

UNIVERSITÉ DU MAINE

Le Mans

THÈSE

présentée
en vue d'obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU MAINE
ÈS ACOUSTIQUE

par

Rozenn NICOL

*Restitution sonore spatialisée sur
une zone étendue:
Application à la téléprésence*

soutenue le 14 Décembre 1999

JURY

Président

Claude DEPOLIER

Rapporteurs

Jacques JOUHANEAU

Diemer DE VRIES

Examineurs

Anne-Marie BRUNEAU

Marc EMERIT

Résumé

Le travail de thèse qui est rapporté dans le présent document a porté sur la réalisation d'un système de restitution sonore spatialisée pour la visioconférence. La principale contrainte de ce projet a résidé dans la taille de la zone d'écoute qui doit être suffisamment grande pour englober plusieurs auditeurs simultanément. Chaque auditeur doit également pouvoir se déplacer au sein de la zone d'écoute. A l'issue d'un tour d'horizon des différentes méthodes de spatialisation sonore existantes (stéréophonie, techniques binaurales, système ambisonique...) dont la pertinence a été examinée du point de vue du contexte de visioconférence, une approche holophonique a été finalement choisie, attendu qu'elle s'avère être la solution la plus pertinente pour obtenir une zone d'écoute étendue. Un prototype de système holophonique pour la visioconférence a ainsi été conçu et réalisé.

D'un point de vue théorique, l'holophonie dérive du Principe de Huygens. Elle constitue l'équivalent acoustique de l'holographie et consiste à reproduire un champ sonore à partir d'un enregistrement sur une surface. Sur la plan pratique, le champ sonore est enregistré par un réseau de microphones, auquel on substitue un réseau de haut-parleurs de géométrie identique à la restitution. Le concept de *Wavefield Synthesis* qui a été mis au point à l'U.T.D. (Université Technologique de Delft) définit un exemple de mise en œuvre d'un système holophonique. Le prototype qui a été développé au cours de cette thèse s'en est largement inspiré. En particulier, les simplifications mises en évidence à l'U.T.D., principalement afin de réduire la taille du réseau de transducteurs et leur nombre, ont été retenues. On a néanmoins eu le souci constant d'analyser la pertinence de la démarche menée à l'U.T.D. et de l'approfondir. Ainsi, les questions de l'échantillonnage spatial et de la troncature du réseau de transducteurs ont fait l'objet d'études spécifiques. Au final, le système holophonique qui a été mis au point se compose d'une antenne de haut-parleurs pilotés par une carte DSP. Il a été validé à la fois en environnement anéchoïque et dans un studio expérimental de visioconférence.

Au delà de la réalisation d'un système de spatialisation sonore pour la visioconférence, le second objectif de cette thèse visait une meilleure compréhension des procédés de spatialisation sonore à partir de l'approche générale que définit l'holophonie. Cet objectif a été atteint en reliant le système ambisonique à l'holophonie. Il est montré que, loin de constituer deux méthodes distinctes, les systèmes ambisonique et holophonique sont fondés sur des processus analogues et qu'en réalité, le système ambisonique est un cas particulier de l'holophonie. De ce résultat, un formalisme unifié de la reconstruction de champ sonore a été dégagé: il permet une comparaison directe des performances des deux méthodes, en termes d'encodage et de décodage de l'information spatiale du champ sonore. Il en ressort que, bien que le système ambisonic soit très séduisant sur le plan théorique, il se heurte à de nombreux problèmes de mise en œuvre. Par suite, l'holophonie reste la méthode la plus robuste sur le plan pratique.

Mots-clefs

Son 3D - Visioconférence - Téléprésence - Holophonie - Principe de Huygens - Intégrale de Kirchhoff-Helmholtz - Intégrale de Rayleigh - Wavefield Synthesis - Echantillonnage spatial - Troncature spatiale - Réseau de haut-parleurs - Antenne acoustique - Intégrale de Rubinowicz - Intégrale de Fresnel - Ambisonique -

