet institut un lieu de saine émulation.

L'IRCAM possède officiellement le statut d'Association Loi 1901, reconnue d'utilité publique, soumise à la législation du travail de droit privé et administrée par un Conseil d'Admi-

nistration. Le directeur de l'IRCAM (aujourd'hui Franck Madlener) est nommé par le conseil -où il siège- après approbation du Ministère de la Culture et de la Communication.

Sept directions constituent l'organisation de l'IRCAM : la Direction Générale, les services transversaux (administration, communication), la Direction Artistique, la Recherche et Développement, la Pédagogie et l'Action Culturelle (Cursus pour les compositeurs, gestion du Master ATIAM en lien avec l'Université Pierre et Marie Curie, médiathèque), les Médiations Recherche/Création (médiations extérieures, Forum) et la Production (gestion des studios d'enregistrements, des tournées et du festival). Avec tous ces services, l'institut est aujourd'hui un lieu de pédagogie, de culture, mais aussi de développement technologique et innovant important.

3.2 Le département Recherche et Développement

Le département Recherche et Développement (R&D) (auquel j'ai appartenu durant ce stage) est quant à lui composé de huit équipes :

- Acoustique Instrumentale
- Acoustique des Salles
- Perception et Design Sonores
- Analyse et Synthèse des sons
- Représentation musicales
- Analyses des pratiques musicales
- Interactions musicales temps réel
- Services en ligne

Les équipes participent à des projets divers, en lien avec la musique, les technologies du son, de la communication, de l'information, mais aussi l'Industrie, notamment en Design Sonore. Les compétences variées de ces équipes et leurs étroites collaborations (comme peut en témoigner le travail effectué durant ce stage) font de l'IRCAM un laboratoire unanimement reconnu parmi la communauté scientifique en matière de techniques audio et plus généralement de l'Acoustique. Parmi les 160 collaborateurs annuels de l'IRCAM, une grande partie sont des artistes ou chercheurs étrangers, invités ou personnels permanents, et donnent ainsi une grande dimension internationale à l'institut. Citons ici Max/MSP, aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement informatique, le principal logiciel développé par les équipes de l'IRCAM - et aussi la majeure partie des ventes de produits ; certainement le produit le plus avancé en matière de traitement audio temps-réel. Pour plus de détails sur les activités de R&D, voir l'annexe 11.1.

3.3 Informations financières

Budget global. A la fin de l'année 2008, le budget de l'IRCAM atteignait un peu plus de 11 322 000 €. Le résultat comptable est globalement nul chaque année (il était de -3 954 € en 2008). Le directeur de la comptabilité impose d'ailleurs à tous les départements une comptabilité équilibrée à la fin de l'exercice. Seule la médiathèque de l'IRCAM, ouverte au public, échappe à cette règle ; trop peu de recettes peuvent y être générées (abonnements) par rapport aux coûts.

Recettes de l'institut. Elles sont composées à hauteur de 50% (soit 5,6 M€) par des subventions de provenances diverses : Ministère de la Culture *via* le CGP, la Direction de la Musique, de la Danse, du Théâtre et des Spectacles (DMDTS), la Direction au Développement et aux Affaires Internationales (DDAI) qui finance la Recherche, et les collectivités territoriales. Les subventions privées et le mécénat y participent également. Sans les subventions, la masse salariale ne serait pas financée par les ressources propres de l'IRCAM (différence de 300 k€). Le département R&D lui-même doit également chercher des subventions.

Les recettes propres représentent 30% des recettes. Détaillons-en les principales pour une institution comme l'IRCAM :

- produits d'édition (licences logiciels, CD, DVD, ouvrages)
- prestation en tournées et de services
- produits accessoires (Forum)
- droits d'entrées aux manifestations

Le département de R&D génère 60% des recettes propres, grâce à des projets nationaux, européens et des contrats industriels (voir 11.1). Le département Création bénéficie également des produits de la R&D, pour les compositeurs, car leur accueil ne génère aucune ressource mais beaucoup de frais (environ 60 k€ par an et par compositeur). Une partie importante des subventions les concerne.

Les 20% restant proviennent des recettes internes, c'est-à-dire de la dotation aux investissements (part de la charge qui est "amortie" chaque année) et de la valorisation de la mise à disposition des locaux par le CGP (recettes à hauteur de 978 k€).

Tout comme une entreprise, l'IRCAM reverse à l'État la TVA sur ses recettes.

Dépenses. Le total des charges d'exploitations s'élève pour l'année 2008 à un peu plus de 11 326 000 € ; les dépenses sociales et de personnel en représentent 60%. La répartition en 2008 de ces charges d'exploitation par secteur d'activité est illustrée figure 2. Précisons que les dépenses de personnels et de fonctionnement selon les secteurs sont équivalentes.

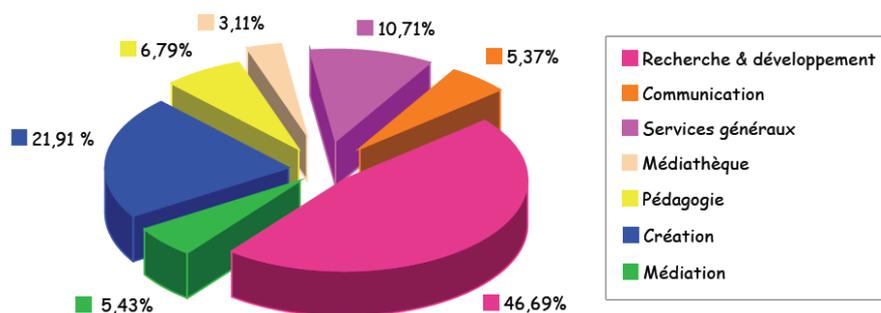


FIGURE 2 – Ventilation analytique des charges d'exploitation de l'IRCAM

Un budget d'environ 100 k€ par an est alloué à la commande d'oeuvres (compter 10 k€ par partition, qui nécessite des musiciens, des techniciens et des studios). Les dépenses de la Création, ne générant pas de ressource, représentent en fait des investissements pour l'IRCAM ; les élèves sont formés et les créations diffusées.

4 Le projet : Théorie et mise en place

4.1 Le contrôle de la directivité : état de l'art

4.1.1 Rappels historiques

Les questions de répartition spatiale des sons et de leur directivité remontent aux prémices de l'acoustique, au temps de l'Antiquité. Les phénomènes de focalisation du son dans les cavernes ou l'acoustique des théâtres grecs étaient déjà des problématiques étudiées. L'intérêt porté aux questions de la directivité des sources électroacoustiques remonte aux années 1930 et 1940 (citons par exemple H. F. Olson et D. W. Martin). A l'époque, on cherchait à rendre des microphones plus directifs, afin de recevoir d'avantage d'énergie acoustique ; les premières études sur le rayonnement d'instruments à vent apparaissaient. Des sources sonores ont été ensuite mises au point, à base de résonateurs [9] ou – déjà – de réseau de haut-parleurs, avec pour but de créer une figure de directivité atypique. Puis, dans les années 80, les industries ont souhaité disposer de sources omnidirectionnelles afin de procéder à des mesures de salles de concert. Par la suite, les laboratoires de recherche en acoustique musicale ont complexifié ces sources.

En 1980, Weinreich [20] a proposé pour la première fois une méthode de mesure de la directivité d'un instrument de musique permettant de décrire entièrement le champ produit par l'instrument et de séparer les fronts d'onde convergente et divergente. Cette méthode remarquable ne nécessite pas d'environnement anechoïque.

4.1.2 Structures actuelles : solides platoniques

La technique la plus couramment utilisée pour restituer une directivité est la source multi-haut-parleurs à base de solides platoniques¹. Pour les mesures de salles, on alimente tous les haut-parleurs avec le même signal et en phase (ceci crée une source omnidirectionnelle). Les premières études sur ces sources sont attribuées à Tarnow [18], qui détermina l'écart à l'isotropie de sources à base de solides platoniques. Il en conclut que cet écart se réduisait si le nombre de face du solide augmentait. Plusieurs laboratoires ont ensuite développé leurs propres sources de ce type, mais avec des canaux indépendants en vue d'une implémentation de contrôle de la directivité.

Les premiers systèmes à directivité contrôlée ont été développés à l'IRCAM, d'abord par Bresciani [3], Dérogis [5], puis N. Misdariis, O. Warusfel et R. Caussé [11]. A partir de l'optimisation de la combinaison de plusieurs haut-parleurs filtrés [19], les équipes de l'IRCAM sont parvenues à appliquer des figures de directivité à une source en partant d'un ensemble de directivités de base (monopôles et dipôles) contrôlées en temps réel [12]. Le prototype réalisé en collaboration avec la société Focal/JMLab, appelé *Timée*, est une source à base de cube à trois voies (caisson de basses deux haut-parleurs, cubes de six mediums et six tweeters, voir figure 3). Dans le même temps, P. Cook et D. Trueman de Princeton University développèrent un système de reproduction sphérique plus complexe (jusqu'à 12 haut-parleurs) pour des ap-

1. Polyèdre régulier convexe où les haut-parleurs sont disposés au centre des faces du solide ; il en existe cinq types en géométrie euclidienne : tétraèdre, cube, octaèdre (8 faces), dodécaèdre (12 faces) et icosaèdre (20 faces)



FIGURE 3 – Prototype et réalisation de la Timée

plications musicales : le N-body Project (1997). Ce projet donna naissance au PLOrk/SLOrk (Princeton/Stanford Laptop Orchestra).

Des prestations de concerts sont régulièrement réalisées avec la *Timée*, notamment par F. Nicolas, O. Schneller (compositeur IRCAM) et N. Misdariis, pilotée *via* Max/MSP. Le projet du stage s'inscrit dans une recherche de cohabitation d'une source amplifiée parmi un ensemble d'instruments, comme lors de ces concerts. Le contrôle de la directivité des sources permet cette cohabitation et offre de nouvelles possibilités en composition musicale pour l'insertion d'un instrument amplifié dans une scène sonore. C'est ce qu'a voulu faire le compositeur Marco Stroppa, qui compose actuellement une pièce pour orchestre et cor de basset amplifié. Le projet de ce stage, qui s'inscrit dans la continuité des travaux précédemment menés à l'IRCAM, est aussi motivé par la création du compositeur.

Systèmes aux architectures avancées

Citons ici trois projets remarquables utilisant des architectures avancées (voir figure 4). L'Institute of Technical Acoustics de la faculté de Aachen a développé une source divisée en trois bandes de fréquences à deux dodécaèdres (12 médiums partageant le même volume, 12 tweeters clos et un caisson de basses), et étudié plusieurs méthodes, dont celle des harmoniques sphériques, permettant de synthétiser une figure de directivité cible. En voulant augmenter le nombre de faces du solide de base, l'Institute of Electronic Music and Acoustics de Graz (IEM) a mis au point un système équivalent à base d'icosaèdres. Une description analytique du système MIMO (Multiple Input Multiple Output) minimisant le couplage entre les haut-parleurs partageant le même volume a été proposée. Enfin, au CNMAT (Center for New Music and Audio Technology) à Berkeley une source icosaédrique à 120 haut-parleurs a été développée. Sur ce montage d'autres contraintes apparaissent, comme la taille de la source et l'amplification pour un grand nombre de voies.

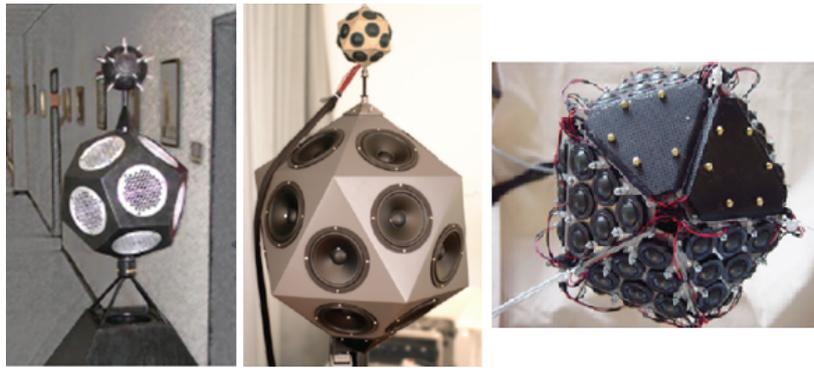


FIGURE 4 – Sources à architectures avancées, de gauche à droite : sources de l’ITA, de l’IEM et du CNMAT

4.2 Objectifs et description du déroulement initial du projet

L’objectif du projet est d’évaluer la faisabilité de la reproduction de la directivité d’un instrument de musique à vent à trous latéraux à l’aide d’une source multi-haut-parleurs à directivité contrôlable. La question de l’évaluation objective et perceptive de cette reproduction sera posée. Les étapes de caractérisation de la source et de l’instrument précéderont les phases de calculs et d’implémentation. On s’efforcera de replacer le projet dans un contexte d’application musicale afin d’évaluer les performances du système.

Nous disposons donc d’une source, une sphère de 12 haut-parleurs disposés aux centres des faces d’un dodécaèdre, et d’une cible à reproduire : la directivité des instruments mesurés. Les champs sonores de ces éléments sont mesurés en chambre anéchoïque (conditions de champ libre). Les instruments sont excités par un haut-parleur (placé au niveau du bec, détaillé plus loin) afin d’étudier le rayonnement du conduit qui les constitue. Le paradigme des harmoniques sphériques est utilisé pour caractériser la source et la cible. Ces dernières sont étudiées tels des systèmes fermés globaux ; cette approche permet de tenir compte des possibles artefacts inhérents à ces systèmes et à leur mesure, et de conserver à l’esprit la finalité du projet, l’application dans un contexte musical. Des techniques afférant à des domaines variés ont été mises en oeuvre. L’objectif du projet n’était pas d’approfondir chacune de ces techniques, mais de les utiliser dans leurs versions simples, nous permettant de conclure quant à la faisabilité du processus global. Bien entendu, un approfondissement de ce travail consisterait en l’étude des techniques les mieux adaptées aux processus, afin d’en améliorer la précision et de converger vers une approche temps-réel.

Source : Global Source Radiator. Le GSR est une source sonore omnidirectionnelle de la société *Outline*², conçue pour la mesure de salles, dont les 12 canaux peuvent être contrôlés séparément (voir figure 5). Elle nous est prêtée par l’équipe LAM de l’Institut Jean Le Rond D’Alembert. Elle répond, selon ses concepteurs, aux normes ISO 3382, ISO 354, ISO 140-3 et DIN 52210 concernant l’isotropie et les mesures acoustiques de salles. Pour cette étude une adaptation de la source est réalisée afin d’alimenter les 12 canaux indépendamment. Ils sont équipés de 12 voies de conversion et d’amplifications identiques (carte son, convertisseurs et amplificateurs). Le logiciel Max/MSP ainsi que les équipements de la chambre anéchoïque de

2. www.outline.it

l'IRCAM permettent de contrôler la source en vue de mesures de son rayonnement.

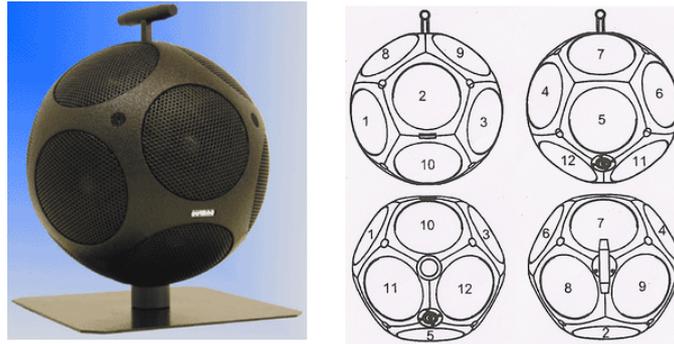


FIGURE 5 – Le Global Source Radiator, source de notre étude

Cibles : les instruments. Le projet de Marco Stroppa pour le festival de Donaueschingen concerne le cor de basset, instrument de la famille des clarinettes. Cet instrument étant difficile à se procurer, l'étude a débuté avec un saxophone ténor (annexe 11.3), instrument assez proche physiquement (excitation par anche simple, réseau de trous, pavillon). Le champ rayonné par ce type d'instrument se révèle complexe et dépendant du doigté joué par le musicien [3]. Les deux instruments ont finalement pu être étudiés, ce qui permet une confrontation des mesures de directivité, notamment car le cor de basset possède un corps droit ce qui n'est pas le cas du saxophone.

Caractérisation. Les champs rayonnés par la source et les cibles sont mesurés, puis décomposés sur la base des harmoniques sphériques (HS), "patterns" de directivité de base. Sous ce paradigme, le comportement des haut-parleurs de la source peut être modélisé, en tenant compte - de manière systématique - des nombreux couplages internes entre haut-parleurs [1][8]. Le calcul et la modélisation de filtres *ad hoc* permettant la reproduction des HS est alors effectué. Dans ce même espace des fréquences spatiales - les HS, la caractérisation des instruments permet de quantifier la projection de leur rayonnement sur les HS et ainsi de pondérer le premier étage de filtrage.

Evaluation. La reproduction par le GSR des patterns de directivité correspondant aux HS est ensuite confirmée par une nouvelle série de mesures de la source "filtrée". L'application du second étage de filtrage afin de produire le rayonnement des cibles est laissé, par manque de temps, à des travaux ultérieurs. En outre, une approche temps différé a été choisie (par opposition aux processus temps-réel nécessaire dans une situation musicale ou de concert) : les signaux d'excitation ont été pré-traités avant envoi à la source. Cette première approche du problème permet l'implémentation de filtres très précis pour une analyse/recomposition préparant de futures implémentations temps-réel, non abordées ici.

La caractérisation de la source filtrée et pondérée permettra de valider la reproduction du champ des instruments, objectivement par la mesure en chambre anéchoïque puis subjectivement par des tests perceptifs et en conditions réelles.

4.3 Théorie et principes

4.3.1 La méthode de Weinreich

En 1980, Weinreich [20] propose une nouvelle méthode de mesure du champ rayonné par une source, en l'occurrence un violon. Cette méthode, utilisant une double sphère de mesure autour de l'instrument, permet de quantifier l'onde entrante et l'onde sortante de la sphère d'analyse (voir figure 6).

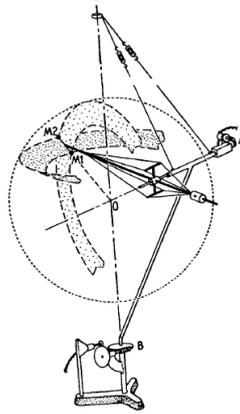


FIGURE 6 – Montage expérimentale de G. Weinreich [20]

Weinreich propose de considérer le champ de pression tout autour de l'instrument et de le représenter sous une forme sphérique :

$$p(r, \theta, \phi) = \sum_{LM} [a_{LM} h_L(kr) + b_{LM} h_L^*(kr)] Y_L^M(\theta, \phi) \quad (4.1)$$

où $p(r, \theta, \phi)$ est la pression acoustique en un point de l'espace, $Y_L^M(\theta, \phi)$ une harmonique sphérique (voir 4.3.4), et $h_L(kr)$ la fonction de Hankel sphérique du premier type. En mesurant $p(R, \theta, \phi)$ sur deux sphères de rayons R puis $R_2 \neq R$ on peut alors déterminer les coefficients a_{LM} et b_{LM} et ainsi décrire entièrement le champ acoustique autour de la source.

4.3.2 Directivité : cas du piston plan

Le point de départ des études sur le contrôle de la directivité est constitué par la remarque que les haut-parleurs conventionnels ne peuvent respecter la directivité originelle de la source qu'ils reproduisent. Pierre Boulez lui-même formalise le constat que le haut-parleur "anonymise les sources réelles" [2].

La forme parfois complexe des membranes des haut-parleurs nous empêche de calculer exactement la directivité qu'ils possèdent ; l'approximation du piston plan -de rayon a - oscillant dans un baffle infini est souvent faite afin d'approcher la directivité d'un haut-parleur. On peut alors montrer (voir calculs détaillés en annexe 11.4) que la pression en champ lointain s'écrit, en coordonnées cylindriques :

$$p(r, \theta) = j\rho_0 c v_0 \frac{ka^2}{2} \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (4.2)$$

où $J_1(x)$ est la fonction de Bessel de première espèce. Le premier terme, indépendant de θ , constitue le champ de pression dans l'axe du piston. Il représente le caractère monopolaire du champ, avec une décroissance en $1/r$. Le second est un facteur de directivité donnant une dépendance du champ en θ . Lorsque $ka < 1$ ce terme devient proche de 1, et le rayonnement est alors monopolaire (ou isotrope). A l'inverse, de nombreux maxima et minima apparaissent lorsque $ka > 1$ comme illustré figure 7. C'est précisément ce comportement global des sources actuelles qui constitue un enjeu de la recherche en contrôle de directivité.

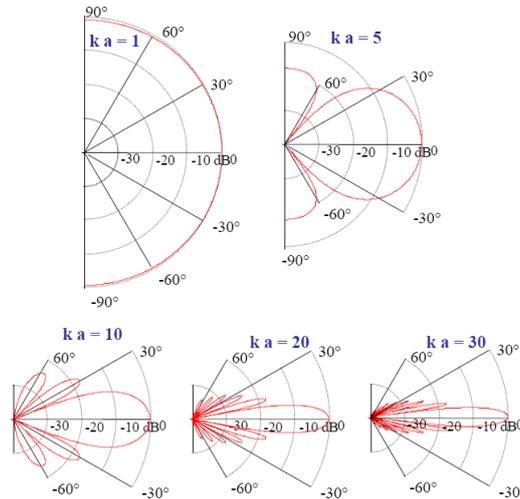


FIGURE 7 – Facteur de directivité d'un piston plan en fonction de θ ; $k = \omega/c$

4.3.3 Mesures sphériques en chambre anéchoïque

Les mesures effectuées consistent en un relevé de la pression acoustique le long d'une sphère centrée sur la source disposée dans une chambre anéchoïque. Ce relevé permet de calculer la réponse impulsionnelle du système étudié, et d'en obtenir la réponse fréquentielle dans toutes les directions. La chambre anéchoïque de l'IRCAM possède un bras robotisé contrôlé par protocole MIDI permettant de faire tourner autour de la source (autour de l'axe transversal) un demi-cercle de 24 microphones. Un peu plus d'un quart de la sphère peut ainsi être couvert. Une table tournante est aussi commandée en rotation autour de l'axe vertical; en retournant enfin la source on peut alors couvrir toute la sphère de mesure (voir figure 8). La source est centrée sur le dispositif à l'aide de trois lasers fixes coïncidents.

Les microphones (capsules à électret mce2000 Monacor) sont répartis tous les 7.8° , situés à $146.5 \pm 1\text{cm}$ du centre de la sphère de mesure. Un échantillonnage tous les 10° d'élévation a été choisi, ce qui donne 828 points de mesure et 36 références (un microphone, fixe par rapport à la source étudiée, permet une référence tous les 10°); ce choix résulte d'un compromis temps/résolution spatiale. En effet, augmenter ce nombre améliorerait la précision des mesures et des décompositions mais ralentirait considérablement les procédures et alourdirait les traitements. Après des séries de test ce choix apparut comme un bon compromis.

Un programme conçu sous Matlab et Max/MSP permet de contrôler les équipements de la chambre, les signaux d'excitation et l'enregistrement des mesures (voir figure 9).

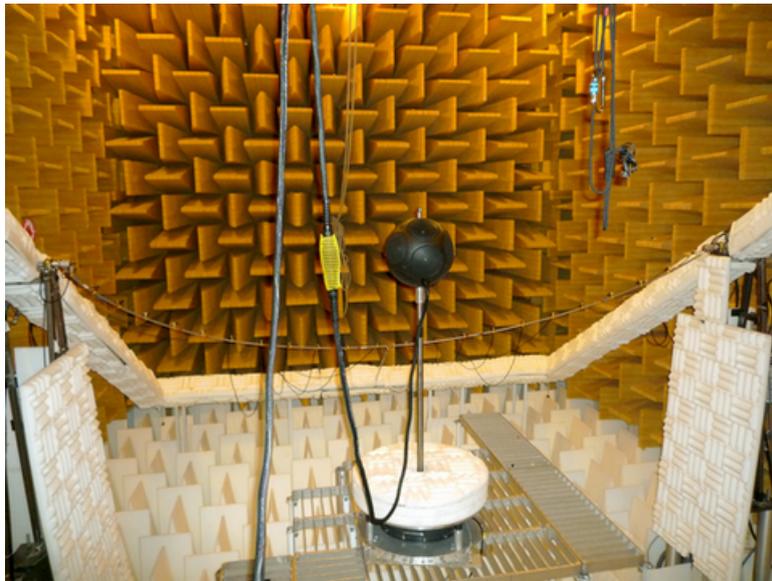


FIGURE 8 – Illustration du système de mesure en chambre anéchoïque

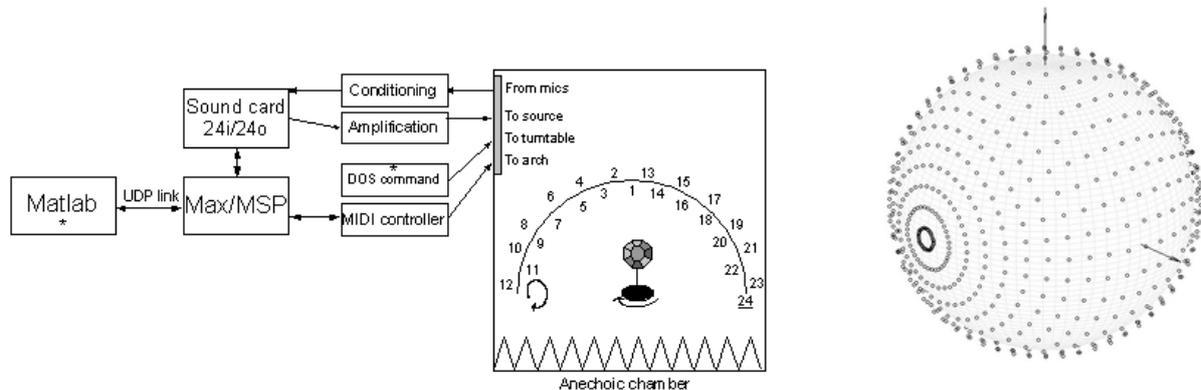


FIGURE 9 – Schéma des contrôles du système de mesure et échantillonnage spatial

Matlab contrôle tous les paramètres des mesures et les envoie à Max/MSP *via* une liaison UDP (User Datagram Protocol). Celui-ci contrôle les entrées et sorties de la carte son, ainsi que la synchronisation entre le signal excitateur et l'ouverture des convertisseurs enregistrant les signaux provenant des microphones. C'est également Max/MSP qui envoie les ordres MIDI au système d'asservissement en élévation de l'arc. Il communique avec un programme gérant les données des capteurs de position de l'arc.

Le premier travail en vue des mesures a consisté à maîtriser tout ce système, et à créer les programmes adaptés aux diverses procédures (calibration des microphones sur l'arc, enchaînement des quatre quarts de la sphère de mesure, gestion des 12 voies du GSR), que ce soit sous Matlab, pour la carte son, les convertisseurs ou sous Max/MSP.

Les mesures étant suivies par une décomposition du champ en HS, une condition nécessaire est que toutes les sources dont le champ sera mesuré se situent à l'intérieur de la sphère de mesure ; autrement dit, qu'aucune autre source soit présente à l'extérieur de la sphère [20]. Les équipements présents dans la chambre anéchoïque de l'IRCAM - bien que traités acoustiquement - peuvent être réfléchissants ou sources de perturbations du champ mesuré. T. Caulkins

[4] a quantifié ces artefacts de mesure avec une méthode similaire à Weinreich ; on peut alors considérer comme anéchoïque l'environnement des mesures et donc se placer dans la condition citée plus haut. On gardera néanmoins à l'esprit que ces artefacts existent, mais seront identiques pour la caractérisation de la source, des cibles *et* de la reconstitution, ils sont donc intégrés dans notre raisonnement et se révéleront gênants uniquement en conditions réelles d'utilisation du système (salle de concert).

4.3.4 Méthodologie et traitements des mesures

Réponse impulsionnelle. Il existe différentes méthodes pour mesurer la réponse impulsionnelle d'un système : impulsion, Maximum Length Sequence (MLS), Time Delay Spectrometry (TDS) ou balayage fréquentiel. La première est une méthode directe et consiste simplement à envoyer au système une impulsion de Dirac et d'en mesurer sa réponse. Le problème est que les haut-parleurs ne sont pas conçus pour répondre favorablement à ce type d'excitation : la puissance demandée est trop importante et ils présentent souvent un temps d'attaque non négligeable. De plus, l'impulsion doit être la plus courte possible, ce qui apporte beaucoup d'énergie et donc beaucoup de distorsion par le haut-parleur.

