

L'AMBISONIE D'ORDRE SUPERIEUR ET SON APPROPRIATION PAR LES MUSICIENS : PRESENTATION DE LA BIBLIOTHEQUE MAX/MSP HOA.LIB

Julien Colafrancesco

CICM - Centre de recherche en Informatique et Création Musicale

Université de Paris 8

Maison des Sciences de l'Homme, Paris Nord

jcolafrancesco@gmail.com

RÉSUMÉ

Cet article a pour but de présenter un ensemble d'outils informatiques dédiés à la spatialisation ambisonique du son. Ces derniers sont accessibles sous forme d'objets MAX/MSP et visent des applications musicales expérimentales. A travers une brève présentation des divers modèles de restitution sonore basés sur la décomposition du champ acoustique en harmoniques sphériques, nous exposerons certains concepts clefs dans le cadre d'une appropriation musicale de l'ambisonie. Nous présenterons par la suite la bibliothèque d'objets et le modèle modulaire d'après lequel elle a été conçue

1. INTRODUCTION

L'espace sonore est une des principales dimensions de la pensée musicale contemporaine, spécialement dans le domaine de la musique électroacoustique, mais également dans les arts intermédia. C'est dans ce contexte que le CICM a fait de la mise en espace des sons l'un de ses principaux axes de recherche [1] [2], en proposant notamment des outils favorisant, pour le musicien, l'expérimentation artistique ainsi que l'appropriation des concepts théoriques liés à la spatialisation. Ainsi, dès 2004 notre équipe a développé les « CICM Tools », une bibliothèque pour MAX/MSP et Pure Data offrant une spatialisation en VBAP ainsi qu'en ambisonique de format B. Plus récemment dans le cadre du projet HD3D2, le « CICM Panner »¹, un plugin VST de panoramique d'amplitude destiné à l'industrie audiovisuelle, a été développé.

Les outils présentés dans cet article visent particulièrement l'approche ambisonique en en proposant une implémentation plus avancée que dans le cadre de nos précédents travaux. Basée sur la thèse de Jérôme Daniel, cette bibliothèque se désolidarise en effet du format B (ambisonique d'ordre 1) et donne

accès à un modèle d'ordre supérieur. Une prise en compte des effets de distance est aussi proposée, cette dernière nous permettant de modéliser la courbure du front d'onde synthétisé.

Afin de saisir l'ensemble des enjeux liés à de telles modifications, la première partie de cet article tentera d'introduire la théorie relative aux techniques ambisoniques. Il s'agit d'un exposé synthétique à destination d'un public non-initié. Nous introduirons ainsi la décomposition du champ acoustique en harmoniques sphériques et les principaux modèles de sources sonores (l'onde plane et l'onde sphérique). Ces quelques bases nous permettront de mettre en valeur les principales différences entre la conception standard de l'ambisonie [3] et celle proposée par Jérôme Daniel [4].

Par la suite seront évoqués certains détails d'implantation. Nous avons, à la manière de Graham Wakefield [5], opté pour une organisation modulaire de notre bibliothèque. L'utilisateur peut ainsi composer son moteur ambisonique en connectant un ensemble d'objets. Cette organisation permet de faire face à diverses situations. De plus, elle laisse au musicien l'accès à un grand nombre de degrés de liberté dont il pourra potentiellement s'emparer à des fins artistiques.

Dans cette optique, le dernier axe de cet article comportera une discussion ouverte sur l'ambisonie et sa possible appropriation par les musiciens via notre suite d'outils, ceci en proposant quelques exemples concrets d'opérations musicales à effectuer dans le domaine des harmoniques sphériques.

2. LES FONDEMENTS ACOUSTIQUES DE L'AMBISONIE

L'ambisonie est basée sur une représentation physique du champ sonore située dans un domaine dit aux harmoniques sphériques. La représentation dont nous parlons décompose un champ en une somme pondérée de fonctions spatiales. Tout champ sonore peut ainsi être codé efficacement par une série de

1. Les CICM-Tools et le CICM-Panner sont librement téléchargeables sur le site <http://cicm.mshparisnord.org/>.

coefficients de pondération.

