

UNIVERSITE PARIS VIII

VINCENNES – SAINT-DENIS

MASTER II

MENTION : MUSIQUE

SPECIALITE : MUSICOLOGIE, CREATION, MUSIQUE ET SOCIETE

PARCOURS : THEORIE ET RECHERCHE

DIRECTEURS : ANNE SEDES ET ALAIN BONARDI

LES TRAITEMENTS MUSICAUX EN AMBISONIE

PIERRE GUILLOT

2012 – 2013

TABLE DES MATIERES

Introduction	7
Preamble	9
La représentation de l'espace	9
La représentation des harmoniques circulaires	10
La représentation des contributions des haut-parleurs	12
1 La synthèse en ambisonie	13
1.1 La source ponctuelle	14
1.1.1 L'encodage ambisonique d'une source sonore	14
1.1.2 Résolution spatiale et ordres fractionnaires	18
1.1.3 La compensation de la distance	24
1.2 Le champ diffus	28
1.2.1 De l'acoustique au traitement	28
1.2.2 La synthèse granulaire	30
1.2.3 Adaptation aux harmoniques circulaires	32
1.2.4 Champs diffus et harmoniques	35
1.2.5 Critique du champ sonore	37
1.3 Du champ diffus à la source ponctuelle	39
1.3.1 Le cross-fade	40
1.3.2 Le facteur de diffusion	44
2 Les transformations du champ sonore	50
2.1 La décomposition en ondes planes	51
2.1.1 Les ondes planes	51
2.1.2 Le filtrage du champ sonore	53
2.1.3 La distorsion de la perspective	57
2.2 La réverbération	61
2.2.1 L'approche	61
2.2.2 Reverberation et ondes planes	62
2.2.3 Reponses impulsionnelles ambisoniques	64
2.2.4 Utilisation d'un module de diffusion	68
2.2.5 Perspectives	70
3 La restitution du champ sonore	72
3.1 Les optimisations	73
3.1.1 Le décodage ambisonique	73

3.1.2	Les types d'optimisation	76
3.1.3	Champs sonores et optimisations	81
3.2	Binaurale et systèmes de restitution irréguliers	83
3.2.1	La binaurale	84
3.2.2	les ordres fractionnaires	87
3.2.3	Le panning d'amplitude	91
3.2.4	La projection adaptée	94
3.2.5	Perspectives	95
	Conclusion	97
	Bibliographie	101
	Annexes	104

Je souhaite remercier toute l'équipe du CICM qui a participé au projet HOA. Il règne au CICM un véritable esprit d'équipe, de partage et de confiance. J'ai pris durant une année un véritable plaisir à y travailler et j'espère sincèrement pouvoir continuer à être en si bonne compagnie.

Je souhaite aussi remercier le GRAME et particulièrement leur équipe de chercheurs : Yann Orlarey, Stéphane Letz et Dominique Fober qui nous ont chaleureusement accueillis à Lyon et avec qui nous avons eu des échanges très fructueux aux sujets du projet Faust, du projet HOA, de la musique et de l'informatique en général.

Merci tout particulièrement à Anne Sédès et Alain Bonardi, mes directeurs ainsi qu'à Julien Colafrancesco et Eliott Paris, mes partenaires de travail.

INTRODUCTION

L'ambisonie est basée sur une représentation physique du champ sonore dans le domaine des harmoniques sphériques ou circulaires. Cette représentation consiste en une décomposition des champs sonores en une somme pondérée de fonctions spatiales qui n'est pas sans rappeler les transformées de Fourier. Ainsi, de manière analogue au domaine fréquentiel où de nombreux traitements musicaux dits d'« analyse-synthèse » et de transformation des sons ont été inventés, le domaine des harmoniques circulaires permet d'envisager de nombreuses opérations musicales liées à la synthèse, la transformation et la restitution de champs sonores. Différents traitements sont déjà établis dans la littérature et sous forme logicielle et font partie des utilisations usuelles de l'ambisonie. Ils vont de l'encodage d'une source ponctuelle à la projection sur un ensemble de microphones en passant par la rotation du champ sonore. Cependant, les recherches et développements actuels tentent principalement de répondre à des problématiques d'ordre acoustique ou liées au génie sonore. L'appropriation des procédés ambisoniques par les musiciens n'a été, à ce jour, que très peu encouragée alors même qu'ils offrent des myriades de possibilités artistiques toutes aussi variées que fertiles pour l'imaginaire.

En 2012, dans le cadre du LABEX Arts H2H de l'Université Paris 8, le CICM entreprend un projet de recherche « La spatialisation du son par les musiciens, pour les musiciens ». Ce projet regroupant étudiants et chercheurs confirmés dans un cadre de recherche et création, associant l'informatique et la création musicale a permis l'élaboration de la bibliothèque HOA (High Order Ambisonics¹). Cette bibliothèque, l'auteur y a activement participé tant sur l'aspect théorique que pour le développement des classes C/C++, la mise en œuvre d'objets pour les logiciels Max/MSP² et Pure Data³ et l'adaptation au langage de programmation fonctionnel Faust⁴. Elle offre, à présent, un ensemble d'outils de spatialisation liés à l'ambisonie d'ordre supérieur dont le but principal est de répondre aux contraintes compositionnelles et musicales dans le domaine de la musique électroacoustique. Ces outils ont déjà fait leurs preuves au travers d'installations qui se sont déroulées dans le cadre de l'événement Savante Banlieue et des JIM⁵ mais aussi de compositions telles que

¹ Ambisonie d'ordre supérieur.

² <http://cycling74.com/>.

³ <http://puredata.info/>.

⁴ <http://faust.grame.fr/>.

⁵ Le lecteur pour se référer aux sites internet de l'événement Savante Banlieue <http://savantebanlieue.plainecommune.fr/> et des Journées d'informatique musicales <http://www.mshparisnord.fr/JIM2013/> ainsi qu'à la section projet du site internet de la bibliothèque HOA : <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/projets/>.

Immersion pour violoncelle et live électronique d'Anne Sédès et *Pianotronics I* pour piano et live électronique d'Alain Bonardi⁶ ou encore dans le cadre des créations mixtes de l'atelier de composition de l'Université Paris 8 dirigé par José Manuel Lopez Lopez⁷.

En nous appuyant sur la bibliothèque HOA, nous proposons au lecteur de s'approprier les notions fondamentales de l'ambisonie afin de lui faire découvrir notre approche particulière basée sur une conception artistique de ces techniques de spatialisation. En revenant sur les concepts acoustiques et mathématiques, nous commencerons notre parcours en explorant la synthèse dans le domaine des harmoniques circulaires et des nouvelles manières d'envisager l'espace sonore qui en découlent. Toujours en nous projetant dans l'abstraction créatrice, nous reviendrons par la suite sur les transformations du champ sonore et les possibilités musicales offertes par celles-ci. Notre démarche se clôturera sur la concrétisation des champs sonores où, en étudiant les techniques de restitution, nous tenterons de préserver la qualité des champs sonores dans le réel. Enfin, l'ensemble des propositions sera validé au travers de l'utilisation, par la communauté scientifique et par les artistes, des outils que nous proposons et grâce aux nombreux retours qui ont fortement contribué à orienter notre démarche et à améliorer la bibliothèque HOA.

⁶ Le lecteur pourra se référer à [Colafrancesco et al, 2013].

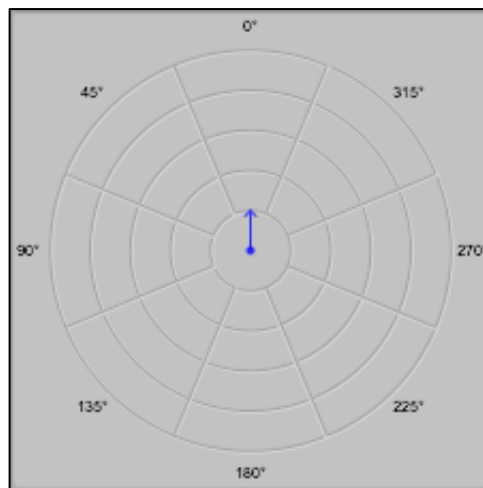
⁷ Le lecteur pourra se référer au site internet : <http://www.univ-paris8.fr/Atelier-de-composition>.

PREAMBULE

Les présentes recherches proposent des équations et des représentations de l'espace qui peuvent diverger des modèles scientifiques. Ce choix volontaire répond aux usages artistiques et musicaux qui varient selon chacun. De plus, nous proposons des représentations du champ sonore sous la forme de sommes de fonctions spatiales ou de contributions de haut-parleurs. Il est nécessaire de fournir au lecteur les clefs permettant la lecture de ce mémoire.

LA REPRESENTATION DE L'ESPACE

Le modèle ambisonique est fondé sur une représentation polaire de l'espace en adéquation avec un auditeur placé au centre d'un cercle de haut-parleurs. Nous définissons arbitrairement que le sens de rotation est antihoraire et que le 0° est déphasé de 90° par rapport à une représentation mathématique d'un cercle comme nous le présentons ci-dessous :

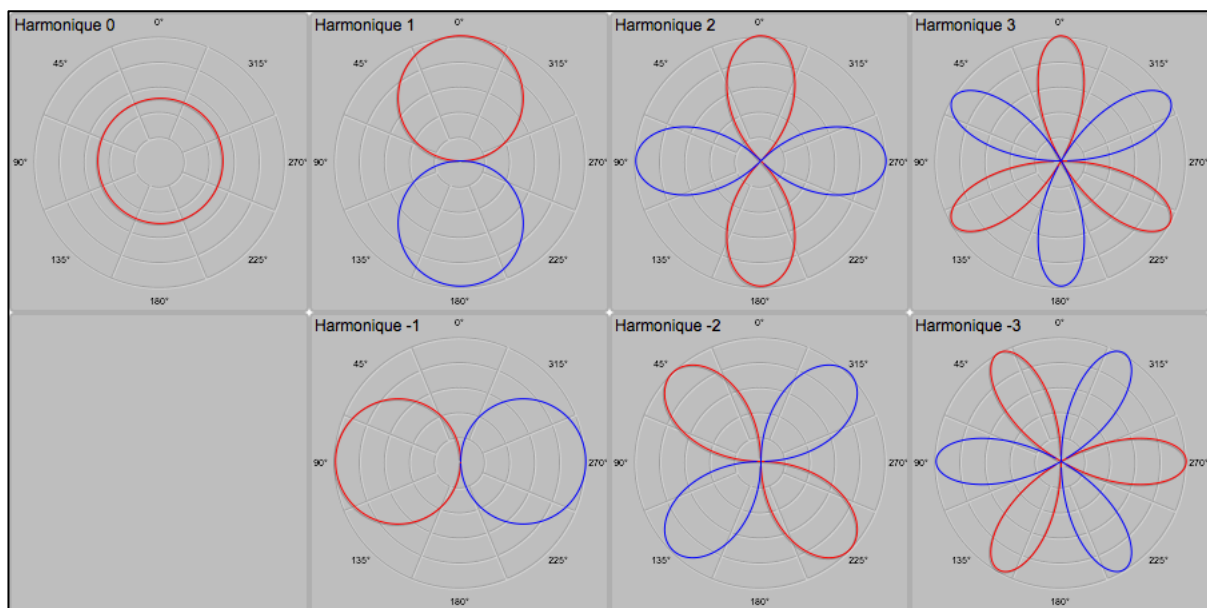


Les angles sont généralement définis en radians (entre 0 rad et $2\pi \text{ rad}$) pour une représentation de l'espace dans le domaine des harmoniques circulaires et en degrés (entre 0° et 360°) pour une représentation de l'espace hors du domaine des harmoniques circulaires. Il est d'usage de définir que « l'avant » du champ sonore est à 0° ou 0 rad , la « gauche » à 90° ou $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$, « l'arrière » à

