

Références Bibliographiques

- AOKI S. & KOIZUMI N. (1987). Expansion of Listening Area with Good Localization in Audio Conferencing. *In: Proc. I.C.A.S.S.P.*
- ARNAUD Y. (1996). *Etude du système à enceintes croisées: de la pertinence de la localisation stéréophonique en diffusion multipoints*. Rapp. tech. Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière.
- BAMFORD J.S. (1995). *An analysis of Ambisonic Sound Systems of First and Second Order*. Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- BARTON G. (1989). *Elements of Green's Functions and Propagation Potentials, Diffusion and Waves*. Clarendon Press, Oxford.
- BAUCK J. & COOPER D. H. (1996). Generalized Transaural Stereo and Applications. *J. Audio Eng. Soc.*, **44**(9), pp. 683–705.
- BAUER B. B. (1960). Broadening the Area of Stereophonic Perception. *J. Audio Eng. Soc.*, **8**(2), pp. 91–94.
- BERKHOUT A. J. (1988). A Holographic Approach to Acoustic Control. *J. Audio Eng. Soc.*, **36**(12), pp. 977–995.
- BERKHOUT A. J., DE VRIES D. & VOGEL P. (1993). Acoustic Control by Wave Field Synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**(5), pp. 2764–2778.
- BLAUERT JENS. (1983). *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- BLUMLEIN A.D. (Juin 1934). *U.K. Patent 394,325*.
- BOONE M. M. & VERHEIJEN E. N. G. (Octobre 1993). Multi-Channel Sound Reproduction Based on Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 95th Convention*.
- BOONE M. M. & VERHEIJEN E. N. G. (Février 1995). Recording and Reproduction using Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 98th Convention*.
- BOONE M. M. & VERHEIJEN E. N. G. (Mars 1997). Qualification of Sound Generated by Wave Field Synthesis for Audio Reproduction. *In: Proceedings of the A.E.S. 102nd Convention*.
- BOONE M. M., VERHEIJEN E. N. G. & VAN TOL P. F. (1995). Spatial Sound-Field Reproduction by Wave-Field Synthesis. *J. Audio Eng. Soc.*, **43**(12), pp. 1003–1011.
- BRIAN C. J. MOORE. (1997). *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Academic Press, San Diego.
- BRUNEAU M. (1983). *Introduction aux théories de l'acoustique*. Université du Maine, Le Mans.
- CHATEAU N. (Mars 1999). Contribution of Perceived Audiovisual Spatial Fusion to Subjective Audiovisual Quality. *In: Collected Papers from the Joint Meeting "Berlin 99" (137th Meeting of the Acoustical Society of America / 2nd Convention of the European Acoustics Association)*.
- CONDAMINES R. (1978). *Stéréophonie: Cours de relief sonore théorique et appliqué*. Masson, Paris.

- CRAVEN P.G. & GERZON M.A. (Août 1977). *U.S. Patent 4,042,779*.
- DANIEL J. (2000). *Représentation des champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction des sons complexes dans un contexte Multimédia*. Ph.D. Thesis, Université Paris VI, Paris, France.
- DANIEL J., RAULT J.-B. & POLACK J.-D. (Septembre 1998). Ambisonics Encoding of Other Audio Formats for Multiple Listening Conditions. *In: Proceedings of the A.E.S. 105th Convention*.
- DANIEL J., RAULT J.-B. & POLACK J.-D. (Avril 1999). Acoustic Properties and Perceptive Implications of Stereophonic Phenomena. *In: Proceedings of the A.E.S. 16th International Conference*. pp. 91-102.
- DE VRIES D., REIJNEN A.J. & SCHONEWILLE M.A. (1994a). The Wave Field Synthesis Concept Applied to Generation of Reflections and Reverberation. *In: Proceedings of the A.E.S. 96th Convention*.
- DE VRIES D., START E.W. & VALSTAR V.G. (1994b). The Wave Field Synthesis Concept Applied to Sound Reinforcement: Restrictions and Solutions. *In: Proceedings of the A.E.S. 96th Convention*.
- DE VRIES D., BERKHOUT A.J. & SONKE J.J. (Mai 1996). Array Technology for Measurement and Analysis of Sound Fields in Enclosures. *In: Proceedings of the A.E.S. 100th Convention*.
- DE VRIES D., BAAN J. & SONKE J.J. (Mars 1997). Multi-channel Wave Field Analysis as a Specification Tool for Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 100th Convention*.
- DUDOUET E. & MARTIN J. (Mars 1999). A New HRTF Decomposition and Algorithm for Sound Spatialisation. *In: Collected Papers from the Joint Meeting "Berlin 99" (137th Meeting of the Acoustical Society of America / 2nd Convention of the European Acoustics Association)*.
- FARRAR KEN. (1979a). Soundfield Microphone. *Wireless World*, Octobre, pp. 48-50.
- FARRAR KEN. (1979b). Soundfield Microphone - 2. *Wireless World*, Novembre, pp. 99-103.
- GERZON M.A. (1974). Surround-Sound Psychoacoustics. *Wireless World*, Décembre, pp. 483-486.
- GERZON M.A. (1977). Criteria for Evaluating Surround-Sound Systems. *J. Audio Eng. Soc.*, **25**(6), pp. 400-408.
- GERZON M.A. (1980). Practical Periphony: The Reproduction of Full-Sphere Sound. *In: Proceedings of the A.E.S. 65th Convention*.
- GERZON M.A. (1985). Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video. *J. Audio Eng. Soc.*, **33**(11), pp. 859-871.
- GERZON M.A. (1992a). Ambisonic Decoders for HDTV. *In: Proceedings of the A.E.S. 92nd Convention*.
- GERZON M.A. (1992b). General Metatheory of Auditory Localisation. *In: Proceedings of the A.E.S. 92nd Convention*.
- GERZON M.A. (1992c). Optimum Reproduction Matrices for Multispeaker Stereo. *J. Audio Eng. Soc.*, **40**(7/8), pp. 571-589.
- GERZON M.A. (1992d). Panpot Laws for Multispeaker Stereo. *In: Proceedings of the A.E.S. 92nd Convention*.
- HERTZ B. F. (1981). 100 Years with Stereo: the Beginning. *Journ. of Audio Eng. Soc.*, **29**(5), pp. 368-372.
- HUGONNET C. & WALDER P. (1994). *Théorie et pratique de la prise de son stéréophonique*. Eyrolles, Paris.
- HUMBERT E. (1997). Un procédé à ultrasons révolutionne la reproduction sonore. *Electronique Internationale*, **261**(Avril), pp. 26.
- JESSEL M. (1973). *Acoustique théorique, propagation et holophonie*. Masson, Paris.
- JOHNSON D.H. & DUDGEON D.E. (1993). *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall.