2.1. Description du champ sonore dans le domaine des harmoniques sphériques, le cas du problème intérieur

Le problème intérieur peut être représenté par la figure 1. Dans le cadre de ce problème, les sources sonores sont situées à l'extérieur d'une sphère de rayon r_{max} . Il s'agit d'un modèle assez proche du cas pratique en jeu dans cet article où nous cherchons à contrôler le champ sonore dans une zone sphérique délimitée par un ensemble de haut-parleurs.

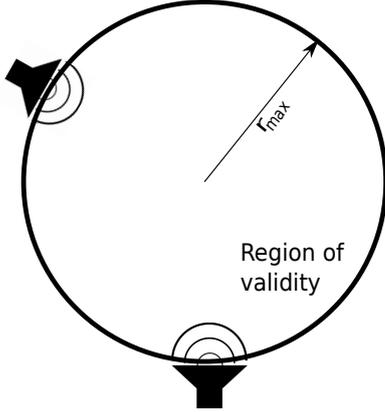


Figure 1. Représentation du problème intérieur

Dans le cas du problème intérieur, une résolution de l'équation de Helmholtz ² en coordonnées sphériques nous donne l'équation

$$p(r, \theta, \phi, k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n b_n^m(k) j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi), \quad (1)$$

avec (θ, ϕ, r) les coordonnées sphériques, k le nombre d'onde, p la pression, Y_n^m les harmoniques sphériques d'ordre n et de degré m , j_n les fonctions de Bessel sphériques et b_n^m les coefficients de la décomposition. Pour de plus amples informations sur la manière dont cette équation est dérivée et sur la nature des différentes fonctions en jeu, le lecteur intéressé peut se référer aux ouvrages [6], [7] et [8]. Dans le cadre de cet article, l'important est de noter qu'un champ sonore peut-être totalement représenté via une suite de coefficients b_n^m .

Cette décomposition du champ sonore en harmoniques sphériques peut être vue de manière analogue à une décomposition en série de Fourier où une fonction périodique est décomposée en une somme pondérée de fonctions sinusoïdales. Dans une décomposition de Fourier, la reconstitution est d'autant plus

2. L'équation de Helmholtz peut être dérivée à partir de l'équation des ondes. Il s'agit d'une équation différentielle gouvernant la propagation des ondes acoustiques en milieu stationnaire (e.g. l'air).

fine que le nombre de composantes fréquentielles augmente. Il en va de même pour une représentation dans le domaine des harmoniques sphériques du champ sonore : plus nous considérons de composantes spatiales d'ordre élevées, plus le champ sonore est représenté en détails. Cette remarque est particulièrement importante dans le cadre de l'ambisonie, où, comme nous allons bientôt le voir, la décomposition du champ sonore est tronquée à un ordre N (i.e. que les composantes spatiales d'ordre supérieur à N ne sont pas considérées).

2.2. Les différents modèles de source sonore

Le principe de superposition nous indique qu'un champ acoustique peut être décomposé en une somme de champs relatifs à chaque source sonore en présence. Nous pouvons ainsi associer à une source sonore un jeu de coefficients b_n^m .

En acoustique, deux modèles de source sont principalement utilisés, la source sonore ponctuelle et l'onde plane. La source sonore ponctuelle est une source située en un point précis de l'espace. Son front d'onde est de nature sphérique, la courbure et l'amplitude de ce dernier se réduisant au fur et à mesure de la propagation. L'onde plane est quant à elle issue d'une source sonore infiniment éloignée, elle est d'amplitude constante et ne présente pas de courbure.