La méthode MLS consiste à mesurer la réponse de la source à un bruit blanc pseudo-aléatoire connu, et à répéter l'opération pour obtenir un meilleur rapport signal/bruit (le bruit de fond n'étant pas corrélé entre les mesures) ; cette méthode apparaît trop longue pour les mesures envisagées (elle est souvent employée pour mesurer la distorsion totale d'un système électroacoustique).

La *Time Delay Spectrometry* est une approche dans le domaine temps-fréquence de la réponse d'un système qui permet de séparer l'influence de différents phénomènes acoustiques ou de signaux non souhaitables. Même si cette méthode autorise l'évaluation des paramètres *in situ* (elle est notamment utilisée dans la mesure de salles aux réponses complexes), elle reste délicate à mettre en oeuvre.

Le balayage fréquentiel logarithmique est la méthode finalement retenue. Ce type d'excitation est bien adapté pour un haut-parleur (à condition que le signal ait une durée plus longue que la réponse impulsionnelle du système) et recommandé pour une mesure en chambre anéchoïque où elle permet la quasi-absence de distorsion harmonique et un bon rapport signal à bruit[17]. On utilise plus particulièrement la méthode décrite par A. Farina [6]. Elle consiste à exciter le système avec un sinus glissant (dont la fréquence augmente de manière logarithmique dans le temps). Le signal temporel de pression relevé par les microphones est ensuite déconvolué par le sinus glissant afin d'obtenir la réponse impulsionnelle du système étudié.

Même si les mesures seront effectuées sur une bande fréquentielle large (20 Hz à 20 kHz : englobe largement la bande passante du système à mesurer, ce qui est nécessaire afin d'éviter les distorsions de transitoires), celle-ci est tronquée à 90 Hz dans les basses fréquences, notamment car les haut-parleurs qui équipent le GSR ne peuvent descendre plus bas. D'autre part, les instruments étudiés (que l'on cherche à reproduire) possèdent des tessitures qui débutent au Fa2 (87 Hz) pour le cor de basset et au Fa#2 (92 Hz) pour le saxophone ténor ; on verra plus loin qu'à ces fréquences, la directivité importe peu pour des instruments de ce type ; la source est d'ailleurs commercialisée avec un caisson de basses traditionnel, ce qui montre le

caractère omnidirectionnel à ces fréquences. D'autres limites concernant les hautes fréquences seront détaillées ultérieurement.

La base des harmoniques sphériques. Les harmoniques sphériques (HS) sont un outil mathématique prenant part à la résolution de l'équation d'onde dans un système de coordonnées sphérique. Dans un tel système (illustré figure 10), de telle sorte que :

$$x = r \sin \theta \cos \phi ; \quad y = r \sin \theta \sin \phi ; \quad z = r \cos \theta \quad (4.3)$$

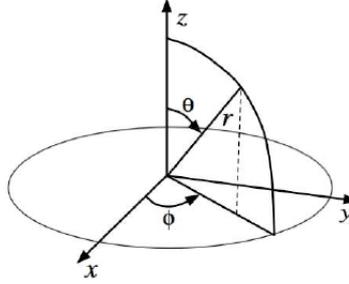


FIGURE 10 – Système de coordonnées sphériques

l'équation d'onde décrivant la pression s'écrit :

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (4.4)$$

où c est la célérité de l'onde dans le milieu. En appliquant une méthode de résolution par séparation des variables r , θ , ϕ et t , on peut montrer[20][21] que la pression s'écrit alors

$$p(r, \theta, \phi, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (A_{nm} h_n(kr) + B_{nm} h_n^*(kr)) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (4.5)$$

où k est le nombre d'onde, A_{mn} et B_{mn} des coefficients complexes, et h_n les fonctions de Hankel sphériques. Le premier terme étant un terme de propagation, le terme de directivité Y_n^m est la fonction - complexe - des harmoniques sphériques de degré n et d'ordre m qui se définit par :

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

Les fonctions $P_n^m(\cos \theta)$ sont les fonctions associées de Legendre, dérivées des polynômes de Legendre, qui s'écrivent, pour $m > 0$:

$$P_n^m(x) = (-1)^m (1-x^2)^{m/2} \frac{d^m}{dx^m} P_n(x) \quad (4.7)$$

que l'on calcule, pour des valeurs négatives de m :

$$P_n^{-m}(x) \equiv (-1)^m \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(x) \quad \text{avec } m > 0$$

Les HS possèdent des propriétés mathématiques remarquables, comme une symétrie hermitienne à l'ordre m :

$$Y_n^{-m}(\theta, \phi) = (-1)^m Y_n^m(\theta, \phi)^* \quad (4.8)$$

ainsi que l'orthonormalité :

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi Y_n^m(\theta, \phi) Y_{n'}^{m'}(\theta, \phi)^* \sin \theta d\theta = \delta_{nn'} \delta_{mm'} \quad (4.9)$$

Les HS définissent alors une base mathématique sur laquelle toute fonction $f(\theta, \phi)$ de carré sommable sur une sphère peut se décomposer :

$$f(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{nm} Y_n^m(\theta, \phi) \quad (4.10)$$

Mathématiquement, la décomposition en HS donne une solution de l'équation d'onde en coordonnées sphériques. Les coefficients complexes A_{nm} caractérisent le champ f au niveau de la sphère d'analyse, c'est-à-dire à une distance donnée du centre. Pour connaître alors le champ en tout point de l'espace, il faut pondérer ce résultat par un terme de propagation calculé à l'aide des fonctions de Hankel. Tout comme une décomposition en série de Fourier, dans l'espace des fréquences, les HS permettent de passer dans le domaine des "fréquences spatiales". Les parties réelles des premiers degrés de ces harmoniques sont tracées figure 11.

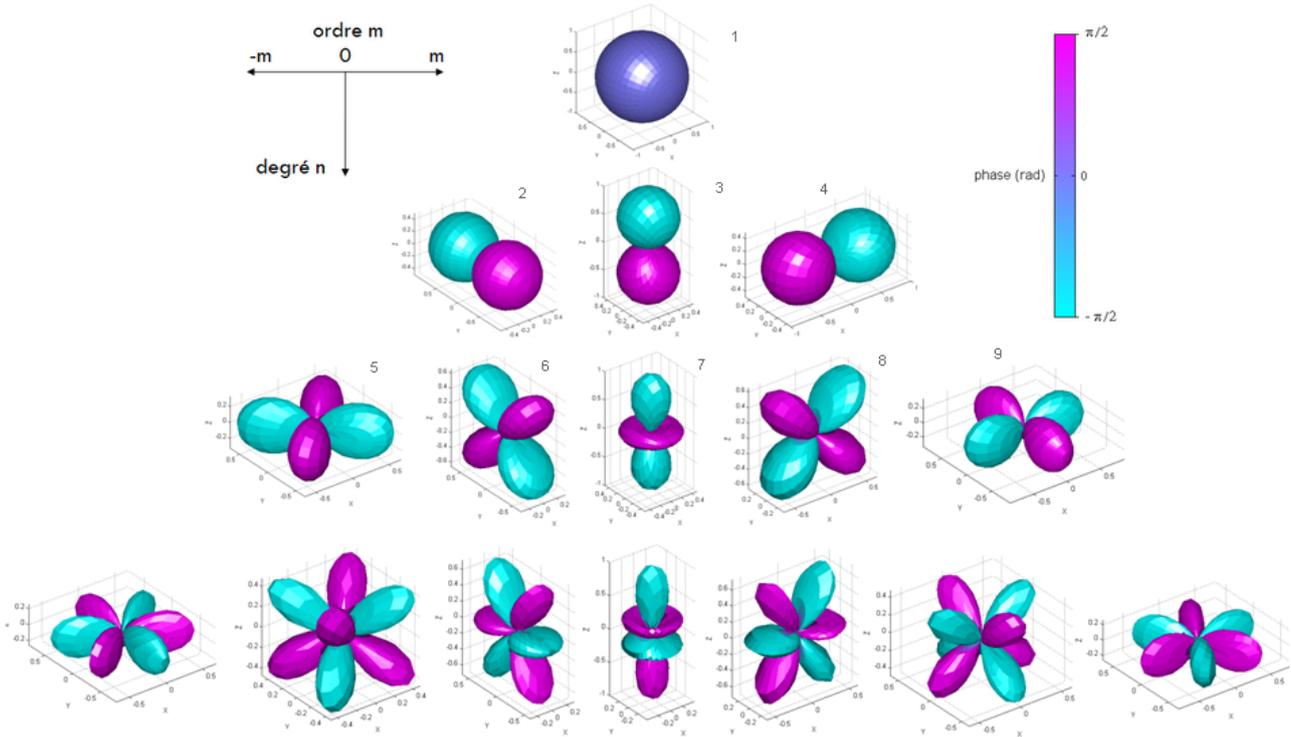


FIGURE 11 – Partie réelle des harmoniques sphériques des 4 premiers degrés

En vertu de l'équation 4.9 on peut calculer les coefficients issus de la décomposition du champ f par un produit scalaire :

$$A_{nm} = \int d\Omega Y_n^m(\theta, \phi)^* f(\theta, \phi) \quad \text{avec} \quad \int d\Omega \equiv \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin \theta d\theta \quad (4.11)$$

Décomposition : conditions. Lorsque l'on effectue une décomposition en harmoniques sphériques avec une technologie d'antennerie, la phase relative entre les microphones a son importance. C'est souvent pour cette raison que l'on préfère mesurer de tels champs avec une sphère de microphone, de manière instantanée, et non en déplaçant un bras ou la source; ceci d'autant plus lorsque l'excitation n'est pas strictement reproductible. C'est pourquoi on veille au cours de tous les traitements post-mesures à ce que les opérations n'introduisent pas de distorsion fréquentielle sur les réponses impulsionnelles mesurées. Les divers filtres appliqués doivent être "à phase linéaire"; leur retard de groupe $-\frac{d\phi}{df}$ est alors une constante. Un soin particulier est alors apporté à la phase lors de la création des nombreux filtres utilisés dans la chaîne de traitement.

Pour cette même raison, il est nécessaire qu'entre deux élévations successives de l'arc, les mesures soient déclenchées - c'est à dire que les convertisseurs soient ouverts - toujours au même instant avant l'envoi du signal excitateur (ce temps est non nul par sécurité afin d'être certain d'enregistrer la totalité du signal). C'est le rôle du microphone de référence, placé au niveau de l'axe de rotation de l'arc. A chaque nouvelle position de l'antenne autour de la source, les mesures sont déclenchées pour les 24 microphones simultanément. En s'assurant de l'alignement temporel des mesures sur ce microphone, les phases de tous les signaux sont "alignées".

Pour cela, on calcul la fonction de corrélation entre la réponse impulsionnelle du microphone de référence pour toutes les élévations avec une élévation témoin (par exemple 0° , l'horizontale). Dans chacune des phases de mesure continues (portions de sphère) le maximum de cette fonction doit apparaître autour du même échantillon temporel. Le système étant échantillonné à 48 kHz, 1 échantillon représente $21\mu s$. On convient généralement en audio qu'au delà de 1 ms ce retard est gênant. Un exemple de calcul pour une mesure du haut parleur n°3 du GSR est donné figure 12.

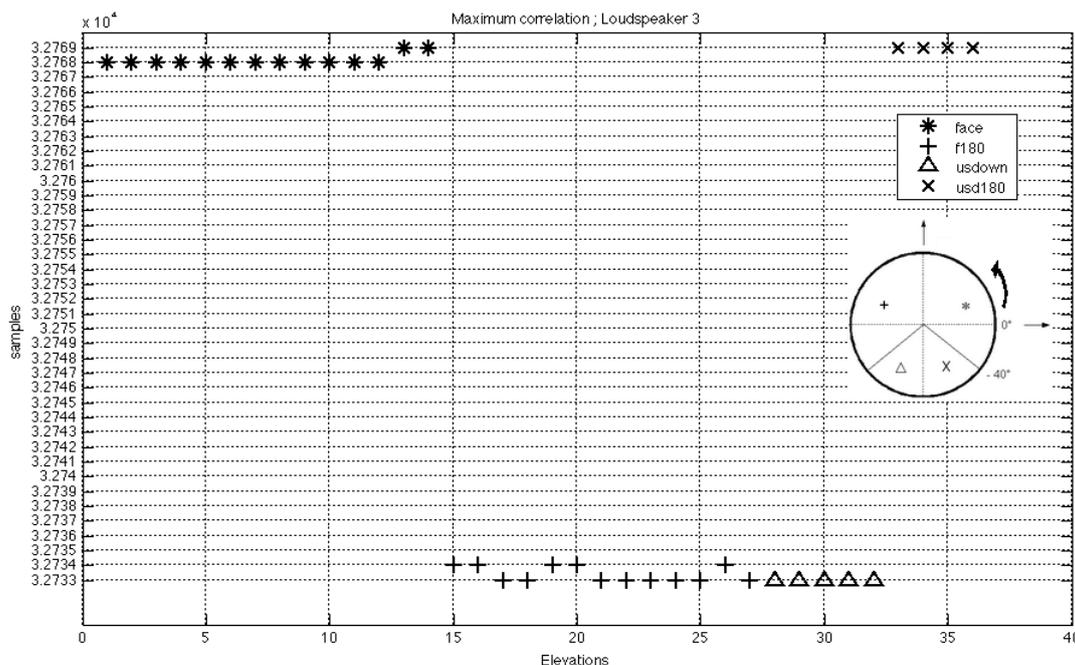


FIGURE 12 – Exemple d'une vérification d'alignement de phase; position temporelle des maxima des autocorrélations pour chaque élévation avec le microphone référence

Les quatre phases de mesure sont représentées ; elle correspondent à la portion de sphère mesurée par le bras. La première mesure est effectuée à -40° d'élévation, puis le pas est de 10° en élévation. On peut remarquer que sur les quatre phases, l'écart des maxima est au plus d'un échantillon ; cependant, entre les phases les résultats sont très différents. De la première à la seconde phase, la source a subi une rotation de 180° dans le plan horizontal, autour de l'axe vertical. Le haut-parleur 3 s'est donc rapproché du microphone de référence (situé à 90° , sur l'axe du bras) car il a pris la place du haut-parleur 6 (voir figure 5). On mesure une différence de 35 échantillons entre ces deux phases, soit $0,729$ ms. En évaluant la distance entre les haut-parleurs 3 et 6, le temps de parcours, pour une vitesse du son de 340 m.s^{-1} est de $0,735$ ms. Cette différence correspond donc au changement de position de la source par rapport au microphone de référence. Le même phénomène se produit lors de la seconde rotation de 180° , entre les deux dernières phases. L'essentiel étant que durant une phase, les écarts de maxima restent raisonnables, ce qui est bien le cas.

Sphère d'échantillonnage. Une autre condition nécessaire à la décomposition du champ mesuré sur la base des HS est que les points de mesure soient distribués de façon homogène sur la sphère. Dans le cas contraire, la matrice des coefficients issus de la décomposition peut présenter un très mauvais conditionnement. Avec un échantillonnage très bas, on dispose les microphones selon un solide platonique autour de la source, mais pour des ordres plus élevés il faut employer une technique de pondération des microphones. Dans notre système, les 828 points de mesure se densifient à l'approche de l'axe de rotation (voir figure 13). On applique donc une correction pour chaque microphone selon sa position sur le maillage (en fait, sa position sur l'arc).

Une technique couramment employée est la pondération de Voronoï. Cet algorithme détermine les surfaces contenant l'ensemble des points les plus proches d'un autre ; on peut imaginer des zones circulaires grandissant toutes à la même vitesse autour de chacun des points et qui stoppent leur expansion lorsqu'elles en rencontrent une autre. Ainsi, les points de mesure présents dans des zones densifiées ont une surface de Voronoï plus petite et la pondération leur donnera une importance moindre. Une condition pour appliquer cette transformation est que la décomposition ne dépasse pas un certain degré N_{max} . Une décomposition au degré N engendre $(N + 1)^2$ dimensions. Sur un échantillonnage comportant P points *régulièrement répartis le long de la sphère de mesure*, le degré maximum de décomposition est $N_{max} = \sqrt{P} - 1$.

Dans le cas présent, avec 828 points de mesure, on obtient $N_{max} = 27$. En réalité, N sera bien inférieur dans le cas d'une grille de points non-équirépartis nécessitant un algorithme de régularisation. Dans le cas de l'algorithme de Voronoï, il est très difficile de le prédire. Cependant, ici, une certaine régularité de disposition des points est présente (une ligne hémisphérique balaye la sphère, voir figure 9). En rapprochant alors cet échantillonnage de celui étudié par Pomberger [14] on peut évaluer N à $N < 4(P + 1)^2 = 13$. On verra plus loin qu'il n'est pas utile d'atteindre ce degré.

Le programme utilisé ici calcul ces surfaces le long d'une sphère (pavage non plan) ; les valeurs représentent donc des angles solides qui sont utilisés pour obtenir le terme $d\Omega$ de l'équation

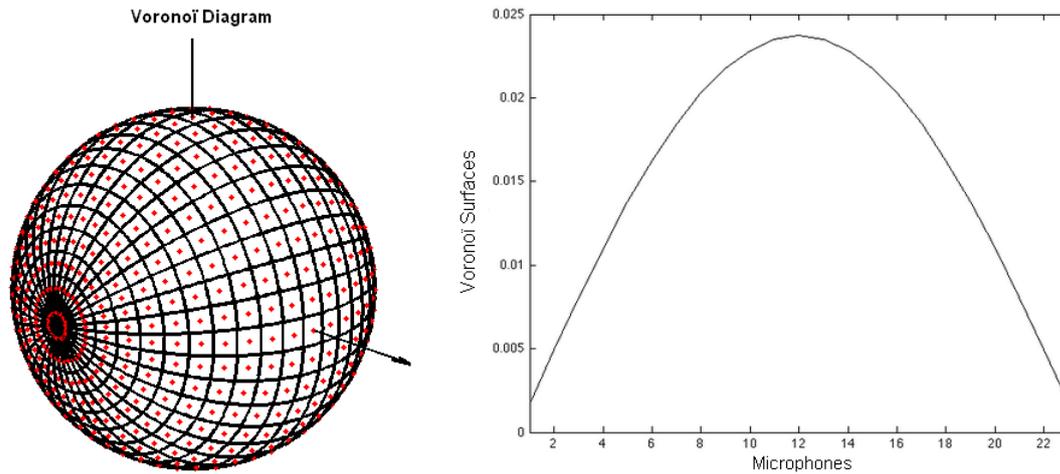


FIGURE 13 – Surfaces de Voronoï sur la sphère et selon une ligne de microphones

4.11. On vérifie en outre que la somme sur les 828 points des valeurs obtenues donne 4π , qui est la valeur en stéradians de l'angle solide couvrant tout l'espace.

Calibration des microphones. Il est évidemment nécessaire de connaître la réponse fréquentielle des microphones utilisés - dans les conditions des mesures - afin de compenser cette réponse pour obtenir une mesure juste. La procédure utilisée est classique : une enceinte de haute qualité est disposée au centre de la chambre anéchoïque, pointant dans la direction de chaque microphone grâce à la table tournante, l'arc étant à l'horizontale. La réponse fréquentielle des 24 microphones est obtenue en mesurant leur réponse impulsionnelle, toujours par la technique du balayage fréquentiel (qui est préférable aussi dans ce cas). Le filtrage consiste à modéliser un filtre sur l'inverse de la réponse fréquentielle ; plusieurs techniques ou fonctions (algorithme de Yule-Walker, fonction `fir2` de Matlab modélisant un filtre à réponse impulsionnelle finie, filtres "zero-phase") ont été testées autour d'un compromis stabilité/linéarité.

En effet, l'approche temps différé nous autorise des ordres élevés (et donc d'importants temps de calcul) mais la linéarité des filtres en phase est obligatoire. La méthode retenue est d'utiliser la fonction `fir2` qui synthétise un filtre à réponse impulsionnelle finie par échantillonnage de la réponse fréquentielle du filtre original. Cette fonction produit des filtres à phase linéaire et permet de travailler à des ordres très élevés (ici 1000, ce qui est compatible avec une approche temps différé). L'ondulation rémanente de la réponse fréquentielle des microphones est mesurée à $+2.4/ - 2$ dB.

Ces mesures étant effectuées dans les conditions de l'expérience, les défauts de la pièce ou des équipements ont donc été pris en compte (comme suggéré en 4.2).

5 Mesures du Global Source Radiator

5.1 Configuration

Les mesures de caractérisation du GSR ont d'abord nécessité la mise en place d'un important équipement audio pour la gestion des 12 canaux (carte son, convertisseurs, amplificateurs). Le

service Production de l'IRCAM dispose d'importants moyens dans ce domaine, et a pu fournir 12 voies de sortie et d'amplification rigoureusement identiques. Chaque haut-parleur du GSR est connecté à une voie d'amplification. La gestion des entrées/sorties s'opère grâce à une carte son entièrement numérique à 24 canaux (24 entrées microphones et 12 sorties sont nécessaires) pilotée par le logiciel Max/MSP (voir figure 9). Le programme de mesure élaboré sous Matlab permet d'effectuer les mesures de directivité du GSR selon 14 configurations en pilotant le mixage de la carte son : les 12 haut-paleurs un à un ("HPS"), puis ensemble et en phase ("OMNI"), et enfin un dipôle ("DIPO") reconstitué en alimentant en opposition de phase deux haut-parleurs diamétralement opposés sur la source (n°2 et 5) et en éteignant les autres. La configuration du montage correspond à la photographie figure 8.

Les procédures de mesure de ces configurations, aussi automatisées soient elles, se révèlent longues et fastidieuses. Les sweeps (sinus glissants) utilisés sont d'ordre 15, et produisent donc des signaux d'une durée de 683 ms³, ce qui est pourtant assez court - en temps de calcul et de stockage. Pour accélérer les procédures, il peut être envisagé de réduire l'échantillonnage spatial, mais celui-ci deviendra rapidement critique notamment vis-à-vis des mesures de directivité en hautes fréquences (> 3 kHz). Cependant, cette remarque sera à confronter avec les diverses limitations de la bande fréquentielle utile pour notre système.

Lors du positionnement et du retournement du GSR entre les phases de mesure, on observe un déplacement de son centre de ± 1 cm dans le plan vertical. Ce déplacement δ fixe alors une limite haute fréquence de raccordement des phases de mesure à λ tel que :

$$\delta = 2cm = \frac{\lambda}{2} \text{ soit } f_{l1} = 17 \text{ kHz}$$

La limite haute fréquence naturelle des haut-parleurs du GSR (12.5 kHz) y reste bien inférieure, et est clairement visible sur les résultats.

5.2 Résultats

Haut-parleurs individuels. Les figures de directivités⁴ obtenues pour les haut-parleurs excités un à un représentent comme attendu la directivité naturelle d'un haut-parleur électrodynamique (voir 4.3.2, 11.5 et figure 14 où un exemple avec un haut-parleur est montré⁵). Une tendance à l'isotropie est remarquée jusqu'à 500 Hz environ, puis le champ rayonné devient plus directif à mesure que la fréquence augmente.

On remarque à certaines fréquences des figures particulières, qui montrent la présence des couplages entre haut-parleurs, comme figure 15. En examinant la phase relative de ces champs, on remarque les partie opposées à la direction du haut-parleur sont déphasées de presque π

3. La durée des réponses impulsionnelles des haut-parleurs du GSR est estimée à 20 ms, ce qui justifie la méthode du balayage fréquentiel.

4. La nécessité d'afficher de nombreuses séries de mesures en trois dimensions a motivé la réalisation d'une interface graphique modulable et portable pour les équipes du laboratoire.

5. Sur ces tracés, le diamètre du "ballon" autour de la source représente l'intensité relative locale du champ (norme de la réponse fréquentielle linéaire) et la couleur la magnitude réelle ou la phase. Les niveaux ont été normalisés pour chaque configuration, puis pour toute la série.

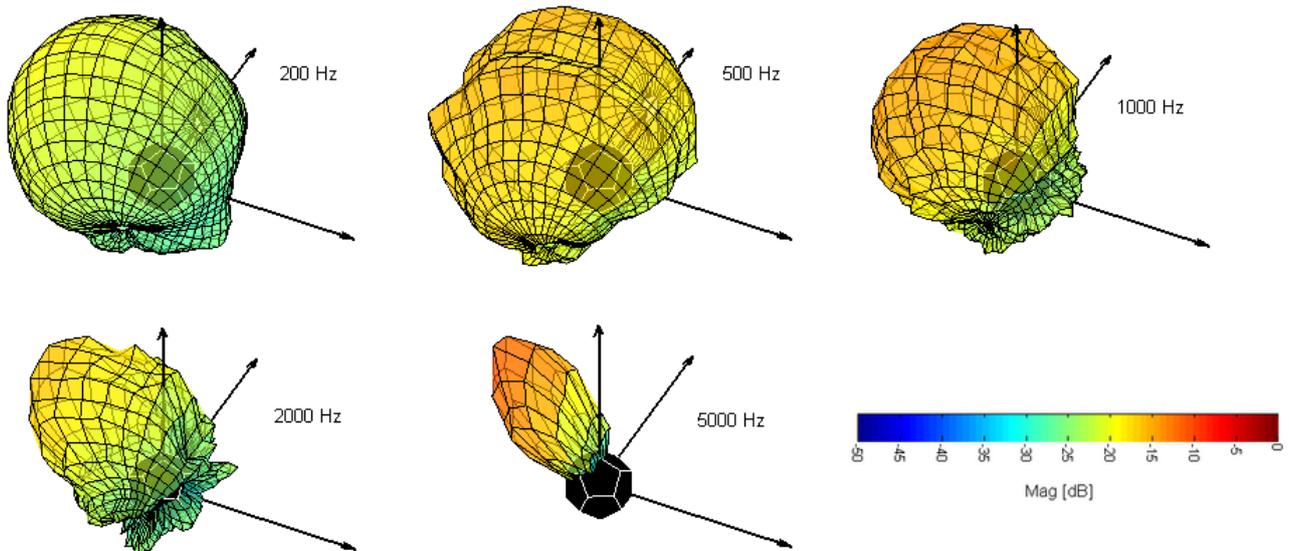


FIGURE 14 – Champ mesuré du GSR pour le HP n°7

radians avec celles-ci. Cela laisse penser qu'un couplage fluide de type "push-pull" a lieu à certaines fréquences entre deux haut-parleurs opposés. L'éventuelle harmonicité de ces fréquences n'apparaît pas évidente. Les fortes symétries de la source, la présence de systèmes résonants en contact vibratoire et le volume d'air commun à tous les haut-parleurs semblent être les causes de ces phénomènes. Zotter, Schmeder et Noisternig [22] précisent qu'un volume d'air individuel et non commun minimiserait les couplages entre les haut-parleurs d'une source sphérique. Pour une investigation plus poussée, on pourra utiliser un vibromètre laser afin de mesurer le déplacement exact de chaque haut-parleur ; néanmoins ces défauts sont entièrement pris en compte dans la description du comportement de la source, vue comme un système. Les calculs ultérieurs en tiendront donc compte implicitement.

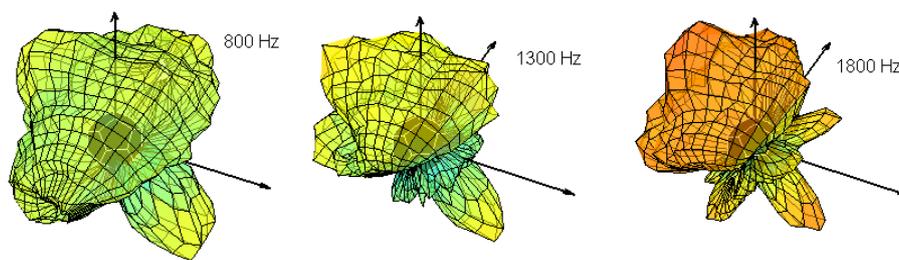


FIGURE 15 – Singularités du rayonnement, HP n°7

Les mesures de directivité fréquentielle des haut-parleurs permettent de connaître le comportement global de la source. En décomposant alors ces champs sur la base des harmoniques sphériques on peut ainsi coder le comportement de la source dans cet espace.