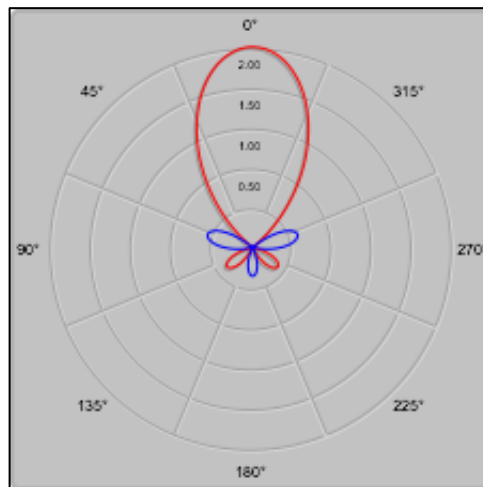
180° ou π rad et la « droite » à 270° ou $\frac{3\pi}{2}$ rad en partant du principe qu'un auditeur placé au centre du champ sonore est dirigé vers 0° comme la flèche bleue le représente.

LA REPRESENTATION DES HARMONIQUES CIRCULAIRES

Les harmoniques circulaires sont des fonctions spatiales dépendant d'un ordre n et d'un indice i et prennent en variable un angle α en radian. Chaque ordre n comprend une harmonique dite négative dont l'indice est égal $-n$ et une harmonique positive dont l'indice est égal n hormis l'ordre 0, qui ne possède qu'une harmonique d'indice 0 considérée comme positive. Ces fonctions circulaires peuvent être représentées sur un plan à deux dimensions en relation avec la représentation de l'espace que nous venons de proposer. Selon l'angle α , les fonctions sont positives (rouge) ou négatives (bleu). Nous présentons un aperçu des représentations pour des harmoniques allant jusqu'à l'ordre 3 :



Un champ sonore décomposé dans le domaine des harmoniques circulaire peut alors être représenté par une somme pondérée d'harmoniques circulaires. Pour un ordre de décomposition N , ce champ sonore est décomposé par $2N + 1$ harmoniques circulaires dépendantes des ordres allant de 0 à N et dont les indices vont donc de $-N$ à N . Cette somme pondérée de fonctions spatiales peut, de manière analogue à une seule harmonique circulaire, être représentée sur un plan à deux dimensions comme nous le présentons pour un ordre de décomposition 3 lors de l'encodage d'un signal mesuré à 2 à 0 radian⁸ :

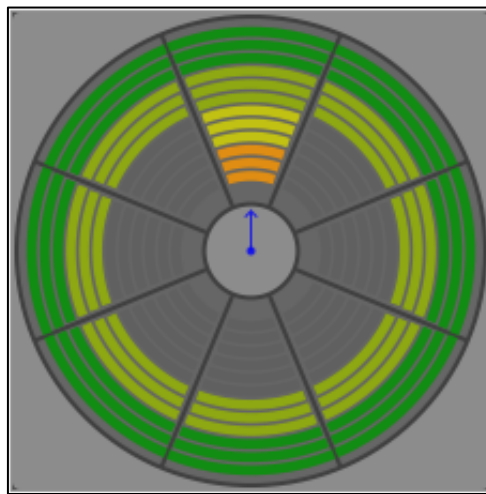


Nous pouvons remarquer que selon l'angle α , les harmoniques circulaires se compensent et s'annulent et la représentation génère des figures de directivité qui, comme nous le verrons dans le premier chapitre, sont corrélées avec la résolution spatiale d'un champ sonore. Notons encore que dans notre représentation, nous normalisons les fonctions afin que la somme des contributions des harmoniques circulaires ne dépasse pas le rayon de notre cercle arbitrairement défini à une amplitude 1. L'amplitude maximum de la somme des harmoniques circulaires peut néanmoins être représentée par une échelle de valeur sur la représentation.

⁸ Rappelons que l'angle d'encodage n'est pas l'angle α utilisé dans notre représentation.

LA REPRESENTATION DES CONTRIBUTIONS DES HAUT-PARLEURS

Il est utile de représenter le champ sonore sous forme de contributions correspondant aux haut-parleurs afin de comprendre et d'analyser le processus de restitution. Nous proposons pour cela une représentation sous la forme de plusieurs modulomètres de type *Peak Programme Meter* qui indiquent donc les crêtes des signaux audio des haut-parleurs. Afin de répondre à la problématique ambisonique, les modulomètres sont représentés de manière circulaire, comme nous le présentons ci-dessous :



Les niveaux des modulomètres sont basés sur l'échelle des décibels et orientés vers le centre du cercle. Le minimum étant à la circonférence du cercle extérieur et équivalent à -90 dB et le maximum étant à la circonférence du cercle intérieur et équivalent à 0 dB. Le vecteur énergie, sur lequel nous reviendrons dans le chapitre qui traite de la restitution du champ sonore, est représenté par la flèche bleue.

1 LA SYNTHÈSE EN AMBISONIE

Le domaine ambisonique permet au musicien d'envisager la synthèse sonore sous un angle d'approche tout à fait différent de celui qu'il observe dans les usages habituels du traitement du signal. Il est, à ce sujet, possible de remarquer une forte corrélation avec ce que le domaine fréquentiel a apporté en matière de possibilités musicales au musicien. Lorsque dans les années 60, la transformée de Fourier rapide devenait accessible au musicien, un nouveau paradigme s'est ouvert à lui. Grâce à la décomposition d'un champ sonore en harmoniques circulaires, c'est là aussi, un monde qui émerge et qui offre de nouvelles perspectives quant à la manière de penser et créer l'espace et le son. Ce domaine ambisonique, bien qu'il fût le sujet de nombreuses recherches et de nombreux développements depuis les années 70, n'a encore que très peu révélé son potentiel musical. Il semble qu'aujourd'hui, grâce aux avancées, qu'elles soient matérielles, technologiques, ou théoriques, nous puissions appréhender cet univers à travers une approche plus artistique. C'est donc principalement à cela que nous tentons de répondre. En nous appropriant les concepts mathématiques, physiques et acoustiques de base liés à l'ambisonie, nous proposons de nouvelles approches libérées des contraintes jusque-là définies par ces domaines d'étude. Ce que nous présenterons tentera alors de satisfaire aux exigences musicales et compositionnelles afin d'offrir aux musiciens de nouveaux outils de création sonore. En somme, c'est par la pratique et l'écoute musicale que nous souhaitons valider nos approches. Partir de la synthèse de sources sonores ponctuelles nous permettra d'éclaircir certains des concepts clefs de l'ambisonie, et d'offrir au lecteur une première marche solide à partir de laquelle nous pourrons fonder notre conception du champ diffus et présenter les possibilités musicales qui en découlent. Enfin nous finirons par découvrir le potentiel musical qui existe entre ces deux notions paradoxales.

1.1 LA SOURCE PONCTUELLE

La mise en espace d'une source sonore ponctuelle est une opération qui offre un fort potentiel musical et qui est largement usitée par les musiciens. Cette approche qui consiste à définir un emplacement à la source sonore et à lui donner du mouvement trouve grâce à l'approche ambisonique de nouveaux paramètres d'interaction. Après un retour sur les fondements mathématiques et acoustiques de l'encodage ambisonique, nous proposons d'aller plus loin avec l'un des traitements les plus pertinents d'un point de vue musical, l'ordre fractionnaire, qui permet de moduler la résolution angulaire d'une source sonore. Par la suite, grâce aux ordres fractionnaires, nous soumettons une proposition permettant de répondre au problème de la simulation de la distance de la source sonore.

1.1.1 L'ENCODAGE AMBISONIQUE D'UNE SOURCE SONORE

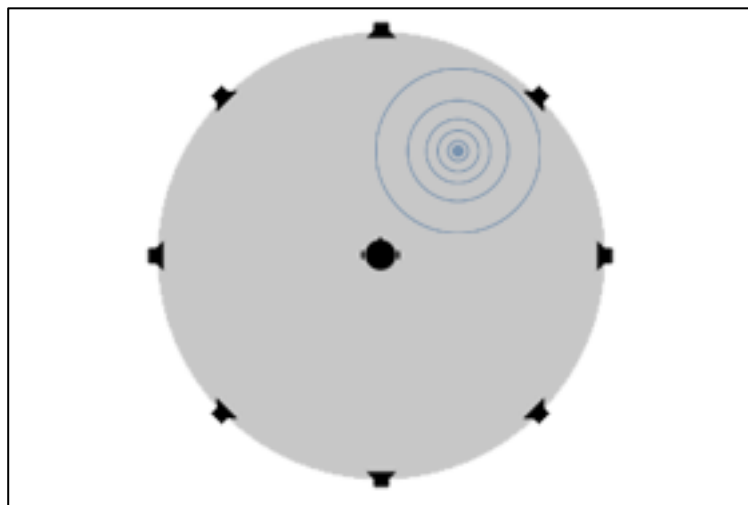


Figure 1 : Représentation d'un auditeur percevant une source sonore ponctuelle dans un espace représenté par un cercle de haut-parleurs.

En ambisonie, encoder une source sonore consiste à transposer un signal dans le domaine des harmoniques circulaires. Le terme d'encodage peut, en réalité, recouvrir un grand nombre d'opérations comme la synthèse de champs diffus que nous verrons par la suite. Cependant les usages limitent généralement cette notion à une application bien précise qui réside dans le fait de donner un caractère ponctuel sur le plan spatial à la source sonore. La source sonore, une fois restituée, peut donc, suite à cette opération, être perceptivement définie comme provenant d'un point précis de l'espace (Figure 1).

