

LA BIBLIOTHEQUE HOA, BILAN ET PERSPECTIVES

Julien Colafrancesco
CICM - EA1572, Université
Paris 8, MSH Paris Nord,
Labex Arts H2H
jcolafrancesco@gmail.com

Pierre Guillot
CICM - EA1572, Université
Paris 8, MSH Paris Nord,
Labex Arts H2H
guillotpierre6@gmail.com

Eliott Paris
CICM - EA1572, Université
Paris 8, MSH Paris Nord,
Labex Arts H2H
eliottparis@gmail.com

Anne Sèdes
CICM - EA1572, Université
Paris 8, MSH Paris Nord,
Labex Arts H2H
anne.sedes@univ-paris8.fr

Alain Bonardi
CICM - EA1572, Université
Paris 8, MSH Paris Nord,
Labex Arts H2H
alain.bonardi@ircam.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente l'état actuel de la bibliothèque HOA en cours de développement, suite à un premier article paru dans les actes des Jim 2012. Nous présentons en détail l'ensemble des objets. Nous précisons l'apport de la décomposition en ondes planes dans le contexte ambisonique ainsi que l'usage de la synthèse binaurale pour une ambisonie virtuelle. Enfin nous abordons la prise en main de la bibliothèque par les musiciens.

1. INTRODUCTION

La bibliothèque HOA¹ (High Order Ambisonics) propose un ensemble de classes C++ et d'objets Max/MSP destinés à l'ambisonie d'ordre supérieur. Cette bibliothèque est un livrable issu du projet de recherche "La spatialisation du son par les musiciens pour les musiciens" développé au CICM dans le cadre du LABEX Arts H2H de l'université de Paris 8. Ce projet regroupe en équipe d'étudiants et chercheurs confirmés dans un cadre de recherche et création, associant l'informatique et la création musicale. La bibliothèque HOA permet de synthétiser, contrôler et transformer des champs sonores pour des environnements de travail accessibles aux musiciens. Grâce à son architecture modulaire, cette bibliothèque facilite la compréhension et l'appropriation de concepts clés liés à l'ambisonie. L'utilisation des harmoniques sphériques (ou plus exactement circulaires, étant donnés les dispositifs matériels utilisés : des haut-parleurs sur un plan à 2 dimensions) et la création de traitements audio numériques dans le domaine correspondant y sont ainsi facilités.

Dans le cadre de cet article nous présenterons l'état de la bibliothèque et des ses développements, en

revenant sur une première publication parue dans le cadre des JIM 2012 qui annonçait le projet, en présentant les modules et les traitements offerts dans la bibliothèque, l'interopérabilité avec la décomposition en ondes planes, la synthèse binaurale associée au modèle ambisonique et la prise en main pas les musiciens. Nous concluons sur le futur de la bibliothèque.

2. LA BIBLIOTHEQUE DEPUIS SA PRESENTATION AUX JIM 2012

Depuis la première ébauche de la bibliothèque présentée aux JIM 2012 à Mons, une première phase d'évaluation nous a amenés à préciser notre approche.

2.1. Retrait de la compensation de la distance

Les prémices de notre travail présentées en 2012 faisaient mention d'un module de compensation de champs proches (module NFC). Cette méthode proposée par Jérôme Daniel [1] occasionne cependant en pratique une très grande amplification en basse fréquence à mesure que la source sonore virtuelle se rapproche de l'auditeur et que l'ordre de décomposition ambisonique augmente. Des solutions à ce problème sont en cours d'étude [2][3][4] Les différentes propositions se basent sur un même concept, l'association d'un ordre de décomposition à une bande de fréquence spécifique. Plus précisément, il est question d'associer des bandes de fréquence de plus en plus haute à mesure que l'ordre augmente. Ces solutions occasionnent cependant des artefacts sonores très perceptibles qui rendent difficiles une exploitation de la technologie à des fins musicales. Cette année, lors de notre travail de refonte de la bibliothèque, nous avons décidé de retirer le module NFC de la version publique livrée.

¹ La bibliothèque est téléchargeable sur le site <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/>.

2.2. Orientation vers la 2D

Le choix de proposer une bibliothèque ambisonique pour des systèmes de restitution à deux dimensions a été adopté pour plusieurs raisons.

Nous souhaitons avant tout offrir un ensemble d'outils facilitant l'appropriation de l'ambisonie par les musiciens, ce choix implique de prendre en compte les systèmes de restitution les plus répandus qui se situent sur un plan 2D (tels que les systèmes quadriphoniques et octophoniques) et qui ne sont pas toujours idéalement répartis dans l'espace². Rappelons encore que le nombre de haut-parleurs dépend de l'ordre de décomposition. Pour une restitution bidimensionnelle, le nombre minimum de haut-parleurs croît de manière linéaire en fonction de l'ordre³ (nombre minimum de haut-parleurs = $2 * \text{ordre} + 1$), pour des systèmes à trois dimensions, le nombre de haut-parleurs augmente de manière quadratique (nombre minimum de haut-parleurs = $(\text{ordre} + 1)^2$). Ainsi, les systèmes circulaires nous permettent de conserver un meilleur rapport entre le nombre de haut-parleurs et l'ordre de décomposition, ou le nombre d'harmoniques. Cette restriction et le fait que certaines opérations varient de manière significative à des ordres élevés⁴, a confirmé notre choix d'une bibliothèque adaptée à des systèmes de restitution à deux dimensions afin de nous permettre d'explorer et de développer ces opérations à des ordres qui nous aurait été inaccessibles en 3D.