Abstract

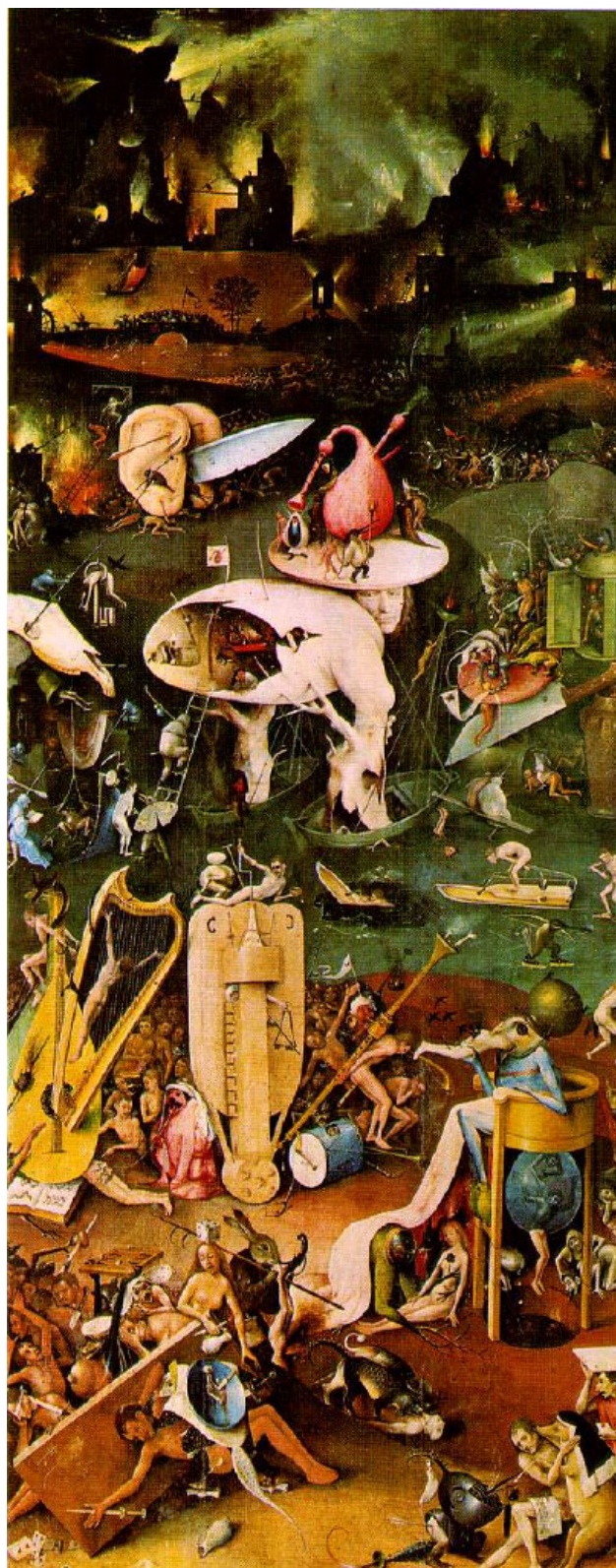
This Ph. D. Thesis deals with 3D-sound reproduction system designed for videoconferencing applications. Since videoconferences are addressed to several listeners, the listening area must be wide and this requirement has determined all the choices made in this study. After an overview of 3D-sound reproduction methods (stereophony, binaural technologies, ambisonic...), whose relevance for videoconferencing has been checked, an holophonic approach is preferred, because it is the only solution which ensures an extensive listening area. Consequently, a prototype of a holophonic system has been designed and implemented for videoconferencing.

From a theoretical point of view, holophony is based on the Huygens' Principle. It defines the acoustical equivalent to holography and consists in reproducing a soundfield from a recording over a surface. Practically, the soundfield is recorded by a microphone array and reproduced by a loudspeaker array of identical geometry. The *Wavefield Synthesis* concept, which has been developed at the Acoustic Laboratory of the D.U.T. (Delft University of Technology), represents one example of such holophonic system. The prototype, which has been designed during this thesis, is largely drawn from the Wavefield Synthesis concept. Particularly, simplifications, which have been pointed out at the D.U.T. in order to reduce the size of the transducer array and the number of transducers involved in the sound pick-up and reproduction, are used. Nevertheless, it was intended to go deeply into the holophonic theory: thus the questions of spatial sampling and spatial truncature have been analysed in detail. The holophonic system finally obtained is composed of a loudspeaker array, which is driven by a DSP. It has been measured and validated both in an anechoic environment and in an experimental videoconferencing studio.