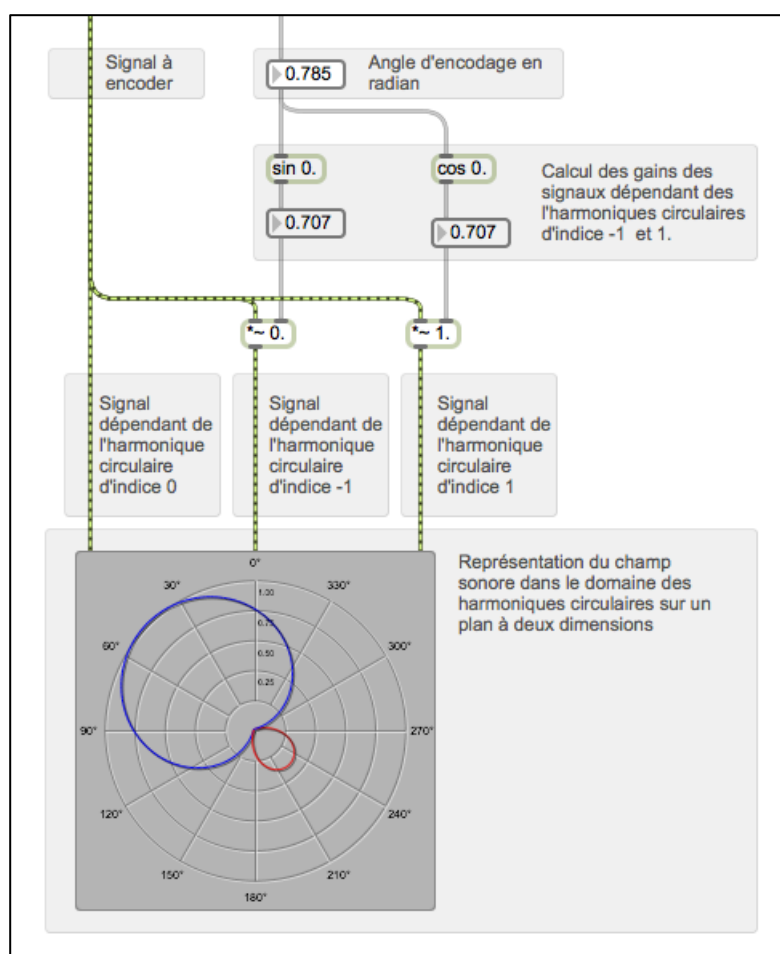


Figure 2 : Représentation des calculs des gains des signaux dépendant des harmoniques circulaires pour un encodage à un ordre de décomposition 1 et un angle d'incidence de $\pi / 4$.

Le format B⁹ est une norme ambisonique basée sur une décomposition du champ sonore à l'ordre 1 (notons que cette norme s'étend aujourd'hui jusqu'à l'ordre de décomposition 3¹⁰) offrant la possibilité d'encoder un signal dans le domaine des harmoniques circulaires via un processus relativement simple. Cette opération consiste à attribuer le signal de la source sonore à encoder à chacun des trois signaux dépendant des harmoniques circulaires¹¹ alors pondérés par des gains. Ces gains sont définis en fonction de l'angle d'incidence que le musicien souhaite donner à la source et de

⁹ Pour de plus amples explications sur les formats le lecteur peut se référer à la documentation de la bibliothèque HOA : *Les formats*, Guillot Pierre, 2012-2013, téléchargeable sur le site <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/>.

¹⁰ Pour de plus amples informations sur les mises en œuvres du format B à l'ordre 3, le lecteur peut se référer [Malham, 2003], [Neukom, 2007], [Neukom et al, 2008].

¹¹ Rappelons que le nombre d'harmoniques est égal à $2 * \text{ordre de décomposition} + 1$.

l'indice de l'harmonique dont dépend chaque signal [Gerzon, 1974]. Pour une décomposition à l'ordre 1, tel que le format B le présente, les gains sont le sinus de l'angle d'incidence pour le gain à appliquer au signal dépendant de l'harmonique -1, le cosinus de l'angle d'incidence pour le gain à appliquer au signal dépendant de l'harmonique 1 et le gain à appliquer au signal dépendant de l'harmonique 0 est toujours égal à 1 (Figure 2).

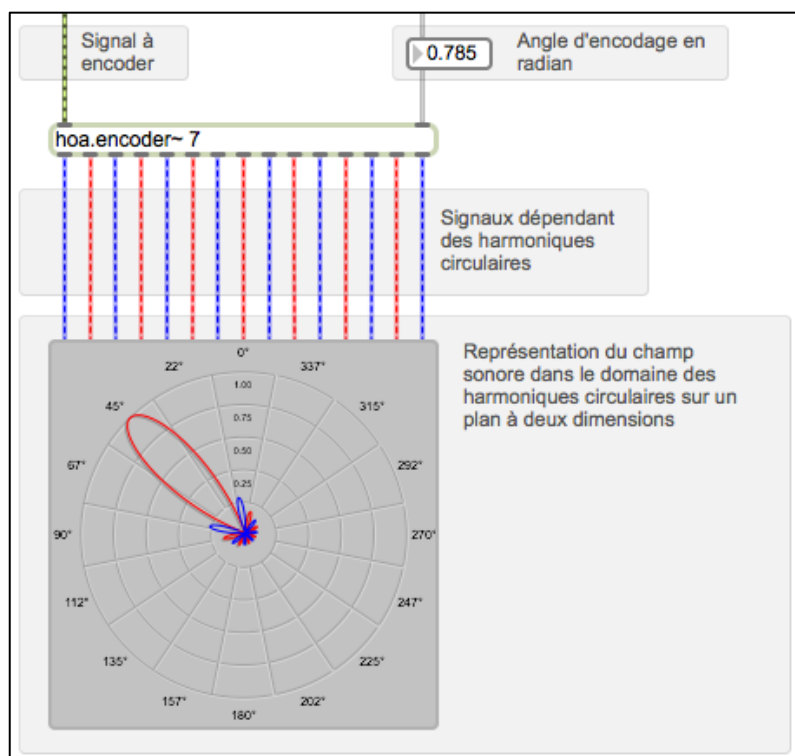


Figure 3 : Représentation de l'encodage dans le domaine des harmoniques circulaires d'une source sonore pour un ordre de décomposition 7 et un angle d'incidence d'environ $\pi / 4$.

L'ambisonie est développée sur un cadre mathématique permettant la représentation d'un champ sonore dans le domaine des harmoniques circulaires à des ordres de décomposition supérieurs. Avec un accroissement de l'ordre de décomposition, la qualité de restitution du champ sonore s'améliore nettement et certaines opérations de synthèse dans le domaine des harmoniques circulaires

prennent une toute autre ampleur¹². L'encodage ambisonique peut donc être généralisé à n'importe quel ordre de décomposition et est défini pour un espace bidimensionnel tel que

si $i \geq 0$,

$$H(i, \theta) = S \cos(n_i \theta)$$

sinon

$$H(i, \theta) = S \sin(n_i \theta)$$

avec

$$n_i \in [0, N]$$

où H est le signal dépendant d'une harmonique, i l'indice de l'harmonique, n_i l'ordre dont dépend l'harmonique d'indice i , N l'ordre de décomposition, θ l'angle d'incidence de la source sonore en radians et S le signal de la source.

L'encodage d'une source sonore dans le domaine des harmoniques circulaires est donc défini par un ordre de décomposition qui est fixe et par un angle d'incidence potentiellement variable tel que le propose l'objet *hoa.encoder*¹³ (Figure 3) - cette approche est bien évidemment étendue au domaine des harmoniques sphériques pour espace à trois dimensions en définissant l'ordre de décomposition, l'azimut et l'élévation de la source sonore [Gerzon, 1974]. Nous pouvons, dès lors, noter que le modèle ambisonique, défini tel quel, ne permet pas de simuler la distance de la source sonore. Il n'est possible en procédant à un encodage ambisonique « classique » de rapprocher ou d'éloigner la source de l'auditeur. Plusieurs propositions sont cependant proposées afin de remédier à cette lacune dans la littérature, notamment par Daniel¹⁴, ce point sera discuté par la suite. Il semble tout d'abord important, à présent, de revenir sur la notion d'ordre de décomposition liée à la résolution spatiale afin d'envisager une première opération musicale utilisant des « ordres fractionnaires » et permettant de jouer sur un « élargissement » de la source sonore.

¹² Nous revenons, par la suite, sur les modifications entraînées par un changement d'ordre de décomposition.

¹³ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

¹⁴ Le lecteur pourra se référer à [Daniel, 2006].

1.1.2 RESOLUTION SPATIALE ET ORDRES FRACTIONNAIRES

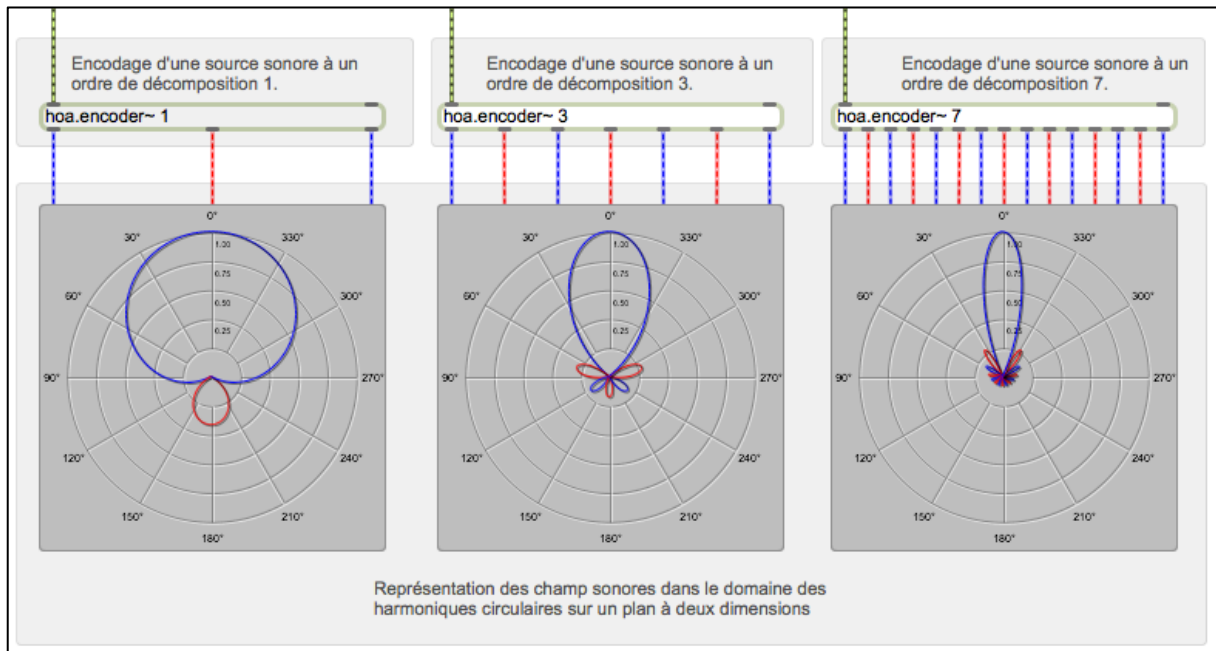


Figure 4 : Représentation de l'encodage d'une source sonore à des ordre de décomposition 1, 3 et 7. Les lobes des harmoniques sont représentatifs de la résolution angulaire de la source encodée pour chaque ordre de décomposition.