- JULLIEN J.-P., GILLOIRE A. & SALIOU A. (Novembre 1984). *Mesure des réponses impulsionnelles en acoustique*. Note technique NT/LAA/TSS/181. C.N.E.T.
- KERGOURLAY G. (1996). *Etude et prédiction de la zone d'écoute stéréo (Rapport de stage, France Telecom C.N.E.T.)*. Rapp. tech. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Le Mans.
- KIRKEBY O. & NELSON P.A. (1993). Reproduction of Plane Wave Sound Fields. *J. Acoust. Soc. Am.*, **94**, pp. 2992–3000.
- KIRKEBY O., NELSON P.A., ORDUNA-BUSTAMANTE F. & HAMADA H. (1996). Local Sound Field Reproduction Using Digital Signal Processing. *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**, pp. 1584–1593.
- KUTTRUFF H. (1991). *Room Acoustics*. Elsevier Applied Science, Paris.
- LAAKSO T.I., VALIMAKI V., KARJALAINEN M. & LAINE U.K. (1994). *Crushing the Delay - Tools for Fractional Delay Filter Design*. Report 35. University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki.
- LARCHER V. & JOT J.-M. (Avril 1997). Techniques d'interpolation de filtres audio-numériques. Application à la reproduction spatiale des sons sur écouteurs. In: *Actes du 4^e Congrès Français d'Acoustique*. pp. 97–100.
- LOPEZ J.J., GONZALEZ A. & ORDUÑA BUSTAMANTE F. (Avril 1999). Measurement of Cross-Talk Cancellation and Equalization Zones in 3-D Sound Reproduction under Real Listening Conditions. In: *Proceedings of the A.E.S. 16th International Conference*. pp. 349–357.
- MAHIEUX Y., PETIT J.-P., EMERIT M., LE TOURNEUR G. & THOMAS J.-P. (1998). Le traitement du son pour la téléconférence. *L'écho des RECHERCHES*, 65–76.
- MAKITA Y. (1962). On the Directional Localisation of Sound in the Stereophonic Sound Field. *E.B.U. Review*, Juin, pp. 102–108.
- MALHAM D. G. (Novembre 1998). Sound Spatialisation. In: *Proceedings of the 98 Digital Audio Effects Workshop (DAFX98)*. pp. 62–70.
- MANGIANTE G. (Avril 1997). Contrôle actif en champ libre. In: *Actes du 4^{ème} Congrès Français d'Acoustique*, vol. 1. pp. 179–182.
- MARIN M. (Octobre 1996). *Etude de la localisation en restitution du son pour la téléconférence de haute qualité*. Ph.D. Thesis, Université du Maine, Le Mans, France.
- MAX J. & COLL. (1985). *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*. Masson, Paris.
- MIYOSHI M. & KOIZUMI N. (1992). NNT's Research on Acoustics for Future Telecommunication Services. *Applied Acoustics*, **36**, pp. 307–326.
- MØLLER H. (1992). Fundamentals of Binaural Technology. *Applied Acoustics*, **36**, pp. 171–218.
- MORSE P.M. & FESHBACH H. (1953). *Methods of Theoretical Physics*. McGraw-Hill, New York.
- MORSE P.M. & INGARD K.U. (1968). *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, New York.
- MURRAY J. D. (1974). *Asymptotic Analysis*. Clarendon Press, Oxford. Chap. 4.
- NELSON P.A. (1994). Active Control of Acoustic Fields and the Reproduction of Sound. *J. Sound Vib.*, **177**(4), pp. 447–477.
- NICOL R. (1996). *A l'écoute du principe de Huygens*. Rapp. tech. D.E.A. d'Acoustique Appliquée, Université du Maine, Le Mans.

- NICOL R. (1997). *Champ proche et champ lointain: Caractérisation physique, applications à la mesure, la prise et la restitution du son (Mémoire de Probatoire Ingénieur)*. Rapp. tech. C.N.A.M., Paris.
- NICOL R. & EMERIT E. (Novembre 1998). Reproducing 3D-Sound for Videoconferencing: a Comparison between Holophony and Ambisonic. *In: Proceedings of the 98 Digital Audio Effects Workshop (DAFX98)*. pp. 17-20.
- NICOL R. & EMERIT E. (1999a). 3D-Sound Reproduction over an Extensive Listening Area: a Hybrid Method Derived from Holophony and Ambisonic. *In: Proceedings of the A.E.S. 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction*. pp. 436-453.
- NICOL R. & EMERIT E. (1999b). Holophony versus Ambisonic: Deriving a Hybrid Method for 3D-Sound Reproduction in Videoconferencing. *In: Collected Papers from the Joint Meeting "Berlin 99" (137th Meeting of the Acoustical Society of America / 2nd Convention of the European Acoustics Association)*.
- OLDHAM K.B. & SPANIER J. (1974). *The Fractional Calculus: Theory and Applications of Differentiation and Integration to Arbitrary Order*. Academic Press, New York and London.
- PERNAUX J.-M. (1999). *Restitution sonore spatialisée par antenne de haut-parleurs selon un procédé holophonique: Etude des phénomènes de diffraction et mise en œuvre d'une solution basée sur l'annulation du champ diffracté*. Rapp. tech. D.E.A. A.T.I.A.M., Université de la Méditerranée, AIX MARSEILLE II.
- PERNAUX J.-M., BOUSSARD P. & JOT J.-M. (Novembre 1998). Virtual Sound Source Positioning and Mixing in 5.1 Implementation on the Real-Time System Genesis. *In: Proceedings of the 98 Digital Audio Effects Workshop (DAFX98)*. pp. 76-80.
- PLOMP R. (1977). Acoustical Aspects of Cocktail Parties. *Acustica*, **38**, pp. 186-191.
- POLACK J. D. (1995). *Cours de psychoacoustique et d'acoustique des salles*. Université du Maine, Le Mans.
- POLETTI MARK. (1996). The Design of Encoding Functions for Stereophonic and Polyphonic Sound Systems. *J. Audio Eng. Soc.*, **44**(11), pp. 948-963.
- POTTER J. M. (1995). Measures for Spaciousness in Room Acoustics Based on a Binaural Strategy. *Acta Acustica*, **3**, pp. 429-443.
- PULKKI VILLE. (1997). Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. *J. Audio Eng. Soc.*, **45**(6), pp. 456-466.
- REINHARD H. (1989). *Cours de Mathématiques du signal*. Dunod Université, Paris.
- RIMELL A. (Avril 1999). Immersive Spatial Audio for Telepresence Applications; System Design and Implementation. *In: Proceedings of the A.E.S. 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction*. pp. 379-390.
- ROCARD Y. (1960). *Dynamique générale des vibrations*. Masson, Paris.
- SALIOU A. (1995). *Rapport interne C.N.E.T./MATRA sur le projet TOSQA*.
- SKUDRZYK E. (1971). *The Foundations of Acoustics, Basic Mathematics and Basic Acoustics*. Springer-Verlag, Wien New York.
- SNOW W. B. (1953). Basic Principles of Stereophonic Sound. *Journal of the SMPTE*, **61**(Novembre), pp. 567-589.
- SONKE J.-J. & DE VRIES D. (Mars 1997). Generation of Diffuse Reverberation by Plane Wave Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 102nd Convention*.