Configuration omnidirectionnelle. La finalité des mesures n'est pas de tester l'isotropie de la source lorsque l'on alimente les 12 haut-parleurs simultanément. Cette mesure permet de connaître les limites de fonctionnement de la source ainsi que d'en révéler quelques défauts. D'après le constructeur du GSR, la source respecte les normes d'isotropie (11.2), du moins

jusqu'à 5 kHz. C'est également ce que l'on constate au vue des mesures. Notons que la mesure de l'index de directivité et son calcul sont assez "flatteurs" pour une telle source ; les haut-parleurs n'étant pas alignés sur un plan horizontal, les mesures dans ce plan bénéficient de l'apport de nombreux haut-parleurs, ce qui explique la forme peu isotrope de la directivité observable à 5 kHz (figure 16) par rapport à l'index de directivité. Les réjections remarquées atteignent presque 10 dB entre certains points de l'espace autour de 2 kHz.

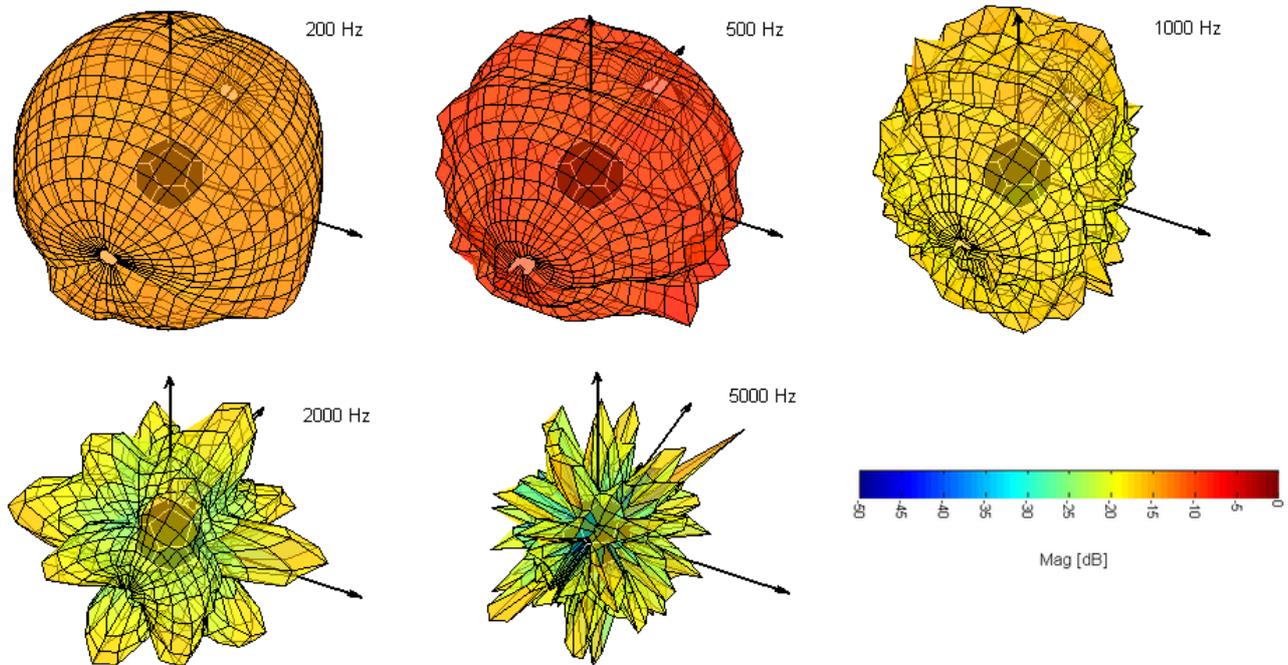


FIGURE 16 – Mesures pour la configuration omnidirectionnelle

Configuration pseudo-dipolaire. Cette configuration a permis de tester toute la chaîne de traitement des mesures car elle génère une figure de directivité particulière, orientée selon l'axe passant par les haut-parleurs 2 et 5 du GSR (à environ 10° du plan horizontal). Parmi les étapes cruciales, la recombinaison des mesures en la sphère de mesure complète est assez délicate en raison du nombre important de fichiers générés par les acquisitions. Cette configuration a aussi permis de vérifier les phases relatives dans le champ de pression (annexe, figure 37). Le résultat de l'excitation en opposition de phase des haut-parleurs 2 et 5 produit une figure intéressante, présentant des réjections de plus de 35 dB perpendiculairement à l'axe du dipôle (figure 17).

6 Mesures sur les instruments

6.1 Acoustique et perception des instruments à trous latéraux

La théorie du comportement de ce type d'instrument est aujourd'hui bien connue, mais difficilement exploitable par sa complexité. Cependant de nombreux travaux sur des modèles sont parvenus à prédire le rayonnement des instruments. Le mode de jeu et la constitution même des instruments à vent à trous latéraux leur procurent une directivité complexe et variable. Le rayonnement est dû à l'ensemble des sources acoustiques : les trous ouverts (pour une

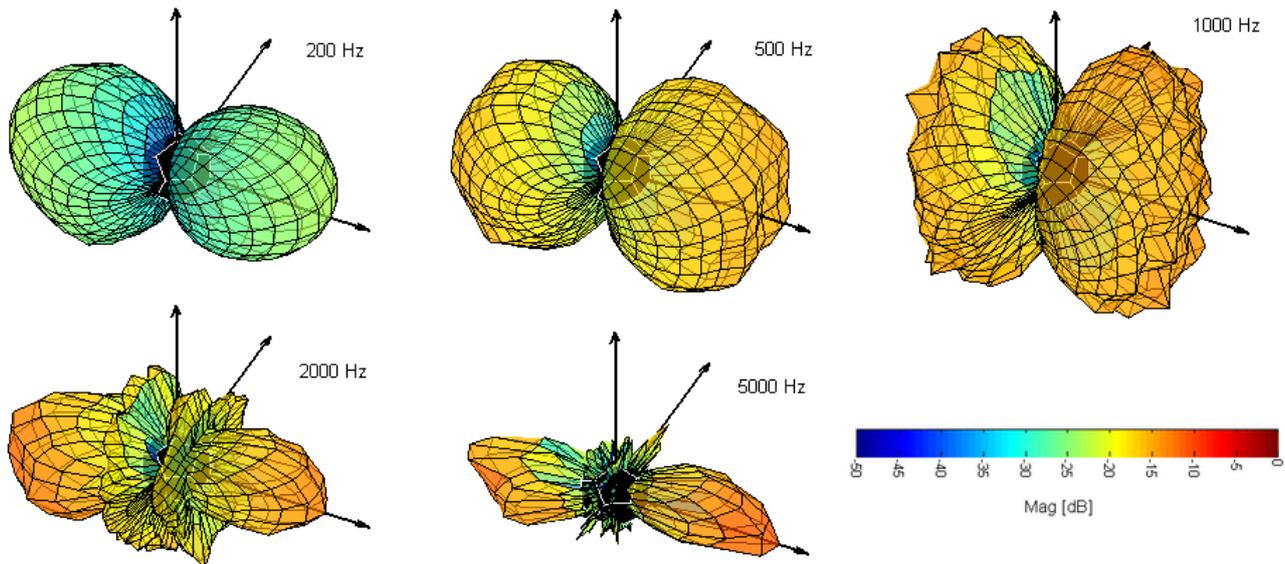


FIGURE 17 – Mesures pour la configuration pseudo-dipolaire

configuration de doigté donnée), le pavillon à l'extrémité de l'instrument et, éventuellement, l'embouchure, pour une flûte par exemple. Ces nombreuses sources, possédant leur directivité "individuelle" donnée par leur géométrie, vont interférer entre elles et ainsi produire des figures de rayonnement complexes et dépendantes de la longueur d'onde. De plus, il arrive qu'une même note puisse être jouée avec des doigtés différents, la nature des sources et la figure d'interférence seront alors modifiées. Le champ de l'instrument dépend donc du doigté *et* de la fréquence. Citons un exemple assez étonnant : la fréquence fondamentale d'un note émise par une flûte traversière sur son octave la plus basse n'est pratiquement pas audible dans l'axe de l'instrument [16].

La directivité de tels instruments est une caractéristique majeure permettant sa reconnaissance par un sujet ; elle doit être prise en compte pour le placement des instrument dans un ensemble et les prises de son. Les haut-parleurs classiques ne peuvent atteindre ce niveau de réalisme ; mais la directivité est une "dimension" qui augmente la qualité des systèmes de reproduction spatialisée (comme la Wave Field Synthesis) car l'effet de salle produit par une directivité spécifique ajoute au réalisme.

La directivité propre des multiples sources de l'instrument ne représente pas le mécanisme prédominant dans la directivité (sauf à très hautes fréquences). Toutes les sources de l'instrument sont synchrones puisqu'il n'y a qu'un seul mécanisme d'excitation : à une fréquence donnée, les différences de phase entre les sources ne varient pas. C'est cela qui produit les phénomènes d'interférences : dans une direction, des déphasages dus à la propagation vont s'ajouter aux déphasages existant et donner lieu à une variation de l'amplitude du champ rayonné dans cette direction. C'est ce phénomène qui prédomine dans la directivité des instruments.

De nombreux paramètres influent alors sur la directivité : le diamètre et la hauteur des

cheminées et des trous, la touche et les clés, l'orientation des trous autour du conduit. Le pavillon quant à lui n'intervient que dans le rayonnement des fréquences très élevées (il tient un rôle plus important chez les cuivres). Plus la fréquence de la note jouée augmente, plus le nombre de sources augmente. Si la fréquence augmente encore, les débits sortant par les trous chutent et la majeure partie de l'énergie est rayonnée par le pavillon, qui devient aussi de plus en plus directif. A ces hautes fréquences l'instrument est quasi-unidirectionnel. Bien qu'acoustiquement la distinction entre deux instrument à perce cylindrique (cor de basset) et conique (saxophone) soit forte, la différence visuelle la plus marquante (la courbure du conduit du saxophone) n'introduit théoriquement pas de changement majeur dans le comportement de l'instrument.

6.2 Mesures : configuration et hypothèses

Les mesures sur les instruments sont effectuées en chambre anéchoïque dans les mêmes conditions que pour le GSR, à l'exception de l'excitation : un haut-parleur est placé à l'embouchure de l'instrument. Pour éviter toute pollution des mesures par son rayonnement propre, il est confiné dans une enceinte et isolé au maximum (voir figure 18).



FIGURE 18 – Dispositif pour la mesure du saxophone et système excitateur ouvert

La question de l'excitation d'un instrument à vent est assez délicate. Il est difficile de connaître le comportement exact d'un haut-parleur lorsque celui-ci est "chargé" par l'impédance du conduit de l'instrument. De plus, la mise en place d'un microphone de référence à l'entrée de l'instrument juste après le haut-parleur s'est révélée impossible à cause des très forts niveaux de pression à cet endroit. Les couplages vibratoires avec le corps de l'instrument rendaient cette tâche encore plus difficile. Cependant, les mesures de directivité ne requièrent pas la connaissance de la fonction de transfert proprement dite entre l'entrée du conduit de l'instrument et la sphère de mesure. La réponse fréquentielle du haut-parleur (libre) étant considérée comme linéaire à ± 2 dB près, c'est le système global depuis la génération du sweep jusqu'au champ de pression le long de la sphère qui est mesuré.

Afin de mesurer tout autour de l'instrument, un montage adapté permet de retourner l'instrument, toujours autour d'un même point, pour tenir compte de la remarque du 4.3.4 sur

la décomposition en HS. Les trois lasers coïncidents de la chambre anéchoïque permettent de repérer un point sur le saxophone. L'orientation initiale des instruments à été choisie proche de la position que leur donnerait un instrumentiste ; l'extrémité du pavillon du saxophone est alignée avec le plan vertical, et celui du cor de basset avec le plan horizontal.

Les quatre doigtés choisis permettent d'obtenir des comportements de l'instrument assez variés : instrument au repos (baptisé ouvert, on ne touche à aucune clé), instrument fermé (on joue la note qui ferme le plus de trous), semi-fermé (la main gauche actionne ses clés - les trous de la moitié supérieure du conduit sont alors fermés), et une note aigüe obtenue en ouvrant quelques trous très proche de l'entrée de l'instrument. Les doigtés sont obtenus en bloquant les clés et les mécanismes afin de fermer les trous.

Notion de centre acoustique d'une source. On trouve dans la littérature plusieurs définitions du concept de centre acoustique d'une source [7]. Il faut se rappeler qu'une source de dimension finie génère une pression variant dans toutes les directions comme l'inverse de la distance pour peu que l'on en soit suffisamment loin. Deux définitions sont principalement utilisées. La première décrivant le centre acoustique comme le point de l'espace depuis lequel la pression varie de cette manière. La seconde le définit comme le point à partir duquel les fronts d'ondes sphériques semblent diverger. A distance proche de la source (ce qui est le cas ici) cette notion semble s'estomper ; remplacer une source étendue par un point source unique est d'autant plus flou que la source est étendue. Précisons que dans la plupart des cas, le centre acoustique change en fonction de la fréquence. Dans le cas d'un instrument à vent à trous latéraux, cette notion est encore plus floue puisque le point bouge avec le doigté, et donc aussi avec la fréquence de jeu.

Hypothèses et choix sur les mesures. Pour le déroulement correct des mesures et de la décomposition des champs mesurés sur la base des harmoniques sphériques, il est nécessaire, puisque l'on doit tourner la source, de la tourner autour d'un même point de l'espace. Afin que les mesures autour de la source se correspondent, il semble aussi important que le centre acoustique de la source (l'instrument) soit immobile lors de ses rotations. Il faudrait donc faire tourner la source autour de son centre acoustique de manière précise.

Trouver la position exacte de ce point est extrêmement délicat. Puisque les mesures sont effectuées sur plusieurs doigtés de l'instrument il serait nécessaire de changer la position initiale de l'instrument à chaque nouveau doigté. Cela rendrait alors impossible toute comparaison du rayonnement mesuré et de la projection en harmoniques sphériques puisque la position de la source finie aurait changé. En conséquence, un point arbitraire -mais non pris au hasard- est fixé comme "centre" de la source, autour duquel seront effectuées les rotations de celle-ci, et ceci pour tous les doigtés. Pour le saxophone, il est situé entre le pavillon et le conduit, environ à mi-expansion du pavillon. Pour le cor de basset (qui possède un conduit cylindrique plus simple et des trous plus réguliers) il est situé à hauteur du milieu du conduit sur l'axe de celui-ci (exactement à 42 cm de l'entrée)⁶.

6. Ces points sont en fait ceux sur lesquels sont centrés les graphiques de directivité disponibles dans ce document.

Une imprécision sur l'immobilité de ces points engendre une limite haute fréquence de validité du raccordement des phases de mesure (la même que dans le cas du GSR, cette imprécision étant due aux installations dans la chambre anéchoïque).

6.3 Résultats

Saxophone Comme attendu, le rayonnement des instruments en basses fréquences est globalement isotrope jusqu'à 400 Hz, ceci quelque soit le doigté. Ce comportement simple sera un avantage pour une approche temps-réel de la reproduction du rayonnement. Selon le doigté joué à l'instrument, le comportement diffère ensuite lorsque la fréquence augmente. Lorsqu'aucun trou n'est volontairement bouché (doigté libre), deux figures caractéristiques des instruments à vent apparaissent (voir figure 19).

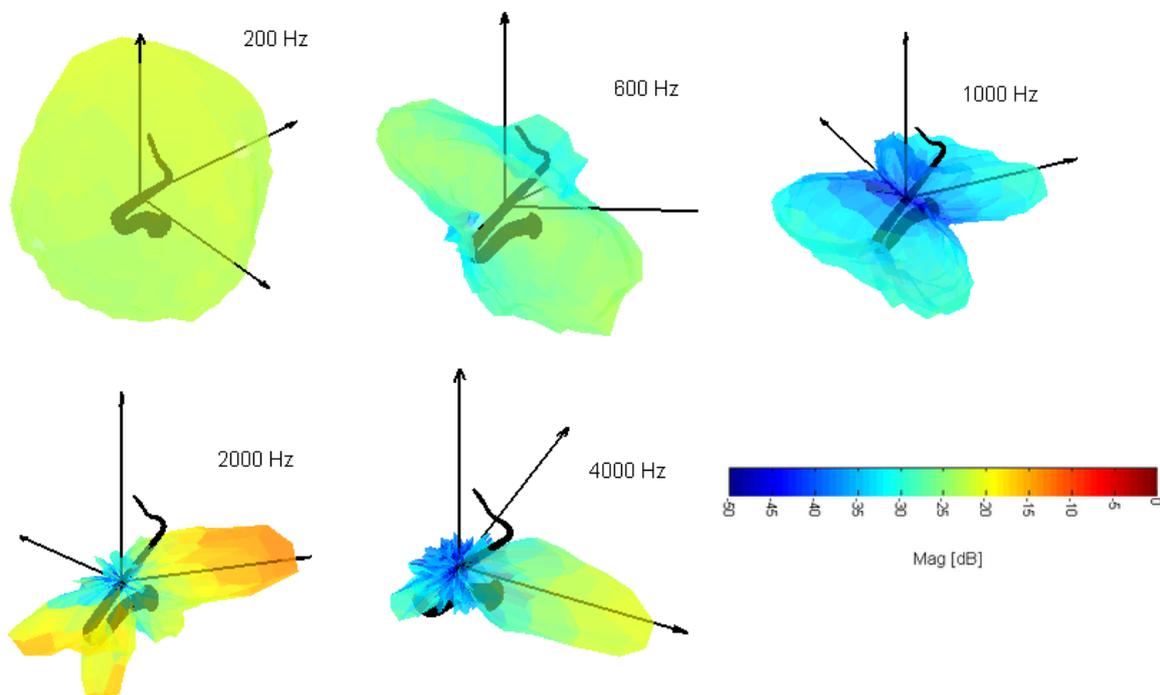


FIGURE 19 – Directivité du saxophone pour un doigté libre (B 246 Hz)

Vers 600 Hz le rayonnement prend la forme d'une couronne autour de l'instrument, dans un plan perpendiculaire à son axe principal. Puis, vers 1 kHz, cette couronne se dédouble. Un comportement similaire avait déjà été prédit et mesuré sur un hautbois [16]. On note également une légère asymétrie du rayonnement, avec quelques dB en plus du côté droit de l'instrument, côté où la majorité des trous sont présents. Lorsque la fréquence augmente encore, l'instrument devient de plus en plus unidirectionnel, et la majorité de l'énergie est rayonnée par le pavillon, ce qui était également attendu.

Pour le doigté fermé, la directivité passe progressivement de l'isotropie à un comportement unidirectionnel depuis le pavillon à mesure que la fréquence augmente (voir annexe 11.6). Dans cette configuration la symétrie du champ est respectée (la majorité des trous étant fermée, le conduit de l'instrument est symétrique).

Dans le cas du doigté semi-fermé, la directivité est d'avantage variable (voir annexe 11.6).

Des figures asymétriques, des couronnes ou même des dipôles apparaissent. Dans tous les cas, l'instrument devient unidirectionnel à partir de 2.5 kHz.

Enfin, pour le doigté aigu la directivité demeure très variable à partir de 500 Hz. On retrouve cependant le comportement en couronne vers 1 kHz. Des figures multipolaires assez complexes apparaissent ensuite vers 1.5 kHz, avant que le champ ne devienne unidirectionnel en hautes fréquences.

Cor de basset On retrouve globalement les mêmes comportements pour la directivité du cor de basset (détails en annexe 11.6). Toutefois, quelques particularités sont aisément observables. La caractère unidirectionnel du champ n'est réellement présent que dans la configuration du doigté fermé. Pour les autres configurations, le champ présente un maximum dans l'axe du pavillon mais aussi vers le bas, dans l'axe du corps de l'instrument. Soulignons également qu'à partir du moment où quelques trous sont ouverts, le champ se comporte de façon assez similaire quelque soit le doigté. A partir de 1.5 kHz la directivité présente de nombreuses zones d'extinction et varie beaucoup avec la fréquence. Ce comportement est probablement dû au fait que les trous du cor de basset ont des dimensions presque identiques ; les interférences provoqueraient donc des changements rapides de figure de directivité en une faible variation de fréquence.

La directivité du cor de basset apparaît plus complexe que celle du saxophone ténor, même si elles partagent quelques comportements similaires.

7 Exploitation des mesures, calculs des coefficients et encodage des signaux

7.1 Projection dans l'espace des harmoniques sphériques

La génération de la base des harmoniques sphériques réelles est effectuée sur la même grille d'échantillonnage que les mesures ; la même pondération de Voronoï est donc utilisée. D'après l'équation 4.11 les coefficients de la décomposition du champ peuvent être calculés, le terme $d\Omega$ correspondant à la somme discrète sur les élévations et les azimuts -de la sphère d'échantillonnage-, des angles solides calculés par l'algorithme de Voronoï.

Un coefficient complexe est alors calculé pour chaque "pattern" d'harmonique sphérique (soit $(N + 1)^2$ coefficients si N est le degré de décomposition). Mathématiquement, on ne peut projeter le champ que sur une base où les ordres sont complets (soit 1, 4, 9, 16, ... coefficients). Dans le cas présent, la projection est effectuée au degré 3, ce qui fait un total de 16 coefficients. Ce degré est indépendant du degré de reproduction des harmoniques par la source (étape suivante du projet).

Il est possible ensuite d'utiliser les coefficients pour recomposer le champ sonore à l'aide la même base (d'après l'équation 4.10). On peut ainsi obtenir le "résultat" de la décomposition du champ mesuré. Un exemple de champ obtenu pour le GSR est donné figure 20.

On peut remarquer que la directivité du GSR est bien reconstituée à 1 kHz ; la reconstruction agissant comme un "lissage", tel un filtre passe-bas spatial. Pour plus de niveau de détail, il faut augmenter le degré de décomposition. Plusieurs essais ont été réalisés, indiquant que le

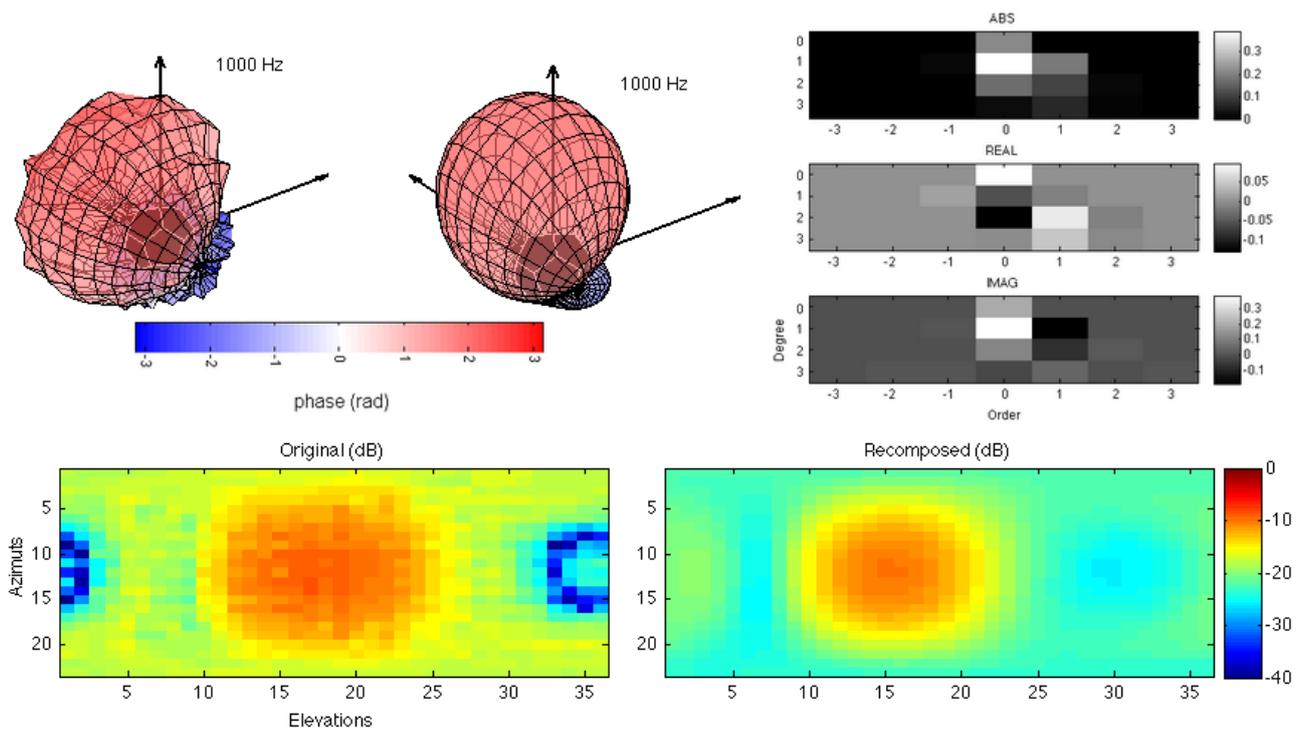


FIGURE 20 – Directivité du hp n°7 (mesurée et recomposée), à 1 kHz ; valeur des coefficients ; magnitude des champs de pression

degré doit très rapidement augmenter si l'on souhaite obtenir beaucoup de détails (aux environs de 10, ce qui engendre 121 coefficients). Les figures assez omnidirectionnelles (basses fréquences) sont très bien reconstituées. Plus la fréquence augmente, moins la décomposition est précise (ce qui est tout à fait normal pour une décomposition à un degré si faible) ; pour le GSR, le lobe unidirectionnel d'un haut-parleur à haute fréquence (5 kHz) est cependant bien respecté (tracés disponibles en annexe 11.7). Les valeurs de magnitude absolue sont plus difficilement reproduites mais la dynamique du champ et les réjections sont respectées.

Pour les instruments, le comportement est le même ; un exemple sur le saxophone en basses fréquences est donné figure 21.

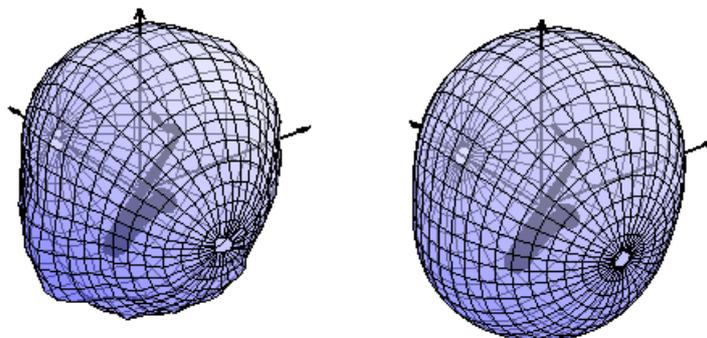


FIGURE 21 – Directivités mesurée (gauche) et recomposée (droite) pour le saxophone ouvert, à 200 Hz

La recomposition reproduit bien le champ rayonné pour toutes les directivités à caractère

isotrope majoritaire. La précision diminue naturellement lorsque la fréquence augmente, puisque les figures de directivités se complexifient (*e.g.* figure 22). On voit alors que pour certaines directivités, la décomposition au degré 3 n'est clairement pas suffisante.