La résolution spatiale permet de définir la précision avec laquelle les images sonores sont restituées [Daniel, 2006]. Ainsi, si la résolution spatiale d'un champ sonore est faible, l'auditeur ne pourra avec précision définir la provenance des sources sonores ponctuelles qui composent le champ sonore. Elles seront, par exemple, plus ou moins devant, derrière, sur la gauche ou sur la droite. A l'opposé, si la résolution spatiale est importante, l'auditeur pourra plus facilement définir leurs provenances. Leurs angles d'incidence pourraient alors théoriquement être perçus au degré près. Cette propriété du champ sonore est bien sûr difficilement quantifiable sur le plan perceptif, elle dépend de l'auditeur, de son placement dans le cercle ambisonique et de l'acoustique de la salle dans laquelle le champ sonore est restitué. Cependant, la résolution spatiale n'en reste pas moins un élément des plus notables sur le plan auditif. La variation de cette propriété peut, en outre, devenir un paramètre musical (et comme nous le verrons par la suite, confondre l'auditeur afin de simuler le rapprochement d'une source sonore). L'un des atouts principaux de l'ambisonie est donc de pouvoir varier cette propriété et cela grâce à l'ordre de décomposition. En effet, plus l'ordre de décomposition augmente,

plus la résolution spatiale du champ sonore augmente et plus la résolution angulaire¹⁵ des sources augmente (Figure 4).

Nous venons de présenter l'encodage d'une source sonore dans le domaine des harmoniques circulaires. Celui-ci dépend d'un angle d'incidence et de l'ordre de décomposition. Cet ordre de décomposition, en tant que paramètre musical, amène à une opération musicale simple qui consiste à encoder des sources sonores à des ordres plus ou moins grands afin d'obtenir un champ sonore à la résolution spatiale hétérogène constitué de sources sonores aux résolutions angulaires différentes. Cette proposition reste néanmoins contraignante car l'ordre de décomposition d'une source sonore est un paramètre fixe de l'encodage ambisonique, qui ne peut varier dans le temps. Une première solution consiste à encoder à un ordre de décomposition maximal¹⁶ une source sonore et, par la suite, annuler les contributions supérieures à un ordre défini. En d'autre terme, ce processus peut être vu comme la virtualisation d'un encodage à un ordre inférieur à l'ordre maximal. Obtenir la résolution angulaire correspondant à l'encodage à un ordre virtuel « n » inférieur ou égal à l'ordre de décomposition maximal consiste à annuler, après l'encodage, les harmoniques appartenant à des ordres supérieurs ou égaux à l'ordre virtuel « n ». L'application en traitement du signal consiste simplement à appliquer un gain nul aux signaux dépendant de ces ordres. Prenons le cas d'un ordre de décomposition maximal 7, il est possible d'obtenir huit résolutions angulaires différentes pour une source sonore (les résolutions angulaires des encodages à des ordres de décomposition allant de 0 à 7). Afin d'obtenir une résolution angulaire équivalent à celle d'un ordre de décomposition 5 par exemple, il faut annuler les signaux dépendant des harmoniques d'indices 6, -6, 7 et -7.

Le processus que nous venons de présenter comporte deux inconvénients principaux. Le premier inconvénient est que l'auditeur perçoit un « saut » flagrant de la résolution angulaire lors des changements d'ordre d'encodage virtuel. Notons, de plus, que la résolution angulaire n'augmente pas de façon linéaire avec l'ordre de décomposition. L'ordre de décomposition 0 génère seulement l'harmonique zéro qui est omnidirectionnelle et l'ordre de décomposition 1 génère une résolution angulaire qui est sensiblement similaire à celle d'un microphone cardioïde. Ainsi, l'ordre de décomposition augmentant, la résolution angulaire augmente suivant une échelle se rapprochant de l'échelle logarithmique. En outre, passer de l'ordre de décomposition virtuel 1 à l'ordre de décomposition virtuel 0 génère une « chute » où la source sonore passe de directionnelle à

¹⁵ Nous utilisons le terme de « résolution angulaire » pour définir une source sonore ponctuelle alors que la résolution spatiale permet de définir un champ sonore. La résolution angulaire permet, de manière analogue, de définir la précision avec laquelle l'auditeur perçoit la direction d'une source.

¹⁶ L'ordre maximal est celui du décodage ambisonique.

omnidirectionnelle sans étapes intermédiaires. Le deuxième inconvénient réside dans un artefact dû au décodage ambisonique¹⁷. Les fondements mathématiques, sous-jacents à l'ambisonie, impliquent lors de la mise en œuvre de ce processus que si l'ordre de décomposition à l'encodage est différent de celui du décodage, le champ sonore perd en énergie et il en résulte une diminution de l'amplitude perçue du champ sonore. L'ordre de décomposition du décodage ne pouvant être défini qu'en amont de tous les processus mis en œuvre, il ne peut varier avec un ordre de décomposition virtuel d'une source. Et tant bien même, cela serait possible, il ne pourrait être adapté à plusieurs sources sonores qui posséderaient des ordres de décomposition virtuels différents. Notons qu'il serait toujours possible de réaliser plusieurs décodages mais cela serait une perte des atouts majeurs des techniques ambisoniques tels que la possibilité de restituer une multitude de sources pour une demande en calculs moindre ou encore de pouvoir enregistrer l'ensemble du champ sonore dans le domaine des harmoniques circulaires (dans un seul fichier audionumérique)¹⁸.

L'objectif de la mise en œuvre d'une variation de la résolution angulaire d'une source est donc de pouvoir simuler des résolutions angulaires intermédiaires à celles des ordres de décompositions et de prendre en compte les modulations d'amplitude du champ sonore liées à ces variations de résolution. En outre, cela consiste à simuler des ordres fractionnaires.

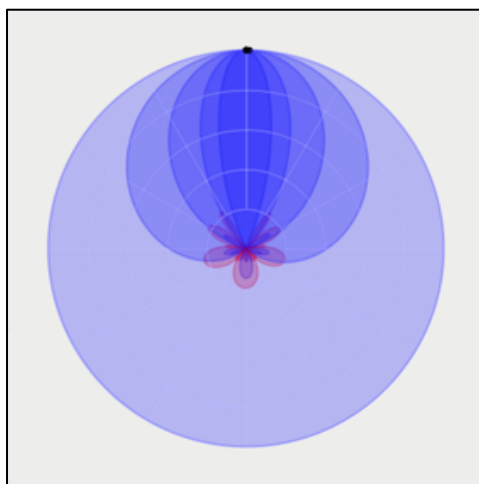


Figure 5 : Représentation sur un plan à deux dimensions de la résolution angulaire d'une source encodée à 0 degré pour un ordre de décomposition 7 avec des valeurs de résolution angulaire 1, 0.75, 0.5, 0.25 et 0 (du bleu foncé au bleu clair).

¹⁷ Nous revenons sur le processus de décodage ambisonique dans le chapitre traitant des optimisations.

¹⁸ L'un des atouts majeurs de l'ambisonie consiste à pouvoir représenter un champ sonore complexe et varié avec une seule représentation du champ sonore dans le domaine des harmoniques circulaires. Plusieurs décodages ambisoniques impliquent plusieurs représentations du champ sonores.

En modulant plus subtilement les contributions des signaux dépendant des harmoniques circulaires, il est alors possible d'espérer un décroissement ou un accroissement linéaire de la résolution angulaire. Nous souhaitons ainsi offrir la possibilité au musicien de passer d'une source très directive (directivité relative à l'ordre de décomposition) à une source omnidirectionnelle. Nous avons fait le choix de définir une valeur de résolution angulaire comprise entre 0 et 1, afin que ce paramètre musical puisse s'adapter à tous les ordres de décomposition. Ainsi, si la valeur de résolution angulaire est 1, toutes les contributions des signaux dépendant de l'ordre sont gardées intactes et la résolution angulaire de la source est la plus fine possible. Réciproquement si la valeur de la résolution angulaire est 0, seule la contribution du signal dépendant de l'ordre 0 est gardée et la source devient omnidirectionnelle (Figure 5).

La notion d'ordre fractionnaire n'est pas nouvelle, elle est déjà présentée dans des mises en œuvre de l'ambisonie. Nous pouvons, en autres, citer l'objet *ambipan~*¹⁹ développé en 2003 au CICM par Mignot et Courribet qui utilise implicitement les ordres fractionnaires afin de simuler le rapprochement d'une source sonore, utilisation sur laquelle nous reviendrons par la suite. De même, Neukom [Neukom, 2007], [Neukom et al, 2008] présente une utilisation hybride de l'ambisonie combiné à du *panning* d'amplitude utilisant des ordres fractionnaires de manière explicite ; cette mise en œuvre se retrouve au sein de la bibliothèque ambisonique de l'ICST via l'objet *ambipanning~*²⁰. Enfin, en 2012, Morell et Reiss présente l'ordre de fractionnaire comme un outil musical permettant de jouer sur la résolution angulaire d'une source sonore [Morell et al, 2012].

Ces propositions ne semblent pourtant pas répondre aux contraintes qu'impose notre approche de l'ambisonie. En effet, l'aspect modulaire de la bibliothèque est contraire à des systèmes où l'encodage et le décodage se retrouvent confondus. De plus, l'*ambipan~* est limité à un ordre de décomposition 1 et l'*ambipanning~* à un ordre de décomposition 3. Cette seconde approche néglige aussi la compensation du champ sonore : « *For fractional order the sum of the speaker signals does not exactly equal one but the deviation is very small, so that it is possible to change the exponent continuously without perceivable inaccuracies.* » [Neukom, 2007], or dans notre approche de l'ambisonie, cet artefact nous semble extrêmement gênant. En harmonie avec notre conception de l'ambisonie « pour et par le musicien », notre perception et notre expérience musicale ont été utilisées

¹⁹ L'objet est disponible sur le site : <http://cicm.mshparisnord.org/>.

²⁰ L'objet est disponible sur le site : <http://www.icst.net/>, le lecteur peut se référer aux articles de cette bibliothèque [Schacher et al, 2006] et [Schacher, 2010].

pour établir les fondements de notre approche dont la mise en œuvre est l'objet *hoa.wider*²¹. Nos observations ont permis de mettre en valeur le fait que, plus l'ordre augmente, moins l'accroissement de la résolution angulaire augmente de manière significative. Ainsi passer d'un ordre 7 à un ordre 8 n'augmentera que très peu la résolution angulaire comparé à une transition entre l'ordre 1 et 2. Il nous a donc semblé préférable d'appliquer une pondération des contributions en basant la valeur de résolution angulaire sur une échelle logarithmique, comme nous l'avons suggéré précédemment. C'est à dire que pour un ordre de décomposition maximal 7, si la valeur de résolution angulaire est à 0.5, l'ordre de décomposition simulé n'est qu'environ 2 (Figure 5).