Via les dérivations détaillées en [9], nous avons :

$$b_n^m(k, r_s) = s Y_n^m(\theta_s, \phi_s) l_n(kr_s) \quad (2)$$

avec

$$l_n(kr_s) = \begin{cases} 4\pi i^n & \text{pour une onde plane,} \\ -ik h_n^{(2)}(kr_s) & \text{pour une onde sphérique,} \end{cases}$$

(θ_s, ϕ_s, r_s) les coordonnées sphériques de la source sonore, $i = \sqrt{-1}$, $h_n^{(2)}$ la fonction de Hankel sphérique de seconde espèce et s le signal de la source sonore.

Nous pouvons ainsi associer à chaque source sonore une série de coefficients spatiaux. Dans le cadre d'un dispositif de restitution ambisonique, il pourrait s'agir de la source sonore virtuelle à reproduire aussi bien que d'un des hauts parleurs physiquement présents.

3. L'AMBISONIE

L'ambisonie consiste à approcher la série de coefficients relative à la source sonore virtuelle via une combinaison des séries de coefficients relatives à chaque haut-parleur. Cependant, et comme nous avons pu le voir en 2.2, plusieurs modèles de sources sonores existent. Lequel choisissons nous ?

3.1. Le modèle ambisonique initial

La manière la plus commune de concevoir l'ambisonie est de considérer que la source virtuelle à reproduire ainsi que tous les haut-parleurs sont suffisamment éloignés pour que leurs ondes puissent être considérées comme planes. Le "format B" [3] est un cas particulier de cette conception où les composantes spatiales sont limitées à l'ordre 1.

Ce type de système ambisonique peut-être représenté sous forme matricielle de la manière suivante :

$$C\vec{s} = \vec{b} \quad (3)$$

avec

$$C = \begin{bmatrix} Y_0^0(\vec{\theta}_1) & Y_0^0(\vec{\theta}_2) & \dots & Y_0^0(\vec{\theta}_L) \\ Y_1^{-1}(\vec{\theta}_1) & Y_1^{-1}(\vec{\theta}_2) & \dots & Y_1^{-1}(\vec{\theta}_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_N^N(\vec{\theta}_1) & Y_N^N(\vec{\theta}_2) & \dots & Y_N^N(\vec{\theta}_L) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\vec{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_N]^T, \quad (5)$$

$$\vec{b} = [sY_0^0(\vec{\theta}_s) \ sY_1^{-1}(\vec{\theta}_s) \ \dots \ sY_N^N(\vec{\theta}_L)]^T.$$

\vec{b} représente les coefficients de la source sonore virtuelle³, C l'encodage directionnel de chaque haut-parleur, \vec{s} les signaux émis par les haut-parleurs, N l'ordre de la décomposition et L le nombre de haut-parleurs.

En calculant la matrice C^+ , la pseudo-inverse de C , nous pouvons obtenir les signaux \vec{s} , en effet :

$$\vec{s} = C^+\vec{b}. \quad (6)$$

Les coefficients b_n^m dans le cas de l'onde plane n'ayant pas de dépendance fréquentielle et étant de plus réels ou imaginaires purs (en fonction de leur ordre), une telle conception de l'ambisonie nous permettra d'approcher les coefficients relatifs à la source sonore virtuelle en appliquant un simple gain à chaque haut-parleur. On notera qu'une résolution de ce système implique un nombre de haut-parleurs au moins égal au nombre de composantes spatiales⁴.

3.2. compensation du champ proche

La conception précédente bénéficie d'une certaine simplicité, l'ambisonie pouvant être considérée comme un cas de panoramique d'amplitude. Deux problèmes se posent pourtant, ils sont dus au choix du modèle de l'onde plane pour représenter les contributions des haut-parleurs et de la source sonore virtuelle. Les haut-parleurs sont en effet davantage assimilables à

3. Dans ce système, il est possible de négliger le facteur $4\pi r^n$ des coefficients car constant pour un ordre donné.

4. Le nombre de composantes spatiales étant égal à $(N+1)^2$ pour un système ambisonique tridimensionnel et $2N+1$ pour un système bidimensionnel

des sources sonores ponctuelles (ils ne sont pas infiniment éloignés de l'auditeur). Négliger cet aspect conduit à des approximations dans la reproduction du champ sonore. Pour ce qui est du front d'onde à synthétiser, choisir le modèle de l'onde plane constitue une réduction en terme de degrés de liberté, il devient impossible de synthétiser le champ sonore relatif à la présence d'une source sonore ponctuelle. Du point de vue de l'auditeur, il y a privation des effets de distances perçus via les variations de courbures du front d'onde.