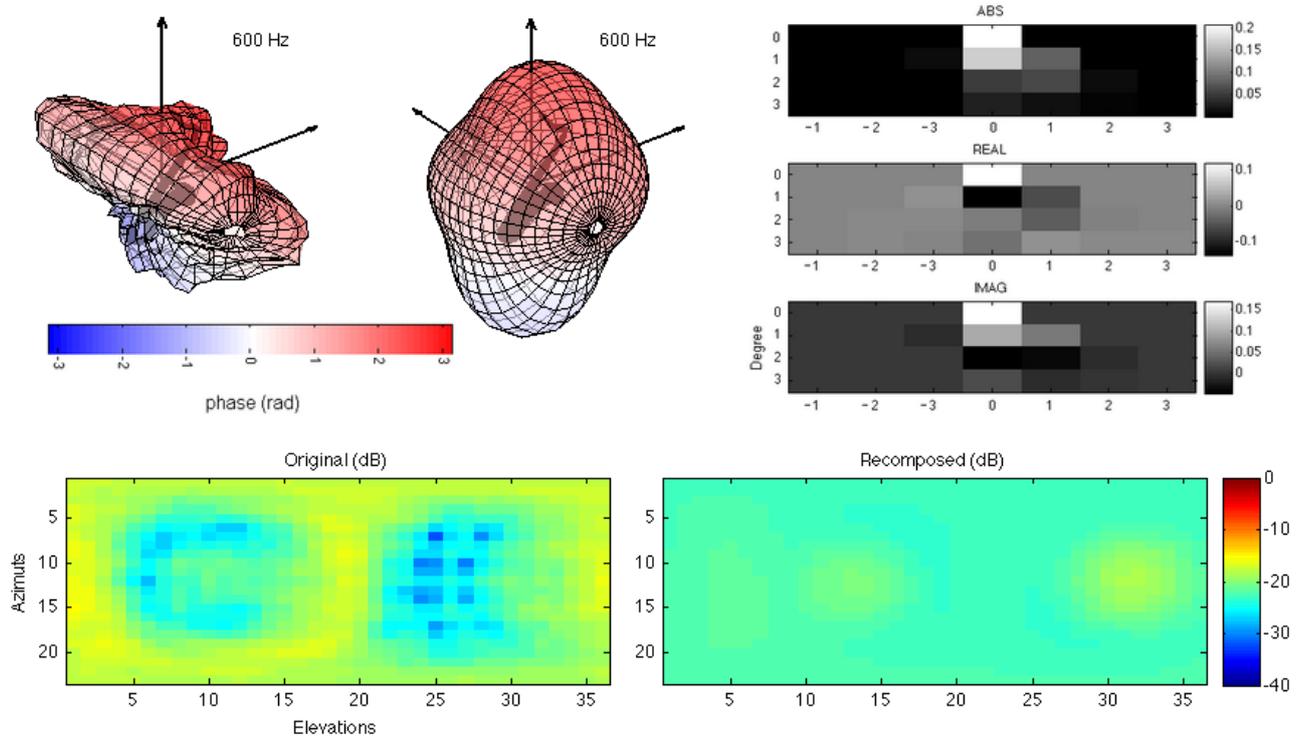


FIGURE 22 – Directivité du saxophone ouvert (mesurée et recomposée), à 600 Hz ; valeur des coefficients ; magnitude des champs de pression

La phase, quant à elle est très bien recomposée dans la grande majorité des cas. Bien évidemment, lorsque la phase du champ mesuré présente de nombreuses variations le long de la sphère d'analyse celle-ci ne peut être correctement restituée à cause du faible degré de décomposition. On note cependant que l'algorithme de décomposition a tendance à interpréter les champs complexes hautes fréquences avec des dipôles déformés, où la phase correspond à celle des harmoniques de degré 1. Il serait intéressant d'évaluer si cette modélisation des directivités en hautes fréquences se révèle pertinente d'un point de vue perceptif.

7.2 Système MIMO de contrôle de directivité

La projection du champ des $L=12$ haut-parleurs du GSR sur la base des harmoniques sphériques génère donc des séries de $(N + 1)^2$ coefficients complexes pour chaque haut-parleur, et pour chaque fréquence - N étant le degré de décomposition du champ. Ils sont alors écrit sous la forme matricielle :

$$\mathbb{C}(\omega) = \begin{bmatrix} {}^1A_0^0(\omega) & {}^2A_0^0(\omega) & \dots & {}^LA_0^0(\omega) \\ {}^1A_1^{-1}(\omega) & {}^2A_1^{-1}(\omega) & \dots & {}^LA_1^{-1}(\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^1A_N^{+N}(\omega) & {}^2A_N^{+N}(\omega) & \dots & {}^LA_N^{+N}(\omega) \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

Le degré maximal de reproduction des harmoniques obéit lui aussi à une limite. Elle est fixée par le nombre de degré de liberté de la source, c'est-à-dire le nombre de haut-parleurs. Avec 12 haut-parleurs la reproduction ne pourra se faire que jusqu'au degré 2 (9 patterns). En effet, il faut que le nombre de figures d'harmoniques sphériques à reproduire soit inférieur ou égal aux degrés de liberté de la source. Ceci s'applique uniquement dans le cas de sources basées sur des solides platoniques. Tout comme l'échantillonnage spatial des points de mesure, une régularisation devra être appliquée si la source possède une répartition spatiale quelconque de ses haut-parleurs. Le degré maximal de reproduction diminuera également. La décomposition est calculée au degré 3 en prévision d'un essai sur la source icosaédrique de l'IEM (Graz) ; avec ses 20 haut-parleurs, elle peut reproduire le degré 3.

La matrice \mathbb{C} est ensuite tronquée au degré $N = 2$; elle caractérise alors le système à 12 entrées et 9 sorties (Multiple Input Multiple Output) reliant le comportement propre des haut-parleurs de la source aux figures de directivité des harmoniques sphériques. Les filtres nécessaires à la reproduction de ces figures par la source s'obtiennent en inversant cette matrice. On a alors un système à 9 entrées (la commande des figures de directivités) et 12 sorties (les 12 canaux du GSR) contrôlant la directivité de la source selon les figures des harmoniques sphériques.

D'un point de vue numérique, quelques précautions sont à prendre lors de l'inversion de \mathbb{C} . Cette matrice n'étant pas carrée, on calcule en fait son pseudo-inverse avec la fonction `pinv` de Matlab. Cette fonction applique le pseudo-inverse de Moore-Penrose, unique solution \tilde{X}^{-1} de l'inversion d'une matrice X de taille $m \times n$ satisfaisant les conditions suivantes⁷ :

$$X \tilde{X}^{-1} X = X \quad (7.13)$$

$$\tilde{X}^{-1} X \tilde{X}^{-1} = \tilde{X}^{-1} \quad (7.14)$$

$$(X \tilde{X}^{-1})^H = X \tilde{X}^{-1} \quad (7.15)$$

$$(\tilde{X}^{-1} X)^H = \tilde{X}^{-1} X \quad (7.16)$$

où X^H désigne la transposée conjuguée de X . Cette méthode vérifie également que

$$\mathbf{a} = \tilde{X}^{-1} \mathbf{b}$$

est la meilleure solution au sens des moindres carrés de

$$X \mathbf{a} = \mathbf{b}$$

On calcule alors

$$\tilde{\mathbb{C}}^{-1}(\omega) = \text{pinv}(\mathbb{C}(\omega)) \quad (7.17)$$

La bande passante de ces coefficients a été réduite afin d'améliorer la stabilité de l'inversion. En effet, en hautes et surtout basses fréquences, le manque d'énergie de la source est compensé lors de la décomposition par de forts coefficients (processus "d'égalisation"). Ces fortes valeurs -complexes- aggravent le conditionnement de la matrice. La bande passante est réduite à 170 Hz - 14,6 kHz.

7. <http://mathworld.wolfram.com>

7.3 Encodage temps différé des signaux excitateurs

Cette opération consiste à filtrer les sinus glissants afin que leur reproduction par le GSR engendre la directivité de l'harmonique souhaitée. Les signaux $\mathbf{u}(\omega)$ sont calculés en temps différé, en filtrant le sinus glissant original. Les filtres numériques sont modélisés à partir de $\tilde{\mathbf{C}}^{-1}$. Pour chaque pattern de directivité, on calcule les filtres des 12 canaux de la source. Un total de 108 filtres sont créés (9x12, taille de la matrice $\tilde{\mathbf{C}}^{-1}$). On contrôle alors la source en sélectionnant le pattern désiré Y_N^{-N} . Cette opération peut s'écrire :

$$\mathbf{u}(\omega) = \tilde{\mathbf{C}}^{-1}(\omega) \begin{bmatrix} Y_0^0 \\ Y_1^{-1} \\ \dots \\ Y_2^{+2} \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

Les filtres sont toujours modélisés avec la fonction `fir2` de Matlab à un ordre élevé. Cette fonction permet d'assurer la stabilité du filtre dans les fréquences extrêmes : les modèles de filtres jouent un rôle de fenêtrage en bordure de la bande passante réduite de \mathbb{C} .

Les signaux sont ensuite encodés en un fichier audio multipistes. Pour améliorer le rapport signal à bruit des mesures, on prend soin de normaliser les signaux non pas un à un mais pour chaque fichier multipistes (sans quoi l'encodage serait faussé). Notons que cette étape de filtrage sera un point crucial lors de l'implémentation en temps-réel.

7.4 Reproduction du champ sonore à directivité contrôlée : approximations

7.4.1 Contrôles angulaire et radial

Les calculs de reproduction angulaire des figures de directivité ne sont rigoureusement vrais que sur la sphère d'analyse, c'est-à-dire à une distance précise de la source (ici 148 cm) ; or la source a un rayon de 31 cm. La sphère d'analyse et la sphère de reproduction sont distinctes. C'est le rôle des fonctions de Hankel de l'équation 4.5 (termes dépendant de r) de simuler la propagation de l'onde sur cette différence de distance. Dans notre étude, ces termes radiaux de propagation ont été ignorés par manque de temps ; leur implémentation reste délicate pour un tel système. Ils sont laissés à une étude ultérieure, mais on gardera en tête cette approximation dans l'interprétation des résultats. Le biais introduit ne devrait pas être trop gênant car ces termes ne représentent que l'expansion sphérique de l'onde : seul le niveau d'énergie rayonné ne sera pas exact, les figures de directivités sont conservées.

7.4.2 Limitations fréquentielles

Tout au long du processus, des imprécisions ou approximations fixent différentes limites fréquentielles en hautes ou basses fréquences. Au-delà de ces limites, la validité du processus global n'est plus garantie. En voici la liste :

- La chambre anéchoïque où sont pratiquées les mesures possède une fréquence de coupure à 70 Hz, ce qui signifie qu'en-deçà, l'environnement de mesure n'est plus considéré comme anéchoïque et l'on perd la condition aux limites concernant les sources externes pour la décomposition en harmoniques sphériques.

- La précision du positionnement des microphones sur l’arc impose une limite haute fréquence (voir 5.1).
- La même limite est atteinte pour l’alignement du centre des sources sur le centre de la sphère d’analyse ; la précision est également de ± 1 cm.
- La bande passante des haut-parleurs du GSR s’étend de 90 à 12500 Hz. Le constructeur précise qu’au delà de 9 kHz, la source ne délivrera plus sa puissance nominale et n’est plus omnidirectionnelle. Le haut-parleur excitateur des instruments a sensiblement la même bande passante.
- Les instruments étudiés ont des tessitures qui s’étendent de 90 Hz à 700 Hz. Cependant, les composantes spectrales ont des fréquences nettements supérieures. La question de la reproduction des partiels n’a pas été abordée ici, et concernera une approche temps-réel de la reproduction du rayonnement des instruments.
- Une source sphérique multi-haut-parleurs possède une limite d’échantillonnage spatial (analogue au théorème de Shannon en signal), la limite étant fixée par la distance entre les haut-parleurs de la source. Tout comme lors du traitement d’un signal temporel, si cette limite n’est pas respectée, des phénomènes de repliement (interférences spatiales) apparaissent, connus sous le nom de "spatial aliasing". Dans notre cas, la distance entre les haut-parleurs de la source est de 13,5 cm, ce qui implique que le contrôle ne peut être efficace qu’en-dessous de 1,26 kHz. C’est la limite la plus contraignante du système. Il faut modifier l’architecture globale de la source pour élargir cette limite (c’est pour cette raison que les sources à directivité contrôlable possèdent souvent plusieurs voies et sous-systèmes dédiés à une partie du spectre).

Ces limites sont regroupées sur le diagramme figure 23. Il apparaît une bande passante globale, entre 200 Hz et 1,26 kHz. Cependant, en ce qui concerne l’application musicale de ce système, on sait qu’en-dessous de 200 Hz, le rayonnement des instruments est isotrope. On peut donc étendre fictivement cette bande passante à 90 Hz. Dans une approche temps-réel, les comportements aux fréquences inférieures à 200 Hz pourront être interprétés comme omnidirectionnels.

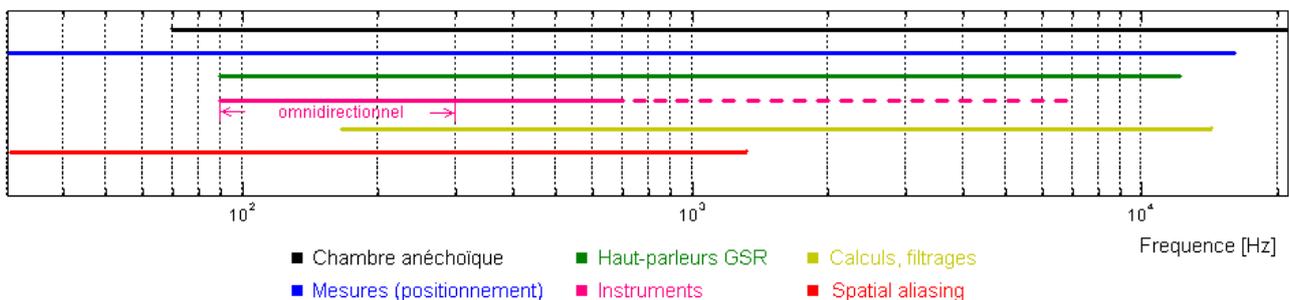


FIGURE 23 – Plages fréquentielles autorisées des processus

8 Mesure et évaluation du résultat

8.1 Procédure de mesure

L'environnement des mesures est parfaitement identique à celui des séries précédentes, les sweeps étant simplement remplacés par les signaux $\mathbf{u}(\omega)$ calculés. De manière identique à la mesure des réponses individuelles des haut-parleurs, à chaque positionnement du système de mesure, les 9 configurations sont "jouées" par la source, une à une (au degré 2, les harmoniques sphériques sont composées de 9 patterns qui sont les configurations mesurées, voir illustration figure 11).

Le dépouillement des mesures et le traitement restent bien évidemment identiques ; le calcul de la réponse impulsionnelle s'effectue avec le sinus glissant original, car le système entier (encodage et restitution) est à considérer. On obtient alors les cartes de directivité de la source reproduisant les 9 premiers patterns des harmoniques sphériques réelles.

8.2 Résultats

Les patterns de degré 0 et 1 apparaissent correctement reproduits sur une plage de fréquence de 150 Hz à 1,5 kHz environ. Le degré 2 ne se forme correctement que vers 400 Hz. Un exemple de mesure des 9 patterns à la fréquence de 1 kHz est donné figure 24 (l'échelle de couleur est la même que précédemment), à comparer avec les fonctions théoriques figure 11. On peut observer que les niveaux de pression sont assez bien équilibrés entre les patterns ; l'algorithme d'encodage et la normalisation en énergie des harmoniques sphériques permet une égalisation relative des patterns. Le comportement de la source doit lui aussi être "compensé" (résonances, couplages, tous les défauts ont été mesurés). On peut comparer en un même point de la sphère le spectre relevé pour le pattern omnidirectionnel (degré 0) et pour la configuration 'OMNI' initiale (le résultat est présenté figure 25).

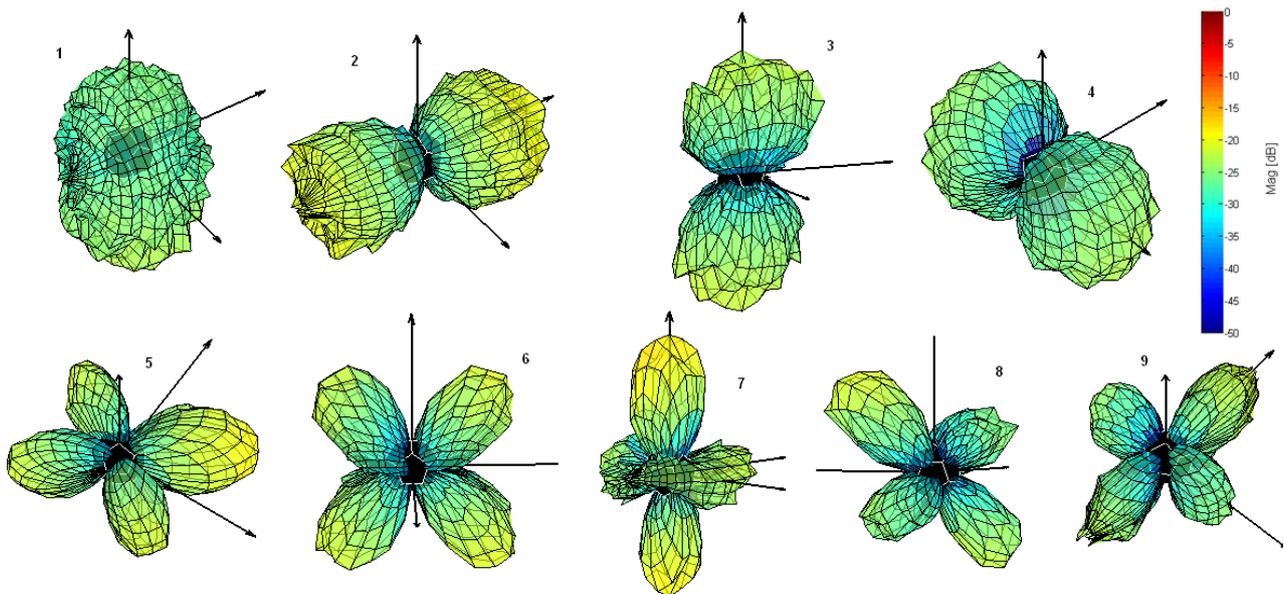


FIGURE 24 – Mesures de directivité la source reproduisant les patterns d'harmoniques sphériques, à 1 kHz

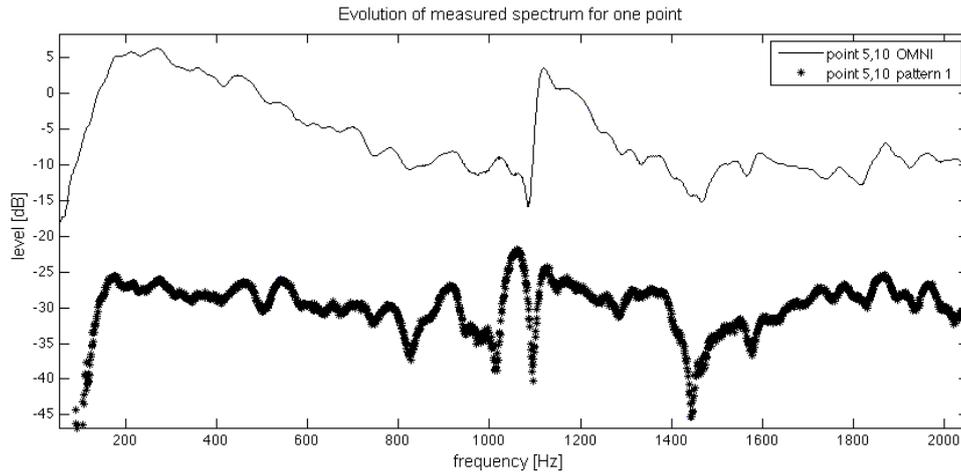


FIGURE 25 – Evolution du spectre mesuré au point (5,10) pour les configurations 'OMNI' et pattern 1 (reproduction de l'harmonique de degré 0) du GSR

Le processus tend bien à égaliser le comportement de la source, même si quelques accidents subsistent. Il est également intéressant de regarder les réjections de niveau entre les lobes de directivité des figures. D'un point de vue perceptif c'est à cela qu'un sujet sera sensible en conditions réelle ; la directivité est une grandeur relative, il est donc important de quantifier les réjections. Elles atteignent en moyenne 25 dB, parfois plus. Des exemples de cartes de niveaux relatifs (linéaires) sont fournis en annexe 11.8 ; elles permettent de vérifier que les lobes de directivité sont bien orientés dans l'espace.

Outre l'observation des réjections, il serait intéressant de trouver un critère objectif de comparaison des figures théoriques et restituées, et de l'associer à un critère perceptif. Des recommandations seront tirées de ce projet, mais il sera nécessaire de les relier à la perception de la directivité. Cette problématique est aux avant-postes des recherches sur la directivité des sources sonores. D'autres projets similaires s'y attelleront certainement.

D'un point de vue statistique, l'erreur quadratique moyenne entre les figures théoriques et mesurées a été calculée (de manière discrète) pour des valeurs de champ linéaires et normalisées (la moyenne est effectuée sur les $P = 828$ points de la sphère de mesure) :

$$Err(\omega) = \frac{1}{P} \sum_{\theta} \sum_{\phi} \left(\|Y_n^m(\theta, \phi)\| - \|\tilde{Y}_n^m(\theta, \phi, \omega)\| \right)^2 \quad (8.19)$$

où $Y_n^m(\theta, \phi)$ représente l'harmonique sphérique réelle de degré n et d'ordre m et $\tilde{Y}_n^m(\theta, \phi, \omega)$ la pression du champ reproduit par le GSR. Le résultat est donné figure 26 en fonction de la fréquence. Cette courbe est à interpréter avec prudence, en effet, la grandeur calculée n'a qu'une valeur statistique afin de voir l'évolution fréquentielle de la précision de la reproduction et de mettre en relief d'éventuelles limites.

Néanmoins, elle permet effectivement d'observer une fréquence au delà de laquelle l'erreur devient globalement croissante. On la situe autour de 1340 Hz. Cette limite semble correspondre à la fréquence d'aliasing spatial, évaluée théoriquement à 1260 Hz ; les erreurs sont toutes globalement croissantes passée cette limite. Sur les tracés de directivité, cette limite s'observe aussi par

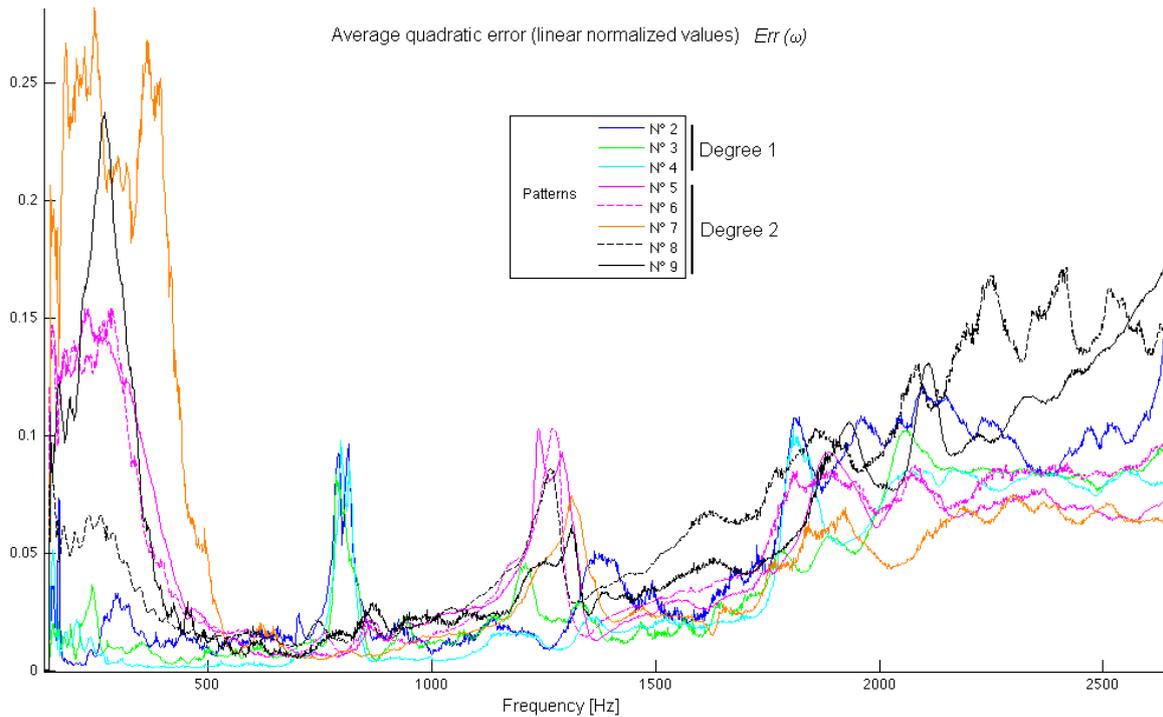


FIGURE 26 – Evolution fréquentielle de l'erreur quadratique moyenne entre les figures théoriques et reproduites

des déformations des patterns (tout en restant symétriques), la disparition ou l'apparition de certains lobes. La courbe d'erreur semble alors confirmer la limite haute fréquence du système, qui ne dépend donc que de l'architecture de la source.

En basses fréquences, l'établissement des figures est plus tardif pour le degré 2 que pour le degré 1 (les dipôles sont correctement reproduits dès 170 Hz). Les forts niveaux d'erreur en-dessous de 500 Hz correspondent à des figures où certains lobes sont absents. Le pattern 7 tend vers l'isotropie jusqu'à 400 Hz, ce qui explique les valeurs d'erreurs dans ce cas. Les causes de ces erreurs en basses fréquences n'ont pas été déterminées. L'isotropie prononcée du rayonnement des haut-parleurs à ces fréquences est peut-être en cause.

Les courbes présentent deux accidents entre 770 et 830 Hz pour le degré 1 (très groupé) et entre 1250 et 1320 Hz pour le degré 2. Il est tout à fait remarquable de voir que les courbes d'un degré passent par un minimum local lorsque l'autre atteint ce pic d'erreur. Ces deux fréquences sont à rapprocher des singularités remarquées dans le comportement seul des haut-parleurs du GSR (voir figure 15) ; ces pics d'erreur coïncident avec les fréquences de deux singularités, autour de 800 et 1300 Hz. Cela peut suggérer que ces phénomènes de couplage n'ont finalement pas été pris en compte dans le processus, ou qu'ils se produisent avec des niveaux trop élevés, qui nécessiteraient un contrôle actif particulier pour les éviter.

Sur la figure 26 la courbe pour le degré 0 (monopole) n'est pas représentée. Le calcul donne des erreurs trois fois plus élevées que celles présentées (à partir de 800 Hz). Comme suggéré plus haut, ce calcul d'erreur, moyenné sur les champs linéaires normés, est très défavorable aux configurations isotropes. Le calcul a aussi été effectué dans le cas où tous les haut-parleurs sont

alimentés par le même signal (configuration 'OMNI'). Le résultat est sensiblement le même, notons toutefois que l'erreur est réduite pour la reproduction codée du degré 0, ce qui était attendu. Pour obtenir une source omnidirectionnelle ce codage semble meilleur que la solution 'OMNI'.

Une caractéristique importante de ces figures est leur respect des phases relatives telles que les harmoniques sphériques les présentent. D'après les mesures elles sont correctement respectées; leur affichage peut se révéler parfois délicat notamment si l'alignement temporel n'est pas réalisé pour certains points. Un exemple est donné figure 27, il est à rapprocher des tracés de la figure 11. La capacité de notre système à respecter les phases dans ces figures de directivité permettra un réalisme accru lors de la reproduction de rayonnement d'instruments. En effet, les différentes phases sont essentielles dans la décomposition en harmoniques sphériques afin de créer des figures de directivités complexes.

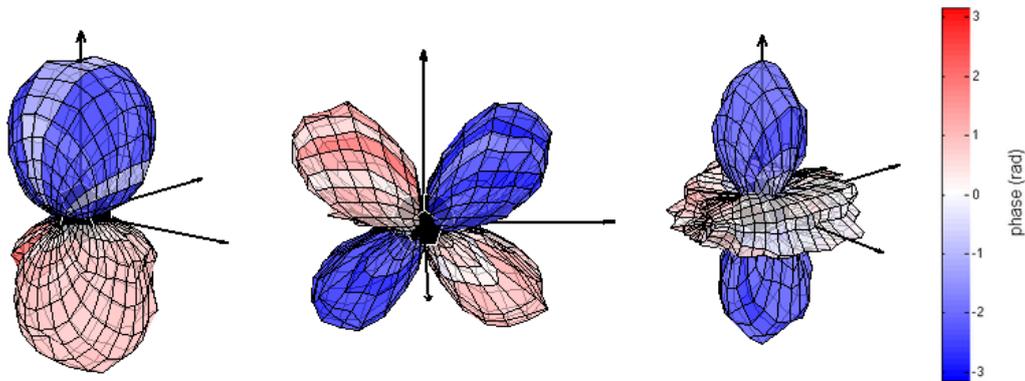


FIGURE 27 – Répartition des phases pour les mesures des patterns 3 (400 Hz), 6 (650 Hz) et 7 (650 Hz)

8.3 Reproduction des harmoniques sphériques : conclusion

D'après les mesures, la phase de reproduction des figures d'harmoniques réelles par le GSR est validée jusqu'à 1,3 kHz, avec toutefois des incertitudes pour quelques figures en-dessous de 400 Hz. Les défauts de la source sont en partie compensés par le traitement; une étude plus approfondie de ces défauts permettrait l'adjonction à ce système d'une correction (traitement actif par exemple) afin de les éliminer totalement.

L'erreur calculée précédemment permet de vérifier les limites du système, sans toutefois explorer tous les aspects qualitatifs des mesures. Tirer d'avantages de conclusions serait prématuré sans un indicateur plus perfectionné.

9 Discussions

Il semble opportun de tirer ici quelques critiques et recommandations issues des points problématiques rencontrés lors du travail effectué.