Cependant, nous n'excluons pas la possibilité d'une déclinaison future de la bibliothèque pour des systèmes de restitution à trois dimensions en admettant que ce qui est applicable en 2D, l'est aussi en 3D ; nous pouvons espérer que nos propositions resteront pertinentes.

3. VERSION 1.1 DE LA BIBLIOTHEQUE HOA POUR MAXMSP

Des bibliothèques de spatialisation telles que, entre autres, le Spat⁵ de l'IRCAM, celles de l'ICST⁶, de Graham Wakefield⁷ ou encore de l'université de York⁸ utilisent également l'ambisonie afin de spatialiser les

² Pour de plus amples explications sur les contraintes liées aux systèmes de restitutions et au positionnement de l'auditoire se référer à la documentation de la bibliothèque HOA : *L'ambisonie d'ordre supérieur et Les optimisations*, Guillot Pierre, 2012-2013, téléchargeable sur le site <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/>.

³ En 2D, pour un ordre 3 de décomposition, il faut $2*3+1=7$ haut-parleurs, les usages standard amèneront en général à en utiliser 8.

⁴ Ordre fractionnaires et synthèse granulaire par exemple.

⁵ <http://forumnet.ircam.fr/product/spat/>

⁶ <http://www.icst.net/research/downloads/>

⁷ <http://www.mat.ucsb.edu/~wakefield/software.html>

⁸ <http://www.york.ac.uk/music/mrc/software/objects/>

sons dans l'espace. La bibliothèque HOA propose d'offrir de nouvelles perspectives créatives aux musiciens par son approche particulière de l'ambisonie et du domaine des harmoniques circulaires, libérée d'une recherche de réalisme héritée des modèles acoustiques traditionnels. Nous revenons sur les nombreux traitements et les nouvelles interfaces désormais disponibles au sein de la bibliothèque⁹.

3.1. Modularité et accessibilité

Le principal enjeu de cette bibliothèque est de faciliter l'emploi et la création de traitements originaux dans le domaine des harmoniques sphériques pour le musicien. Il nous a dès lors paru indispensable de mettre l'accent sur sa modularité et son accessibilité.

Le développement du code en C++ et l'organisation modulaire des classes permettent la portabilité de notre bibliothèque sur de multiples plateformes. Un premier déploiement a été effectué à destination de l'environnement Max/MSP.

Effectuer un traitement dans le domaine des harmoniques sphériques se résume le plus souvent à appliquer ce traitement en parallèle sur différents canaux. Hors, les spécificités d'un environnement de programmation graphique tel que Max/MSP ne facilitent pas ce type de mise en place. Nous nous retrouvons à devoir effectuer un grand nombre de manipulations telles que l'instanciation et la connexion d'objets. Afin de factoriser ces interventions, nous avons développé l'objet *hoa.plugin~*. Un même traitement créé sous forme de patch peut être appliqué à l'ensemble des canaux ambisoniques et variabilisé selon un ordre et un indice. De plus, *hoa.connect* permet de faciliter les connections entre les objets de la chaîne de traitement tout en associant des couleurs aux liaisons en fonction de ce qu'elles représentent (une harmonique positive, une harmonique négative ou un signal dans le domaine des ondes planes).

Afin de rendre accessible la bibliothèque et ses traitements aux utilisateurs ne disposant que d'un casque ou d'un couple de haut-parleurs, nous offrons un rendu binaural et stéréophonique grâce aux objets *hoa.binaural~* et *hoa.stereo~*.

3.2. Principaux traitements

Hoa.encoder~ et *hoa.decoder~* permettent l'encodage et le décodage ambisonique. Avoir séparé ces deux processus a permis d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'exercer tout type de traitement lié à l'approche l'ambisonique, ce qui répond au principal enjeu de cette bibliothèque.

Trois types d'optimisation de décodage sont rendus possibles grâce à l'objet *hoa.optim~* :

⁹ Se référer à la documentation contenue au sein de la bibliothèque HOA pour Max/MSP et *Les champs sonores*, Guillot Pierre, 2012-2013, téléchargeable sur le site <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/>

- un décodage basic (présent par défaut, c'est-à-dire sans optimisation, et optimal pour un auditeur idéalement placé au centre du système circulaire de restitution sonore) ;

- un décodage maxRe (pour une meilleure restitution du champ sonore pour des positions d'écoute excentrées) [5].

- un décodage dit inPhase permettant de répondre à la situation critique où l'auditoire se trouve extrêmement proche des haut-parleurs ou même à l'extérieur du cercle de haut-parleurs [6].

L'objet *hoa.rotate~* applique une rotation de tout l'ensemble du champ sonore.

Les objets *hoa.projector~* et *hoa.recomposer~* élargissent ou resserrent la scène sonore en un point grâce au traitement *fisheye*.