- START E. (1997). *Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis*. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Physics, Delft, Pays-Bas.
- START E. W. (Mai 1996). Application of Curved Arrays in Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 100th Convention*.
- TÄGER W. (Mars 1997). *Filtres numériques pour retards fractionnaires*. Brevet 9703845. France Telecom.
- THOMAS Y. (1995). *Signaux et systèmes linéaires*. Masson, Paris.
- THURLOW W.-R. & JACK C.E. (1973). Certain Determinants of the "Ventriloquism Effect". *Perceptual and Motor Skills*, **36**, pp. 1171–1184.
- TORICK E. (1998). Highlights in the History of Multichannel Sound. *J. Audio Eng. Soc.*, **46**(1/2), pp. 27–31.
- TRÉBUCHET L.-C. (1997). *Etude et mise en œuvre des techniques ambisoniques pour la spatialisation du son*. Rapp. tech. FT.BD.CNET/DSM/RSA/SDA/147/97/LCT. E.N.S.T. / C.C.E.T.T.
- VALIMAKI V. (1994). *Fractional Delay Waveguide Modeling of Acoustic Tubes*. Report 34. University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki.
- VERHEIJEN E. (1997). *Sound reproduction by wave field synthesis*. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Physics, Delft, Pays-Bas.
- VERHEIJEN E. N. G., JANSEN G. & BOONE M. M. (Mars 1997). Design and Implementation of an Audio Reproduction System Based on Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 102nd Convention*.
- WENZEL E.M. (Avril 1999). Effect of Increasing System Latency on Localization of Virtual Sounds. *In: Proceedings of the A.E.S. 16th International Conference*. pp. 42-50.

Table des illustrations

1.1	Principe d'une visioconférence	26
1.2	Concept du mur de téléprésence: Les participants ont l'illusion de partager le même espace que leurs interlocuteurs distants (localisés à Singapour et Sydney), d'après [Miyoshi & Koizumi, 1992].	29
2.1	Expérience du Théâtrophone	40
2.2	Expérience du Théâtrophone: Schéma de connection des microphones (Opéra) aux récepteurs téléphoniques (Palais de l'Industrie) [Hertz, 1981]	41
2.3	Localisation d'une source sonore dans l'espace à trois dimensions (la position de la source est repérée par ses coordonnées sphériques: rayon r , angle d'azimut φ et angle d'élévation δ): Localisation dans le plan horizontal (<i>horizontal plane</i>) et dans le plan médian (<i>median plane</i>) (d'après [Blauert, 1983]).	42
2.4	Différences interaurales d'intensité et de temps calculées en modélisant la tête par une sphère rigide de diamètre 17 cm, les deux oreilles étant figurées par 2 points de sa surface situés en $(\varphi, \delta) = (100^\circ, 0^\circ)$ et $(260^\circ, 0^\circ)$, (d'après [Blauert, 1983]).	43
2.5	Expérience des "bandes directives" de J. Blauert: Lorsque l'on fait écouter des signaux à bande étroite de fréquence donnée et émis par une source fixe, l'évènement sonore est localisé indépendamment de la position de la source réelle et uniquement en fonction de la fréquence du son (d'après [Blauert, 1983]).	44
2.6	Précision de la localisation dans le plan horizontal et dans le plan médian (d'après [Blauert, 1983]).	45
2.7	Système stéréophonique conventionnel	48
2.8	Stéréophonie de temps: Couple AB omni (microphones omnidirectifs non coïncidents)	50
2.9	Stéréophonie d'intensité	51
2.10	Stéréophonie mixte: Couple AB (microphones unidirectifs non coïncidents)	52
2.11	Dispositif de restitution stéréophonique étendue à trois points d'écoute pour un système de visioconférence [Aoki & Koizumi, 1987]	53
2.12	Test de localisation pour un système stéréophonique conventionnel [Aoki & Koizumi, 1987] . .	55
2.13	Test de localisation pour le dispositif de restitution stéréophonique étendue à trois points d'écoute [Aoki & Koizumi, 1987]	55
2.14	Utilisation de la directivité des enceintes pour compenser une différence de temps par une différence d'intensité [Arnaud, 1996]	56
2.15	Principe d'une enceinte à directivité contrôlée croissante (E.D.C.C.)	57
2.16	Dispositif de paires d'enceintes croisées pour une zone de restitution stéréophonique étendue (vue de dessus): L'ensemble des enceintes gauches et droites sont utilisées pour synthétiser deux sources stéréophoniques gauche et droite virtuelles dont la localisation est indépendante de la position de l'auditeur au sein de la zone d'écoute considérée.	58
2.17	Méthode vectorielle de construction des sources virtuelles	59
2.18	Etendue de la zone de restitution stéréophonique stable évaluée sur la base d'un critère de distorsion d'imagerie V (la surface grisée représente la zone sur laquelle le critère V est inférieur ou égal à 10%): comparaison des performances du système de multidiffusion stéréophonique de l'I.N.A. avec un dispositif stéréophonique conventionnel [Arnaud, 1996]	60