Source. Il a été déterminé que l'élément limitant le plus la bande passante du système complet était la source électroacoustique elle-même. La fréquence d'aliasing spatial impose donc une modification de l'architecture de la source. On peut alors subdiviser le système pour des gammes de fréquences (comme pour la *Timée*), mais cela remettrait en cause le caractère ponctuel de la source dans l'espace, nécessaire à cette analyse.

Dans son étude sur les sources à base de solides platoniques, Tarnow [18] a montré que les dissemblances entre haut-parleurs d'une même source peuvent briser des symétries dans son comportement acoustique. Malgré une approche de type système global de la source, ses défauts (couplages internes, résonances, linéarité de bande passante, *etc*) ne sont pas totalement compensés par l'implémentation. L'implémentation développée ici nécessite donc une connaissance plus approfondie de la source reproductrice.

Mesures. L'excitation des instruments à étudier est assez délicate. On prendra garde à bien isoler le rayonnement arrière du haut-parleur excitateur tout en assurant un niveau suffisant (le rapport signal à bruit n'est toutefois pas fondamental pour les opérations ultérieures). A fort niveau, il est probable que le haut-parleur n'opère plus dans un domaine linéaire, d'autant plus qu'il se trouve chargé par l'impédance que représente le conduit de l'instrument. Une mesure de la pression à l'entrée de l'instrument n'est pas aisée mais pourrait être utile. Une attention particulière sera donc portée au système excitateur *in situ*.

Dans une optique d'adaptation de ce système à d'autres instruments, les campagnes de mesures pourraient se multiplier (d'avantage de doigtés sont aussi envisageables) et il serait judicieux de réduire le temps de mesure (et de dépouillement) actuel. Il apparaît plusieurs pistes pour cela : la réduction de la finesse du maillage des points de mesure, qui serait en concordance avec une réduction de la bande passante, ou même la mise en place d'un dispositif sphérique fixe permettant des relevés de pression "instantanés" (diminuant par la même occasion les incertitudes de répétabilité d'excitation de la source). Ces structures commencent à apparaître ; elles permettent d'enregistrer des phénomènes non répétables (comme la voix d'un chanteur) très rapidement. Une étude du coût d'une telle structure est envisagée à l'IRCAM.

Traitement des données. La connaissance du gain global du système et des pondérations introduites par les nombreux traitements n'est pas primordiale pour une application musicale et en conditions réelles du système (des ajustements seront nécessairement effectués et des possibilités de réglages seront offertes dans une approche temps-réel). Il serait toutefois intéressant d'affiner les techniques de traitement de signal mises en oeuvre ici et de les adapter au mieux aux données traitées (filtrages, transformées diverses, observations des grandeurs, *etc*). Cette étape sera un préambule au passage vers une implémentation en temps-réel du système (reproduction "en direct" d'un instrument joué).

Résultats. La directivité est une propriété spatiale qui n'est pas toujours aisément observable ou quantifiable. On prendra garde aux grandeurs que l'on veut observer et à leur méthode d'affichage (formats, dynamiques). Ce sont les applications et le contexte d'utilisation du système et de ses performances qui doivent orienter les choix des observables. Le choix des critères d'évaluation des performances est tout aussi délicat. Il n'existe pas de méthode permettant d'évaluer les performances d'un tel système acoustique. Une composition habile parmi des critères physiques, statistiques et perceptifs semble nécessaire.

10 Conclusion et perspectives

La dernière phase du déroulement initialement prévu du projet n'a été qu'abordée, par manque de temps. La seconde phase d'implémentation (afin de reproduire la directivité mesurée des instruments) reste à accomplir. Toutes les phases antérieures ont été validées ; les difficultés et les limites inhérentes à ces étapes ont été clairement identifiées. Le système permettant de reproduire des figures de directivité correspondant aux premières harmoniques réelles a été mis en place au sein du laboratoire. Les calculs en vue de la dernière étape ont été entrepris. Beaucoup de résultats et de relevés de mesures sont maintenant à disposition pour poursuivre et améliorer le système actuel.

L'approche temps-réel des implémentations s'inscrit dans la continuité de ce projet. Elle permettra l'application de ce système en contexte musical, notamment dans le cadre du projet musical de Marco Stroppa (Donaueschingen 2010). La détection du jeu du musicien alliée à la connaissance du comportement de l'instrument et de la source reproductrice engendrera une reproduction amplifiée particulièrement fidèle et réaliste du son de l'instrument.

Le présent travail demande à être poursuivi au sein des équipes du laboratoire concernées par la problématique de la directivité. De nombreux projets et stages peuvent en poursuivre le développement. D'autres approches peuvent aussi être envisagées, notamment la question de la perception de la directivité des sources sonores et de tels systèmes de reproduction.

11 Annexes

11.1 Synthèse du Rapport d'Activité 2007 de l'IRCAM

1. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Directeur : Hugues Vinet

Le département Recherche et développement de l'Ircam mène des recherches scientifiques et technologiques pluridisciplinaires en rapport avec les problématiques musicales, dans le contexte de la création contemporaine. La mise en œuvre de ces travaux suit une organisation thématique par équipes spécialisées. Ces recherches débouchent sur le développement d'environnements logiciels, principalement destinés aux compositeurs et aux professionnels de la musique et du son et diffusés notamment dans le cadre du Forum Ircam. Cette dynamique de recherche tournée vers les problématiques de la création contemporaine, selon des modalités constamment réévaluées, donne lieu à la consolidation d'une expertise originale autour des sciences et technologies du son et de la musique, qui fait l'objet de différentes formes de structuration et collaborations avec des institutions et partenaires industriels aux échelles régionale, nationale, européenne et internationale.

C'est ainsi que le département R & D de l'Ircam a été récompensé par le prix de l'ANRT décerné aux présentations des projets soutenus par l'ANR à l'occasion du grand colloque STIC 2007 qui s'est tenu en novembre 2007. Dans le « webometrics ranking of world universities » réalisé par le CSIC en Espagne, l'Ircam se classe au 103^e rang mondial dans le top 1000 des instituts de recherche dans le monde, toutes tailles confondues¹. Ce classement original mesure l'importance de la publication par le Web basé non pas sur le nombre de page visitées mais sur la performance globale et la visibilité de chaque institut. Enfin le conseil scientifique de l'Ircam instance statutaire composée d'experts internationaux reconnus, présidé par le professeur Frédéric Truchetet, a souligné que « son appréciation globale sur l'activité de recherche menée à l'Ircam est très positive ». Il note une « progression très significative de son rayonnement scientifique (...), une participation remarquable à des projets européens ou financés par l'ANR.(...) ; le laboratoire de recherche de l'Ircam est un groupe incontournable et de référence au niveau international dans le domaine de la recherche musicale. »

Après un point général sur les aspects de gestion et l'évolution des liens institutionnels du département, cette synthèse se concentre sur les principaux travaux effectués et avancées obtenues au cours de l'année 2007, selon la structuration des activités en quatre grandes orientations thématiques transversales définie pour la période en cours.

Organisation et gestion des activités, liens institutionnels

Renouvellement des moyens et effectifs

Projets nationaux et européens

Compte tenu de l'extension importante des activités du département, à travers une part toujours croissante de ressources extérieures (le volume d'activités a plus que triplé au cours des 12 dernières années), l'attention des tutelles de l'Ircam a été attirée dans différents cadres sur le nécessaire renforcement de sa structure pérenne (personnel permanent). Ce constat n'a pas pour le moment trouvé de réponse. Les moyens alloués au département, issus des subventions de base de l'Ircam, ont été au contraire en baisse depuis plusieurs années dont, en 2007, une réduction de la subvention recherche issue de la MRT, accentuant le

¹ http://www.webometrics.info/top500_r&d.asp

déséquilibre constaté. Une part de plus en plus importante des ressources existantes est donc consacrée à la recherche de moyens extérieurs et à la gestion des contraintes qui leur sont liées (réunions, rapports, évaluations, suivi administratif). Au-delà de la poursuite des projets existants, l'activité dans ce domaine a porté en 2007 sur le démarrage de nouveaux projets : Sample Orchestrator (bases de données d'échantillons sonores, traitement par le contenu, aide à l'orchestration), VoxStruments (modèles physiques d'instruments à vent contrôlés par la voix), EarToy (interaction corps/espace/son), SID et Minet (réseaux européens thématiques sur l'interaction sonore et la métrologie). Il est à noter que la plupart de ces projets fédèrent les travaux de plusieurs équipes et contribuent ainsi à la coordination et à la cohérence générales. Les actions entreprises en vue du montage de nouveaux projets ont été poursuivies et ont abouti au démarrage, début 2008, des projets suivants : Same (nouveaux modes d'interaction musicale), Affective avatars (contrôle expressif de la voix), Corpus prosodique de la langue française, Quaero et Disco (indexation multimédia). Cet effort, auquel sont appelés à contribuer l'ensemble des chercheurs du département, permet le développement de la masse critique nécessaire à l'Ircam pour conserver, dans un contexte de concurrence accrue, son statut de centre de recherche de référence au niveau international dans le domaine des sciences et technologie de la musique et du son. Il a notamment été récompensé par le prix de l'ANRT décerné aux présentations des projets de l'Ircam soutenus par l'ANR à l'occasion du grand colloque STIC 2007.

Valorisation industrielle

Si la gestion de projets de R & D dans le cadre de programmes nationaux et européens représente l'essentiel des financements extérieurs du département, le potentiel de valorisation de son expertise dans l'industrie reste encore insuffisamment exploité. Ce constat avait motivé l'intégration en 2006 d'une cellule de valorisation de la recherche, placée sous la responsabilité de Christophe Martin de Montagu. Ses missions ont été recentrées en 2007 sur les aspects de valorisation industrielle, avec pour principal objectif de systématiser les cessions de licences des résultats issus des recherches dans l'industrie, à commencer par les logiciels et matériels pour la production musicale, sonore et audiovisuelle. À cet effet a été constituée au cours de l'année une base d'information recensant, selon différents critères, les éléments de technologie issus des travaux de recherche et susceptibles d'être licenciés à des sociétés extérieures. À la suite du départ de Christophe Martin de Montagu à l'été 2007, cette mission est assurée depuis décembre par Frédérick Rousseau.

Renouvellement des doctorants

Le renouvellement des doctorants représente également un enjeu important pour celui des recherches de l'Ircam. Quatre d'entre eux ont soutenu leur thèse en 2007 : Jean Bresson (Représentations musicales), Terence Caulkins (Acoustique des salles), Arie Livshin (Analyse/synthèse), Clara Suied (Perception et design sonores). Nous accueillons depuis la rentrée 2007 quatre nouveaux doctorants : Tommaso Bianco (bourse Edite), Ivan Cohen (Cifre, Ellipse-Audio), Joseph Sanson (bourse Edite) et Fivos Maniatakos, qui est le premier doctorant à être soutenu dans le cadre d'un mécénat industriel avec l'aide de la Fondation Lagardère.

Liens institutionnels

UMR STMS Ircam-CNRS

L'année 2007 marquait le démarrage d'une nouvelle période quadriennale pour l'UMR STMS, dont la principale évolution a concerné son extension à 7 collaborateurs de l'Ircam (Joël Bensoam, Frédéric Bevilacqua, Nicolas Misdariis, Geoffroy Peeters, Axel Roebel, Norbert Schnell, Patrick Susini) et à deux équipes de recherche : Perception et design sonores, et Interactions musicales temps réel, nouvelle dénomination pour l'équipe

Applications temps réel, qui marque la spécificité de son domaine de recherche. Le laboratoire a bénéficié du soutien du CNRS sous différentes formes, notamment pour une contribution au projet d'équipement de l'espace de projection avec un système WFS (cf. infra), et à travers le post-doc de Maylis Dupont en analyse des pratiques musicales et la délégation de Georges Bloch en Représentations musicales. Suite au départ à la retraite des principaux chercheurs SHS (notamment Jacques Theureau fin 2007), l'attention de la direction du CNRS a été portée sur le nécessaire renouvellement des affectations en postes de chercheurs et d'ingénieurs.

Conseil scientifique

Conformément à sa périodicité biannuelle, le Conseil scientifique de l'Ircam s'est réuni les 20 et 21 décembre dans une configuration renouvelée par l'arrivée de nouveaux experts, sous la présidence du professeur Frédéric Truchetet (cf. annexe au rapport détaillé). L'évaluation des activités a été globalement très positive : « Le Conseil scientifique tient à souligner que son appréciation globale sur l'activité de recherche menée à l'Ircam est très positive. Il note une progression très significative de son rayonnement scientifique concrétisé par une augmentation sensible du nombre de publications dans des revues et des conférences internationales à comité de lecture et par une participation remarquable à des projets européens ou financés par l'ANR. Incontestablement le laboratoire de recherche de l'Ircam est un groupe incontournable et de référence au niveau international dans le domaine de la recherche musicale. Les interactions internes entre ses nombreuses équipes de recherche sont nombreuses, elles témoignent de la vitalité et du dynamisme de la structure et de ses membres. Un des atouts majeurs de l'Ircam est sa conjugaison entre une vie culturelle au plus haut niveau (créations musicales, accueil de compositeurs et d'instrumentistes) et une activité de recherche scientifique reconnue par la communauté internationale ».

Principaux travaux de recherche et de développement

La synthèse des principaux travaux de recherche est présentée ci-après, selon les quatre orientations thématiques transversales rappelées plus haut, elles-mêmes subdivisées selon les thèmes de recherche musicale structurant l'activité des équipes dans leur relation avec les enjeux musicaux.

Modélisation pour la synthèse et le traitement sonores

Modèles de signaux

Plusieurs résultats importants ont été produits dans ce domaine : amélioration de l'estimation des paramètres en analyse sinusoïdale (modèle additif), estimation de fondamentales multiples (thèse de Chunghsin Yeh), qui a obtenu le deuxième score au concours international MIREX, avec des perfectionnements prévus en 2008. Différentes améliorations du vocodeur de phase SuperVP ont été initiées dans le cadre de Sample Orchestrator : adaptation automatique de la taille de la fenêtre d'analyse, nouvelle méthode de transposition dans le domaine spectral plus efficace pour les transpositions importantes vers l'aigu.

Voix

L'ensemble de compétences réunies depuis 2006 dans le cadre du projet Vivos et de plusieurs thèses (Greg Beller, Nicolas Obin, Federico Villavicencio, Gilles Degottex) s'est traduit par de nombreuses avancées et directions de recherche nouvelles : segmentation automatique des signaux de parole et leur application à la pièce de Stefano Gervasoni sur le Fado, étude de la prosodie, mise en place d'une plateforme de gestion de corpus de parole, transformations

sonores du type et de la nature de la voix (sexe, âge, voix rauque, soufflée, chuchotée), modifications de l'expressivité, estimation de l'enveloppe spectrale sur des critères perceptifs, mesures et études de la source glottique.

Synthèse par modélisation physique

Une part importante des recherches a été consacrée aux instruments entretenus, notamment les vents et cordes frottées, dont la modélisation des transitoires et le contrôle sont parmi les plus délicats. La poursuite du projet Consonnes et le démarrage du projet VoxStruments ont fourni un cadre propice à de nombreuses avancées relatives à la modélisation des instruments à vent : adaptations de Modalys avec l'intégration de modèles d'embouchure de flûte et de premiers instruments complets (clarinette, saxophone, basson, projet VoxStruments), conception et première phase de réalisation d'une bouche artificielle destinée à la réalisation de mesures reproductibles (Consonnes), poursuite des travaux sur la propagation d'ondes progressives dans les tubes de section variable (thèse de Rémi Mignot). Les travaux sur la modélisation des non-linéarités ont également porté sur celle des vibrations transverses à forts régimes dans les cordes (thèse de David Roze) et des avancées théoriques sur les formalismes utilisés (séries de Volterra). Par ailleurs, en lien avec les travaux sur l'analyse du geste, a été mis au point un système de mesure de la pression d'archet (thèse de Matthias Demoucron).

Spatialisation

Les recherches sur les systèmes WFS ont abouti, à travers notamment la thèse de Terence Caulkins soutenue en cours d'année, à de premiers résultats relatifs à l'utilisation de cette technique dans le contexte du concert, prenant en compte l'effet de salle. Ces travaux, complétés par plusieurs séances d'expérimentations artistiques et de mesures objectives, ont contribué à l'élaboration d'une première phase d'équipement de l'Espace de projection avec ce dispositif en 2008 dans le cadre du projet Peri-ode, qui bénéficie non seulement du soutien de la région Ile-de-France (programme Sesame), mais également en 2007 de celui du CNRS dans le cadre de financements d'équipements mi-lourds. Les recherches sur la WFS se poursuivent avec le démarrage de la thèse de Joseph Sanson consacrée au contrôle musical. D'autres recherches se sont consacrées à la caractérisation perceptive de différentes techniques de reproduction spatiale : systèmes Ambisonique aux ordres supérieurs (thèse de Stéphanie Bertet), sources multi-haut-parleurs à directivité contrôlée (Timée simplifiée, Perception et Design sonores). Les recherches sur l'interaction spatiale sont présentées plus loin.

Signal/symbolique

Cette thématique transversale, qui concerne les correspondances entre différents niveaux de représentations musicales à travers les processus d'analyse (indexation, suivi, reconnaissance) et de synthèse (par le contenu à partir de descriptions de haut niveau) via des structures intermédiaires à évolution lente (contrôle, signaux gestuels, formes temporelles), s'inscrit à la convergence de nombreuses préoccupations actuelles de différentes équipes. Les différentes problématiques qui lui sont liées comprennent l'indexation audio (extraction automatique de descriptions musicales, reconnaissance et catégorisation d'événements, notamment à des fins de navigation), les méthodes de production par le contenu (s'appuyant sur les descriptions issues de l'indexation pour spécifier ou orienter la production de matériau sonore) et l'analyse du geste et de l'interprétation. Ces recherches bénéficient du soutien de plusieurs projets extérieurs, notamment Sample Orchestrator, qui couvre une part importante de l'ensemble des travaux.

Indexation musicale

Les recherches dans ce domaine portent sur l'analyse automatisée des signaux de deux types distincts d'enregistrements audio : morceaux de musique et échantillons, utilisés en production musicale et sonore. Les travaux relatifs au premier thème ont été effectués principalement dans le cadre des projets MusicDiscover (interface graphique regroupant différents résultats d'analyse pour la navigation inter- et intra-documents), Ecoute (estimation automatique d'accords, de tonalités, de premier temps, amélioration des méthodes de classification, segmentation parole/publicités/musique pour la radio, catégorisation en genre et ambiance, estimation de points de montage pour le mixage automatisé), des thèses d'Hélène Papadopoulou (tonalités) et d'Arie Livhsin (identification des instruments). Il est à noter que, dans le cadre d'Ecoute, ces recherches, menées dans la continuité de Semantic HIFI, trouvent leurs premières applications commerciales, qui seront poursuivies et amplifiées à partir de 2008 en lien avec le projet Quaero. L'autre volet des recherches sur l'indexation des échantillons, dans la lignée des projets Studio en ligne, Ecrins et Cuidado menés depuis dix ans, trouve son prolongement dans le projet Sample Orchestrator, qui vise également une réalisation commerciale sous la forme d'une interface de navigation dans des bases de données de sons. Le principal objet des travaux porte sur la classification automatique d'échantillons, à partir de différentes approches de catégorisation menées en lien avec l'équipe Perception et design sonores, et sur une navigation par descripteurs perfectionnant l'interface de CataRT (cf. ci-après).

Traitement par le contenu pour le temps réel

Une première application temps réel des descripteurs concerne les techniques de synthèse par corpus, à travers les évolutions du logiciel CataRT menées au cours de l'année : nouvelles fonctions de segmentation et constitution de corpus à la volée, synthèse concaténative à partir de boucles rythmiques, amélioration du contrôle. CataRT a été utilisé dans plusieurs projets artistiques (Hans Tutschku, Dai Fujikura, Stefano Gervasoni, Roque Rivas et Hector Parra). Un second et nouvel aspect de ces travaux porte sur des traitements sonores interactifs, tels que le morphing entre deux sons, reposant sur des représentations morphologiques et permettant une gestion indépendante des informations symboliques et des fonctions de modulation expressive (vibrato, tremolo).

Écriture du son, orchestration

Dans le contexte des outils d'écriture et de composition, le thème signal/symbolique se décline selon différentes approches complémentaires, dont un aboutissement a été, avec celui de la thèse de Jean Bresson, la réalisation du système OMSounds, qui traite à la fois des aspects de bas niveau (gestion des analyses de signal à partir du format SDIF) et de haut niveau (notamment modélisation de processus à partir de perfectionnements de l'interface des Maquettes). Quant aux recherches liées au projet d'aide à l'orchestration, elles se sont traduites, conformément aux objectifs poursuivis et grâce au suivi constant du compositeur Yan Maresz, par des approches originales concernant d'une part la modélisation des sons : extension à des sons bruités et inharmoniques, modèles de description croisée par instruments et modes de jeu (thèse de Damien Tardieu) ; d'autre part la résolution efficace de problèmes d'optimisation combinatoire en lien avec la gestion de contraintes d'exécution (thèse de Grégoire Carpentier). Les résultats de ces travaux ont d'ores et déjà contribué à plusieurs compositions, dont l'orchestration de phonèmes (voyelles) pour la pièce *Speakings* de Jonathan Harvey qui doit être créée en juin 2008.

Analyse du geste et de l'interprétation

Le travail de thèse de Nicolas Rasamimanana sur la modélisation du contrôle de l'archet a étudié les différents types de contraintes auxquelles est soumis l'interprète en vue de la production d'un son (contrôle de la vibration de la corde, biomécanique) et mis en évidence la caractérisation automatique des principaux modes de jeu, ainsi que certaines stratégies de contrôle gestuel (co-articulation). Ces résultats ont contribué à une expérimentation menée tout au long de l'année avec la compositrice Florence Baschet en vue de la création d'un quatuor augmenté à l'automne 2008. Par ailleurs, une analyse en temps réel du signal vocal a été menée dans le cadre d'une part de la thèse de Julien Bloit permettant, en lien avec les recherches sur la voix, l'analyse des phonèmes, d'autre part du projet VoxStruments qui vise le contrôle par la voix de modèles physiques d'instruments et qui a produit une bibliothèque fournissant un ensemble de descripteurs du signal vocal.

Écriture du temps et de l'interaction

Cette thématique transversale, qui concerne les méthodes de formalisation et de réalisation de processus temporels et interactifs, est étroitement liée au thème précédent dès lors que les dispositifs de contrôle des processus sonores dépassent de simples mises en correspondance (*mappings*) statiques avec les paramètres d'entrée et comportent un modèle d'interaction tel que le suivi (de partition, de geste ou de formes temporelles).

Suivi de partition, de geste et de formes temporelles

La collaboration d'Arshia Cont avec Marco Stroppa pour la production de la pièce *...of Silence*, pour saxophone et électronique, a abouti à la réalisation d'un nouvel algorithme de suivi de partition, antescofo, intégrant une modélisation du tempo et des différents types de structures des formes temporelles. Ce travail s'inscrit dans une recherche s'attachant à modéliser certains aspects relatifs à l'anticipation musicale. De plus, les recherches sur le suivi de geste ont abouti à un algorithme combinant reconnaissance de gestes appris et suivi de la position temporelle par rapport au geste de référence. Leur portée dépasse en fait le suivi de geste et permet la reconnaissance et le suivi de tous types de formes multimodales, puisque les signaux temporels à variation lente traités peuvent être issus non seulement de capteurs gestuels, mais aussi de descripteurs extraits d'analyses audio, d'image, etc. Ces travaux ont été appliqués dans le projet i-Maestro à la réalisation de scénarios pédagogiques pour l'apprentissage de l'interprétation, à travers Le développement de l'environnement *Sound and Gesture Lab*.

Nouveaux systèmes d'interaction et de formalisation des processus temporels

La nécessité d'une gestion unifiée de différents types de données temporelles (partition, fichier son, courbes de BPF, etc.) a donné lieu à la réalisation, dans OpenMusic, du nouvel éditeur OMSheet, qui synchronise les représentations graphiques de tous types de données à partir des positions des pulsations issues de la partition. La gestion de contraintes temporelles, qui permet d'exprimer le déroulement de processus selon des relations temporelles (notamment lois d'Allen), a fait l'objet du projet partitions interactives, dont un prototype a été réalisé avec les maquettes d'OpenMusic ; ces travaux sont poursuivis dans le cadre du projet franco-colombien REACT qui s'attache à formaliser les systèmes à base de contraintes concurrentes temporelles dans différents champs d'application dont la musique. Quant au système OMax, il a bénéficié de perfectionnements, tels que de nouvelles heuristiques de navigation et une prise en compte du rythme, qui en améliorent l'usage musical.

Interaction spatiale

Dans le cadre du projet Crossmod, suite à la mise en place d'un système de réalité virtuelle combinant un écran de grande taille et une diffusion par WFS, ont été menées des expériences sur l'intégration multisensorielle, et notamment sur les limites de disparités entre informations provenant de modalités différentes. L'expérimentation de situations d'interaction corps/espace/son fait l'objet du nouveau projet Eartoy démarré en cours d'année. Ces travaux se prolongent dans le cadre du nouveau projet européen Same, monté au cours de l'année et démarrant en 2008. L'utilisation de la modalité sonore spatialisée à des fins de sonification dans un contexte de réalité virtuelle a été expérimentée dans le cadre du projet CoRSAIRe. Du point de vue des architectures techniques, la finalisation du projet ConceptMove a abouti au développement, par l'Irisa, d'un métalangage d'interaction compatible avec différents environnements de modélisation 3D (OpenMask, Spat/Max, Flash), destiné à faciliter la réalisation par les artistes d'œuvres interactives combinant captation de mouvement, synthèse d'image et de son 3D.

Ingénierie et médiation des connaissances

Cette thématique regroupe les différentes disciplines scientifiques, approches méthodologiques et technologiques visant la constitution (élicitation, formalisation) et la médiation (diffusion à travers différents supports) de connaissances sur le musical (œuvres, pratiques) et le sonore.

Perception et design sonores

Les recherches menées depuis plusieurs années avaient comme principal domaine d'application celui des transports et ont abouti en cours d'année à la soutenance de la thèse de Clara Suied sur les sons d'alarmes dans les voitures. Dans le cadre des projets Closed et Sample Orchestrator, les travaux ont été consacrés à la description, l'identification et la classification des sons environnementaux. Au-delà des aspects descriptifs des sons figés, Closed s'intéresse à l'étude des interactions entre un sujet et un objet sonore, ainsi qu'au contrôle perceptif de modèles physiques (en lien avec le thème signal/symbolique). Deux nouveaux projets de réseaux européens ont été démarrés en cours d'année : SID (sound interaction design) et Minet (métrologie, psychophysique).

Analyse des œuvres et des pratiques musicales

Les recherches sur la musicologie computationnelle se sont poursuivies à travers l'étude de formalismes algébriques tels que le groupe affine, les polynômes cyclotomiques et la transformée de Fourier discrète, la thèse de Yun-Kang Ahn consacrée à la formalisation et l'implémentation de la notion de topographie musicale, avec notamment le développement de stratégies de segmentation automatique de matériaux musicaux, ainsi qu'une participation active à plusieurs actions fédérant la communauté mathématiques et musique, dont la première édition de la conférence internationale Mathematics and Computation in Music (MCM) qui s'est tenue au cours de l'année.

Le programme de recherche en analyse des pratiques musicales a porté, dans son volet analyse de la composition, sur une enquête sur les ateliers de composition dans le cadre d'un numéro thématique de la revue Circuit et l'établissement de liens avec la communauté d'analyse génétique et dans son volet analyse de l'interprétation sur le suivi du projet de quatuor augmenté de Florence Baschet (cf. supra) et la poursuite, à l'EHESS, du séminaire « Comprendre le travail de l'interprétation ».

Supports et technologies de médiation

Ces travaux ont contribué à la réalisation de courts-métrages de la série « Images d'une œuvre », coordonnée par la direction de la Pédagogie et de l'action culturelle, conçue pour présenter un travail de composition en avant-première de la création ; ils ont débouché sur la production, destinée aux enseignants en musique de la région PACA, des deux premiers DVD-ROM interactifs de la collection « Parcours interactifs » présentant des analyses hypermédias des *Variations op. 27* d'Anton Webern et *Voil(rex)* de Philippe Leroux. Cette réalisation a une portée plus générale, puisqu'elle a donné lieu, dans le cadre du projet Ecoute, à la réalisation d'un outil auteur destiné à faciliter la production de tels supports hypermédias à partir de synchronisations effectuées dans le logiciel ML-Annotation de l'environnement Musique Lab 2. Cet outil est susceptible de contribuer à la réalisation d'analyses d'œuvres dans le cadre du projet Répertoire de l'Ircam.