L'objet *hoa.wider~* simule des ordres de décomposition fractionnaires afin de varier la résolution angulaire des lobes harmoniques, et de pouvoir passer linéairement d'une source ponctuelle à un champ sonore omnidirectionnel.

L'objet *hoa.halo~* applique un filtrage spatial du champ sonore afin d'en révéler ou cacher certaines parties.

L'objet *hoa.plug~* permet la mise en œuvre simplifiée de traitements sonores directement au sein de Max/MSP. Cet objet peut être utilisé à différents endroits de la chaîne de traitement du signal (sans encodage, avant, ou après un encodage ambisonique) suivant l'effet escompté.

Le patch *hoa.decorrelation~* permet de décorréler des canaux ambisoniques grâce à des lignes à retard et d'offrir un champ sonore diffus.

Le patch *hoa.grain~* est une application dans le domaine des harmoniques sphériques de la synthèse granulaire quasi-synchrone [Roads, 1996], [Roads, 2001]. Les différents paramètres sont modulés en fonction de chaque harmonique afin de synthétiser un champ sonore diffus à la texture spécifique.

Le patch *hoa.mirror~* propose de révéler ou cacher une image miroir du champ sonore en jouant sur le poids des harmoniques négatives.

Le patch *hoa.mixer~*, aide à mieux comprendre la contribution de chaque harmonique sphérique en laissant à l'utilisateur le soin de régler indépendamment le gain de chacune d'elles.

Le patch *hoa.closer~* reprend l'approche ambisonique de l'objet *ambipan~*¹⁰ afin de jouer sur la distance d'une source.

Deux types de réverbération dans le domaine des harmoniques sphériques sont proposés :

Le patch *hoa.reverberation~* utilise un réseau de lignes à retard avec réinjection adapté au domaine des harmoniques sphériques grâce à *hoa.plug~*.

L'objet *hoa.convolve~* permet d'obtenir une réverbération par convolution dans le domaine ambisonique en conjonction avec *hoa.irconverter~* qui

permet de transposer des réponses impulsionnelles dans le domaine des harmoniques sphériques.

3.3. Interfaces graphiques

La bibliothèque HOA propose quatre interfaces graphiques. Les deux premières concernent la visualisation du signal (*hoa.meter~* et *hoa.scope~*) [Figure 1]. Les secondes (*hoa.control* et *hoa.map*) ont pour but d'offrir un contrôle graphique sur certains paramètres ambisoniques et permettent de mieux s'approprier les concepts liés à l'ambisonie.

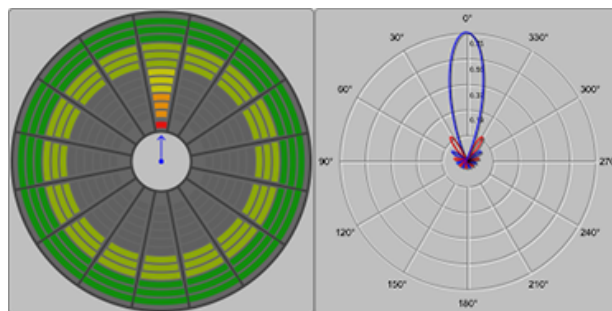


Figure 1. Représentation des contributions de seize haut-parleurs pour un dirac encodé à 0° à l'ordre 7 via l'objet *hoa.meter~* (gauche) et des harmoniques correspondantes *hoa.scope~* (droite).

L'objet *hoa.scope~* permet, à la manière d'un *phase scope*, de visualiser l'amplitude et la phase des harmoniques.

L'objet *hoa.meter~* offre une alternative à la représentation traditionnelle du VU-mètres, peu pertinente dans le contexte ambisonique par la visualisation des contributions de plusieurs haut-parleurs positionnés de manière circulaire.

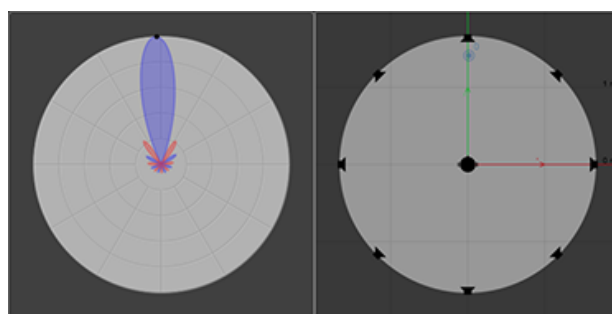


Figure 2. Représentation via l'objet *hoa.control* (gauche) de l'encodage d'un dirac à 0° à l'ordre 7 et de sa projection sur un plan cartésien via l'objet *hoa.map* (droite).

L'objet *hoa.control* aide à la compréhension et à la visualisation des harmoniques sphériques tout en permettant leur manipulation (ordre d'encodage, ordre fractionnaire, types d'optimisation et azimuth).

¹⁰ Objet disponible sur le site du CICM: <http://cicm.mshparisnord.org/>

L'interface *hoa.map* permet la spatialisation de sources sonores ponctuelles sur un plan 2D. Les sources peuvent être manipulées, indépendamment ou de manière groupée. Les données d'azimut de chaque source peuvent être directement traitées par l'encodeur ambisonique, les données de rayon, quant à elles, peuvent être utilisées grâce à une mise à l'échelle avec l'amplitude de la source, pour contrôler la distance via *hoa.closer~* ou encore une réverbération via *hoa.convolve~*.