Besides the implementation of a 3D-sound reproduction system for videoconferencing, the second purpose of this thesis aimed at a deep understanding of the sound spatialization process from the general approach defined by holophony. It has been reached by linking ambisonic and holophony. Indeed, it has been shown that, far from being two opposite methods, ambisonic and holophony are fundamentally based on a similar process. Moreover, ambisonic must be considered as a particular case of holophony. From this result, an unified approach of soundfield reconstruction has been derived, which has led to a straightforward comparison of the spatial encoding and decoding of the two methods. It was concluded that ambisonic is very attractive from a theoretical point of view, but unfeasible, so that holophony should be preferred in practice.

Keywords

3D-Sound Reproduction - Videoconferencing - Telepresence - Holophony - Huygens' Principle - Kirchhoff-Helmholtz Integral - Rayleigh Integral - Wavefield Synthesis - Spatial Sampling - Spatial Truncature - Loudspeaker Array - Microphone Array - Rubinowicz Integral - Fresnel Integral - Ambisonic -



Hieronymus Bosch: *Le jardin des plaisirs* — *L'Enfer* —

A toi

Remerciements

Le travail de thèse qui est rapporté dans le présent document s'est déroulé au sein du C.N.E.T. de Lannion, dans le cadre de l'Unité de Recherche et Développement I.S.I. dédiée aux Interfaces Sonores Innovantes du Laboratoire D.I.P.S. (Dialogue et Interaction par la Parole et le Son) de D.I.H. (Direction des Interactions Humaines).

Je voudrais d'abord remercier la direction du C.N.E.T. de m'avoir accueillie dans son établissement afin que j'y réalise mon travail de thèse. Pour les premiers mois passés au sein du Département C.M.C., je tiens à remercier son responsable, Pierre Combescure, de m'avoir admise au sein de son équipe. D.I.P.S. ayant succédé à C.M.C., j'adresse aussi mes remerciements à Francis Charpentier, responsable de D.I.P.S., de m'avoir intégrée dans son Laboratoire. Je remercie également Yannick Mahieux, responsable d'I.S.I., de m'avoir accueillie dans son U.R.D. Je tiens enfin à remercier l'ensemble du personnel du C.N.E.T. de son accueil qui a contribué à rendre mon séjour aussi agréable qu'enrichissant.

L'initiative de cette thèse revient à André Gilloire qui en a défini le sujet et monté le projet. Je veux lui exprimer ici ma reconnaissance de la confiance qu'il m'a accordée pour mener à bien cette étude. Je voudrais aussi le remercier de m'avoir offert l'opportunité d'un sujet de thèse passionnant qui m'a embarquée pour un voyage merveilleux au cœur de la spatialisation sonore et de l'holophonie... Enfin, je tiens à le remercier de l'aide et des conseils qu'il m'a apportés tout au long de mon travail de thèse.

C'est à Marc Emerit qu'a incombé la lourde tâche de diriger mon travail de recherche au C.N.E.T. Du fond du cœur, un grand merci à toi, Marco, pour ta disponibilité, ta patience et la perspicacité dont tu as su m'éclairer. Je n'ai pas peur d'écrire que, grâce à toi, ces trois années passées ont été une aventure formidable dans laquelle le responsable de thèse a fait place à un véritable ami...

Je voudrais aussi exprimer mes plus sincères remerciements à Jean-Marc Jot pour nos nombreuses discussions, au cours desquelles il a bien voulu, avec l'incommensurable bienveillance qui le caractérise, me communiquer quelques bribes de son savoir sur le son 3D ou ambisonic. Jean-Marc, le dernier chapitre de ce document t'est dédié...

Je pense aussi très fort à mon "frère de thèse", Hyeronimus, et à "ma sœur de thèse", Véro...

J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler au sein du Laboratoire D.I.P.S. et je remercie chaleureusement tous ses membres de leur accueil...

Une grande pensée pour Janine, la rayonnante "grand-mère" dont la présence illumine le secrétariat...

Une pensée affectueuse pour Pascal, Claude, Oli, Totophe, Ch'ri Ar Braz, Lionel, Laetitia, Elodie, Gérard, Pierrot...

Je n'oublie pas non plus Stéphane et Jean-Marie qui, à l'occasion de leur stage, ont partagé l'aventure de l'holophonie. Qu'ils soient vivement remerciés non seulement pour l'aide qu'il m'ont apportée dans mon travail de thèse, mais aussi pour leur bonne humeur contagieuse...