L'ingénierie des connaissances musicales a également trait à celle de bases de données utilisées dans différents contextes, pour des fonctions patrimoniales, de diffusion culturelle ou de production des œuvres. Les équipes concernées (Services en ligne, Analyse des pratiques musicales) ont ainsi contribué aux aspects techniques de la mise à jour de la base Brahms (septembre 2007) et des évolutions de la base Mustica (documentation technique des œuvres). Dans le cadre du projet européen Caspar, des recherches, abordant dans une perspective générale la problématique de la préservation des œuvres interactives, ont été menées à travers différentes approches concrètes : conception d'un modèle de données pour la documentation des œuvres, outils d'analyse de patches Max pour en faciliter l'aide au portage, préparation d'entrepôts numériques d'objets et d'abstractions destinés à référencer tous les éléments logiciels utilisés.

Développement logiciel

Les principales avancées ont concerné d'une part le développement d'une version 4 du Spat reprenant de manière générique et étendant l'ensemble des fonctionnalités existantes sous la forme d'une nouvelle bibliothèque SpatLib, d'autre part le démarrage du portage d'OpenMusic dans l'environnement LispWorks, suite à l'absence de support pour les processeurs Intel pour Macintosh constaté dans l'environnement existant (MCL).

Les autres travaux de développement dans les différents environnements, en plus des nouvelles fonctions décrites plus haut, ont porté :

- pour Modalys, sur l'optimisation du contrôle, le portage sur Windows et une meilleure interface avec Matlab pour faciliter l'intégration de nouveaux modèles ;
- pour SuperVP, sur des optimisations pour les processeurs Intel et le système Windows ;
- pour Audiosculpt, sur de nouvelles fonctions d'annotation, une adaptation aux architectures multithreads améliorant les calculs sur les machines à multiprocesseurs, la réalisation d'une version gratuite limitée aux fonctions d'annotation, destinée notamment à la communauté MIR (music information retrieval) et la mise en œuvre d'un nouveau système de documentation logicielle ;
- pour les fonctions d'indexation, sur l'extension et le développement en C++ de la bibliothèque ircamdescriptor et la réalisation d'un prototype d'éditeur en Flash visualisant les différents types d'analyse ;
- pour FTM, sur une stabilisation avec la version 2, la publication d'une interface de programmation, la réalisation de composants graphiques en Juce et un portage sur Pd.

Événements publics

Les événements publics de la recherche de l'Ircam ont été organisés en deux temps principaux, l'un le 11 juin dans le cadre d'Agora avec la journée « Nouveaux paradigmes pour

l'informatique musicale », l'autre du 12 au 15 novembre autour de l'organisation du colloque IHM'07, qui fédérait la communauté francophone des interfaces homme-machine et les concepteurs et utilisateurs des technologies de l'audiovisuel (journée professionnelle « interfaces homme-machine et production audiovisuelle » organisée en collaboration avec le Pôle de compétitivité Cap Digital). Les événements IHM ont permis à l'Ircam d'accueillir des intervenants prestigieux, certains pour la première fois en Europe, tels que Bill Buxton (Microsoft Corp.), le Pr. Paulo Viviani (psychologue du mouvement), Glenn Reid (concepteur chez Apple des logiciels iPhoto et iMovie), Mike Mages (chef des projets Aperture et FinalCut Pro chez Apple). De plus, l'équipe Analyse des pratiques musicales a organisé les 27 et 28 avril 2007, en collaboration avec l'EHESS et le CRAL, un colloque international sur les Politiques de l'analyse musicale.

2. CRÉATION ET DIFFUSION MUSICALES

Directeur artistique : Frank Madlener

Marquée par l'aboutissement de projets ambitieux, initiés de longue date (*Wagner Dream* de Jonathan Harvey, *Lichtung 3* d'Emmanuel Nunes, le projet des carnets d'études), l'année 2007 a été simultanément celle du rayonnement de l'Ircam hors les murs, par ses tournées. Présent à Berlin et Genève, à Porto et Tokyo, Lille et Metz, Toulouse et Tarbes, Vilnius et Tallin, partenaire actif des grands rendez-vous contemporains (Le Printemps des Arts de Monaco avec 9 productions, Ars Musica à Bruxelles, Musica à Strasbourg), l'Ircam a pu dessiner des portraits d'envergure dans l'orbite d'une tournée : une présence soutenue à l'automne d'Emmanuel Nunes en Europe ou de Georges Aperghis, l'itinérance du *Paris qui Dort* de Yan Maresz et de *Cassandra* de Michael Jarrell. Cette pérennité d'un répertoire qui se constitue peu à peu se retrouvait encore à l'opéra de Paris avec la reprise du *Songe de Médée* d'Angelin Preljocaj – Mauro Lanza et à la Cité de la Musique où les pièces avec électronique de Pierre Boulez côtoyaient les œuvres de Bach.

L'articulation entre des productions récentes et le répertoire, entre l'histoire réévaluée et le « maintenant » de la Création, a exercé une pression très forte sur les équipes artistiques et celle de la Production. Dans un cadre budgétaire fragile, l'Ircam a toutefois pu s'appuyer sur le levier des coproductions française et internationale. Les Spectacles Vivants du Centre Pompidou auront contribué au succès de l'édition du festival Agora 2007, un festival prenant une toute nouvelle dimension par la diversité de ses propositions et sa dissémination dans de nouveaux lieux parisiens pour l'Ircam, comme le théâtre des Amandiers de Nanterre ou le Musée du Quai Branly.

Dans cette conjoncture exceptionnelle, le public aura répondu très favorablement aux propositions artistiques de l'Ircam, durant la saison et le festival Agora.

Festival Agora

Temps fort de la saison artistique de l'Ircam, Agora est aujourd'hui un rendez-vous attendu autour de projets pour la plupart réalisés à l'Ircam. Sous l'intitulé *Utopia-Exotica*, Agora proposait un voyage dans l'imaginaire musical aimanté par le lointain et le déplacement dans l'espace. À côté des créations de Nunes ou Harvey, Agora présentait des œuvres majeures de Mauricio Kagel (*Exotica*) et Stockhausen (*Hymnen* avec le ballet de Lorraine dans la scénographie de Gérard Fromanger). En 2007, Agora s'inaugurait symboliquement par une création de Valerio Sannicandro reliant les salles de l'Ircam et du Centre Pompidou. En deux semaines, le festival aura élargi de nombreux champs artistiques : du projet d'un jardin sonore jusqu'à la musique orchestrale avec électronique live, de l'œuvre soliste jusqu'à l'opéra de Jonathan Harvey, *Wagner Dream*, présenté en clôture de la manifestation. Les 14 spectacles et concerts (dix-sept représentations), les rencontres et ateliers instrumentaux auront connu une progression de fréquentation de près de 22 % par rapport à l'année précédente.

Saison parisienne

Rythmée par une série de cycles originaux assurant la lisibilité des productions de l'Ircam, la saison a renoué avec les Ateliers Répertoire et le cycle *La poursuite*. Ce cycle réalisé par l'Ircam aux Bouffes du Nord transforme le concert en un scénario sans interruption, qu'il s'agisse d'une poursuite dans l'espace du théâtre, ou d'une poursuite généalogique par-delà les séparations historiques (Bartók, Ligeti, création d'Unsuik Chin). Au Centre Pompidou,

L'Ircam consacrait ses ateliers au répertoire soliste qui traverse l'histoire de l'Ircam (œuvres de Francesconi, Harvey, Maresz, Parra, Lanza).

Cette saison est soutenue par des interprètes entretenant un rapport privilégié avec l'Ircam (Ensemble intercontemporain, Ictus) ou par des solistes très engagés dans la création. Un événement musical aura marqué la participation de l'Ircam à l'exposition Beckett au Centre Pompidou, avec une création commandée à Jérôme Combier et Pierre Nouvel dans ce cadre. L'Ircam fut très présent à la Cité de la musique et a également lancé une collaboration avec Nanterre dont l'aboutissement fut la création de l'opéra de Jonathan Harvey aux Amandiers.

3. PÉDAGOGIE ET ACTION CULTURELLE

Directeur : Cyril Béros

L'année 2007 aura été celle de la mise en œuvre des premières réformes liées à la redéfinition de l'action du département avec l'arrivée d'un nouveau directeur en septembre 2006 :

- réforme du Coursus de composition et d'informatique musicale, désormais articulé sur deux années. Projet européen pilote lié à cette réforme. Poursuite des discussions approfondies avec plusieurs établissements de l'enseignement supérieur Culture européen, en vue d'inscrire le Coursus dans l'évolution de ce paysage ;
- offre structurée en direction du jeune public (« Parcours découverte » et « Parcours croisés : les ateliers de la création ») et en direction des jeunes interprètes (« Parcours Musique mixte ») ;
- lancement de la série de films « images d'une œuvre », en coproduction avec le Centre Pompidou, qui porte un regard sur le processus de création, présenté au public lors d'« Avant-premières » en présence des artistes ;
- cycle de conférences « un dimanche, une œuvre » avec le Centre Pompidou.

L'ensemble de ces activités a été mis en place avec une subvention constante, en dégagant des ressources propres supplémentaires (recettes de la formation professionnelle, mécénat) : + 54 % en 2007 après une augmentation de + 57 % en 2006.

Les formations supérieures et professionnelles

Coursus de composition et d'informatique musicale

Année de transition entre l'ancienne formule du Coursus (jusqu'en octobre 2007) et la nouvelle (à partir de septembre 2007). Cœur de l'activité du département, le Coursus se décline désormais sur deux années :

- un Coursus 1 resserré dans le temps (entre 6 et 7 mois), qui garantit l'excellence de la formation, en se concentrant sur les concepts et apprentissages fondamentaux de l'informatique musicale et en mettant en exergue les spécificités de l'Ircam dans ce domaine, tant sur un plan méthodologique que technologique ;
- un Coursus 2 qui propose une immersion complète dans la vie de l'institut, à travers la réalisation d'un projet artistique singulier, en étant accompagné par les équipes ; des liens avec les laboratoires de recherche et une participation active aux séminaires et journées d'étude de l'institut.

L'expérience de la première promotion 2007-2008, dont le bilan de détail sera établi au printemps 2008, permettra d'ajuster l'organisation et les moyens nécessaires pour répondre aux enjeux de cette réforme, désormais pleinement engagée :

- inscription dans le paysage de l'enseignement supérieur Culture ;
- meilleure prise en compte des disparités de formation initiale des compositeurs et temps nécessaire à la maturation des problématiques et à l'assimilation des outils ;
- renforcement du soutien à la jeune création : singularité et visibilité des projets, insertion professionnelle, dimension expérimentale.

Master de l'UPMC « Parcours Atiam »

Élaboré en partenariat avec l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6), l'une des plus importantes universités scientifiques françaises, et l'École Nationale Supérieure des Télécommunications (Telecom Paristech), le parcours Atiam du Master Sciences et Technologies est une référence dans les domaines de la recherche en informatique musicale et en traitement du signal appliqués à la musique. Il est par ailleurs un vecteur efficace des liens que l'Ircam entretient avec les formations universitaires supérieures et les écoles doctorales.

La formation professionnelle continue

L'effort de lisibilité des actions de formation (définition, ciblage des publics, communication) et d'adéquation avec les dispositifs de la FCP, continue à produire son effet. De plus, le lancement de nouvelles formules « Premiers pas avec Max/MSP en 6 jours » et deux stages « à la carte » pour des entreprises partenaires ont permis d'augmenter significativement les recettes :

- + 34% du nombre de stagiaires (335 contre 250 en 2006 et 190 en 2005) ;
- + 97 % de recettes (105 000 euros contre 53 000 euros en 2006 qui avaient déjà augmenté de 30 % en 2006) ;
- + 62 % de prise en charge dans le cadre de FPC (dont +35 % Afdas) ;
- 76,5 % de taux de remplissage.

Les actions vers le milieu scolaire et l'enseignement spécialisé

L'action culturelle développée depuis deux ans participe d'un effort de démocratisation et de rayonnement de l'Ircam auprès du jeune public. Déjà engagé dans cette voie à travers le projet de suite logicielle « Musique Lab », développée grâce une convention avec les ministères de la Culture et de l'Éducation nationale, et en attente de renouvellement en 2008, l'Ircam souhaite proposer quelques actions pertinentes, ciblées et fidèles à ce qui fait sa spécificité : exigence artistique, esprit expérimental et qualité pédagogique.

Parcours « découverte »

L'offre de « Parcours découverte » destinée aux collèges et lycées a été restructurée à la rentrée scolaire 2007. Associant une découverte de l'institut, un ou deux ateliers pratiques utilisant les logiciels pédagogiques développés à l'Ircam et la venue à un concert, ces parcours permettent aux enseignants de susciter une rencontre privilégiée entre leurs élèves et la création musicale contemporaine.

Les parcours 2007-2008 ont été définis en fonction des différents publics et thématiques pour proposer des « entrées » multiples :

- collèges : « Les machineries parlantes de Georges Aperghis », dans l'atelier d'un compositeur ;
- lycées d'enseignement général : « La voix décryptée par la science », du naturel au synthétique ;
- option musique et enseignement spécialisé : « Métamorphoses de la voix », parcours de création.

Au total, plus de 250 élèves ont suivi un parcours scolaire pendant la saison 2006-2007 et le début de la saison 2007-2008.

Parcours croisé « Les ateliers de la création »

Le parcours « Les ateliers de la création » est un projet pilote d'éducation artistique destiné aux lycées professionnels, situé à la croisée des arts visuels, des arts du son et des nouvelles technologies. Il a été mis en œuvre en 2007 par le département Pédagogie et action culturelle de l'Ircam et le Service Éducatif du Centre Pompidou.

Il permet aux élèves de trois lycées professionnels de découvrir conjointement et dans la durée, le langage de l'art contemporain et de la création sonore à travers un ensemble d'ateliers, de rencontres et d'événements artistiques répartis au cours de l'année.

Par cette action partenariale, l'Ircam et le Centre Pompidou réaffirment leur rôle d'aiguillon dans la conduite de projets éducatifs innovants et ambitieux. La démocratisation de l'accès aux expressions les plus récentes, la mise en relation des différentes disciplines, la pratique inventive grâce aux technologies développées à l'Ircam sont autant d'enjeux placés au cœur de ce projet pédagogique.

Trois lycées professionnels issus des trois académies d'Ile-de-France se sont engagés dans ce parcours en 2007. Le projet fera l'objet au printemps 2008 d'une évaluation visant à réfléchir aux possibilités de diffusion dans d'autres contextes et de valorisation des acquis du dispositif.

Parcours « Musique mixte » pour les jeunes musiciens

Suite aux premières expériences menées en 2006, une véritable formule de « parcours » destinés aux jeunes instrumentistes en cours de professionnalisation ou de formation, a vu le jour au cours de l'année 2007. Ils visent à transmettre aux jeunes musiciens une première expérience de la musique mixte et comprennent :

- un atelier de découverte des technologies pour l'instrumentiste ;
- des séances pratiques de travail sur le répertoire ;
- un moment de présentation publique du travail des élèves ou de Master-classe avec les compositeurs.

Trois classes du CNSMD de Paris (saxophone, musique de chambre et réalisation musicale) ont participé à ces parcours. D'autres projets ont eu lieu avec le Conservatoire du Centre de Paris et le CRD du Blanc-Mesnil. Une douzaine d'œuvres pour solistes et électronique ont été réalisées (Agobet, Boulez, Jodlowski, Manoury, Matalon, Saariaho, Stockhausen) par une vingtaine d'étudiants qui ont pu rencontrer dans ce cadre Pierre Boulez et Pierre Jodlowski.

À partir d'octobre 2007, ces parcours « musique mixte », jusque-là centrés sur le répertoire existant, s'enrichissent d'une nouvelle formule ayant pour objectif la création par les étudiants d'études composées par les jeunes compositeurs du Coursus.

Trois groupes d'instrumentistes participeront à ces parcours « création » en 2007-2008 :

- la classe d'alto de Jean Sulem du CNSMDP ;
- un groupe de jeunes musiciens professionnels de l'ensemble transversales 20.21 ;
- la classe de flûte de Cécile Daroux du Conservatoire du Centre de Paris.

Les adresses au grand public

Les activités proposées au grand public sont en cours de restructuration. La priorité a été mise en 2007 sur la mise en œuvre de deux actions qui marquaient un rapprochement avec le Centre Pompidou : le cycle de conférences « Un dimanche, une œuvre » et la série de films « Images d'une œuvre » coproduite avec le Centre Pompidou.

Conférences « Un dimanche, une œuvre » au CGP

Mieux insérer les œuvres musicales dans l'histoire de l'art contemporain ; donner au public des repères sur les œuvres et les compositeurs phares des XXe et XXIe siècles ; croiser les publics des deux institutions : tels sont les objectifs du partenariat.

Depuis deux saisons, l'Ircam s'associe au Centre Pompidou pour proposer quatre conférences musicales par saison dans le cadre du cycle « Un dimanche, une œuvre ». Suite au succès de la première conférence consacrée par Pierre-Laurent Aimard à *Répons* de Pierre Boulez, quatre autres conférences sont proposées en 2007-2008, à l'occasion du 10e anniversaire du cycle.

Avant-Premières et série de films « Images d'une œuvre »

Pourquoi proposer une série de films documentaires ?

Il s'agit tout d'abord de mieux documenter ce qui se fait à l'Ircam et de le faire partager au public. Quatre projets de création donneront lieu à quatre films permettant d'accéder aux coulisses de la création, de saisir les enjeux et les sources d'une œuvre, de comprendre ses modes de fabrication.

Il s'agit ensuite de mieux diffuser les savoirs et travaux de l'institut : ces films trouveront naturellement leur place dans le projet de Centre Pompidou virtuel et sur les sites de l'Ircam. Enfin, il y a la volonté de renouveler les formes de rencontres. Présenté avec le public lors d'avant-premières, précédant la création de l'œuvre et en présence des artistes, le film donne à la fois des clés d'écoute et devient un objet de médiation pour nourrir les échanges entre le compositeur et le public.

Deux films ont été réalisés en 2007 prenant pour objet deux créations de Jérôme Combier et Pierre Jodlowski. Deux autres ont débuté et seront finalisés en 2008, consacrés à Philipp Maintz et Georges Aperghis.

11.2 Normes de directivité

D'après ses concepteurs, le GSR répond aux normes ISO 140 et ISO 3382 concernant l'isotropie de son rayonnement. Cette caractéristique est mesurée par l'index de directivité qui s'exprime par la différence en dB entre le niveau moyen d'énergie rayonnée sur 360° et le niveau moyen sur un arc i de 30° :

$$DI_i = L_{360} - L_{30,i}$$

Ce résultat doit demeurer inférieur à une limite dépendant de la fréquence, fixée par les normes. Les résultats donnés par le constructeur sont illustrés figure 28.

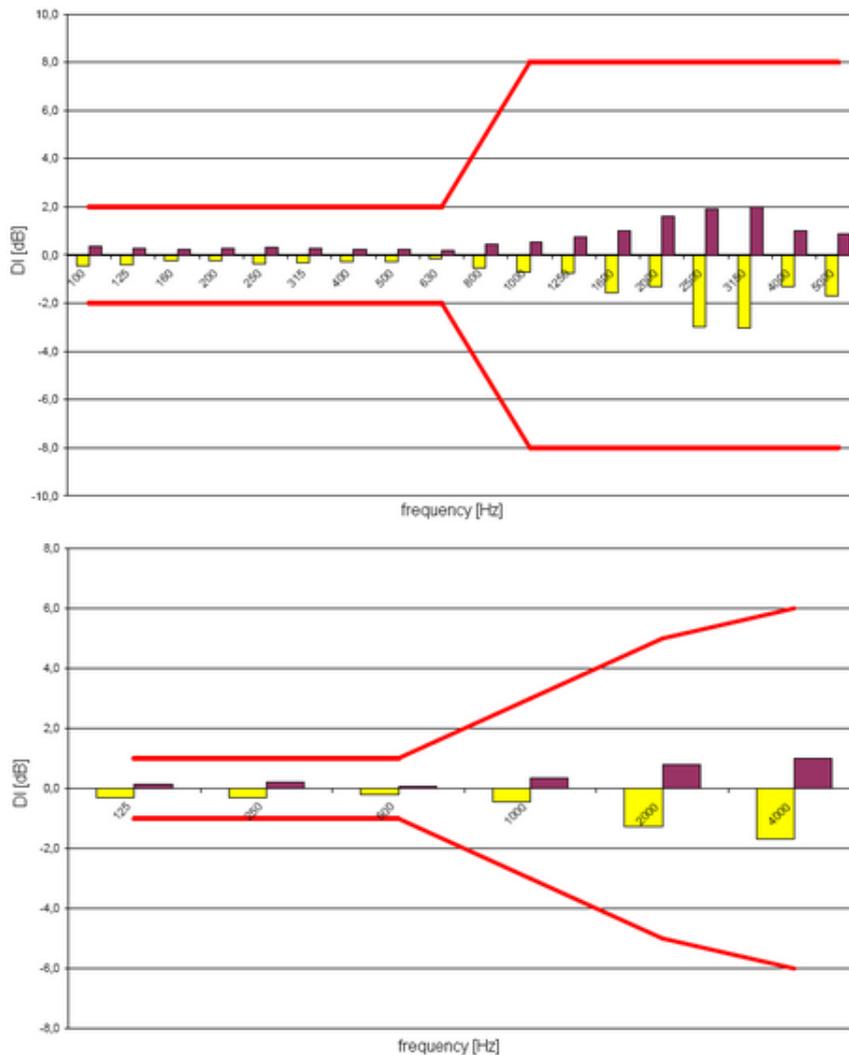


FIGURE 28 – Mesures de la directivité du GSR selon les normes ISO 140 (en haut) et 3382 (en bas)

11.3 Cor de basset et saxophone ténor



FIGURE 29 – Cor de basset et saxophone ténor



FIGURE 30 – Cor de basset en conditions de mesure

11.4 Rayonnement du piston plan

Considérons un piston rigide de rayon a oscillant à la pulsation ω dans un baffle infini (figure 31). Chaque élément de surface dS est repéré par ses coordonnées polaires (\mathbf{r}_0, ϕ) ; il se déplace à la vitesse v_0 . Le point \mathbf{r} est repéré par ses coordonnées sphériques (θ, ϕ) .

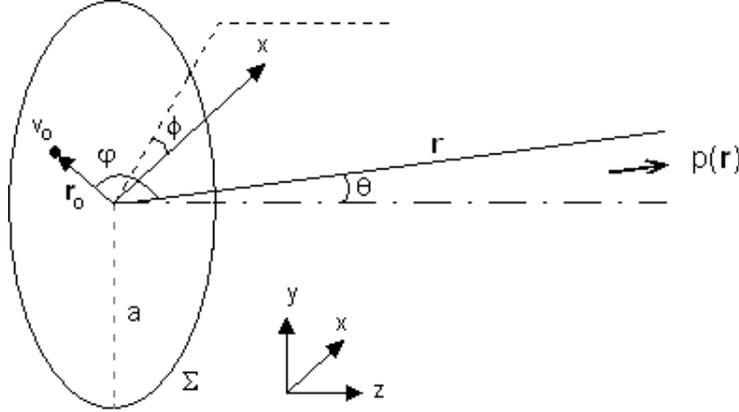


FIGURE 31 – Piston plan rayonnant

En utilisant la seconde intégrale de Rayleigh, qui est l'approximation en champ lointain de la première [15], la pression selon \mathbf{r} peut s'exprimer [13]

$$p(\mathbf{r}) \approx j\omega\rho_0 \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \iint_{\Sigma} v_n(\mathbf{r}_0) e^{jk\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{r}/r} dS \quad (11.20)$$

où ρ_0 est la masse volumique de l'air au repos. Il faut alors calculer le terme $\frac{\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{r}}{r}$ afin d'évaluer cette intégrale. D'après le système de coordonnées, $\mathbf{r} = (r \sin \theta \cos \phi, r \sin \theta \sin \phi, r \cos \theta)$ et $\mathbf{r}_0 = (r_0 \cos \varphi, r_0 \sin \varphi, 0)$. Ainsi,

$$\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_0}{r} = r_0 \sin \theta (\cos \phi \cos \varphi + \sin \phi \sin \varphi) = r_0 \sin \theta \cos(\varphi - \phi)$$

On obtient alors, en posant $\psi = \varphi - \phi$:

$$p(r, \theta, \phi) = j\omega\rho_0 v_0 \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{jkr_0 \sin \theta \cos \psi} r_0 d\psi dr_0 \quad (11.21)$$

En faisant intervenir la fonction de Bessel :

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{jx \cos \psi} d\psi \quad (11.22)$$

$$p(r, \theta) = j\omega\rho_0 v_0 \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \int_0^a J_0(kr_0 \sin \theta) r_0 dr_0 \quad (11.23)$$

Or, par définition :

$$\int \mu J_0(\mu) d\mu = \mu J_1(\mu) \quad (11.24)$$

En posant $\mu = kr_0 \sin \theta$ on on peut évaluer

$$\begin{aligned} \int_0^a J_0(kr_0 \sin \theta) r_0 dr_0 &= \frac{1}{(k \sin \theta)^2} \int_0^{ka \sin \theta} J_0(\mu) \mu d\mu \\ &= \frac{1}{(k \sin \theta)^2} [\mu J_1(\mu)]_0^{ka \sin \theta} \\ &= a^2 \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \end{aligned} \quad (11.25)$$

On obtient finalement pour la pression :

$$p(r, \theta) = j\rho_0 c v_0 \frac{ka^2}{2} \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (11.26)$$

Le terme dépendant de θ est responsable des "lobes" de directivité que l'on peut observer. Le terme indépendant de θ représente le caractère monopolaire du rayonnement (décroissance en $1/r$). Mais le rayonnement dépend aussi de la dimension du piston devant la longueur d'onde. Si $ka < 1$ alors

$$\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \approx 1 - \frac{(ka \sin \theta)^2}{8}$$

On trouve alors que le rayonnement est omnidirectionnel en basses fréquences. A partir de $ka \sin \theta = 4$ environ, le rayonnement présente des extinctions, correspondant aux zéros de la fonction de Bessel J_1 .

En champ proche, l'approximation faite plus haut n'est plus valable et l'on doit calculer

$$p(\mathbf{r}) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} \iint_{\Sigma} v_n(\mathbf{r}_0) \frac{e^{-jkr}}{r} dS$$

11.5 Directivité du GSR

Sur les cartes suivantes - semblables à des planisphères - les carrés représentent la position des haut-parleurs du GSR à la verticale des points de mesures. Les points représentent l'axe vertical. Les élévations, au nombre de 36, débutent à -40° (l'horizontale frontale est à la 5^{ème} élévation, la verticale en haut à la 14^{ème}, etc). Les azimuts correspondent à la position des microphones, ils décrivent les azimuts de -90° à $+90^\circ$ (le 12^{ème} étant sur l'axe longitudinal).