4. DECOMPOSITION EN ONDES PLANES

L'onde plane est un modèle d'onde fréquemment utilisé en physique. Une onde plane dispose de fronts d'ondes assimilables à des plans (ou, en 2D, à des lignes), de même amplitude et se propageant selon une même direction. En acoustique, nous associons souvent ce modèle à une source sonore éloignée. En effet, le front d'onde d'une source sonore ponctuelle omnidirectionnelle peut être associé à la surface d'une sphère dont la courbure et la variation d'amplitude diminuent à mesure que le rayon augmente. A partir d'une certaine distance entre la source sonore et le point de mesure, et donc à partir d'un certain rayon, le front d'onde est assez peu courbé et varie assez peu en amplitude pour être associé à celui d'une onde plane.

Alternativement à la décomposition en harmoniques sphériques, il existe d'autres manières de décomposer un champ sonore. La décomposition en ondes planes est une de ces opérations, elle nous permet de représenter un champ sonore comme une somme infinie d'ondes planes.

L'ambisonie, et plus particulièrement son étape de décodage, utilise implicitement une version discrète de cette décomposition. En effet, il s'agit de restituer un champ sonore par le biais d'un ensemble de haut-parleurs approximatifs comme étant à onde plane. Les émetteurs ne sont donc représentés que par leur direction, la distance les séparant de l'auditeur n'étant pas prise en compte. Les décodages par projection ou pseudo-inverse [7] peuvent donc être vus comme autant d'outils nous permettant de passer d'une représentation du champ sonore aux harmoniques sphériques à une représentation en onde plane.

Si dans le cas de l'ambisonie ce processus est associé à l'étape de restitution sur haut-parleur, il est possible d'utiliser cette représentation à d'autres fins. On pourrait ainsi concevoir cette dernière comme une représentation de passage nous permettant de mettre en œuvre des traitements directionnels. Parmi les applications possibles, notons le filtrage d'un champ sonore afin de mettre en avant ou de retirer l'un de ses objets. L'efficacité de ce type d'opération étant dépendante de la finesse de notre représentation (i.e. du nombre de fonctions de base considérées) ainsi que de la validité avec laquelle il est possible d'associer le modèle de l'onde plane à l'onde générée par la source sonore traitée.

Dans le cadre de ce projet nous avons tenté de répondre à l'une des problématiques soulevées par Jérôme Daniel dans sa thèse. Ce dernier décrit en effet une opération initialement proposée par Gerzon [8] : la *distorsion de la perspective*¹¹. Il s'agit d'une opération appliquée à une représentation ambisonique permettant d'élargir ou de resserrer la scène frontale. Pour mieux visualiser ce dont il s'agit, nous pouvons noter une certaine similitude entre ce type de traitement et l'application en optique, d'un effet de type *fish-eye*. La distorsion de la perspective est obtenue par Gerzon via une certaine forme de transformation de Lorentz, l'avantage de ce mode opératoire étant la préservation des propriétés de l'onde plane. En d'autres termes, une onde plane à qui l'on fera subir une distorsion de la perspective restera une onde plane. Dans sa thèse, Jérôme Daniel souligne cependant que cette propriété n'est vraie qu'à l'ordre 1, que son extension aux ordres supérieurs n'est malheureusement pas vérifiée.

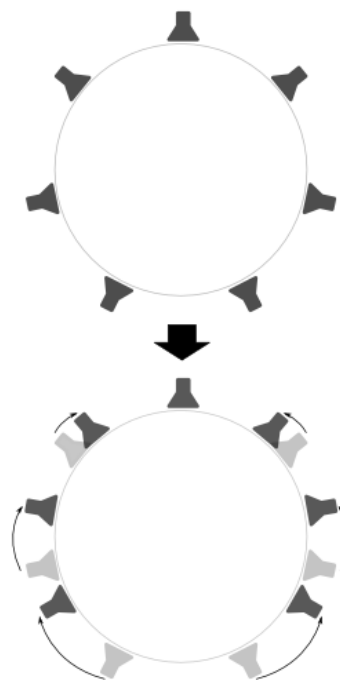


Figure 3. Déplacement des haut-parleurs virtuels dans le but d'obtenir une contraction de la scène frontale.

Malgré cette limitation, la distorsion de la perspective nous a semblé être une manipulation disposant d'un certain potentiel musical. Nous nous sommes donc intéressés à la mise au point d'une stratégie nous permettant d'arriver à un résultat perceptivement équivalent dans le cadre d'une représentation ambisonique d'ordre supérieurs. Nous parlons d'une

¹¹ Il est possible de se questionner concernant la légitimité avec laquelle nous pouvons employer le terme « *perspective* », ce dernier n'étant pas vraiment adapté à la « géométrie » de l'écoute dans un contexte ambisonique.