Et une pensée très particulière pour Catherine qui m'a accordé l'hospitalité de son bureau...

J'adresse aussi mes plus vifs remerciements aux mécaniciens de l'Atelier de Mécanique pour la réalisation du prototype d'holophonie.

Je tiens à remercier Anne-Marie Bruneau d'avoir accepté d'être ma Directrice de thèse, ainsi que pour son aide et ses conseils. J'exprime aussi mes plus sincères remerciements à Jacques Jouhaneau, Claude Depollier, Diemer de Vries, qui ont bien voulu faire partie de mon jury de thèse, et je remercie tous les membres du

jury d’avoir relevé le “défi” que constituait la lecture de mon document de thèse dont l’épaisseur aurait découragé plus d’un...

Enfin, du plus profond du cœur, je voudrais remercier ma famille pour l’affection dont elle a su m’entourer tout au long de ce travail. Et une pensée très très particulière aux “grandes marées” ...

Et aussi gros poutous à Lolo et Jéré!

Et enfin, plein de choses à toi, Babou...

Trugarez!

Table des Notations et Symboles

$j = \sqrt{-1}$	Unité imaginaire
c	Célérité des ondes acoustiques
t	Temps (s)
f	Fréquence (Hz)
$\omega = 2\pi f$	Pulsation
$k = \frac{\omega}{c}$	Nombre d'onde
$\lambda = \frac{c}{f}$	Longueur d'onde
$\vec{r}(x, y, z)$	Coordonnées cartésiennes
$\vec{r}(r, \varphi, z)$	Coordonnées cylindriques
$\vec{r}(r, \varphi, \theta)$	Coordonnées sphériques
φ	Angle d'azimut (coordonnées cylindriques ou sphériques)
θ	Angle d'élévation (coordonnées sphériques)
$\vec{\chi}(\chi_x, \chi_y, \chi_z)$	Vecteur de fréquence spatiale
Ω	Domaine spatial considéré
$\partial\Omega$	Frontière du domaine Ω
$p(\vec{r}, t)$	Pression acoustique au point \vec{r} et à l'instant t
$p(\vec{r}, \omega)$	Pression acoustique au point \vec{r} et à la pulsation ω
$\vec{\nabla} p(\vec{r}, t)$	Gradient de pression
$P(\vec{\chi})$	Spectre spatial de $p(\vec{r})$
\vec{v}	Vecteur de vitesse particulaire
\vec{I}	Vecteur d'intensité acoustique active
ϕ	Terme de phase
$g(\vec{r}, t)$	Fonction de Green associée au problème (problème temporel)
$g(\vec{r}, \omega)$	Fonction de Green associée au problème (problème fréquentiel)
$g_\infty(\vec{r}, t)$	Fonction de Green en espace infini (problème temporel)
$g_\infty(\vec{r}, \omega)$	Fonction de Green en espace infini (problème fréquentiel)
$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_M]$	Vecteur de longueur M
\mathbf{a}^T	Transposé du vecteur \mathbf{a}
$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1^T \ \mathbf{a}_2^T \ \cdots \ \mathbf{a}_M^T]$	Matrice de dimensions $M \times N$
$\delta(x)$	Distribution de Dirac
$Rect(x)$	Fonction rectangle
$signe(x)$	Fonction signe
$sinc(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$	Fonction sinus cardinal
$J_m(x)$	Fonction de Bessel cylindrique de première espèce d'ordre m
$j_m(x)$	Fonction de Bessel sphérique de première espèce d'ordre m

g	Facteur de gain
Δ	Espacement entre transducteurs (microphones ou haut-parleurs)
w	Fenêtre de pondération
W	Spectre associé à la fenêtre de pondération w
M_e	Matrice d'encodage
M_d	Matrice de décodage

Table des Sigles et Abréviations

U.T.D.	Université Technologique de Delft
T.F.	Transformée de Fourier
F.F.T.	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformée de Fourier Rapide)