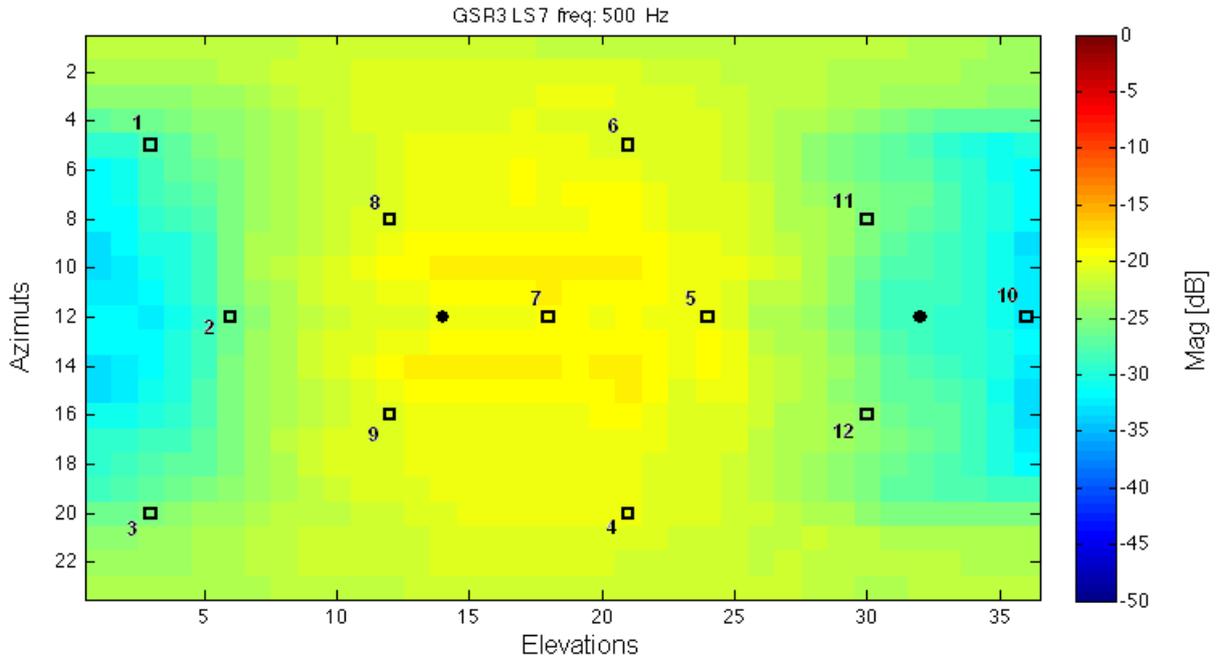


FIGURE 32 – Répartition du champ de pression - GSR - HP N°7 - 500 Hz

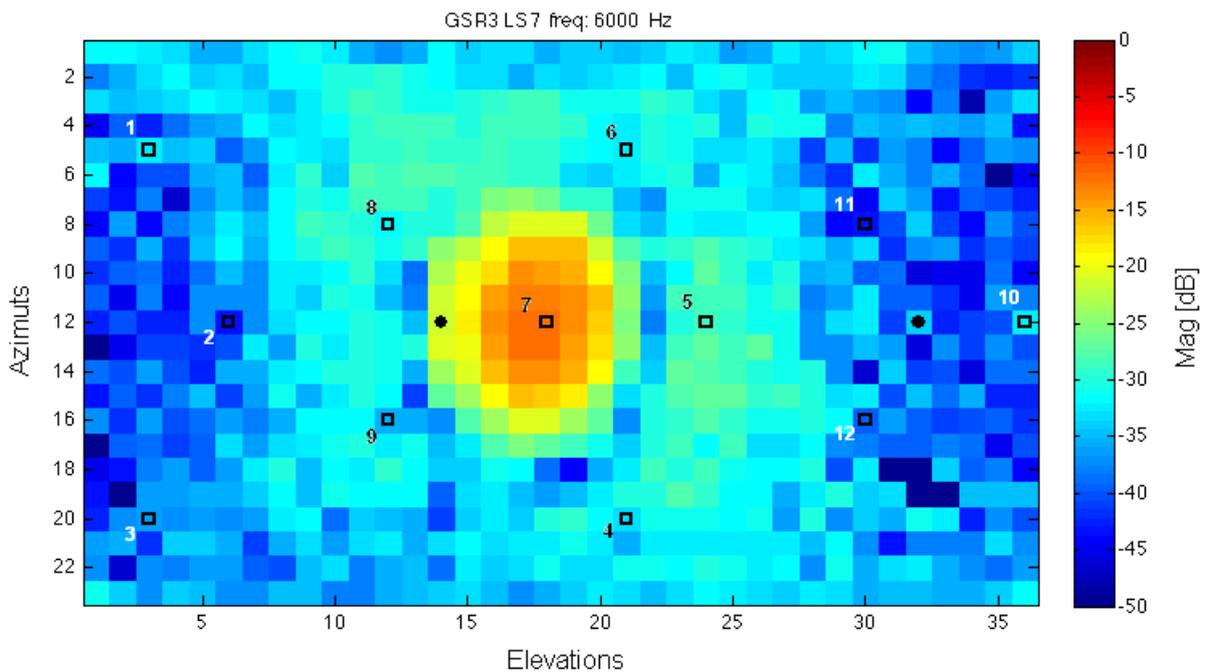


FIGURE 33 – Répartition du champ de pression - GSR - HP N°7 - 6000 Hz

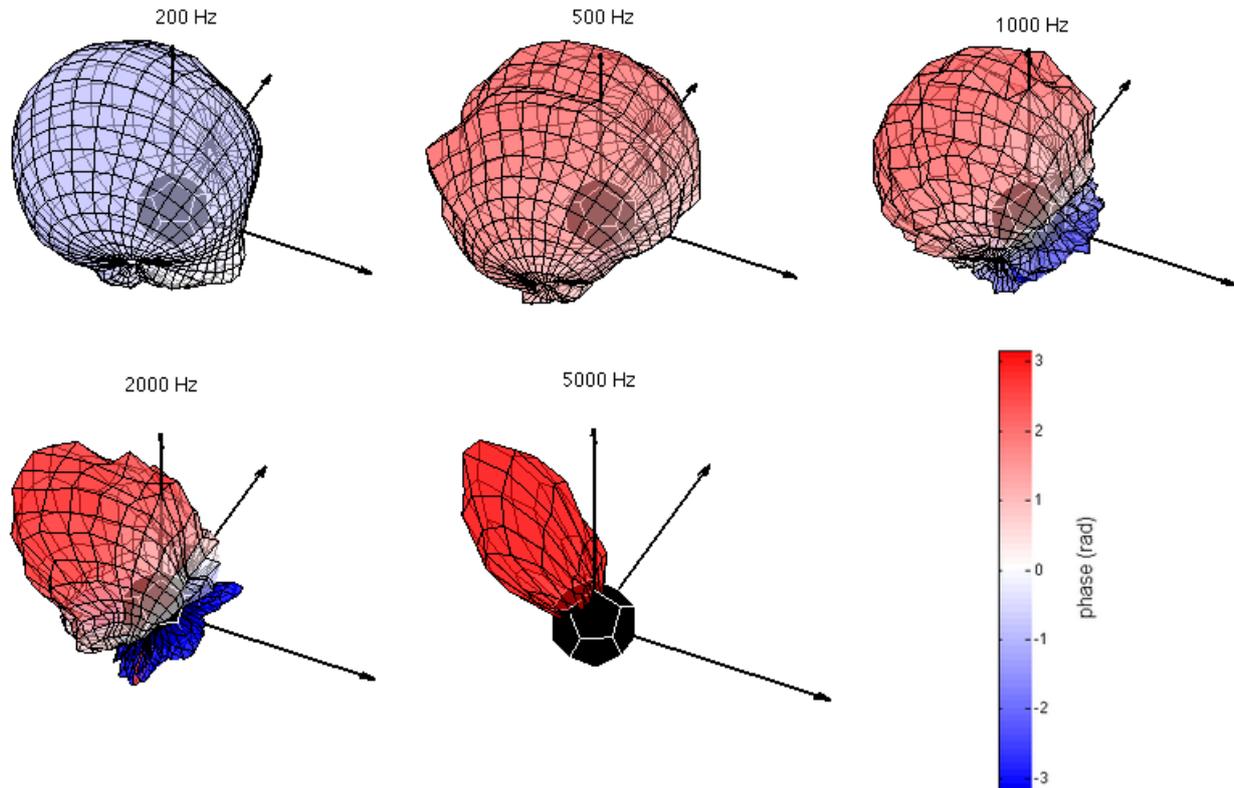


FIGURE 34 – Directivité du GSR avec phase du champ - HP n°7

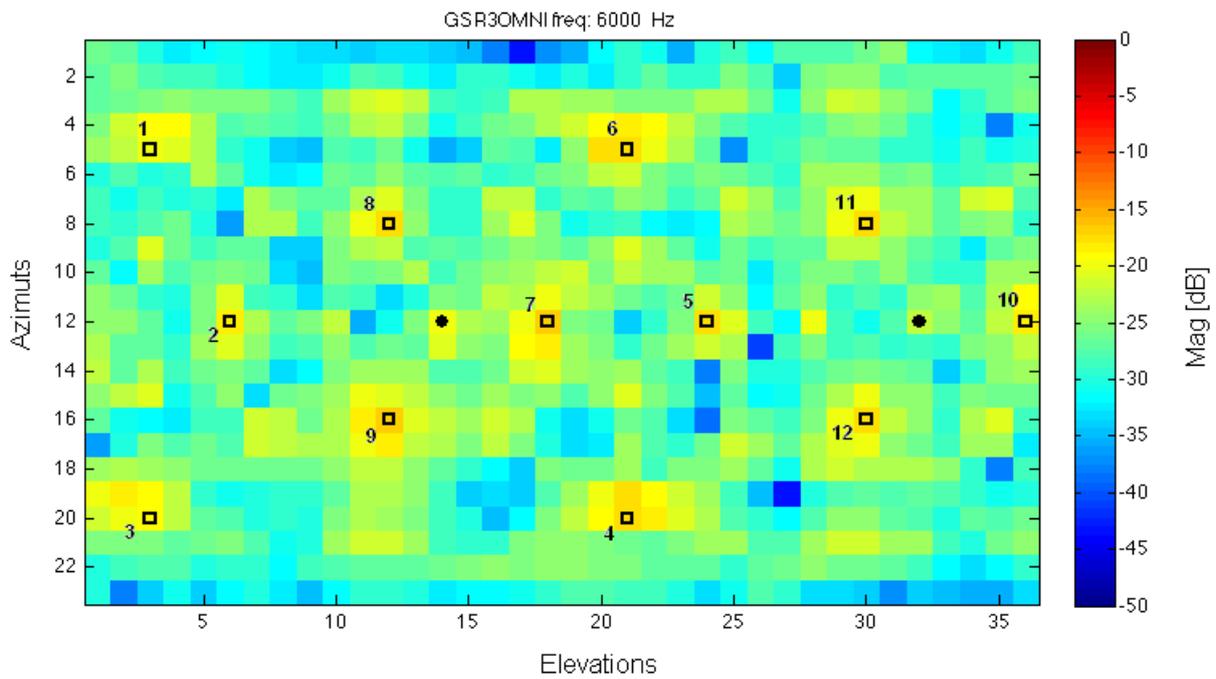


FIGURE 35 – Répartition du champ de pression - GSR - OMNI - 6000 Hz

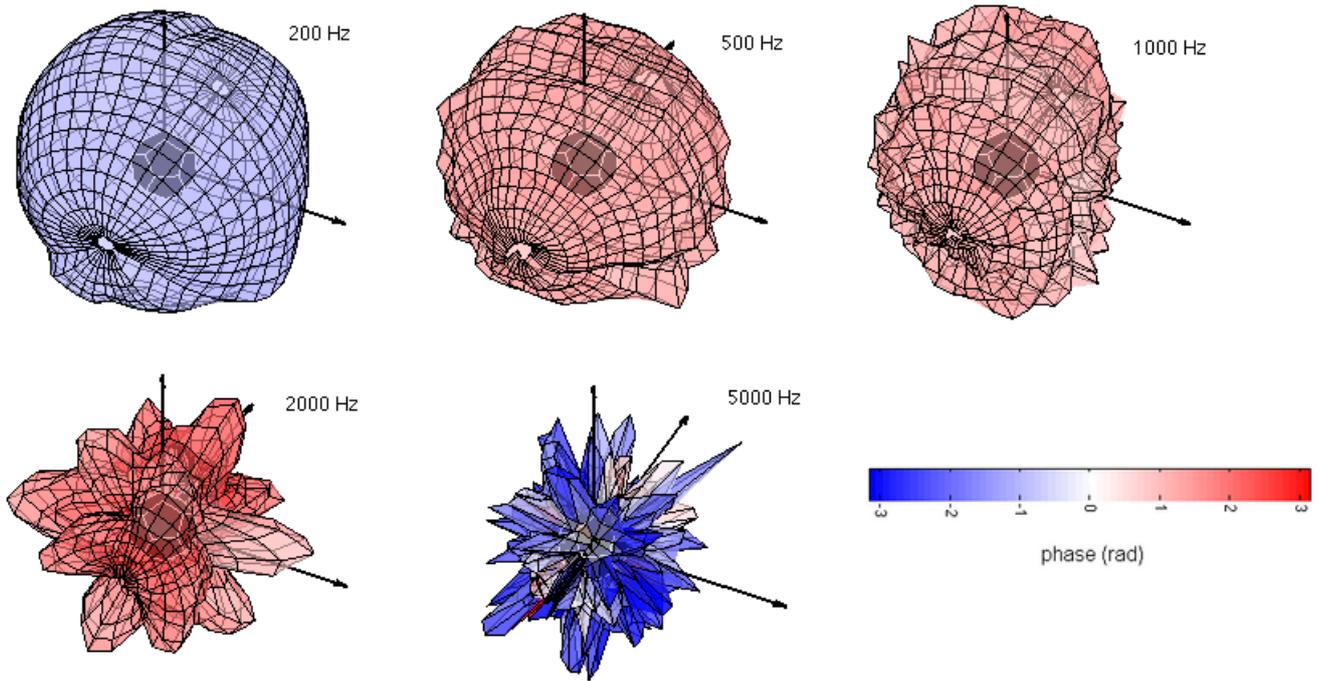


FIGURE 36 – Directivité du GSR avec phase du champ - OMNI

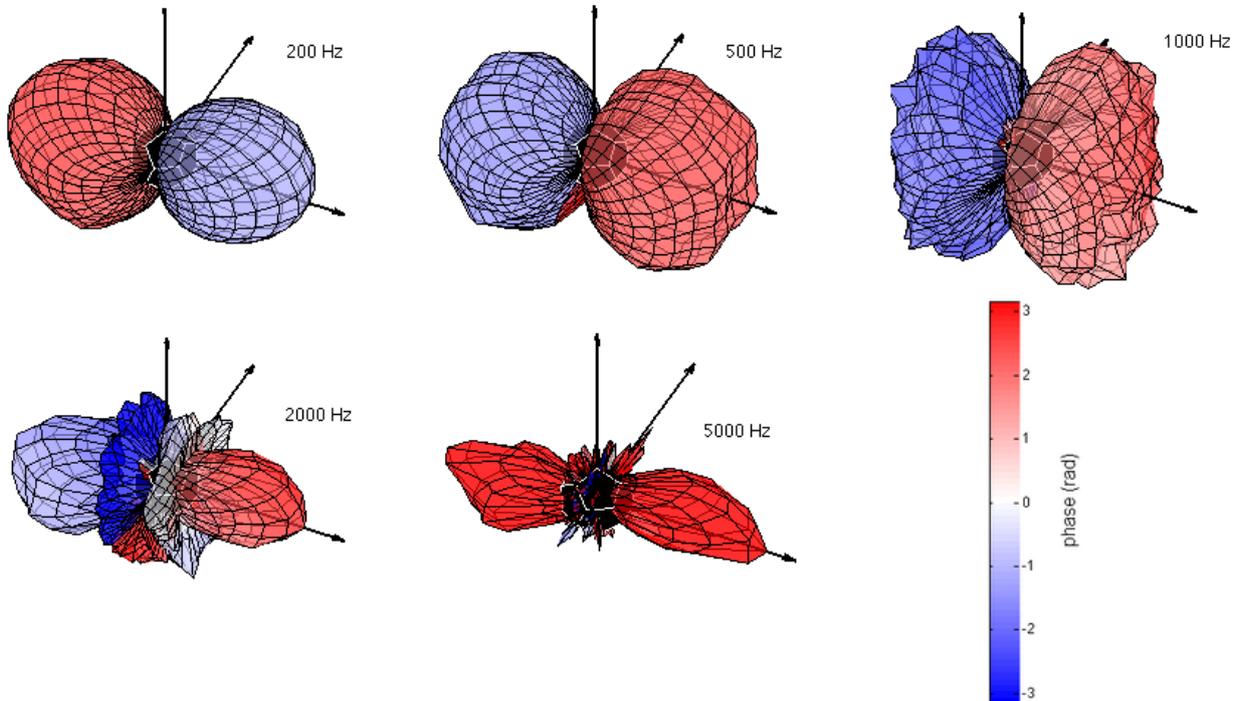


FIGURE 37 – Directivité du GSR avec phase du champ - DIPO

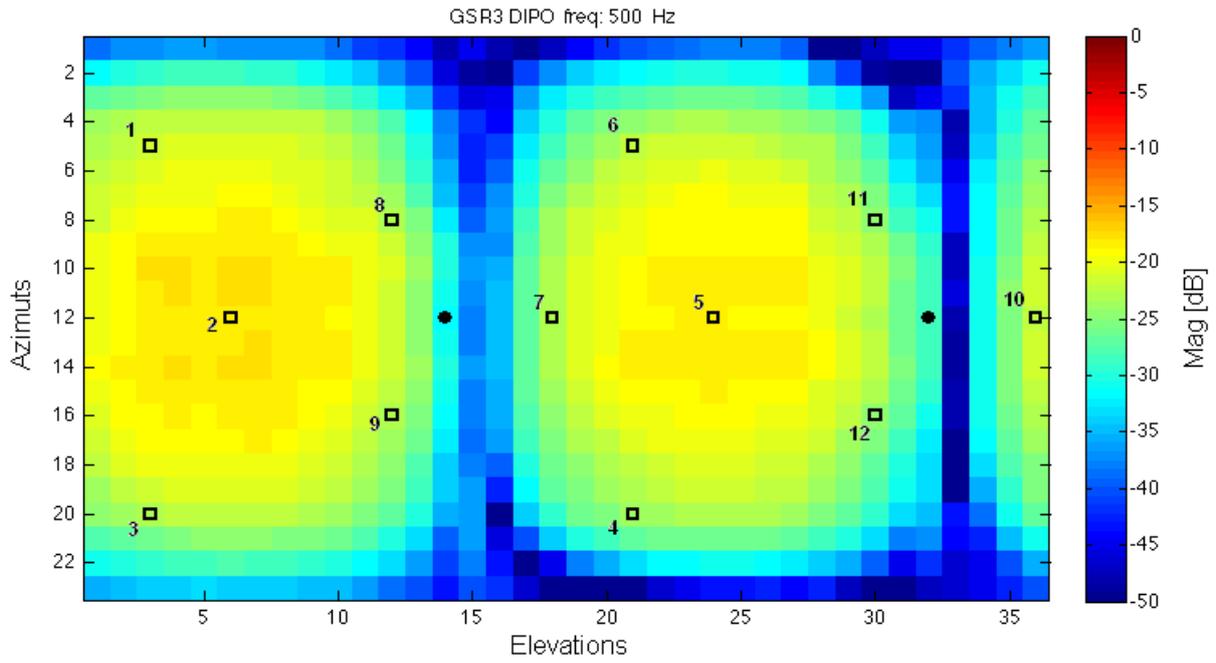


FIGURE 38 – Répartition du champ de pression - GSR - DIPO - 500 Hz

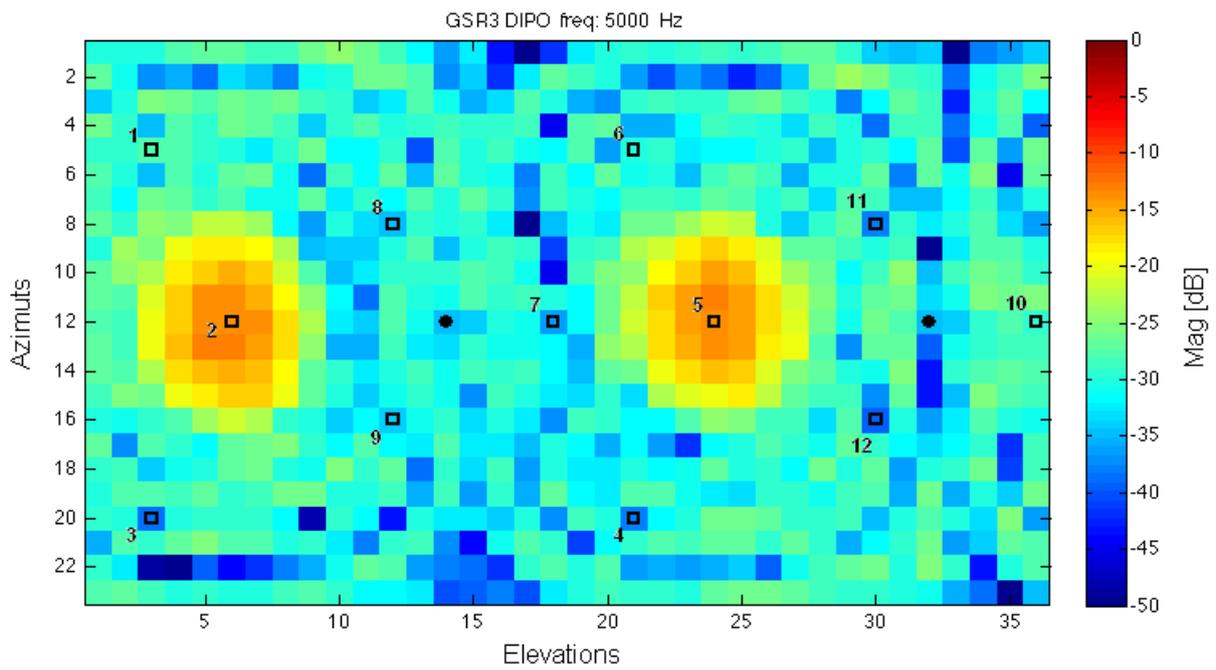


FIGURE 39 – Répartition du champ de pression - GSR - DIPO - 6000 Hz

11.6 Directivité des instruments

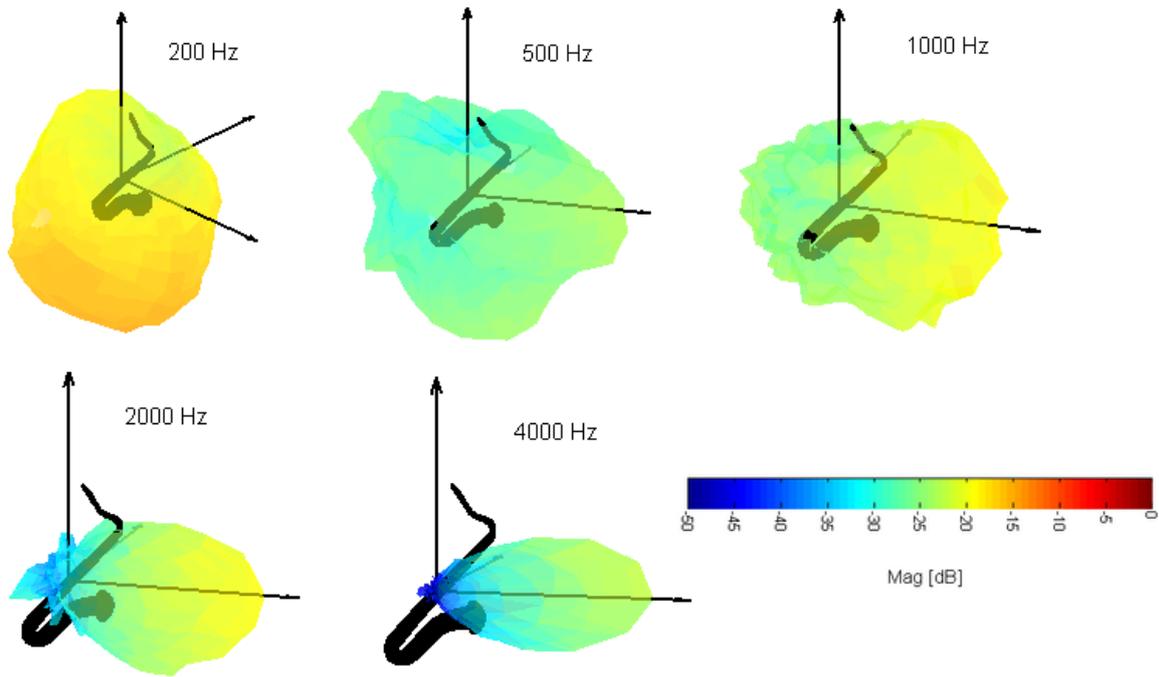


FIGURE 40 – Directivité du saxophone, doigté fermé (Ab 104 Hz)

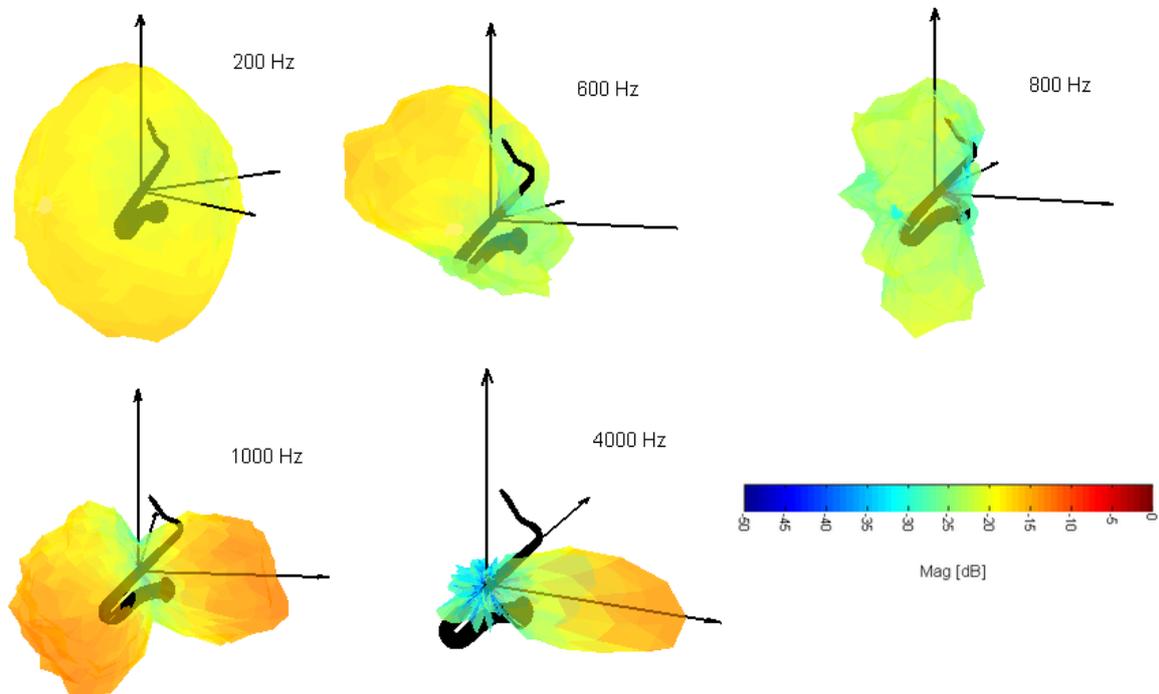


FIGURE 41 – Directivité du saxophone, doigté semi-fermé (F 175 Hz)

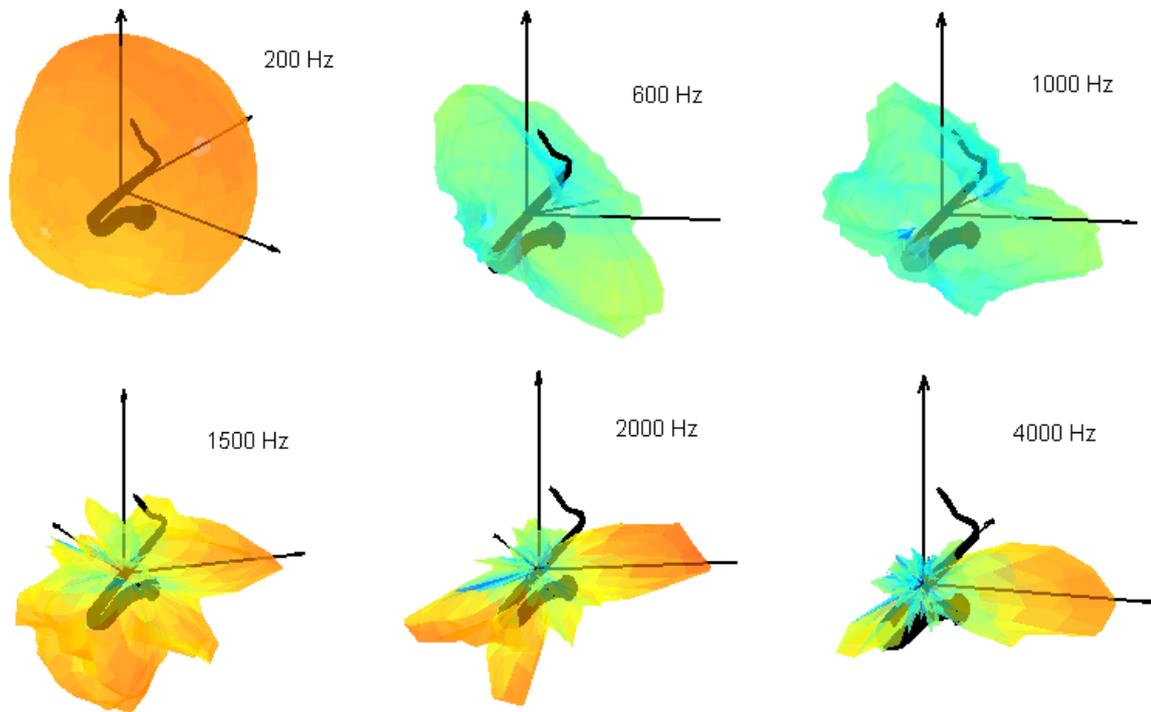


FIGURE 42 – Directivité du saxophone, doigté aigu (Eb 622 Hz)