Afin de remédier à ces deux problèmes, Jérôme Daniel propose un nouveau format ambisonique [4] considérant un modèle d'onde sphérique plutôt que plane. La pertinence de ce format vient en grande partie de sa compacité ainsi que de sa compatibilité avec la conception en onde plane. Le dispositif ambisonique pouvant être représenté sous forme matricielle de la manière suivante :

$$\vec{s} = C^+H\vec{b} \quad (7)$$

avec

$$H = \text{Diag}([\dots h_n^{\text{NFC}}(k, r_{sc}, r_{lp}) \dots]), \quad (8)$$

$$h_n^{\text{NFC}}(k, \rho, R) = \frac{I_n(kr_{sc})/I_0(kr_{sc})}{I_n(kr_{lp})/I_0(kr_{lp})}, \quad (9)$$

r_{sc} la distance de la source virtuelle et r_{lp} la distance des haut-parleurs.

4. UNE BIBLIOTHEQUE POUR L'AMBISONIE D'ORDRE SUPERIEUR

La bibliothèque Hoa.Lib propose un ensemble d'objets MAX/MSP destinés à l'ambisonie d'ordre supérieur. Elle s'inspire de la bibliothèque ambisonique de Graham Wakefield [5] dans la mesure où elle reprend son concept d'architecture modulaire. Si les deux outils peuvent être vus de manière analogue en ce qui concerne leur architecture, leurs ambitions et fonctionnalités demeurent sensiblement différentes. Le travail de Graham Wakefield respecte les différentes normes et conventions relatives à l'ambisonie, il y a donc une parfaite compatibilité avec les outils et matériaux ambisoniques pré-existants (e.g. les fichiers audio enregistrés au format B). L'ordre est cependant limité à l'ordre 3 et la prise en compte du champ proche n'est pas proposée.

Hoa.Lib a quant à elle été créée comme un ensemble d'outils autonomes dédiés à l'expérimentation musicale. Elle a été développée via la bibliothèque C++ de calcul matriciel Boost : Ublas et propose ainsi l'accès à un ordre variable, uniquement limité en pratique par les capacités de calcul de la machine. Hoa.Lib propose de plus une compensation des coefficients afin de prendre en compte les distances auxquelles sont situés les haut-parleurs ainsi

que la source sonore virtuelle. La description théorique de l'ambisonie faite dans la section 3 a donc été implantée dans son ensemble.

4.1. La bibliothèque en détail

La figure 2 représente un patch MAX/MSP exécutant un encodage puis un décodage ambisonique d'ordre 3 à destination de 8 haut-parleurs. Cet exemple est basé sur la conception de l'ambisonie décrite en 3.1 car seuls les modules d'encodage et de décodage sont présents.

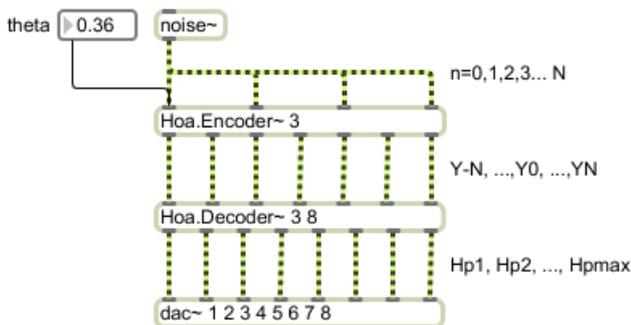


Figure 2. Encodage et décodage basique à l'ordre 3

Sur la figure 2 nous pouvons remarquer trois niveaux rendant possible une éventuelle interaction :

- **Post-décodage** : nous avons directement accès aux signaux prêts à être restitués par les haut-parleurs.
- **Pré-décodage** : nous disposons des signaux résultant de l'encodage spatial.
- **Pré-encodage** : nous agissons sur le signal de la source sonore virtuelle.