2.19	Principe de la stéréophonie dirigée: Contrôle de la localisation de la source virtuelle par un panoramique d'intensité	62
2.20	Méthode V.B.A.P.: Projection de la source virtuelle sur une base vectorielle constituée à partir des haut-parleurs	63
2.21	Méthode V.B.A.P. étendue à trois dimensions	64
2.22	Panoramique d'intensité 3D avec la méthode V.B.A.P.: L'auditeur est entouré par une sphère de haut-parleurs.	65
2.23	Techniques binaurales: Système binaural conventionnel et Système transaural (d'après [Møller, 1992])	68
2.24	Principe du système transaural généralisé	70
2.25	Exemple de système de restitution transaurale généralisée: Combinaison d'un monopôle et de plusieurs dipôles disposés derrière chaque auditeur	72
2.26	Prise de son ambisonique: Association d'un microphone omnidirectionnel (composante W) à trois microphones bidirectionnels (composantes X,Y,Z)	75
2.27	Coordonnées du vecteur d'onde associé à une onde plane (φ_0 : angle d'azimut, θ_0 : angle d'élévation)	76
2.28	Microphone Soundfield: Combinaison de quatre capsules cardioïdes montées sur les faces d'un tétraèdre régulier	77
2.29	Microphone Soundfield: Dérivation des signaux (W,X,Y,Z) à partir des signaux (LF, LB, RF, RB) enregistrés par les capsules cardioïdes [Farrar, 1979a]	78
2.30	Système de restitution ambisonique: Distribution de haut-parleurs sur la surface d'une sphère centrée sur l'auditeur	80
2.31	Synoptique d'un circuit de décodage ambisonique	85
2.32	Onde plane horizontale: Coordonnées cylindriques (vecteur d'onde \vec{k} de l'onde plane et point d'écoute \vec{r})	86
3.1	Principe de Huygens: le front d'onde à un instant donné est équivalent à une distribution de sources secondaires qui rayonnent chacune une ondelette et dont la superposition des contributions redonne le front d'onde aux instants ultérieurs.	99
3.2	Applications du Principe de Huygens	100
3.3	Décomposition de l'espace Ω en deux domaines: le domaine Ω_1 des sources primaires et le domaine Ω_2 de restitution (Dans un souci de clarté du dessin, les domaines Ω et Ω_2 sont figurés par des sphères, mais leur forme est quelconque.)	102
3.4	Géométrie du problème de Kirchhoff: La partition de l'espace Ω en deux sous-espaces peut s'effectuer de deux façons, en entourant par une surface fermée $\partial\Omega$, soit le domaine de restitution Ω_2 (a), soit le domaine des sources Ω_1 (b).	103
3.5	Directivité dipolaire: Le plan de la membrane du transducteur, qu'il s'agisse d'un microphone ou d'une source, correspond à un zéro de directivité.	105
3.6	Relations de phase dans les signaux captés par un microphone à gradient de pression et dans l'onde émise par une source dipolaire	106
3.7	Géométrie du problème de Rayleigh: Le domaine des sources Ω_1 et le domaine de restitution Ω_2 sont séparés par un plan vertical.	107
3.8	Principe général de la prise et restitution du son selon la méthode holophonique	109
3.9	Source Monopolaire et Source Dipolaire: Approximation par un haut-parleur bafflé et un haut-parleur non bafflé	110
3.10	Source de Kirchhoff: Relations de phase entre les signaux captés par le microphone de pression et le microphone à gradient de pression d'une part et entre les signaux émis par le monopôle et le dipôle d'autre part (les dipôles sont orientés selon la normale \vec{n} , cf. Fig. 3.4)	111
3.11	Conséquences pratiques de la sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff	113
3.12	Problème de Kirchhoff appliqué à une salle: Modélisation d'un effet de salle par la méthode des sources images	114
3.13	Problème de Kirchhoff appliqué à une salle	115
3.14	Approximation de la Phase Stationnaire: La distribution de sources secondaires se réduit à l'intersection de la surface $\partial\Omega$ avec le plan horizontal.	117