Cette relation entre l'ordre de décomposition maximal et la valeur d'ouverture doit aussi prendre en compte la diminution perceptive de l'amplitude générale du champ sonore basée, de même, sur une échelle logarithmique et peut être définie par

$$H'(i, x) = (H(i) \times (1 - x)) \times ((\ln(N + 1) + 1) \times W(i, x))$$

avec pour $i \neq 0$

$$W(i, x) = (x \times \ln(N + 1)) - (\ln(n_i) \times \frac{1}{\ln(n_i + 1) - \ln(n_i)})$$

sinon

$$W(i, x) = 1$$

avec

$$x \in [0, 1]$$

où H' est le signal résultant dépendant d'une harmonique et d'une valeur d'ouverture, H le signal initial dépendant d'une harmonique, i l'indice de l'harmonique, n_i l'ordre dont dépend l'harmonique d'indice i , N l'ordre de décomposition et x la valeur d'ouverture.

²¹ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

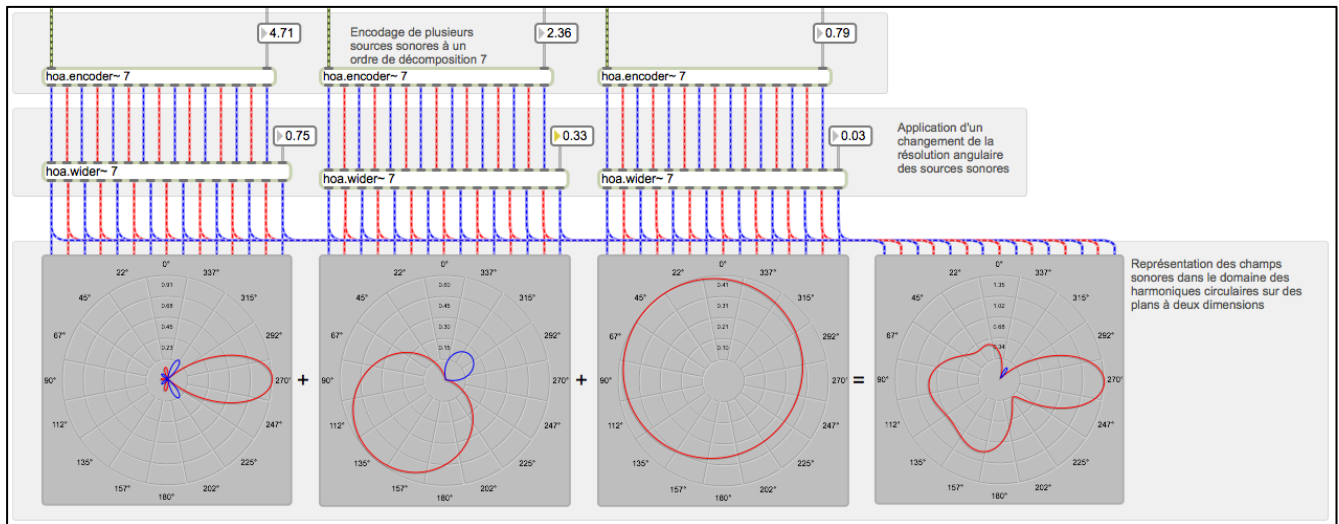


Figure 6 : Représentation de la création d'un champ sonore constitué de trois sources sonores encodées pour un ordre de décomposition 7 dont les résolutions angulaires sont variables.

L'approche présentée des ordres fractionnaires n'est en aucun cas fondée sur un « réalisme » acoustique mais possède selon nous un fort potentiel musical. Le musicien peut ainsi « élargir » la source sonore et donner l'impression que l'auditeur se retrouve au centre de la source sonore ou constituer des champs sonores complexes où chaque source sonore possède une résolution angulaire propre (Figure 6). Notons que ce traitement peut, bien sûr, être appliqué à l'ensemble d'un champ sonore composé de plusieurs sources sonores, mais dans ce cas, toutes les sources sonores posséderont la même résolution angulaire. Remarquons, dès à présent, que ce genre d'approche est pertinent pour des sources sonores ponctuelles mais peut devenir déroutant ou ne pas offrir le rendu sonore désiré lorsqu'il est appliqué à un champ diffus car l'annulation des signaux dépendant des harmoniques peut générer des artefacts²². Enfin, grâce à cet outil et en se réappropriant les approches combinant l'ambisonie et les techniques de *panning*, nous pouvons envisager un outil simple et efficace permettant de simuler un éloignement ou un rapprochement de la source sonore.

²² Nous reviendrons précisément sur ce cas dans la partie réservée à la synthèse de champs diffus.

1.1.3 LA COMPENSATION DE LA DISTANCE

Comme nous l'avons précédemment évoqué, en ambisonie, la source sonore ponctuelle se situe sur le cercle enveloppant l'auditeur, défini par les haut-parleurs ; elle sera alors toujours perçue à une distance équivalente au rayon du cercle et les seuls mouvements possibles de cette source sont limités à la circonférence de ce cercle. Cependant plusieurs procédés permettent de simuler certaines caractéristiques acoustiques liées à la perception de la distance comme la diminution de l'amplitude lors de l'éloignement de la source, ou encore l'effet Doppler lors de mouvements rapides de la source [Roads, 1996]. Nous étudions à présent certaines de ces méthodes.

Daniel propose un nouveau format ambisonique NFC (Near Field Compensation) permettant de simuler une source à l'intérieur et l'extérieur de la sphère (ou du cercle) ambisonique [Daniel, 2006]. Cette approche permet de recréer le front d'onde²³ d'une source sonore, plus ou moins éloignée au niveau de l'auditeur en se basant sur le principe que les formats ambisoniques d'alors ne sont pas viables pour la compensation de la distance notamment en raison d'un artefact dans les basses fréquences²⁴ auquel il propose de remédier. Les principaux changements de cette approche résident dans une série de filtres sonores en fonction de la distance de la source et de l'ordre de décomposition. Bien que valide sur un plan acoustique, ce format ambisonique ne semble pas approprié pour des applications musicales. D'une part, les contributions apportées par celui-ci ne semblent pas suffire pour simuler, à elles seules, la distance de la source par rapport à l'auditeur. Elles ne semblent en réalité pertinentes que parmi un ensemble de traitements complémentaires comme la simulation de la réverbération d'une salle. D'autre part, les processus de filtres mis en jeu nécessitent une demande en calculs non négligeable qui devient rédhibitoire pour un musicien souhaitant utiliser un grand nombre de sources sonores. Enfin, cette caractéristique du processus s'accroît avec l'augmentation de l'ordre de décomposition. Ainsi, et pour le moment, nous avons fait le choix, dans la bibliothèque HOA de ne pas offrir aux musiciens une mise en œuvre utilisant les procédés présentés par Daniel au profit d'une approche plus « simple », et ayant fait ses preuves, basée principalement sur une variation de l'amplitude et de la résolution angulaire de la source sonore.

²³ Nous expliquons brièvement le front d'onde dans le chapitre réservé à la décomposition en ondes planes.

²⁴ Nous revenons sur cet artefact dans le chapitre dédié aux optimisations.

Cette approche proposée par la bibliothèque HOA via l'objet *hoa.map~*²⁵ est donc basée sur une approche relativement similaire à celle adoptée au travers l'objet *ambipan~*. Cet objet prend en réalité énormément de liberté avec les modèles acoustiques mais a été validé par de nombreux musiciens et compositeurs pour sa pertinence musicale²⁶. Il existe malheureusement un manque de littérature sur l'approche utilisée lors de la mise en œuvre de cet objet. Cependant par l'analyse des codes sources et les observations auditives que nous avons pu réaliser, nous avons été capables de définir les points essentiels à reproduire afin d'obtenir un rendu sonore similaire. Le principe est simple, l'éloignement de la source sonore par rapport au cercle a pour incidence de diminuer l'amplitude de la source afin de reproduire la perte d'énergie de l'onde sonore lors de son trajet jusqu'à l'auditeur. Afin de réduire la demande en calculs de ce traitement, il nous a semblé raisonnable de l'effectuer sur le signal de la source sonore avant encodage en appliquant un gain g calculé à partir de la distance d tel que

$$g = \frac{1}{d^2}$$

La distance est relative au rayon du cercle qui est arbitrairement défini à 1. Le choix de ne définir aucune unité pour la distance permet au musicien une plus grande flexibilité dans l'utilisation du traitement. L'éloignement de la source sonore résidant essentiellement sur l'écoute, celui-ci se trouve plus libre de se projeter dans n'importe quel espace de son choix. Notons encore que la distance étant limitée à l'extérieur du cercle, le gain vaut 1 (son maximum) lorsque la source est dans le cercle de haut-parleurs et il décroît lorsque la source s'éloigne du cercle. La deuxième opération mise en œuvre est une variation la résolution angulaire de la source lorsque celle-ci se trouve à l'intérieur du cercle de haut-parleur. La valeur de résolution angulaire, comme nous l'avons définie précédemment, est dans le cas présent, égale à la distance. Seulement, pour cette opération, la distance est limitée à l'intérieur du cercle de haut-parleurs. Ainsi lorsque la source sonore se trouve sur la périphérie du cercle ou à l'extérieur du cercle, elle possède la directivité la plus importante permise par l'ordre de décomposition. Lorsque la source sonore est dans le cercle et se rapproche du centre, sa directivité diminue jusqu'à obtenir une source omnidirectionnelle lorsque la source se situe au centre exact du cercle.

²⁵ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

²⁶ L'objet *ambipan~* a, en outre, été l'un des principaux outils de spatialisation utilisés pour les pièces mixtes de l'atelier de composition de José Manuel Lopez Lopez ces dernières années.

Une source sonore éloignée se traduit par une diminution de l'amplitude de la source sonore. Lorsqu'elle rentre dans le cercle ambisonique son amplitude est à son maximum. La résolution angulaire de la source sonore diminue cependant progressivement au fur et à mesure que celle-ci se rapproche du centre jusqu'à obtenir une source sonore omnidirectionnelle lorsque la source est au centre (Figure 7).