Table des matières

Introduction	19
1 De la spatialisation sonore en contexte de visioconférence	23
1.1 De la téléconférence à la visioconférence...	27
1.2 Restitution spatialisée de la scène sonore	27
1.3 Mur de Téléprésence	28
1.4 Reproduction 3D d'un champ sonore sur une zone étendue	30
Références Bibliographiques	31
2 Reproduction 3D d'un champ sonore	35
2.1 Une expérience historique: le <i>Théâtrophone</i> de C. Ader (1881)	39
2.2 Perception 3D d'un champ sonore	42
2.3 Reproduction 3D d'un champ sonore: approche physique et approche psychoacoustique	46
2.4 Stéréophonie	48
2.5 Techniques binaurales	66
2.6 Système ambisonique	73
2.7 Privilégier une approche physique de reproduction sonore 3D	89
Références Bibliographiques	91
3 Holophonie	95
3.1 Le Principe de Huygens	99
3.2 L'Intégrale de Kirchhoff	103
3.3 Application à la reproduction 3D d'un champ sonore	108
3.4 Vers une approche simplifiée	116
3.5 Conclusion	170
Références Bibliographiques	173
4 Echantillonnage spatial de la distribution de sources secondaires	179
4.1 Discrétisation de la distribution de sources secondaires	183
4.2 Pas d'échantillonnage	184
4.3 Repliement de spectre spatial	196
4.4 Processus d'interpolation spatiale	204
4.5 Conclusion	207
Références Bibliographiques	209
5 Troncature Spatiale	213
5.1 Analyse du phénomène	217
5.2 Quantification de l'effet de troncature	247
5.3 Solutions pour réduire l'effet de troncature	254
5.4 Conclusion	280
Références Bibliographiques	283

6	Prototype de système holophonique pour la visioconférence	289
6.1	Contexte de visioconférence	293
6.2	Description du prototype	296
6.3	Expérimentations	311
6.4	Conclusion	322
	Références Bibliographiques	327
7	Lien entre l'holophonie et le système ambisonique	331
7.1	L'approche ambisonique généralisée	335
7.2	Dérivation du système ambisonique à partir de l'holophonie	343
7.3	Une approche unifiée	346
7.4	Encodage spatial	351
7.5	Décodage spatial	359
7.6	Discussion: Système ambisonique versus Holophonie	367
	Références Bibliographiques	371
	Conclusion	377
	Annexes	381
A	Poser et résoudre un problème aux limites en acoustique	383
A.1	Poser le problème	385
A.2	Fonction de Green	386
A.3	Résolution par équations intégrales	388
	Références Bibliographiques	390
B	Intégrale de Kirchhoff	391
B.1	Données du problème de Kirchhoff	393
B.2	Choix de la fonction de Green	393
B.3	Spécificités de l'approche de Kirchhoff	394
B.4	Propriétés de l'intégrale de Kirchhoff	394
	Références Bibliographiques	396
C	Intégrale de Rayleigh	397
C.1	Géométrie du problème de Rayleigh	399
C.2	Choix de la fonction de Green	399
C.3	Propriétés de l'intégrale de Rayleigh	401
	Références Bibliographiques	403
D	Approximation de la phase stationnaire	405
D.1	Principe	407
D.2	Dérivation de la limite asymptotique de l'intégrale	409
D.3	Application aux intégrales de Kirchhoff et Rayleigh	409
	Références Bibliographiques	411
E	Routines Matlab de simulation de l'holophonie	413
E.1	Introduction	415
E.2	Intégrale de Rayleigh I	416
E.3	Intégrale de Rayleigh II	418
E.4	Intégrale de Rayleigh I avec l'approximation de la Phase Stationnaire	420
E.5	Intégrale de Rayleigh II avec l'approximation de la Phase Stationnaire	423
E.6	Intégrale de Rubinowicz	426

F Impulsion Gaussienne	429
F.1 Définition	431
F.2 Spectre	432
Références Bibliographiques	433
G Spectre spatial d'une onde sphérique	435
G.1 Spectre 3D	437
G.2 Spectre 2D	438
Références Bibliographiques	442
H Approximation de Fresnel	443
H.1 Principe	445
H.2 Application à l'intégrale de Rayleigh I	445
Références Bibliographiques	447
I Publications	449
I.1 CORESA 98 (Lannion, 9 & 10 juin 1998)	451
I.2 ICA (Seattle, 20-26 juin 1998)	461
I.3 DAFX 98 (Barcelone, 19-21 novembre 1998)	469
I.4 Forum Acusticum 99 (Berlin, 14-19 mars 1999)	475
I.5 AES 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction (Rovaniemi, 10-12 avril 1999)	481
Références Bibliographiques	501
Table des illustrations	507