3.15	Approximation de la phase stationnaire: On considère un espace de restitution Ω_2 prenant la forme d'une colonne verticale infinie de section quelconque.	118
3.16	Point de Phase Stationnaire: Point d'intersection entre le plan horizontal et la ligne verticale infinie L considérée (cf. Fig. 3.15)	120
3.17	Approximation de la Phase Stationnaire: A chaque ligne-source verticale est substituée une source unique située à son point de phase stationnaire, ce qui ramène le réseau 2D de sources secondaires au contour 1D C_0	122
3.18	Approximation de la Phase Stationnaire: Exemples de réseau 1D de sources secondaires	123
3.19	Théorème de la phase stationnaire appliqué au réseau 1D de sources secondaires	124
3.20	Décomposition de l'espace des sources primaires en zones élémentaires contrôlées par une seule source secondaire	125
3.21	Restriction de l'espace des sources primaires: Réseau ouvert	125
3.22	Restitution holophonique pour la visioconférence: Antenne rectiligne de haut-parleurs disposée derrière l'écran vidéo (l'espace des sources primaires se limitent au demi-espace situé derrière l'écran vidéo)	126
3.23	Réseau circulaire: Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs	128
3.24	Réseau circulaire: Comparaison entre l'onde de pression originale et onde de pression synthétisée par les sources secondaires (la pression acoustique est représentée en fonction du temps le long d'une ligne parallèle à l'axe (O_x) en $y = 0.5$ m., la source primaire est un monopôle situé en $s_1[0., 3., 0.]$ et qui émet une impulsion gaussienne de fréquence $f = 400$ Hz, les sources secondaires sont distribuées le long d'un cercle de rayon $r_0 = 1.5$ m. et au total $N = 100$ sources secondaires sont utilisées, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)	129
3.25	Décomposition du réseau circulaire en deux sous-antennes semi-circulaires	129
3.26	Réseau circulaire: Contribution relative des sous-antennes semi-circulaires (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	130
3.27	Synthèse du champ acoustique d'un monopôle par une antenne circulaire: Identification des sources utiles et sources inactives	131
3.28	Réseau circulaire: Décomposition en deux sous-antennes représentant respectivement un quart du cercle et son complément	132
3.29	Réseau circulaire: Contribution relative d'un quart de cercle et de son complément (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.28, cf. Annexes E & F)	132
3.30	Décomposition du processus de reconstruction de l'onde primaire en un point: Ondelettes émises par les sources secondaires (Récepteur en $\vec{r}[0., 0., 0.]$, source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, réseau circulaire: $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)	133
3.31	Décomposition du processus de reconstruction de l'onde primaire en un point: Sommation des ondelettes (Récepteur en $\vec{r}[0., 0., 0.]$, source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, réseau circulaire: $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)	134
3.32	Réseau circulaire: Onde de pression originale et onde de pression synthétisée par l'antenne semi-circulaire 1 pour la source primaire en $s_2[3., 2., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	135
3.33	Réseau circulaire: Onde de pression originale et onde de pression synthétisée par l'antennes semi-circulaire 1 en $y = -0.5$ m. (source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	135
3.34	Réseau carré: Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs	136
3.35	Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires pour simuler une source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	138
3.36	Réseau carré: Contributions des quatre côtés pour une source primaire centrée (source primaire en s_1 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	138

3.37 Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires pour une source primaire excentrée (source primaire en s_2 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	139
3.38 Réseau carré: Contributions des quatre côtés pour une source primaire excentrée (source primaire en s_2 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	139
3.39 Réseau polygonal élémentaire (une antenne rectiligne principale — côté 2 — associée à deux antennes latérales — côtés 1 et 3 —): Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs	140
3.40 Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	141
3.41 Réseau polygonal élémentaire: Contribution des trois antennes rectilignes élémentaires pour la source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	142
3.42 Réseau polygonal élémentaire: Contribution des trois antennes rectilignes élémentaires pour la source primaire en s_2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	143
3.43 Réseau circulaire: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires de la sous-antenne circulaire 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	144
3.44 Réseau circulaire: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires de la sous-antenne circulaire 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	144
3.45 Réseau circulaire: Onde de pression restituée lorsque le réseau ne comporte exclusivement que des monopôles ou des dipôles (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	145
3.46 Réseau circulaire de monopôles: Pondération spatiale semi-circulaire	146
3.47 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	148
3.48 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	148
3.49 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 3 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	149
3.50 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 4 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	149
3.51 Simulation d'une source primaire en s_1 située en aval du réseau de sources secondaires (c'est-à-dire du même côté que la zone de restitution): Le front d'onde synthétisé correspond à celui qui aurait été émis par une source située en s'_1 , position symétrique de s_1 par rapport au plan des sources secondaires.	150

3.52	Source secondaire au point de phase stationnaire: Equivalence entre les ondes rayonnées par le monopôle et le dipôle en vertu de la symétrie des angles d'émission, pour le microphone bidirectionnel, et de réception, pour la source dipolaire.	151
3.53	Distribution 1D de Rayleigh: Chaque côté du réseau carré est identifié à un segment tronqué d'une droite infinie.	152
3.54	Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	154
3.55	Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	154
3.56	Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 3 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	155
3.57	Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 4 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	155
3.58	Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires monopolaires pour la source en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	156
3.59	Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires monopolaires pour la source en s_2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	157
3.60	Réseau polygonal élémentaire: Décomposition de l'espace des sources primaires en six zones associées aux différents éléments du réseau de sources secondaires	159
3.61	Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	160
3.62	Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_3[2., 4., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	161
3.63	Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_4[0., 2., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	162
3.64	Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_5[3., 1., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	163
3.65	Multimicrophonie de proximité	165
3.66	Processus d'extrapolation appliqué aux signaux microphoniques: Opérations de rétropropagation et propagation destinées à simuler une prise de son par un réseau holophonique	166
3.67	Concept de source notionnelle appliqué à des sources en mouvement: Couverture de la scène sonore par un réseau microphonique horizontal disposé en hauteur et dont chaque microphone pointe sur une fraction de l'espace	168