équivalence sur le plan perceptif car l'extension aux ordres supérieurs nous oblige à faire fi de la conservation des propriétés de l'onde plane. En cela notre démarche pourrait être vue de manière analogue à l'élaboration d'un vocoder de phase, ce dernier nous permet d'étirer ou de compresser un son, mais il ne conserve pas les propriétés d'une simple impulsion de Dirac. La validité d'un time-stretcher se situe ailleurs, dans sa capacité à conserver certains indices pertinents sur le plan perceptif comme par exemple la durée des attaques d'un instrument de musique. C'est dans cette démarche que nous avons étudié l'extension d'un effet de distorsion de la perspective aux ordres supérieurs.

La solution que nous proposons se base sur l'interopérabilité entre la décomposition en harmoniques sphériques et la décomposition en ondes planes mentionnée précédemment. L'opération s'articule en trois étapes, la représentation ambisonique d'ordre supérieur est tout d'abord transposée dans le domaine des ondes planes. Afin de nous représenter plus aisément cette opération, nous pouvons imaginer que chacune de ces ondes est associée à un haut parleur virtuel, chaque haut-parleur virtuel étant disposé de manière homogène sur le pourtour du cercle de restitution. La deuxième étape consiste à déplacer les haut-parleurs de manière à obtenir la distorsion de perspective désirée. Par exemple, si nous désirons un rétrécissement de la scène frontale, il nous faudra déplacer les haut-parleurs d'une manière analogue à celle illustrée en [Figure 3]. La dernière étape consiste à retourner dans le domaine des harmoniques sphériques où nous pouvons disposer d'une représentation ambisonique d'ordre supérieur ayant subi une distorsion de la perspective.

Dans le contexte de la bibliothèque HOA, la mise en place de ce genre de pratique a permise via la création d'une série d'objets facilitant les aller-retour entre les deux domaines cités précédemment. La classe "projection" permet ainsi de projeter une décomposition en harmoniques sphériques sur une base arbitraire d'ondes planes et la classe "recomposition" altère dans un premier temps la direction d'incidence des différentes ondes planes avant de retourner dans le domaine des harmoniques sphériques.

5. AMBISONIE ET BINAURALE

La bibliothèque HOA permet d'étendre les techniques ambisoniques afin d'offrir une restitution sonore au casque grâce à la synthèse binaurale [9] [10]. Cette proposition, déjà présente dans certaines bibliothèques de spatialisation du son tel que le Spat¹² ou Harpex¹³, est ici revisitée afin d'offrir un rendu pour les ordres supérieurs. L'originalité de l'approche présentée réside dans son optimisation grâce aux bibliothèques de calculs

matriciels qui permettent d'offrir une restitution préservant la linéarité des variations de phase via l'utilisation de filtres FIR (Finite Impulse Response) [11] tout en restant accessible sur des ordinateurs personnels¹⁴.

La mise en œuvre d'une ambisonie virtuelle par convolution dans le domaine temporel peut sembler être un choix non optimal comparée aux approches par FFT [12] et par filtres IIR [9]. Pour de petites réponses impulsionnelles, et sur des machines favorisant la parallélisation et la vectorisation des calculs, effectuer une convolution directement peut cependant être un choix judicieux [12]. Obtenir une restitution binaurale à partir d'un champ sonore représenté dans le domaine des harmoniques sphériques revient, dans un premier temps, à restituer ce champ sonore pour un nombre défini de haut-parleurs virtuels. En fonction de l'angle d'incidence du haut-parleur dont il provient, chaque signal est par la suite filtré par un couple de HRIR (Head Related Impulse Response).

Afin d'obtenir une restitution binaurale de qualité, un grand nombre de haut-parleur doit être considéré, ceci implique de nombreuses convolutions devant être effectuées en parallèle. La solution proposée par la bibliothèque HOA réside dans sa représentation matricielle des calculs.

Une nouvelle matrice de décodage est en effet proposée. Ce nouveau décodage peut être vu comme une projection du décodage multicanal classique sur uniquement deux canaux intégrant les informations relatives aux différentes HRIR.

En termes de calculs, nous passons d'un grand nombre de FFT au profit d'une seule multiplication matricielle. Dans les bibliothèques que nous avons utilisé, cette opération est hautement vectorisée, parallélisée et bénéficie d'algorithmes de FMF (Fast Matrix Factorization). L'ensemble nous permet d'optimiser les calculs afin d'être accessible sur la majorité des ordinateurs personnels d'aujourd'hui.

Comme chaque haut parleur nécessite l'utilisation d'un couple d'HRIR distinct, l'ordre de décomposition est contraint par le nombre de réponses impulsionnelles. Dans la bibliothèque HOA, nous utilisons les HRIR du laboratoire CIPIC¹⁵, qui comporte 178 réponses impulsionnelles horizontales pour chaque oreille, l'ordre maximal est donc de 35 et nous tirons parti de la bibliothèque de calcul matriciel MKL¹⁶ pour optimiser l'ensemble des calculs matriciels.

Élargir les moyens de restitution par le rendu binaural permet de spatialiser une multitude de sources sonores sans pour autant augmenter le nombre de filtres binauraux et offre aux utilisateurs un accès au casque à l'ensemble des traitements ambisoniques proposés par la

¹² <http://www.ircam.fr/>

¹³ <http://www.harpex.net/>

¹⁴ L'utilisation du CPU (processeur Intel Core i7 à 2,3 GHz) est d'environ 23% pour un ordre 35, 12% pour un ordre 7 et 9% pour un ordre 1.