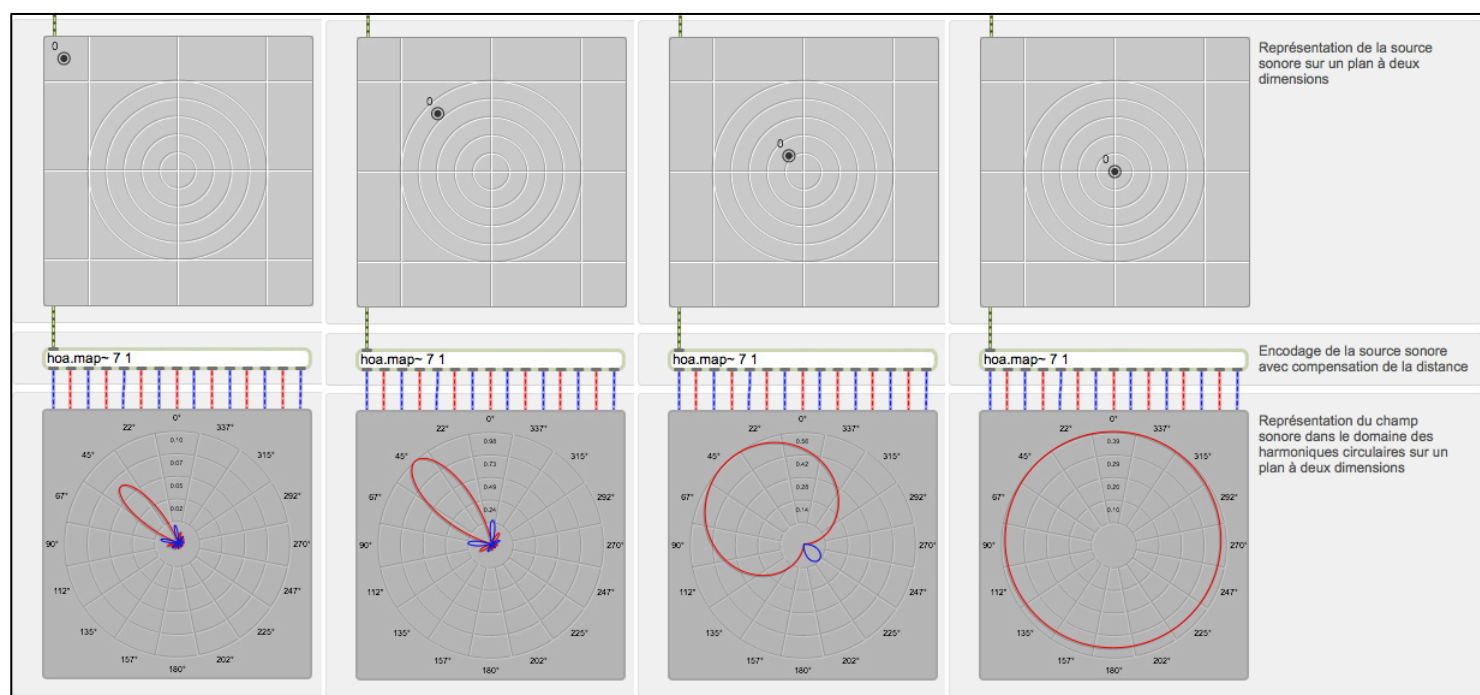


Figure 7 : Représentation du processus d'encodage avec la compensation de la distance d'une source sonore se rapprochant du centre du cercle (de gauche à droite)

Nous pouvons noter certains avantages de la mise en œuvre de ce processus au sein de la bibliothèque HOA par rapport à l'objet *ambipan~*. Rappelons, dans un premier temps, que celui-ci lie l'encodage et le décodage de la source sonore au sein d'un même processus. Via une approche modulaire, il est possible de tirer un avantage certain lors de l'encodage de plusieurs sources sonores car un seul décodage est nécessaire. De plus, une optimisation *inPhase* semble être appliquée à la source dans l'objet *ambipan~*. Notre approche modulaire permet de choisir le type d'optimisation que l'on souhaite appliquer aux sources sonores et d'appliquer différentes optimisations sur différentes « parties » du champ sonore (si notre champ sonore est une fusion d'un champ diffus et d'un champ sonore composé de sources ponctuelles par exemple)²⁷.

²⁷ Nous reviendrons par la suite sur les optimisations, comment et pourquoi les utiliser et quels sont leurs avantages et leurs inconvénients dans le chapitre est consacré ce sujet.

Pour la création de mouvements de sources sonores dans l'espace, cette approche semble donc suffisante bien qu'il soit possible de la compléter par d'autres traitements comme l'effet Doppler [Roads, 1996]. Il est possible encore de critiquer cette approche dès lors que les sources sonores deviennent statiques. En effet, la perception de la distance ne se fait qu'en rapport avec la position antérieure de la source sonore. Prenons le cas de la mise en espace d'un bruit blanc par ce procédé. Sans mouvement, il est impossible à l'auditeur de définir si le volume sonore de la source est originel à la source ou s'il est dû à un éloignement. De même, ne pouvant se référer à aucune autre impression auditive, la faculté d'enveloppement de la source peut tout aussi bien être perçue comme une lacune du système de restitution vis à vis de la résolution spatiale, ou comme un geste musical du compositeur lié à la résolution angulaire de la source mais indépendant de toute volonté de simulation de distance. Cela est accru par le fait qu'il n'existe, dans la réalité, aucune situation où un son devient omnidirectionnel lorsqu'il se rapproche d'un auditeur (en effet, lorsque la source est omnidirectionnelle, l'auditeur a l'impression d'être au « cœur » de la source sonore. Or, jamais dans la réalité, nous pouvons nous trouver au « cœur » d'un son). Une première solution qui sera, nous le souhaitons, mise en œuvre dans une prochaine version de la bibliothèque HOA, consiste à appliquer un filtrage passe-bas afin de recréer l'absorption de l'air [Smith, 2007a]. Cette solution ne fonctionne sans doute que pour des sons « reconnaissables » où l'auditeur peut se rendre compte que la morphologie sonore qu'il écoute découle bien d'un traitement relatif à la distance. Les caractéristiques dues au filtrage d'un son de synthèse « inexistant dans le monde réel » ne pourraient pas être reconnues comme telles, cependant ce processus consoliderait sûrement l'impression de mouvement. Une deuxième solution, bien plus efficace mais qui réside, en même temps, d'un choix compositionnel est d'appliquer de la réverbération au champ sonore et de jouer sur le ratio entre son « sec » et réverbération²⁸.

Cette première approche de la synthèse sonore dans le domaine des harmoniques circulaires nous a permis de nous approprier certains principes fondamentaux de l'ambisonie tout en offrant aux musiciens des opérations sonores et spatiales qui, bien que relativement « classiques », sont pertinentes sur un plan musical. Nous pouvons, à présent, envisager de détourner de manière plus radicale les techniques ambisoniques afin de découvrir d'autres techniques de synthèses comme la synthèse de champ diffus.

²⁸ Nous revenons par la suite sur la réverbération dans le domaine des harmoniques circulaires dans le chapitre qui lui est consacré.

1.2 LE CHAMP DIFFUS

En 2006, Wakefield suggère que l'accès aux signaux dépendant des harmoniques sphériques amène aujourd'hui de nouvelles expérimentations musicales : « [...] *access to the Ambisonic domain signals within a flexible DSP environment invites experimentation with new manipulations of the sound field, and the possibility of directly synthesizing the directional difference signals (rather than or in addition to encoding virtual sources)*. » [Wakefield, 2006]. Il soumet l'hypothèse qu'en assignant, à chaque signal dépendant d'une harmonique, un module de synthèse par modulation de fréquence, nous devrions obtenir des champs sonores nouveaux et complexes encore jamais entendus. Il suppose alors que la synthèse sonore peut être envisagée comme étant une manière de générer à la fois des morphologies sonores et des morphologies spatiales. Il explore notamment les possibilités offertes par l'application de filtrages appliqués aux signaux dépendant des harmoniques sphériques grâce auxquels il a pu obtenir des images spatiales chaotiques et complexes possédant un fort potentiel musical. Colafrancesco reprend l'approche proposée par Wakefield dans un système ambisonique à deux dimensions [Colafrancesco, 2012] et décide d'approfondir les possibilités offertes par ce genre de procédé en soumettant notamment l'hypothèse d'utiliser la synthèse granulaire. Cette approche devient alors un des axes centraux de la bibliothèque HOA, il convient de définir plus clairement les bases de cette approche avant d'en explorer les possibilités.

1.2.1 DE L'ACOUSTIQUE AU TRAITEMENT

Wakefield nous signale que synthétiser directement les signaux dépendants des harmoniques circulaires génère un champ sonore chaotique où le son semble arriver de toutes les directions. Colafrancesco établit, par la suite, la liaison qui s'effectue, entre l'approche musicale établie par Wakefield et la proposition de Daniel, de création de champs diffus dans le cadre d'une approche d'acousticiens. Il établit donc la notion de champ diffus tel qu'il est envisagé sur un plan acoustique : « 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. » [Colafrancesco, 2012]. Par la suite, il rappelle que Daniel propose d'utiliser des signaux décorrélés dans l'entrée d'un décodeur ambisonique pour générer un champ diffus afin de simuler des

réverbérations tardives [Daniel, 2003]. Cette approche envisagée de façon indépendante à son application acoustique, rappelle fortement celle proposée par Wakefield pour synthétiser des champs sonores chaotiques. Dans l'approche acoustique et dans l'approche musicale, les caractéristiques morphologiques principales souhaitées des champs sonores sont les mêmes, et les mises en œuvre sont basées sur les mêmes principes. Ce que Wakefield propose en 2006 est donc en réalité la synthèse de champ diffus vu par un musicien. L'enjeu est alors d'explorer les champs diffus sur un plan musical.

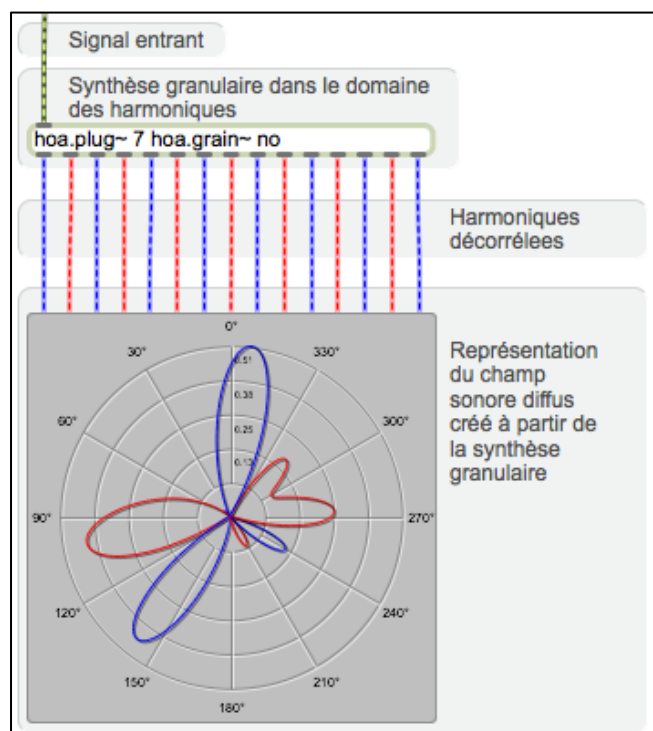


Figure 8 : Représentation du processus de synthèse granulaire dans le domaine des harmoniques circulaires pour un ordre de décomposition 7.