3.68	Couverture de la scène sonore par des antennes acoustiques dont les lobes balaient les différentes zones de la scène sonore	169
4.1	Discrétisation de la distribution de sources secondaires: Maillage de la surface $\partial\Omega_0$	182
4.2	Système de coordonnées associé à la surface $\partial\Omega_0$	184
4.3	Spectre spatial d'une onde plane $p_0(\vec{r}) = a_p e^{j\vec{k}\cdot\vec{r}}$: Représentation symbolique d'une distribution de Dirac en $\vec{\chi}(k_x = -0.5, k_y = 0.25)$	186
4.4	Décomposition d'un front d'onde sphérique en une infinité de fronts d'ondes planes élémentaires	188
4.5	Spectre spatial d'une onde sphérique $p_0(\vec{r}) = a_s \frac{e^{jkr}}{4\pi r}$ ($k = 1, z_0 = 25$)	190
4.6	Echantillonnage spatial de la pression p_0 : Périodisation du spectre $P_0(\chi_x, \chi_y)$	191
4.7	Coordonnées sphériques pour le vecteur d'onde \vec{k}	193
4.8	Pas d'échantillonnage et incidence de l'onde plane	193
4.9	Directivité d'une source et spectre spatial	195
4.10	Simulation du phénomène de repliement spectral: Configuration de la source primaire, des sources secondaires et des récepteurs	198
4.11	Onde de pression restituée par un réseau discret de sources secondaires à la fréquence $f_1 = 500 \text{ Hz} < f_{al}$: Absence de phénomène d'aliasing (source primaire en $s_1[0., 0., 0.]$, récepteurs en $z = 5 \text{ m.}$, antenne rectiligne de longueur $l = 10 \text{ m.}$, espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1 \text{ m.}$, $N = 100$ sources secondaires au total, cf. Fig. 4.10, cf. Annexes E & F)	199
4.12	Onde de pression restituée par un réseau discret de sources secondaires à la fréquence $f_2 = 2 \text{ kHz} > f_{al}$: Mise en évidence du phénomène d'aliasing (source primaire en $s_1[0., 0., 0.]$, récepteurs en $z = 5 \text{ m.}$, antenne rectiligne de longueur $l = 10 \text{ m.}$, espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1 \text{ m.}$, $N = 100$ sources secondaires au total, cf. Fig. 4.10, cf. Annexes E & F)	199
4.13	Source directive: Exemple de diagramme de directivité (cf. Equ. 4.33)	200
4.14	Onde de pression restituée par un réseau discret de sources secondaires: Limitation du support du spectre spatial en jouant sur la directivité de la source primaire, des microphones ou en appliquant une fenêtre de pondération spatiale au réseau de sources secondaires (source primaire en $s_1[0., 0., 0.]$, $f = 2 \text{ kHz}$, récepteurs en $z = 5 \text{ m.}$, antenne rectiligne de longueur $l = 10 \text{ m.}$, espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1 \text{ m.}$, $N = 100$ sources secondaires au total, cf. Fig. 4.10, cf. Annexes E & F)	201
4.15	Equivalence entre la directivité de la source primaire et la directivité des microphones	202
4.16	Equivalence entre la directivité de la source primaire et une pondération spatiale du réseau de sources secondaires	203
4.17	Onde de pression restituée par un réseau discret de sources secondaires: Erreur d'interpolation spatiale lorsque $\chi_c > \chi_{c_0}$ et Correction par la directivité des sources secondaires (source primaire en $s_1[0., 0., 0.]$, $f = 1 \text{ kHz}$, récepteurs en $z = 5 \text{ m.}$, antenne rectiligne de longueur $l = 10 \text{ m.}$, espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1 \text{ m.}$, $N = 100$ sources secondaires au total, cf. Fig. 4.10, cf. Annexes E & F)	206
5.1	Reproduction d'un champ sonore par des sources secondaires distribuées sur une surface fermée (cas d'un cube)	217
5.2	Numérotation des faces du cube	218
5.3	Troncature de la distribution de sources secondaires de Kirchhoff (seule la face 1 du cube est conservée)	219
5.4	Reproduction d'un champ sonore par un plan infini de sources secondaires (Intégrales de Rayleigh)	220
5.5	Reproduction par un plan fini de sources secondaires (approche de Rayleigh avec troncature)	221
5.6	Effets de la troncature sur le spectre d'une onde plane p_0 ($P_0 = 1, (k_x, k_z) = (\pi, \pi), y_0 = 0$): Influence de la taille de la fenêtre de troncature	223
5.7	Fenêtre de troncature pondérée par une fonction sinusoidale	224
5.8	Analogie entre troncature et diffraction: Réseau tronqué et réseau infini masqué par un écran percé d'une ouverture	225

5.9	Phénomène de diffraction: A l'onde directe se superpose une onde diffractée générée par les bords de l'ouverture	226
5.10	Mise en évidence de l'onde diffractée par un réseau 2D carré: Configuration de la source primaire, des sources secondaires et des récepteurs (les récepteurs sont situés dans le plan horizontal défini par l'équation $z = 0$ — récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$ —, les sources secondaires sont réparties sur un réseau plan vertical de forme carrée centré sur l'origine du repère — réseau carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m. —, cf. Annexes E & F)	228
5.11	Onde de pression originale et onde synthétisée par un réseau carré de sources secondaires: Le front d'onde est suivi d'une onde résiduelle qui correspond à l'onde diffractée (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	229
5.12	Géométrie du problème de Rubinowicz	230
5.13	Repère associé à la surface K du cône	232
5.14	Notations relatives à l'intégrale de Rubinowicz (la normale \vec{n} est perpendiculaire aux vecteurs $\vec{\rho}$ et \vec{dl})	234
5.15	Géométrie de Rubinowicz appliquée au problème de troncature d'un réseau de sources secondaires	235
5.16	Comparaison entre l'erreur de troncature et l'onde diffractée par une ouverture carrée obtenue par le modèle de Rubinowicz (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	238
5.17	Contour de l'ouverture associée au réseau tronqué de sources secondaires	239
5.18	Mise en évidence des 4 ondes diffractées correspondant aux 4 côtés qui définissent le contour de l'ouverture — cf. Fig. 5.17 — (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	240
5.19	Zones de reconstruction de Huygens	241
5.20	Détermination du contour d'un réseau discret de sources secondaires: Proposition de trois contours possibles	243
5.21	Maillage associé au réseau discret de sources secondaires: Mise en évidence du contour virtuel du réseau	243
5.22	Onde primaire (trait continu) et onde reconstruite (trait pointillé): L'onde reconstruite est altérée par les ondes diffractées résultant de la troncature (récepteur en $\vec{r}[0.75, -1., 0.]$, source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	244
5.23	Onde primaire (trait continu) et ondes diffractées (trait pointillé) par le contour du réseau de sources secondaires: Visualisation des ondes diffractées associées aux différents côtés du carré constituant le contour du réseau — cf. Fig. 5.17 — (récepteur en $\vec{r}[0.75, -1., 0.]$, source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	245
5.24	Interférence destructrice entre l'onde primaire et l'onde diffractée émise par le côté 1 du contour — cf. Fig. 5.17 — (le trait continu et le trait pointillé représentent respectivement l'onde primaire seule et l'onde primaire sommée à l'onde diffractée): L'effet global est une atténuation de l'onde primaire (récepteur en $\vec{r}[0.75, -1., 0.]$, source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	246
5.25	Onde primaire (trait continu) et onde diffractée (trait pointillé) par le côté 3 du contour — cf. Fig. 5.17 — à la fréquence de 100Hz: Les deux ondes se chevauchent partiellement alors qu'elles étaient dissociées pour $f = 500$ Hz (récepteur en $\vec{r}[0.75, -1., 0.]$, source primaire en $s_0[0.25, 1., 0.25]$, réseau de sources secondaires carré de côté $l = 1$ m., $N = 121$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.10, cf. Annexes E & F)	246