¹⁵ <http://interface.cipic.ucdavis.edu/>

¹⁶ <http://software.intel.com/en-us/intel-mkl>

bibliothèque HOA sans la nécessité donc de posséder un système composé d'une multitude de haut-parleurs.

6. PRISE EN MAIN PAR LES MUSICIENS

Dans le cadre du projet de recherche « la spatialisation du son par les musiciens pour les musiciens », il était établi que l'observation des retours d'usage se ferait au cours de situations réelles de création musicale, conduites au sein de l'équipe. Deux projets de pièces mixtes ont vu le jour dans ce contexte, ainsi qu'une installation sonore interactive. Par ailleurs, des évaluations dans des cadres pédagogiques ont pu avoir lieu.

6.1. Anne Sédès, Immersion, pour violoncelle et électronique live

Il s'agit d'une pièce¹⁷ pour violoncelle, et électronique live avec Max/MSP comportant une pédale midi et 8 haut-parleurs. Nos avons donc été amenés à travailler à l'ordre 3, ce qui permet d'obtenir le maniement de 7 harmoniques.

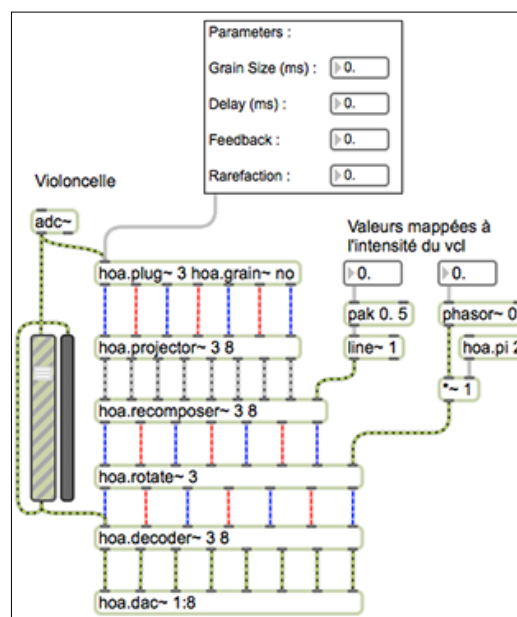


Figure 4. Le module de spatialisation avec HOA dans le patch de la pièce Immersion.

L'enjeu de la pièce est la mixité, ou comment faire converger une écriture instrumentale dédiée au potentiel sonore du violoncelle avec le traitement spatial du son instrumental en temps réel, grâce aux moyens de HOA, en s'appuyant sur le maniement de quelques variables.

Parmi l'ensemble des traitements offerts dans HAO, nous avons fait le choix de la granulation, en utilisant *hoa.grain~* dans *hoa.plug~*. D'une part, c'était un des premiers traitements disponibles dans la bibliothèque. D'autre part, la granulation a un potentiel expressif que nous sommes habitués à manier (accès à des variations de timbre, de rythme, à du délai non répétitif, à de l'aléatoire, à des effets de spatialités décorrélables selon les canaux etc.). Nous avons également fait le choix de la variation de la rotation globale et de la contraction/dilatation du champ sonore, en nous inspirant de l'emploi habituel de trajectoires de sources sonores, mais ici appliqué à l'ensemble du champ sonore [Figure 4].

Les paramètres variables de *hoa.grain~*, qui est basé sur une technique de ligne à retard granulaire, sont les suivants : le choix de l'harmonique, la taille du grain, le retard, la réinjection et la raréfaction.

Nous avons construit au fil de l'écriture instrumentale une sorte de canon, introduisant par changements de programme à la pédale midi les successions de couches granulaires propres à chaque harmonique, les changements de variables étant soit contenus dans un tableau *patternstorage*, soit mappés à l'intensité du jeu instrumental (via l'objet *peakamp~*).

Nous avons également utilisé des techniques de *Fisheye* (*hoa.recomposer~*) et de rotation (*hoa.rotate~*), connectées au suivi d'amplitude (*peakamp~*) que nous avons appliquées à l'ensemble des couches produites, afin d'obtenir des jeux de mouvements spatiaux globaux,

¹⁷ La pièce a été composée au studio de la MSH Paris Nord entre Juillet et novembre, avec quelques séances d'essai avec le violoncelliste Guilherme Carvalho, puis avec des enregistrements des séances. L'écriture instrumentale a été fixée à l'automne. Une première présentation a eu lieu à l'université Paul Valéry-Montpellier 3, dans le cadre d'un concert-lecture, le 27 novembre 2012. La pièce sera rejouée dans le cadre des JIM 2013 le 13 mai prochain. Cette pièce a également une fonction pédagogique, car elle a permis de fournir des exemples didactiques dans le cadre de l'atelier de composition du département de musique de l'université Paris 8.

en contrepoint avec la source instrumentale directe diffusée au centre. Afin d'obtenir une cohérence entre le jeu du violoncelle en direct et son traitement spatial, le son direct du violoncelle a en effet été connecté vers l'entrée du 1er harmonique, pour que le violoncelle seul soit diffusé en mono, indépendamment des traitements de spatialisation.