Pré-encodage, le signal est copié sur un nombre de canaux égal à $N + 1$. Ceci permet une factorisation des traitements linéaires à effectuer sur les composantes spatiales en fonction de leur ordre.

Tel que l'indique l'équation (8), la compensation du champ proche peut être appliquée par filtrage des signaux encodés spatialement. Dans le cadre de ce travail, nous avons implanté ces traitements par convolution. En conséquence, les calculs peuvent rapidement se révéler prohibitifs à mesure que le nombre de signaux à considérer augmente.

La figure 3 est un exemple illustrant une factorisation des opérations de filtrage. Comme nous pouvons le constater, ceci a pour effet de réduire drastiquement le nombre d'opérations de convolution à effectuer.

Il existe toutefois certaines situations où il est préférable d'effectuer la compensation post-encodage. Par exemple, si nous souhaitons spatialiser plusieurs sources sonores tout en sachant que ces dernières seront à la même distance du point d'écoute, nous

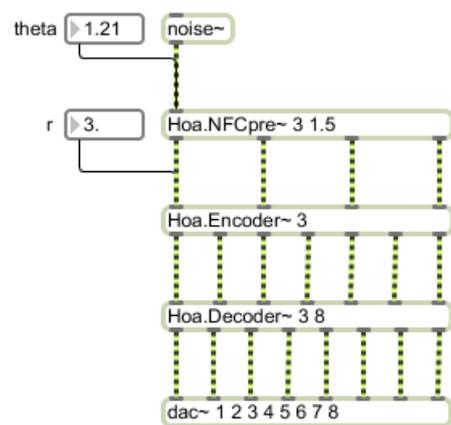


Figure 3. Filtrage NFC pre-encodage

pouvons effectuer un encodage pour chaque source puis sommer les canaux issus de l'encodage de manière à effectuer simultanément la compensation des différents signaux. La figure 4 illustre ce cas, nous pouvons y noter la présence d'un seul et unique module de compensation.

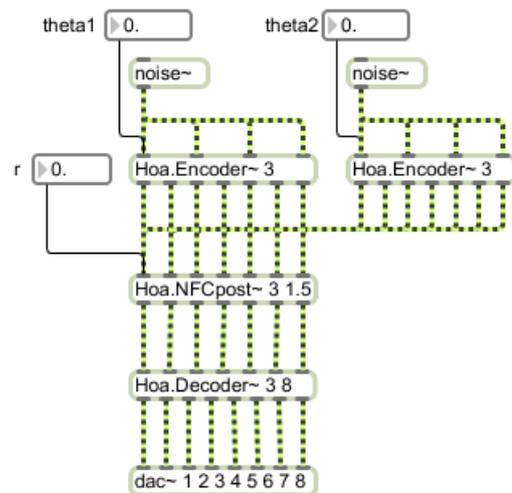


Figure 4. Filtrage post-encodage

4.2. Limitations

La bibliothèque présentée dans cet article est sujette à un certain nombre de limitations. Certaines d'entre elles ne sont que temporaires et devraient être levées lors des prochaines mises à jour. Le système proposé est notamment réduit à un espace à deux dimensions, aucune gestion de l'élévation n'est possible. L'écart angulaire entre les différents haut-parleurs doit de plus être parfaitement régulier. Une configuration irrégulière impliquerait un mauvais conditionnement de la matrice de décodage qui sous-

optimiserait le nombre de haut-parleurs nécessaire pour atteindre un ordre donné. Certaines solutions ont été trouvées afin de répondre à ce problème. En effet, en calculant la pseudo-inverse de la matrice C à l'aide d'une décomposition en valeurs singulières [10], une amélioration des résultats devient possible.