Dans la bibliothèque HOA, nous souhaitons offrir aux musiciens la possibilité de mettre en œuvre toutes sortes de traitements dans le domaine des harmoniques circulaires. Par son aspect modulaire le logiciel Max/MSP offre la possibilité d'imbriquer des modules de synthèse directement dans le domaine des harmoniques circulaires. Nous avons, cependant, noté une lacune vis à vis de la mise en place de traitements parallèles restreignant le musicien dans ses expérimentations musicales de synthèse de champ diffus. En effet, et comme nous le verrons par la suite, la synthèse de champ diffus prend toute son ampleur à des ordres de décomposition élevés. Or, il s'agit pour le musicien de créer autant de modules de synthèse qu'il y a d'harmoniques circulaires. Cette opération est déjà en soi laborieuse et peu rebuter voir freiner des musiciens-programmeurs confirmés ; il faut rajouter à cela que, pour avoir des signaux décorrés, il faut que les paramètres de chaque module de synthèse soient

différents, le nombre de paramètres à gérer par l'utilisateur devient alors rapidement trop important pour pouvoir envisager de manière claire les opérations à réaliser.

Afin de remédier à ces inconvénients, nous proposons un objet *hoa.plug~*²⁹ (Figure 8) permettant de charger des patches, de les dupliquer autant de fois qu'il y a d'harmoniques circulaires et offrant une gestion globale des paramètres qui peuvent s'adapter en fonction de l'ordre de décomposition et de l'indice de l'harmonique à laquelle correspond chaque instance du patch chargé. Nous avons déjà, brièvement, présenté cet outil dans le cadre des JIM³⁰ [Colafrancesco et al, 2013]. Nous revenons, à présent, sur un exemple concret de création d'un champ sonore diffus via l'utilisation de la synthèse granulaire, comme Colafrancesco le proposait en 2012, afin de mieux comprendre son fonctionnement. Pour cela, nous présentons dans un premier temps le module de synthèse pour, par la suite, expliquer notre stratégie d'adaptation de cette synthèse au domaine des harmoniques circulaires. Nous pourrions ainsi faire une critique du rendu sonore, mettre en lumière les contraintes auxquels nous avons dû faire face, soumettre de nouvelles propositions de synthèse et envisager de nouvelles expérimentations, mises en œuvre et stratégies d'adaptation au domaine des harmoniques circulaires.

1.2.2 LA SYNTHÈSE GRANULAIRE

Sous l'influence du prix Nobel de physique Denis Gabor, apparaît dans l'univers musical des années 70, une nouvelle manière de concevoir et générer le son sous forme de particules ou grains. La synthèse granulaire, qui découle de cette conception du son s'est fortement répandue dans la musique dite de « recherche » allant jusqu'à définir en quelque sorte une esthétique musicale dont les représentants les plus emblématiques sont Barry Truax et Curtis Roads. Grâce notamment aux écrits de ce dernier [Roads, 2001], la synthèse granulaire fait aujourd'hui partie des outils de base du compositeur. Il existe de multiples manières d'envisager la synthèse granulaire et toutes peuvent, dans l'absolu, être mises en œuvre dans le domaine des harmoniques circulaires. Afin de répondre aux contraintes imposées par le temps-réel, notre démarche s'est portée de manière naturelle vers la synthèse granulaire quasi-synchrone (QSGS) comme définie par Curtis Roads, [Roads, 1996],[Roads, 2001]. La QSGS génère des grains à intervalles irréguliers en utilisant les lignes à retard avec

²⁹ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

³⁰ Journées d'informatique musicales.

réinjection et une enveloppe d'amplitude (Figure 9). Une telle approche offre les avantages d'être peu coûteuse en ressources et de ne générer aucune latence.

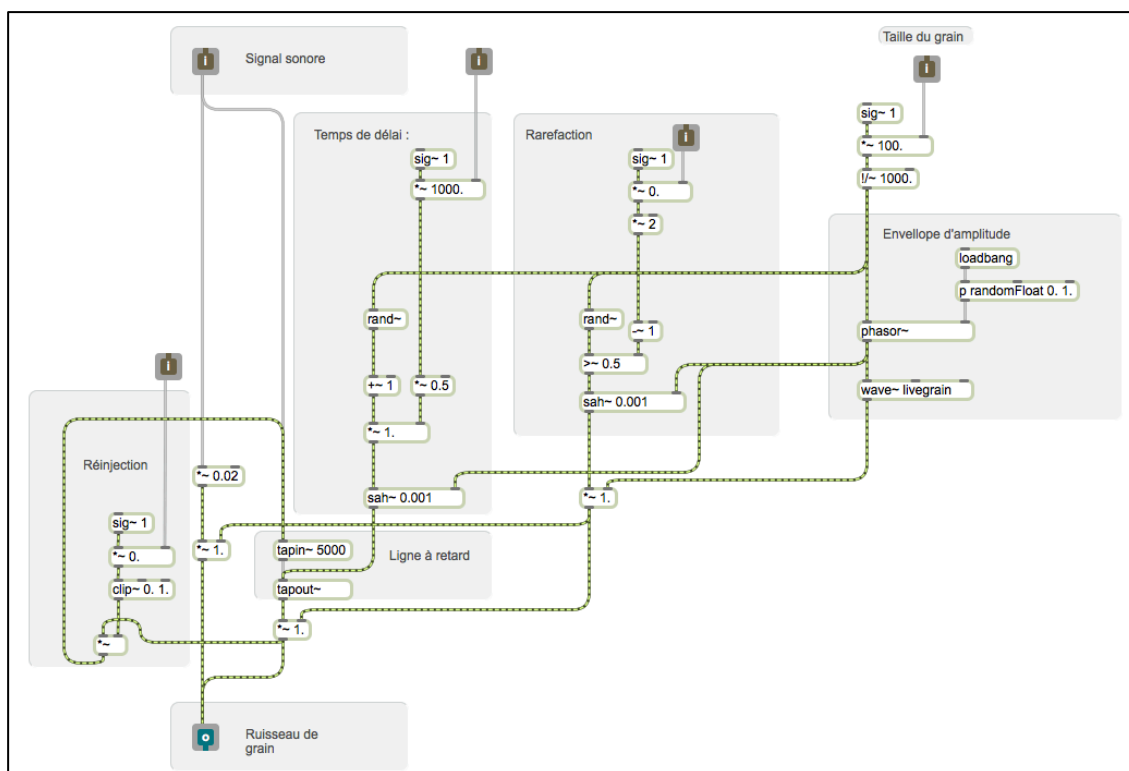


Figure 9 : Abstraction Max/MSP générant des « ruisseaux » de grains sonores par synthèse granulaire quasi-synchrone

La mise en œuvre de cette technique de granulation peut donner lieu à de nombreux paramètres de contrôle, cependant, afin d'offrir à l'utilisateur un outil simple à prendre en main, nos modules de synthèse restreignent ces paramètres au nombre de quatre : la taille moyenne des grains en millisecondes, le temps de délai en millisecondes, le pourcentage de réinjection des grains et le pourcentage de raréfaction des grains³¹. Ces différents paramètres sont variables en temps-réel sans artefacts sonores et permettent d'obtenir de nombreuses variations liées à la « masse » sonore et au timbre. Hors du domaine ambisonique, nous utilisons généralement ce type de synthèse granulaire en parallélisant le processus afin d'obtenir plusieurs « ruisseaux » de grains, donc une masse plus importante et ainsi plus de flexibilité quant aux contrôles. Les paramètres de chaque granulateur sont définis de manière stochastique à partir des quatre paramètres que nous venons de citer. En opérant de la sorte, notre module de synthèse granulaire devient plus facilement utilisable dans un contexte

³¹ Le lecteur pourra se référer au fichier patch *hoa.grain~* et *hoa.granular~* dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

musical en temps-réel. Enfin, un paramètre essentiel est la fonction générant l'enveloppe d'amplitude. Celle-ci peut, théoriquement, prendre n'importe quelle forme, les usages favorisent des fonctions de type gaussienne, sinus, et sinus cardinal offrant des rendus sonores « lisses », comme le propose Roads [Roads, 2001]. Il n'est cependant pas prohibé d'utiliser toutes sortes de fonctions dont les variations possibles sont autant de possibilités de rendu sonore. Il nous faut néanmoins noter que modifier ce paramètre en temps-réel engendre dans la mise en œuvre actuelle du granulateur des artefacts³².

1.2.3 ADAPTATION AUX HARMONIQUES CIRCULAIRES

Un champ sonore dans le domaine ambisonique est représenté par un ensemble de signaux dépendant des harmoniques circulaires. La corrélation entre cette représentation et la parallélisation des processus de synthèse granulaire dans le système que nous venons de présenter, amène à assigner à chacun de ces signaux un seul module de synthèse granulaire. Ainsi, chaque signal dépendant d'une harmonique circulaire génère un ruisseau de grains possédant alors les caractéristiques spatiales propres à l'harmonique dont il dépend. Cette première caractéristique de l'adaptation du module de synthèse dans le domaine des harmoniques circulaires amène déjà une contrainte liée à l'ordre de décomposition. En effet, la masse sonore dépend, dans cette mise en œuvre, du nombre d'harmoniques circulaires et donc de l'ordre de décomposition. Ainsi, un ordre de décomposition « faible » ne présentera que peu de modules de synthèse (à un ordre de décomposition 1, il n'y a que trois harmoniques donc trois modules de synthèse granulaire) et n'offrira qu'un champ sonore de « faible masse ». En dehors de toute considération spatiale, il faut donc prendre en considération ce type d'artefact dans la mise œuvre d'un processus de synthèse de champ diffus (nous reviendrons aussi, par la suite, sur les inconvénients générés par un changement d'ordre de décomposition).

Il semble intéressant dans une telle approche, de pouvoir définir à chaque granulateur une morphologie sonore qui sera alors corrélée aux caractéristiques spatiales de l'harmonique circulaire dont dépend le granulateur. Une variation globale et identique des paramètres de tous les modules de synthèse granulaire - ou une variation complètement aléatoire de ces paramètres - offre déjà des champs sonores complexes et potentiellement intéressant sur un plan musical. Ceci est dû au caractère stochastique³³ de notre module de synthèse (bien que chaque instance chargée de ce module soit identique et possède les mêmes valeurs de paramètres, les signaux générés sont, quoiqu'il arrive,

³² Clicks sonores.