Dans cette pièce, Nous avons donc pu tester la prise en main de la bibliothèque, sans trop de difficultés, et faire des retours de détail aux développeurs. Nous avons au fond, servi de beta-testeurs. Nous avons ainsi pu évaluer la grande stabilité de la bibliothèque.

Sur le plan de la musicalité des traitements, nous avons fait le choix de la granularité, pour des raisons expressives et parce qu'il permettait facilement de construire des couches différenciables, autrement dit, de la décorrélation temporelle [13], correspondant chacune à un harmonique. En quelque sorte, nous avons considéré chaque harmonique circulaire comme une couche, comme une voix, pour une polyphonie spatiale. Le jeu avec les rotations et l'effet *fisheye* nous a permis d'introduire une véritable dynamique du mouvement sans tomber dans des effets systématiques de trajectoires circulaires d'une source sonore. Nous avons testé au passage l'usage de la stéréo et de l'ambisonie pour des séances domestiques de préparation du travail en amont du studio. Avec une approche de la mixité, basée sur la variation de peu de traitements du son instrumental avec HOA (la granulation et ses variables, la rotation et l'effet *fisheye*), nous avons donc réussi à construire une pièce dont le rendu nous donne musicalement satisfaction.

6.2. Alain Bonardi, Pianotronics 1, pièce pour piano et live électronique

Cette pièce pour piano et électronique temps réel, diffusée sur un dispositif octophonique, est en cours de composition; elle sera créée lors des Journées d'Informatique Musicale en mai 2013. Nous travaillons sur la variabilité de l'espace sonore, en explorant ses continuités et discontinuités selon deux axes :

- la variabilité de présence du piano : les situations sonores vont d'un piano au premier plan en solo en jouant sur son timbre à un piano absent en son direct mais présent dans l'électronique, en passant par des situations intermédiaires. La spatialisation par HOA contribuera largement à ces variations de présence.
- la variabilité du champ électroacoustique par des micro-polyphonies sur les harmoniques circulaires, à partir essentiellement d'un sampler aux sorties distribuées sur ces dernières.

6.3. Transduction, installation interactive

Dans le cadre du projet, une installation sonore interactive est également développée. En utilisant des interfaces de contrôle et de jeu de type de Kinect, iPad

ou Wii-balance, nous invitons un public non initié à jouer avec des contenus spatialisés. Une première proposition a été présentée à Savantes banlieues 2012 (fêtes de la science¹⁸ à Villetaneuse). Une deuxième proposition aura lieu lors des présentes JIM et dans le cadre du festival Futurs en Seine 2013. Elle inclura cette fois-ci la création d'un interacteur spécifique sur IPAD, proposé par Manuel Deneu, dans le cadre d'un partenariat avec l'ENS Louis Lumière.

Ce développement artistique sous forme d'installation, qui cherche à transduire l'énergie gestuelle du public visiteur à l'écoute du dispositif de spatialisation est pour l'équipe un moyen de tester, "à taille réelle" et dans des situations standard de production artistique, le rendu en cours de développement de la bibliothèque HOA. Il va accompagner spécialement les développements à venir sur 2013, concernant le développement des interfaces de contrôle et d'écriture de la spatialisation du son avec HOA.

6.4. Prise en main par de jeunes musiciens

La récente résidence d'Alain Bonardi au Conservatoire à Rayonnement Régional de Bayonne fin janvier 2013 abordait les thèmes de la synthèse et de la spatialisation. La librairie HOA a été présentée à cinq jeunes compositeurs de la classe d'électroacoustique (professeur : Patrick Defossez) qui ont pu faire des premiers tests sur un dispositif octophonique. Ils ont mis en œuvre l'encodage, le décodage et la gestion d'effets sous forme de plug-ins (lignes à retard, réverbérations). Les points positifs immédiatement relevés sont :

- la possibilité d'appropriation rapide des outils d'ambisonie grâce aux patches d'aide immédiatement opérationnels;
- la facilité de mise en œuvre d'un effet dans *hoa.plugin*.

Ayant tout d'abord utilisé l'objet *ambipan* des CICM Tools (ambisonie d'ordre 1), ils ont pu comparer les deux approches. Les retours se focalisent sur deux points:

- alors que l'objet *ambipan* proposait d'emblée la saisie de l'azimut et de la distance à l'origine (coordonnées polaires), ce dernier paramètre est absent de la librairie HOA : l'objet *hoa.encoder* ne permet de manipuler que l'azimut. Il est certes possible de coder une atténuation liée à la distance, mais cette dimension n'était alors pas donnée d'emblée au musicien.
- les harmoniques circulaires ne sont pas évidentes à comprendre et à appréhender dans l'espace sonore.

En fin de résidence, une courte restitution a été organisée, donnant lieu à des esquisses de quelques minutes, essentiellement à base d'improvisations instrumentales traitées par l'ordinateur (la plupart de ces

¹⁸ <http://savantebanlieue.plainecommune.fr/>

jeunes compositeurs étant également musiciens improvisateurs). Désormais, ils développent ces esquisses avant une prochaine présentation fin mai ou début juin devant un jury. Les points négatifs étaient que les étudiants ne trouvaient pas dans HOA les facilités offertes dans l'objet *ambipan* en terme de contrôle du rayon de la source. C'est suite à cette remarque de musiciens en situation de création que *hao.closer* a été ajouté à la bibliothèque.