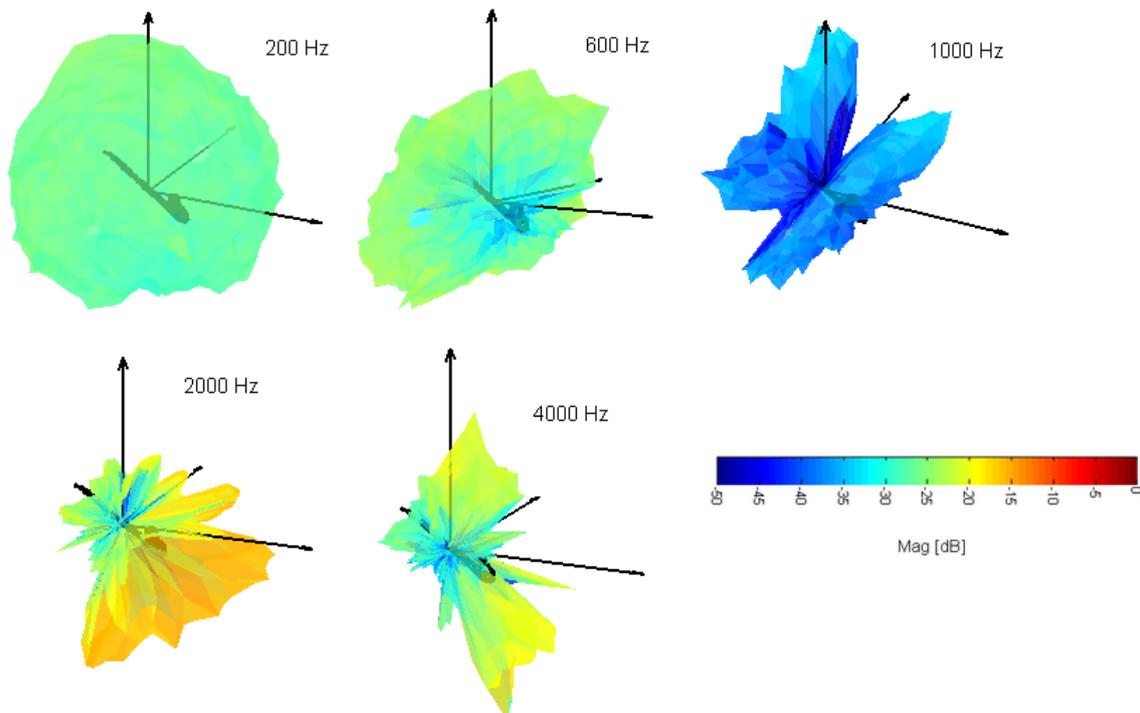


FIGURE 43 – Directivité du cor de basset, doigté ouvert (C 261 Hz)

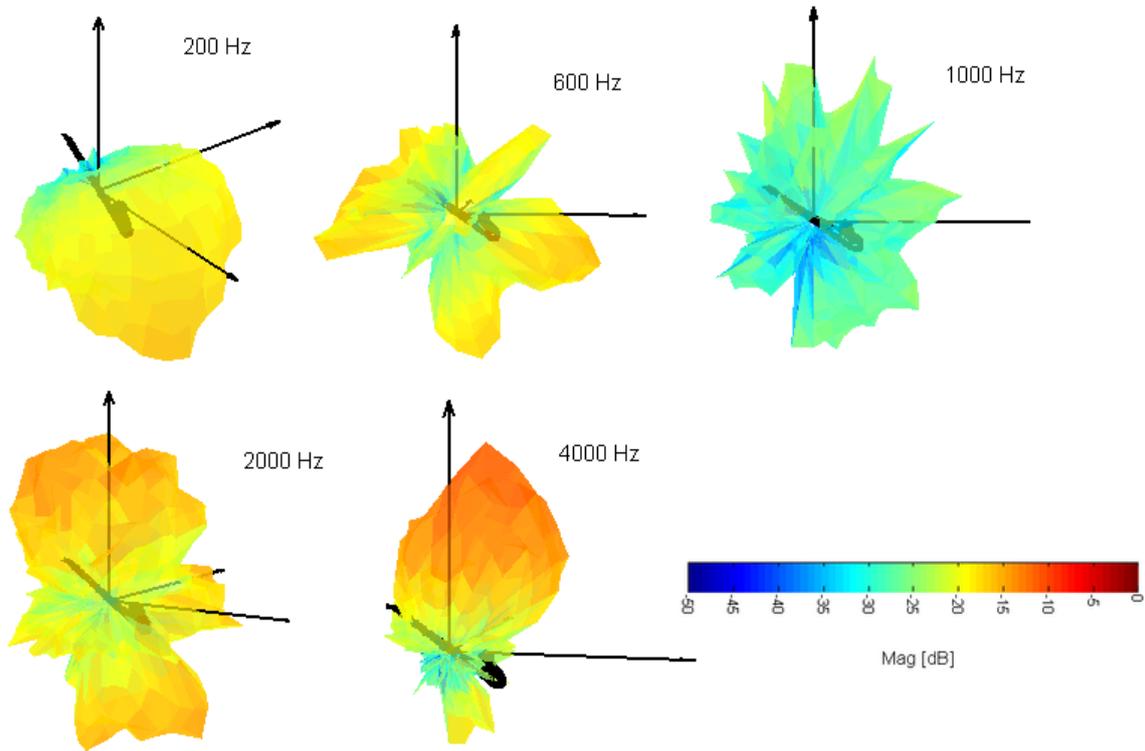


FIGURE 44 – Directivité du cor de basset, doigté fermé (F 87 Hz)

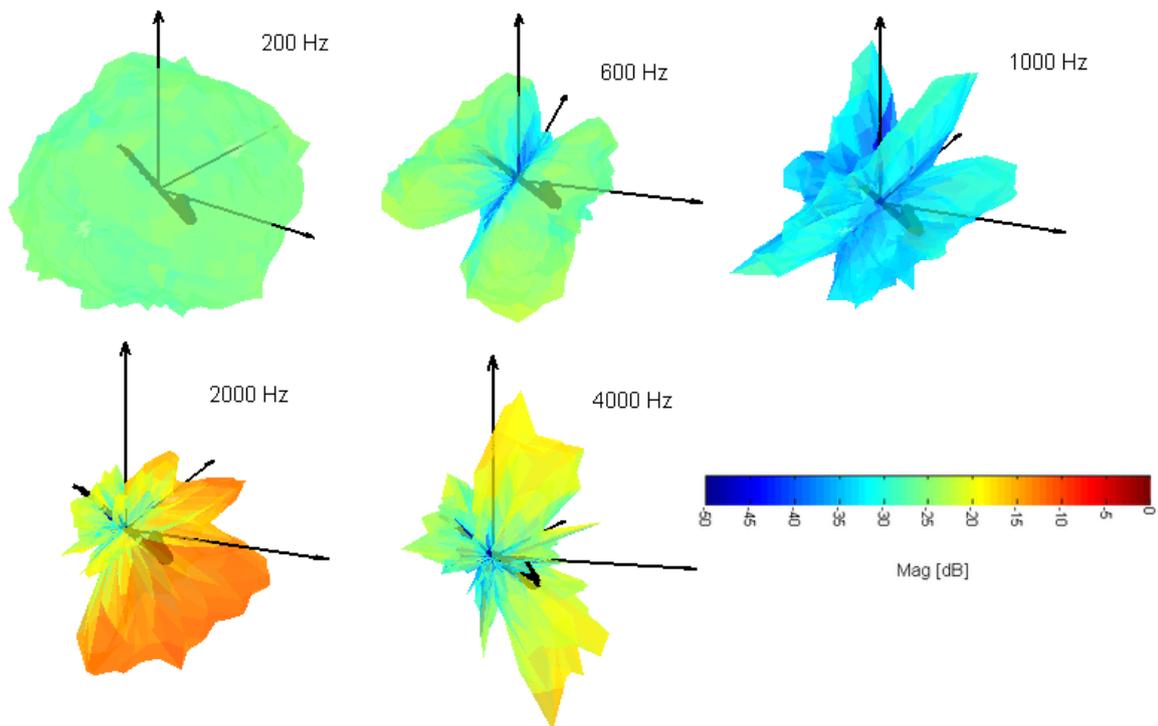


FIGURE 45 – Directivité du cor de basset, doigté semi-fermé (F 175 Hz)

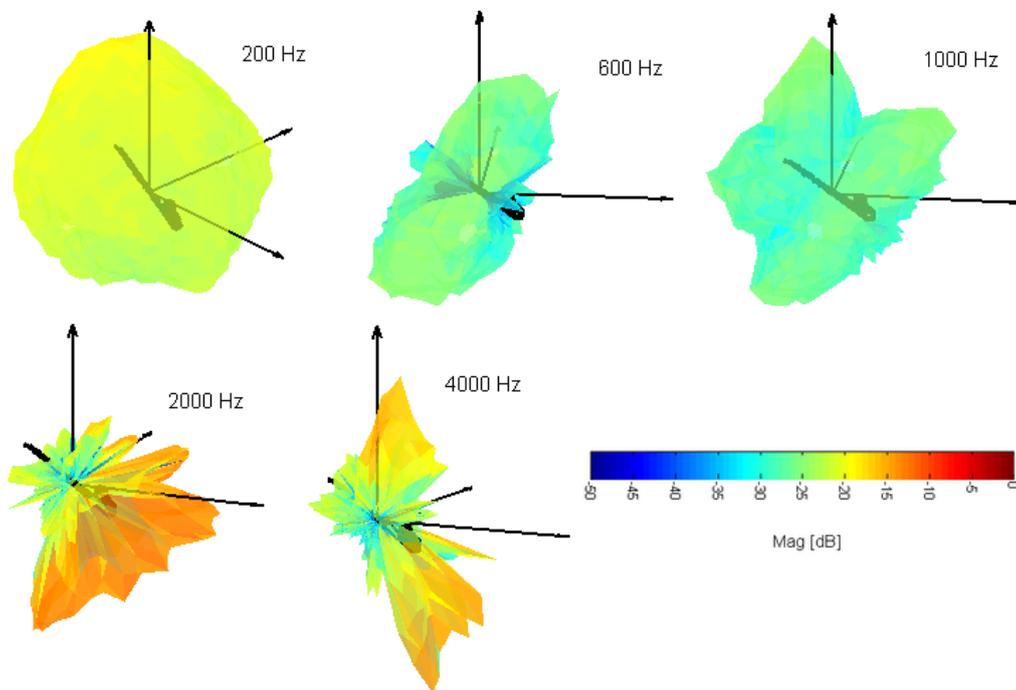


FIGURE 46 – Directivité du cor de basset, doigté semi-fermé (B 494 Hz)

11.7 Décomposition des champs mesurés

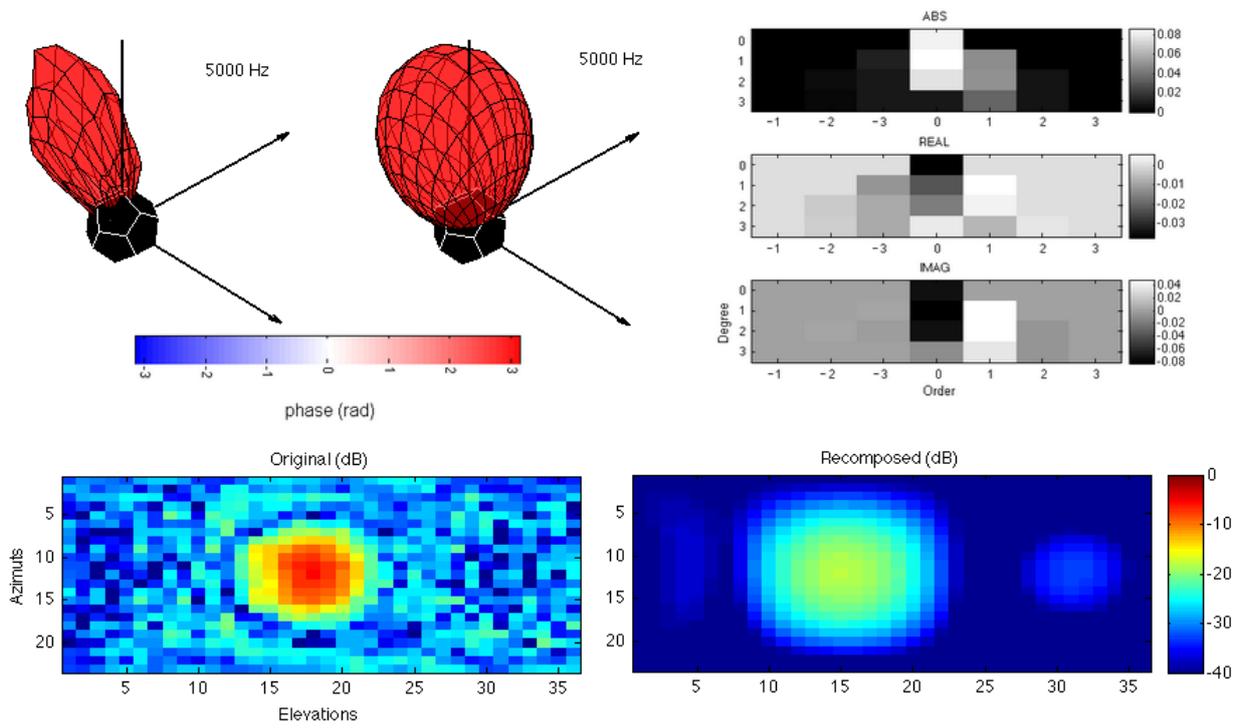


FIGURE 47 – Décomposition du champ sonore pour le hp n°7 (mesuré et recomposé), à 5 kHz ; valeur des coefficients ; magnitude des champs de pression

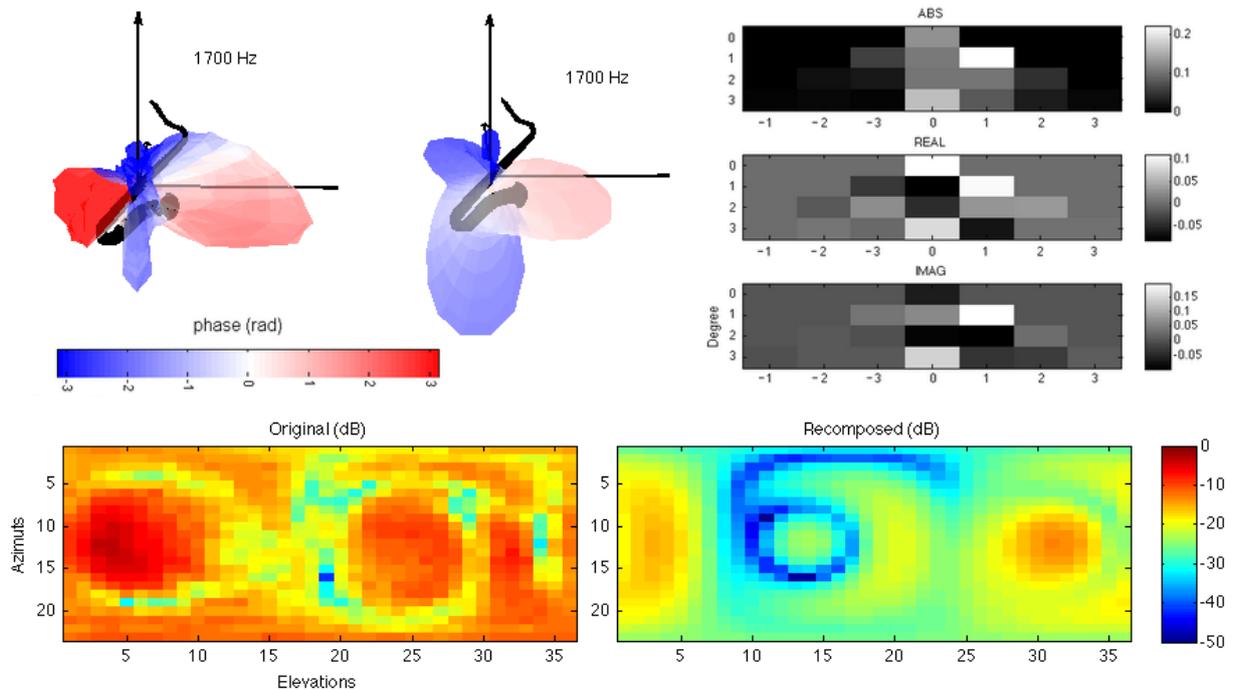


FIGURE 48 – Décomposition du champ sonore pour le saxophone (mesuré et recomposé), à 1,7 kHz ; valeur des coefficients ; magnitude des champs de pression

11.8 Reproduction des harmoniques sphériques

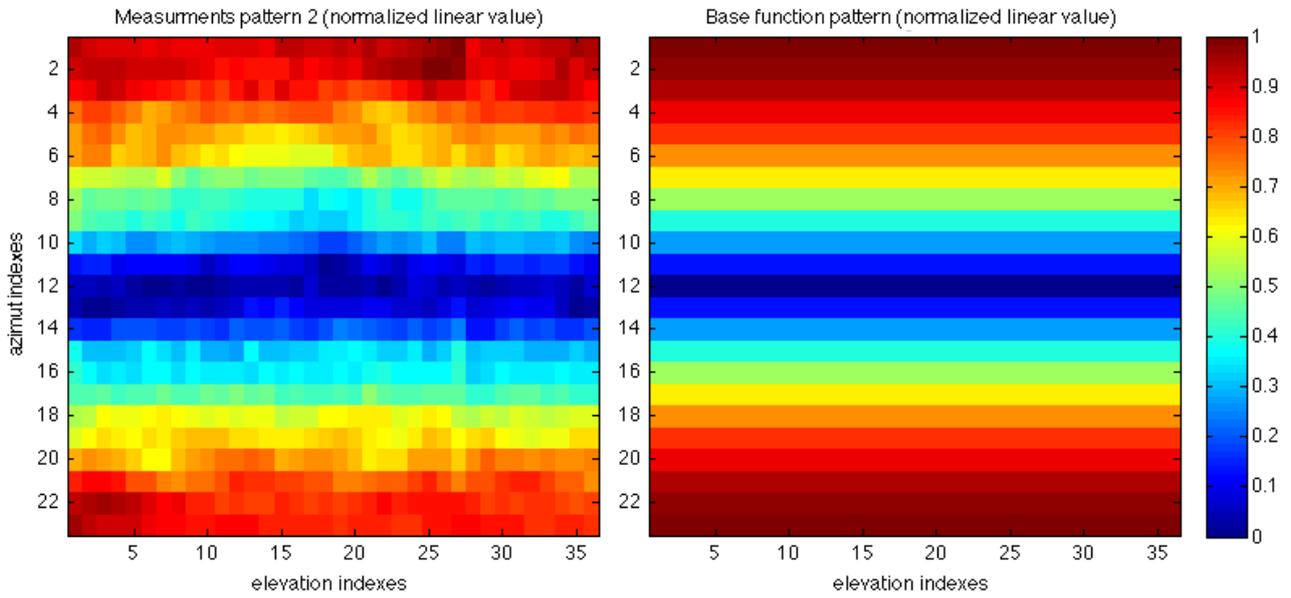


FIGURE 49 – Carte de niveau relatif pour le pattern 2 (dipole transversal), mesure et théorie, 585 Hz

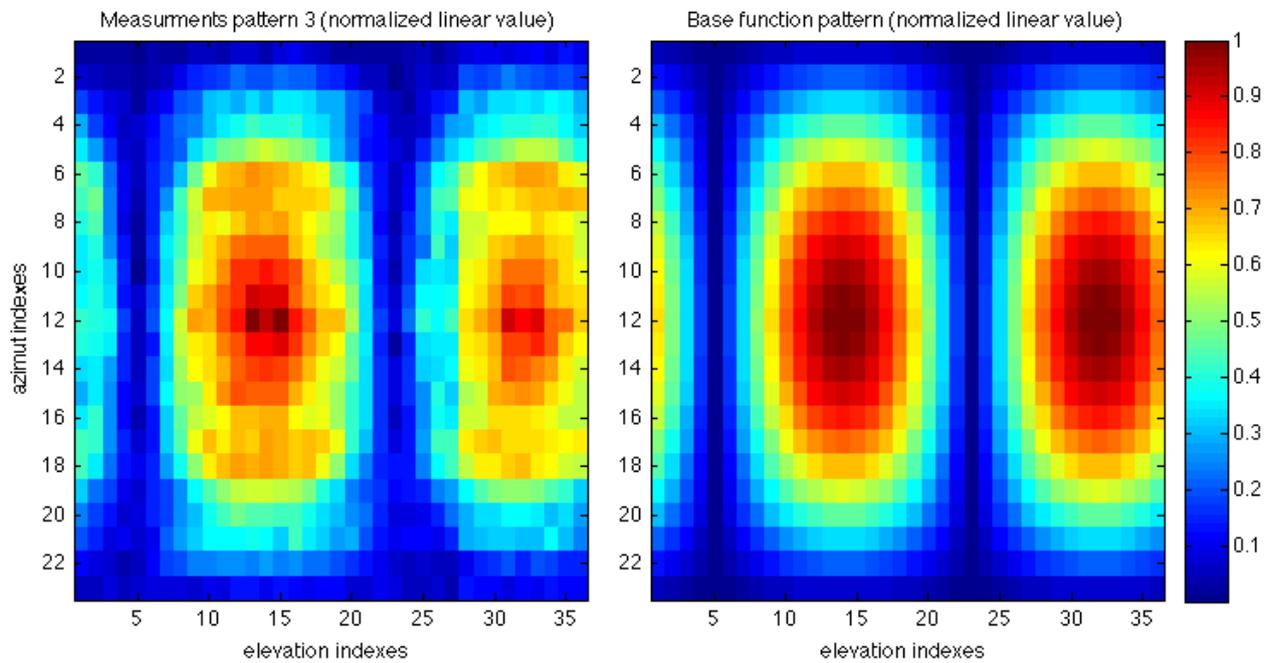


FIGURE 50 – Carte de niveau relatif pour le pattern 3 (dipole vertical), mesure et théorie, 585 Hz

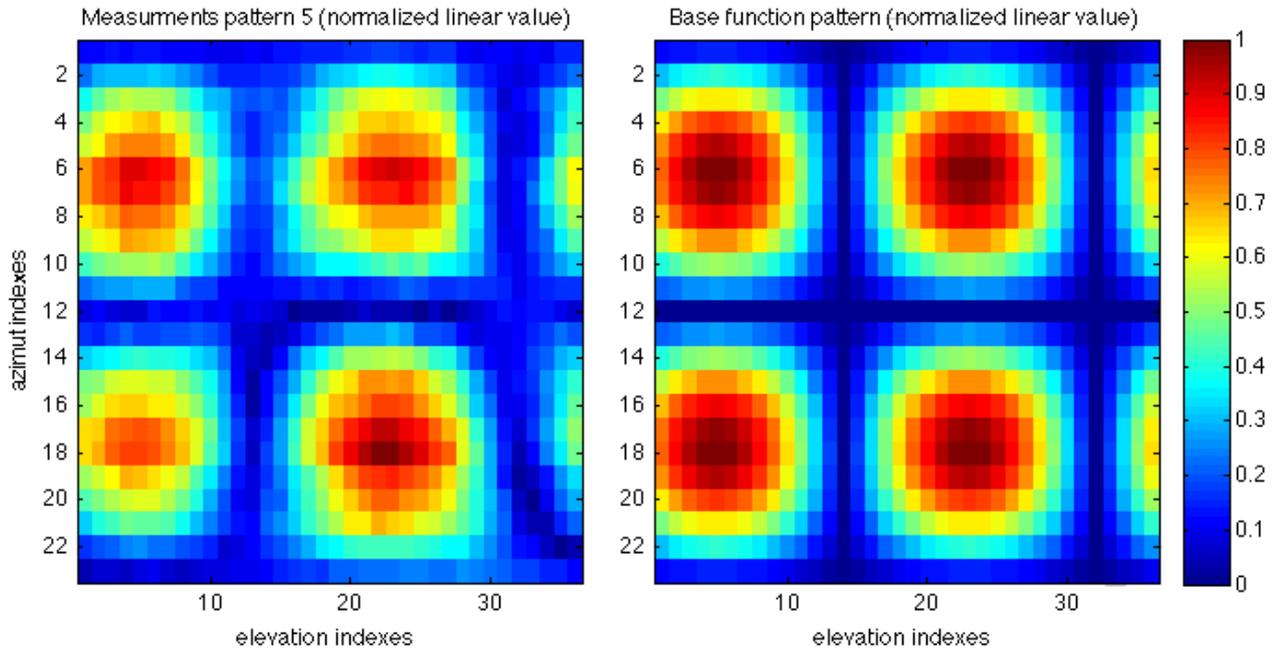


FIGURE 51 – Carte de niveau relatif pour le pattern 5 (plan vertical), mesure et théorie, 585 Hz

Références

- [1] G. K. Behler. Sound source for the measurement of room impulse responses for auralisation. In *19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2007*.
- [2] P. Boulez. 11e congrès international d'acoustique. *8, 213-216*, 1983.
- [3] J.F. Bresciani. *Etude du rayonnement des instrument de musique en vue du contrôle de la reproduction par des haut-parleurs*. PhD thesis, Université du Maine, 1996.
- [4] T. Caulkins. *Caractérisation et contrôle du rayonnement d'un système de Wave Field Synthesis pour la situation de concert*. PhD thesis, Université Paris VI, 2007.
- [5] P. Dérogis. *Analyse des vibrations et du rayonnement de la table d'harmonie d'un piano droit et conception d'un système de reproduction du champ acoustique*. PhD thesis, Université du Maine, 1997.
- [6] A. Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *108th Convention of the AES, Paris, Feb. 2000*.
- [7] F. Jacobsen, S. Barrera Figueroa, and K. Rasmussen. A note on the concept of acoustic center. *JASA, 115(4)*, 2004.
- [8] T. W. Leishman. An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound. *JASA 120(3), 1411-1422*, 2006.
- [9] A. Mas and E. Leipp. Une enceinte acoustique instrumentale. *Bulletin du GAM, 89*, 1977.
- [10] N. Misdariis, F. Nicolas, O. Warusfel, and R. Caussé. Radiation control on multi-loudspeaker device : La timée. *IRCAM*, 2001.
- [11] N. Misdariis, O. Warusfel, and R. Caussé. Le contrôle de la directivité par un système multi haut-parleurs. *IRCAM*, 2001.
- [12] N. Misdariis, O. Warusfel, R. Caussé, and F. Nicolas. Le contrôle de la directivité par un système multi haut-parleurs - applications. *IRCAM*, 2002.
- [13] J.C. Pascal. *Vibrations et acoustique 2*. Cours ENSIM, 2008.
- [14] H. Pomberger. Angular and radial directivity control for spherical loudspeaker arrays. *Diploma thesis, IEM, Graz - Austria*, 2008.
- [15] C. Potel and M. Bruneau. *Acoustique générale*. Ellipses, 2006.
- [16] A. Rousseau. *Modélisation du rayonnement des instruments à vent à trous latéraux*. Rapport de stage IRCAM, 1996.
- [17] G-B. Stan, J-J. Embrechts, and D. Archambeau. Comparison of different impulse response measurement techniques. *JAES, Vol. 50, N°4*, 2002.
- [18] V. Tarnow. Sound radiation from loudspeaker systems with the symmetry of platonic solids. *Bruel&Kjaer, Technical Review*, 1974.
- [19] O. Warusfel, P. Derogis, and R. Caussé. Radiation synthesis with digitally controlled loudspeakers. *IRCAM*, 1997.
- [20] G. Weinreich and E. B. Arnold. Method for measuring acoustic radiation fields. *JASA 68(2)*, 1980.
- [21] E. G. Williams. *Fourier Acoustics*. Academic Press, 1999.
- [22] F. Zotter, A. Schmeder, and M. Noisternig. Crosstalk cancellation for spherical loudspeaker arrays. *DAGA08, Dresden*, 2008.