Certaines limitations dépendent davantage du format ambisonique considéré. La conception présentée en 3.2 ne peut gérer les configurations composées de haut-parleurs situés à des distances différentes du point d'écoute. Il est aussi impossible de supporter le fait que plusieurs haut-parleurs puissent être dépendants du même canal. La levée de ces deux limitations ouvrirait la voie à des applications ambisoniques avancées. Nous pourrions par exemple imaginer un système où chaque source sonore miroir, due aux réflexions sur les parois de la salle, serait prise en compte dans la matrice de décodage, il s'agirait d'un premier pas vers une compensation ambisonique de la réverbération.

5. OPERATIONS MUSICALES DANS LE DOMAINE DES HARMONIQUES SPHERIQUES

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente, une représentation du champ sonore dans le domaine des harmoniques sphériques offre l'accès à un certain nombre de nouveaux paramètres variables dont le musicien pourra s'emparer à des fins expérimentales. Nous allons ici présenter deux exemples assez classiques relatifs à une utilisation détournée de l'ambisonie.

5.1. Contrôle de la résolution angulaire

Comme nous avons pu le noter précédemment, plus l'ordre du système ambisonique est élevé, plus le champ sonore est synthétisé avec fidélité. Nous avons cependant pu remarquer un attachement de certains compositeurs au "format B" (ordre 1) de par sa capacité à "envelopper" l'auditeur. Il s'agit en réalité d'un effet "low-fi" dû à une assez faible résolution angulaire du système. À des fins artistiques, il serait intéressant de pouvoir reproduire cet effet dynamiquement dans un cadre de travail ambisonique d'ordre supérieur.

La figure 5 illustre l'une des solutions possibles. Il s'agit de pondérer les différents signaux ambisoniques en fonction de leur ordre. En variant l'importance des différentes harmoniques, nous pouvons moduler la résolution angulaire de manière continue pour retrouver par exemple les caractéristiques d'un encodage au format B. Artistiquement, une métaphore optique pourrait être proposée en associant à une source sonore l'idée d'un faisceau dont nous pourrions modifier l'ouverture et la largeur à volonté.

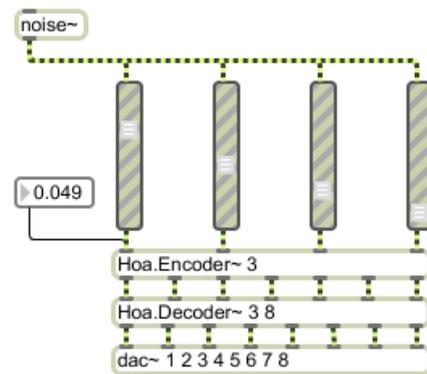


Figure 5. Pondération des composantes spatiales en fonction de leur ordre

5.2. Création d'un champ acoustique diffus

En acoustique, un champ diffus est un champ où l'énergie volumique moyenne a la même valeur en tous les points et où l'intensité acoustique est la même dans toutes les directions. La partie tardive de la réverbération d'une salle est un cas concret où nous pouvons noter la présence d'un champ diffus. Du point de vue de l'auditeur on note une sensation d'enveloppement, ce dernier ne peut en effet associer le champ sonore perçu à un nombre déterminé de sources sonores présentes dans l'espace.

Afin de reproduire un champ sonore diffus dans un cadre ambisonique, Jérôme Daniel propose d'insérer des signaux décorrélés (e.i. qui ont une covariance nulle) en entrée d'un décodeur ambisonique [4]. Il s'agit d'une proposition faite afin de modéliser les réflexions tardives d'une réverbération, nous pouvons cependant nous désolidariser de cette application et proposer la création d'un champ diffus à partir de tout signal monophonique. La problématique est alors de savoir comment obtenir plusieurs signaux décorrélés à partir d'un seul et unique signal.

Graham Wakefield suggère un exemple où cette décorrélation est effectuée via une banque de filtres passe-bande [5], chaque bande fréquentielle étant associée à un signal ambisonique convoyé au décodeur.