HOA est également utilisée dans le cadre de l'atelier de composition instrumentale et électronique du département de musique de l'université de Paris 8, sous la direction de J.-M. Lopez Lopez, A. Sèdes et A. Bonardi. Les travaux de composition mixte des étudiants seront présentés en concert en juin 2013. Là encore, les retours d'utilisation sont étudiés de très près.

7. CONCLUSION

Grâce à la mise en œuvre de ce projet, nous avons pu avancer sur la possibilité de traitement au niveau des harmoniques circulaires, la possible interopérabilité entre décomposition en ondes planes et décomposition en harmoniques sphériques ainsi que l'ambisonie virtuelle (par le biais de la synthèse binaurale). Nous avons tenté de mettre le potentiel de l'ambisonie à la disposition des musiciens électroacousticiens et des développeurs en informatique musicale.

Les présents résultats nous incitent à poursuivre nos recherches en développant les techniques de convolution et de décorrélation appliquées au domaine des harmoniques sphériques afin d'offrir aux musiciens électroacousticiens de nouveaux traitements. Par ailleurs, il nous semble également utile d'élargir nos systèmes de restitution pour permettre l'utilisation de configurations irrégulières de haut-parleurs auxquelles les musiciens sont souvent confrontés. Également, nous n'excluons pas d'examiner la combinaison d'autres techniques de spatialisation telle que la WFS avec l'ambisonie dans le cadre d'HOA.

Notons que des perspectives de portage de la bibliothèque sont à l'ordre du jour dans la communauté de l'informatique musicale. Ainsi, une étude de faisabilité du déploiement sur FAUST est en cours avec le GRAME.

Pour 2013, l'effort va porter sur le développement d'interfaces de contrôle et d'écriture pour la spatialisation du son avec HOA. Cet effort engage une réflexion sur les interfaces de contrôle et d'écriture de la mise en espace du son selon diverses échelles temporelles. C'est la raison pour laquelle notre équipe porte un intérêt pour les projets OSSIA et ISCORE et commence sur ce plan un dialogue avec l'équipe du GMEA à Albi.

Notons enfin que le retour d'utilisation en situation de création artistique a permis d'évaluer en taille réelle et en situation professionnelle de production la pertinence conceptuelle des outils sur le plan de leur utilisation musicale, autant que la stabilité technique des logiciels offerts. Du point de vue du musicien, elle a permis de développer une pensée musicale en interaction avec les outils en cours de développement. Nous ne pouvons ici que nous féliciter d'un travail dont la méthodologie a bénéficié d'une dynamique d'équipe, alliant recherche et création.

8. REFERENCES

- [1] Daniel, J. "Spatial Sound Encoding Including Near Field Effect : Introducing Distance Coding Filters and a Viable New Ambisonic Format", AES 23rd International Conference, Copenhagen, Danemark, 2003.
- [2] Daniel, J. Moreau, S. "Spatial encoding and decoding of focused virtual sound sources", Proc. Of the 1st Ambisonics Symposium, Graz, Austria, 2009.
- [3] Ahrens, J. Spors, S. "Further study of sound field coding with high order ambisonics" Proc. of the 116th Audio Engineering Society Convention, Berlin, Germany, 2004.
- [4] Favrot, S. Buchholz, J. "Reproduction of nearby sound sources using hier-order ambisonics : Implementation and evaluation", Proc. of the 36th German Annual Conference on Acoustics, Berlin, Germany, 2010.
- [5] Gerzon, M. A. "General metatheorie of auditory localisation", Preprint 3306 of the 92nd Audio Engineering Society Convention, Vienne, Autriche, 1992.
- [6] Malham, D. "Experience with large area 3D ambisonic sound systems", Proceedings of the Institute of Acoustics, York, Royaume-Uni, 1992.
- [7] Colafrancesco, J. "L'ambisonie d'ordre supérieur et son appropriation par les musiciens", Actes des Journées d'Informatique Musicale, Mons, Belgique, 2012.
- [8] Gerzon, M. A. "Ambisonic Decoder for HDTV". Proc. of the 92nd AES Convention, Vienne, Autriche, 1992.
- [9] Larcher, V. "Techniques de spatialisation des sons pour la réalité virtuelle", Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2001.
- [10] Noisternig, M. Musil, T. Sontacchi, A. Höldrich, R. "3D Binaural Sound Reproduction using a Virtual Ambisonic Approach", International Conference On Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, And Measurement Systems, Lugano, Suisse, 2003.
- [11] Smith, J.O. "Partial Fraction Expansion", in *Introduction to Digital Filters with Audio Applications*,

http://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Partial_Fraction_Expansion.html, 2007, Livre en ligne, accès 2013.

[12] Smith, J.O. "Fourier Theorems for the DFT", in *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications, Second Edition*, http://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/Fourier_Theorems_DFT.html, 2007, Livre en ligne, accès 2013.

[13] Vaggione, H. « Décorrélation microtemporelle, morphologies et figurations spatiales, actes des Journées d'informatique musicale », Actes des Journées d'Informatique Musicale, Marseille, France, 2002.