5.26	Positions des récepteurs sélectionnés pour l'évaluation du critère d'erreur moyenne de troncature dans le plan horizontal $z = 0$ ($\Delta' = 0.35$ m)	248
5.27	Restitution restreinte à un plan horizontal: Le réseau de sources secondaires se réduit à une ligne	249
5.28	Contour du réseau rectiligne de sources secondaires pour le calcul de l'onde diffractée	249
5.29	Troncature dans le cas d'un réseau 1D: Configuration de la source primaire, des sources secondaires et des récepteurs (récepteurs en $y = -1$ m., sources primaires en $s_1[0., 1., 0.]$ et $s_2[0.75, 1., 0.]$, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Annexes E & F)	250
5.30	Troncature verticale et troncature horizontale: Source primaire centrée située en s_1 (récepteurs en $y = -1$ m., $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	251
5.31	Troncature verticale et troncature horizontale: Source primaire excentrée située en s_2 (récepteurs en $y = -1$ m., $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	252
5.32	Troncature verticale et troncature horizontale: Réseau tronqué à $N = 6$ sources secondaires (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 6$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	253
5.33	Erreur de troncature moyenne \bar{E}_{tronc} en fonction de la fréquence (cf. Equ. 5.29) pour une source primaire centrée située en s_1 : Erreur totale, erreur résultant de la troncature verticale seule et erreur résultant de la troncature horizontale seule — la valeur de l'écart-type est représentée par des barres verticales — (source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	255
5.34	Erreur de troncature moyenne \bar{E}_{tronc} en fonction de la fréquence (cf. Equ. 5.29) pour une source primaire centrée située en s_2 : Erreur totale, erreur résultant de la troncature verticale seule et erreur résultant de la troncature horizontale seule — la valeur de l'écart-type est représentée par des barres verticales — (source primaire en s_2 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	256
5.35	Erreur de troncature moyenne \bar{E}_{tronc} en fonction de la fréquence (cf. Equ. 5.29) pour un réseau tronqué à $N = 6$ sources secondaires: Erreur totale, erreur résultant de la troncature verticale seule et erreur résultant de la troncature horizontale seule — la valeur de l'écart-type est représentée par des barres verticales — (source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 6$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	257
5.36	Symétrie verticale des sources de Rubinowicz: Le nombre de sources correctives peut être divisé par deux si la source primaire, les sources secondaires et le point récepteur appartiennent au même plan horizontal	258
5.37	Géométrie du réseau de sources de Rubinowicz: Contour 1 de référence (N.B.: les sources de Rubinowicz sont espacées de $\frac{\Delta}{2}$).	260
5.38	Correction de la troncature par les sources de Rubinowicz (source primaire en s_1): Correction idéale et correction approchée définie pour une position moyenne d'écoute (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	261
5.39	Correction de la troncature par les sources de Rubinowicz (source primaire en s_2): Correction idéale et correction approchée définie pour une position moyenne d'écoute (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_2 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	262
5.40	Correction de la troncature par les sources de Rubinowicz: Erreur de troncature moyenne \bar{E}_{tronc} avant correction et après correction ($f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	263

5.41	Différentes façons d'échantillonner le contour du réseau de sources secondaires pour positionner les sources de Rubinowicz	264
5.42	Correction de la troncature par les sources de Rubinowicz: Erreur de troncature moyenne \bar{E}_{tronc} avant correction et après correction pour différentes distributions de sources de Rubinowicz (source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	265
5.43	Concept de source de Rubinowicz virtuelle: La source de Rubinowicz située en \vec{r}_c est synthétisée par la source secondaire placée au point \vec{r}_0	266
5.44	Problème de Rayleigh: Restitution par un réseau tronqué de sources secondaires	268
5.45	Intégration sur la surface P en utilisant l'approximation de Fresnel: Définition d'un repère adapté (on remarque que $\rho = \sqrt{x_0^2 + z_0^2}$)	269
5.46	Approximation de la Phase Stationnaire appliquée à l'intégrale de Rayleigh: Le plan vertical infini se réduit à une droite horizontale infinie.	272
5.47	Correction de la troncature verticale par l'approximation de la Phase Stationnaire: Onde reconstruite au point $\vec{r} = [0.5, -1., 0.]$ (source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	273
5.48	Correction de la troncature verticale par l'approximation de la Phase Stationnaire pour une source primaire centrée située en s_1 : Correction idéale et correction définie pour une position moyenne d'écoute, Comparaison avec l'annulation de l'onde diffractée verticale par des sources de Rubinowicz (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	274
5.49	Correction de la troncature verticale par l'approximation de la Phase Stationnaire pour une source primaire excentrée située en s_2 : Correction idéale et correction définie pour une position moyenne d'écoute, Comparaison avec l'annulation de l'onde diffractée verticale par des sources de Rubinowicz (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_2 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	275
5.50	Erreur de troncature moyenne avant et après correction de la Phase Stationnaire: Correction idéale et correction approchée calculée pour une position moyenne d'écoute ($f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	276
5.51	Fenêtre de pondération spatiale $w(x)$ appliquée à un réseau rectiligne de sources secondaires [Start, 1997]	277
5.52	Correction de la troncature horizontale par pondération spatiale du réseau: Source primaire centrée située en s_1 (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_1 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	278
5.53	Correction de la troncature horizontale par pondération spatiale du réseau: Source primaire excentrée située en s_2 (récepteurs en $y = -1$ m., source primaire en s_2 , $f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29, cf. Annexes E & F)	279
5.54	Erreur moyenne de troncature avant et après pondération spatiale du réseau de sources secondaires ($f = 500$ Hz, réseau de sources secondaires rectiligne de $N = 21$ sources espacées de $\Delta = 0.1$ m., cf. Fig. 5.29 & 5.26, cf. Annexes E & F)	280
6.1	Spécificités du contexte de visioconférence	293
6.2	Angle maximal d'incidence α_{max} des ondes primaires sur le réseau de sources secondaires en situation de visioconférence	294
6.3	Système holophonique pour la visioconférence	296
6.4	Système holophonique pour la visioconférence: Restitution du son	297
6.5	Haut-parleur monté sur une enceinte close ($V = 1$ l)	298
6.6	Réponse impulsionnelle d'un haut-parleur ($\varphi = 0^\circ$)	299