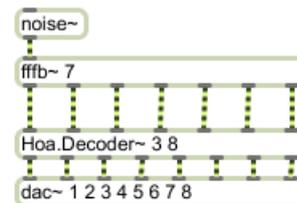


Figure 6. Décorrélation via une banque de filtres à destination d'un décodeur ambisonique

La figure 6 illustre la proposition faite par Wa-

kefield. D'autres solutions sont cependant possibles. Nous pourrions ainsi considérer l'utilisation d'un granulateur temps réel polyphonique répartissant aléatoirement chaque grain sur l'un des canaux du décodeur. Les méthodes possibles sont en réalité assez nombreuses et une évaluation artistique de ces dernières serait nécessaire afin de déterminer quelles sont les plus pertinentes dans un contexte musical.

6. CONCLUSION

La principale motivation de cet article a été de présenter Hoa.Lib, une nouvelle bibliothèque d'objets MAX/MSP dédiée à l'ambisonie d'ordre supérieur. Il s'agit d'un outil proposant certaines fonctionnalités assez avancées telles que la compensation du champ proche et la possibilité d'accéder à un ordre de décomposition non limité. Afin de détailler ce que ces fonctionnalités impliquent, une synthèse théorique des mécanismes liés à l'ambisonie a été proposée.

Nous avons par la suite présenté la bibliothèque avec davantage de détails en soulignant notamment son architecture modulaire. Cette dernière permettant à l'utilisateur d'optimiser les traitements en fonction de ses besoins. Elle laisse de plus l'accès à un grand nombre de paramètres susceptibles d'être utilisés à des fins artistiques expérimentales. La dernière partie de cet article a en effet présenté deux applications où l'usage détourné d'un moteur ambisonique permet d'aboutir à de nouvelles formes artistiquement pertinentes. C'est dans cette direction que nous souhaitons d'ailleurs continuer nos recherches, via une évaluation artistique des différentes possibilités offertes par une représentation du champ sonore dans le domaine des harmoniques sphériques. Cette évaluation s'effectuera sur le terrain, en interaction avec les différents compositeurs du CICM. Hoa.Lib peut ainsi être vue comme le cadre de travail nécessaire à nos prochains travaux.

7. REFERENCES

- [1] Sedes, A. et al. *Espaces sonores : Actes de recherches*. Transatlantiques (éditions musicales), Paris, 2003.
- [2] Sedes, A. Courribet, B. et Thiébaud, J. B. "Ego-sound, and egocentric, interactive and real-time approach of sound space", *Proceedings of the 6th International Conference of Digital Audio Effect*, London, UK, 2003.
- [3] Gerzon, M. "Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video", *Journal of the Audio Engineering Society*, Plymouth, USA, 1985.
- [4] Daniel, J. "Spatial Sound Encoding Including Near Field Effect : Introducing Distance Coding Filters and a Viable, New Ambisonic Format",

AES 23rd International Conference, Copenhagen, Denmark, 2003.

- [5] Wakefield, G. "Third-Order Ambisonic Extensions for Max/MSP with Musical Applications", *International Computer Music Conference*, University California Santa Barbara, USA, 2006.
- [6] William, E. G. *Fourier Acoustics : Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. Academic Press, London, 1999.
- [7] Gumerov, N. A. Duraiswami, R. *Fast Multipole Methods For The Helmholtz Equation In Three Dimensions*. Elsevier, University of Maryland, 2004.
- [8] Colafrancesco, J. "Caractérisation du champ sonore dans les salles, applications à la mesure et au transcoding de réponses impulsionnelles multicanaux" *Master Thesis*. IRCAM, Centre George Pompidou, 2011.
- [9] Zotter, F. "Analysis and synthesis of sound-radiation with spherical arrays" *Phd Thesis*. University of Music and Performing Arts, Austria, 1999.
- [10] Golub, G. H. Kahan, W. "Calculating the singular values and pseudo-inverse of a matrix", *Society for Industrial and Applied Mathematics : Journal on Numerical Analysis*, 2 ser. B p. 205-224, 1965.