6.7	Réponse en fréquence moyenne des 16 haut-parleurs ($\varphi = 0^\circ$)	300
6.8	Diagramme de directivité moyen des 16 haut-parleurs pour les bandes de tiers d'octave de $f = 125$ Hz à 1.6 kHz	301
6.9	Diagramme de directivité moyen des 16 haut-parleurs pour les bandes de tiers d'octave de $f = 2$ kHz à 16 kHz	302
6.10	Système holophonique pour la visioconférence: Prise de son	303
6.11	Synoptique du traitement appliqué aux signaux microphoniques	304
6.12	Réponse en fréquence du filtre semi-dérivateur — filtre R.I.F. à $N = 64$ coefficients — (la réponse théorique est définie par $H_{th}(f) = \sqrt{2\pi f}$)	308
6.13	Module de la réponse en fréquence du filtre d'égalisation (Filtre R.I.I. à $N = 8$ coefficients)	309
6.14	Module de la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs avant et après égalisation	310
6.15	Système holophonique pour la visioconférence: Prototype réalisé au C.N.E.T.	311
6.16	Prototype holophonique: Synoptique du traitement implémenté	312
6.17	Réponse en fréquence moyenne des 16 microphones ($\varphi = 0^\circ$)	313
6.18	Diagramme de directivité moyen des 16 microphones pour les bandes de tiers d'octave de $f = 125$ Hz à 1.6 kHz	314
6.19	Diagramme de directivité moyen des 16 microphones pour les bandes de tiers d'octave de $f = 2$ kHz à 16 kHz	315
6.20	Configuration de mesure: Positions relatives des haut-parleurs, des microphones et des sources primaires synthétisées (sources primaires en $s_1[1., 1., 0.]$, $s_2[1., 5., 0.]$, $s_3[-0.5, 1., 0.]$ ou $s_4[1., 3., 0.]$, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m.)	317
6.21	Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Source primaire en s_1 ($f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.63$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)	318
6.22	Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Source primaire en s_2 ($f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.63$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)	319
6.23	Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Source primaire en s_3 ($f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.03$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)	320
6.24	Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Source primaire en s_4 ($f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.03$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)	321
6.25	Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Phénomène de repliement spectral à la fréquence $f = 2$ kHz (source primaire en s_1 , antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.63$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)	323
6.26	Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Phénomène de repliement spectral à la fréquence $f = 2$ kHz (source primaire en s_4 , antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.03$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)	324
7.1	Combinaison de deux microphones bidirectifs pour enregistrer les signaux u_1 and u_2	336
7.2	Pondération du réseau circulaire holophonique	346
7.3	Holophonie: Principe de la prise et de la restitution du son	348
7.4	Système ambisonique: Principe de la prise et de la restitution du son	349
7.5	Fonction d'encodage holophonique fh : Filtrage Passe-Bas induit par les fonctions de Bessel	351
7.6	Zéros des fonctions de Bessel $J_m(kr_S)$ et de leurs dérivées $J'_m(kr_S)$	353
7.7	Prise de son holophonique: Nombre minimal de microphones $N_{e_{min}}$ en fonction de la fréquence f et du rayon r_S de l'antenne microphonique	355

7.8	Erreur moyenne d'encodage: Comparaison entre l'holophonie et le système ambisonique (Synthèse d'une onde plane d'incidence $\varphi = 60^\circ$ et de fréquence $f = 1$ kHz, prise de son holophonique effectuée par une antenne circulaire de rayon $r_S = 1$ m.)	357
7.9	Erreur moyenne de décodage: Comparaison entre l'holophonie et le système ambisonique (Synthèse d'une onde plane d'incidence $\varphi = 60^\circ$ et de fréquence $f = 1$ kHz, prise de son holophonique effectuée par une antenne circulaire de rayon $r_S = 2.5$ m.)	360
7.10	Erreur de décodage et approximation de la Phase Stationnaire (Holophonie): Influence du rayon r_S de l'antenne de haut-parleurs et de la fréquence f de l'onde plane (Synthèse d'une onde plane d'incidence $\varphi = 60^\circ$, prise de son holophonique effectuée par une antenne circulaire de rayon r_S , $N_d = 31$ haut-parleurs)	361
7.11	Rayon r_{max} de la zone de reconstruction correcte en fonction de l'ordre de troncature M de la série d'harmoniques cylindriques	362
7.12	Effet de troncature sur l'onde synthétisée: Onde plane d'incidence $\varphi_0 = \varphi_4 \simeq 50^\circ$ (onde plane de fréquence $f = 1$ kHz, $N_d = 21$ haut-parleurs, $r_S = 2.5$ m)	364
7.13	Effet de troncature sur l'onde synthétisée: Onde plane d'incidence $\varphi_0 \simeq 55^\circ$ (onde plane de fréquence $f = 1$ kHz, $N_d = 21$ haut-parleurs, $r_S = 2.5$ m)	365
7.14	Effet de troncature sur l'onde synthétisée: Onde plane d'incidence $\varphi_0 = \frac{\varphi_4 + \varphi_5}{2} = 60^\circ$ (onde plane de fréquence $f = 1$ kHz, $N_d = 21$ haut-parleurs, $r_S = 2.5$ m)	366
7.15	Reconstruction par des monopôles (Onde plane d'incidence $\varphi_0 = 60^\circ$ et de fréquence $f = 1$ kHz, $N_d = 51$ haut-parleurs, $r_S = 2.5$ m)	368
C.1	Calcul de la fonction de Green en espace semi-infini par la méthode des sources images	400
D.1	Exemple typique de l'évolution de la phase $\phi(y_0)$ (y_s repère le point de phase stationnaire) .	407
D.2	Tracé de la fonction $\cos[\lambda\phi(y_0)]$ pour deux valeurs de λ : Illustration du principe de l'approximation de la phase stationnaire	408
F.1	Impulsion gaussienne: Signal temporel ($f_0 = 500$ Hz)	431
F.2	Impulsion gaussienne: Spectre fréquentiel ($f_0 = 500$ Hz)	432

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 system, 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 -