³³ Un caractère aléatoire « contrôlé » de manière probabiliste par les paramètres de l'utilisateur.

toujours décorrélés). Cependant, l'analyse de tels procédés ne permet pas de mettre en valeur les contributions de la synthèse en fonction des caractéristiques spatiales des harmoniques circulaires. L'enjeu est alors de pouvoir contrôler indépendamment les paramètres de chaque granulateur et de définir un caractère sonore à chaque « ruisseau » de grain (en se référant à la taille des grains ou à la durée d'un ruisseau de grains). Il est nécessaire, en somme, que ces paramètres s'adaptent aux modules de synthèses granulaires en fonction des ordres et des indices afin de pouvoir définir clairement la relation entre les caractéristiques spatiales des harmoniques circulaires et la morphologie générale du champ sonore. Cette approche possède aussi l'avantage de réduire grandement le nombre de paramètres en n'offrant pas plus de paramètres à l'utilisateur qu'il n'en existe dans un seul module, facilitant ainsi l'utilisation de tels procédés de synthèse pour les musiciens et compositeurs souhaitant une interaction temps-réel.

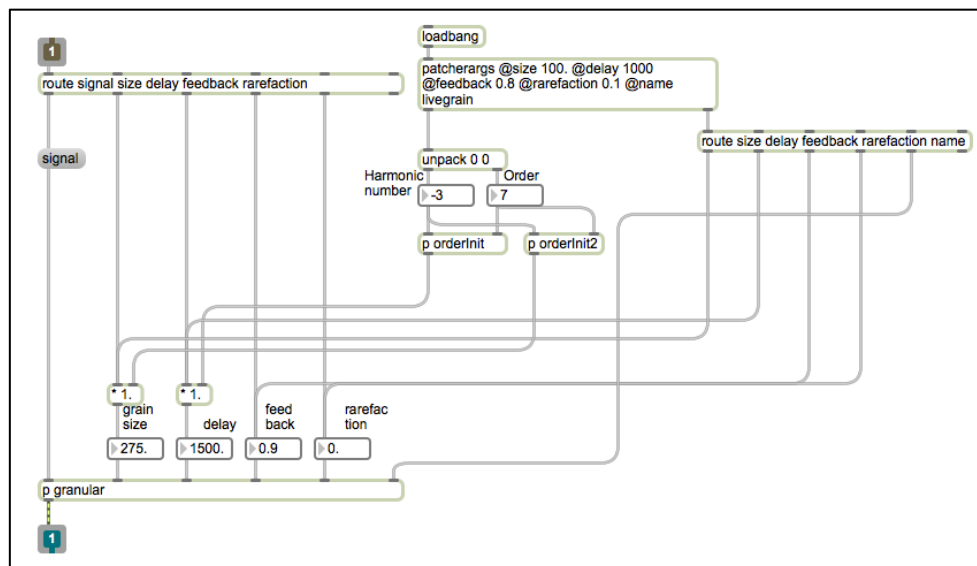


Figure 10 : Représentation de l'instance de module de synthèse granulaire *hoa.granular~* dépendant de l'harmonique d'indice -3 où l'ordre de décomposition est 7 et les valeurs des paramètres de taille de grain et de délai sont initialisés en fonction des indices des harmoniques et de l'ordre de décomposition.

Pour clarifier cette approche, nous revenons sur la mise en œuvre dans le domaine des harmoniques circulaires du module de synthèse granulaire *hoa.granular~*. Ce module se présente sous forme de patch et est chargé via l'objet *hoa.plug~*. Il convient, alors, de rappeler une des fonctionnalités principales de l'objet *hoa.plug~* qui consiste à envoyer à chaque module l'ordre de décomposition et l'indice de l'harmonique auquel il se réfère via l'objet *patcherargs* (Figure 10).

Dans le patch *hoa.granular*, le cœur du module de synthèse a été encapsulé dans le sous-patch *granular* afin de ne laisser visible que les informations relatives à la gestion des paramètres. Nous avons arbitrairement défini que les formes d'ondes générant l'enveloppe d'amplitude, la raréfaction et la réinjection restent globales à toutes les harmoniques. Ainsi, nous ne faisons varier que les tailles des grains et les temps des délais en fonction des indices des harmoniques et de l'ordre de décomposition. Dans cette mise en œuvre, les temps des délais augmentent de manière linéaire en fonction de l'ordre auquel appartiennent les harmoniques de sorte que pour chaque instance relative à une harmonique :

$$d(i) = dMax \times \frac{n_i + 1}{N + 1}$$

où d est le temps de délai (en ms) d'un module dépendant d'une harmonique, i l'indice de l'harmonique, n_i l'ordre dont dépend l'harmonique d'indice i , N l'ordre de décomposition et $dMax$ le temps de délai (en ms) défini par l'utilisateur.

La taille des grains est, elle aussi, mise sur une échelle dépendant des indices des harmoniques. Elle décroît de manière linéaire alors que l'ordre des harmoniques augmente et, au sein d'un même ordre, l'harmonique négative engendre une taille de grain plus grande que l'harmonique positive de sorte que pour chaque instance relative à une harmonique

si $i \geq 0$

$$s(i) = sMax \times (1 - \frac{n_i}{N + 1})$$

sinon

$$s(i) = sMax \times (1 - \frac{n_i - 0.5}{N + 1})$$

où s est la taille des grain (en ms) d'un module dépendant d'une harmonique, i l'indice de l'harmonique, n_i l'ordre dont dépend l'harmonique d'indice i , N l'ordre de décomposition et $sMax$ la taille maximale des grains (en ms) définie par l'utilisateur.

En exemple, dans le tableau 1, nous présentons les résultats de ces calculs pour un ordre de décomposition de 3, une valeur maximale de taille de grain de 100 ms et un temps de délai maximum de 1000 ms.

Indice de l'harmonique	0	-1	1	-2	2	-3	3
Taille des grains (ms)	100	87.5	75	62.5	50	37.5	25
Délai des grains (ms)	250	500	500	750	750	1000	1000

Tableau 1 : Valeurs des tailles de grains et des temps de délai des grains pour chaque module de granulation dépendant d'une harmonique circulaire et pour un ordre de décomposition 3 et avec 100 ms de taille de grain maximum et 1000 ms de temps de délai maximum

Nous pouvons, grâce à ce processus, espérer mettre en valeur une partie des relations complexes qui s'opèrent entre le champ sonore diffus et les caractéristiques spatiales de chaque harmonique circulaire. Nous devrions, selon toute vraisemblance, obtenir de « gros grains » (en l'occurrence de 100 ms) omnidirectionnels et une profusion de petits grains qui perdurent plus longtemps et qui proviennent de toutes les directions. Rappelons, néanmoins, que la mise en échelle des valeurs des paramètres n'est qu'une suggestion et a été réalisée au regard de nos expériences et de nos choix esthétiques. Le musicien peut appliquer toutes sortes de « *mapping* » qui prendraient une signification particulière (ou pas d'ailleurs) dans son approche musicale comme par exemple, inverser le processus afin d'obtenir de gros grains dans les modules des harmoniques d'indices élevés. La proposition faite dans le cas présent est, en somme, principalement didactique.

1.2.4 CHAMPS DIFFUS ET HARMONIQUES

L'aspect essentiel de cette adaptation au domaine des harmoniques circulaires réside dans la génération de « couches » spatiales dépendant des harmoniques circulaires possédant des morphologies sonores qui leurs sont propres à savoir des tailles de grains plus ou moins grandes et une survivance du son plus ou moins importante. La Figure 11 présente les caractéristiques spatiales associées à certaines harmoniques circulaires, celles-ci sont à associer directement aux morphologies sonores que nous avons créées via les paramètres attribués (la mise en œuvre a été effectuée pour un

ordre de décomposition 7, le tableau 1 ne peut donc être appliqué pour elle mais le lecteur peut appliquer les mêmes principes).

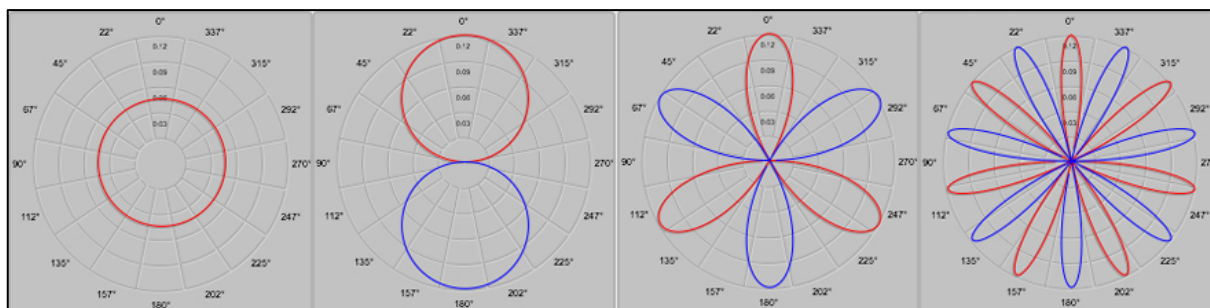


Figure 11 : Représentation spatiale des harmoniques circulaires d'indice 0, 1, 3 et 7 (de gauche à droite).

Dans l'exemple que nous venons de mettre en œuvre, nous pouvons assez facilement « discerner » l'harmonique 0 via les grains de tailles relativement importantes et le rendu omnidirectionnel en opposition aux grains de petites tailles associés aux harmoniques d'ordre 7 et qui, de par leur temps de délai plus important, perdurent plus longtemps. Ces deux extrêmes sont, en quelques sortes, reliés par les harmoniques intermédiaires. Ainsi, à chaque ordre donné correspond une spatialité propre qui, interagissant avec les différents ordres, génère des masses et des couches sonores pertinentes sur un plan musical de par leur aspect chaotique et multidirectionnel (Figure 12).

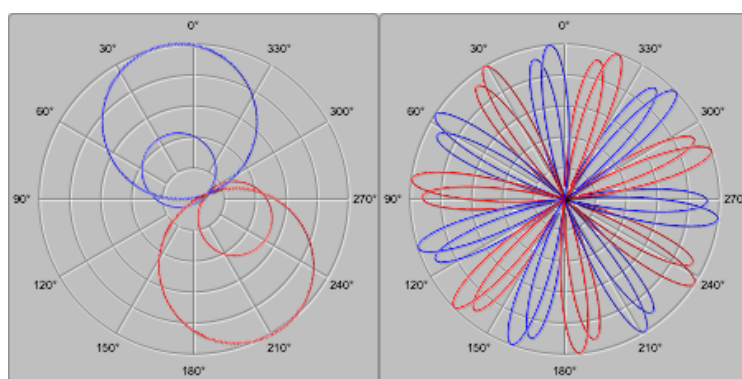


Figure 12 : Représentation sur un plan à deux dimensions des harmoniques circulaires d'indices -1 et 1 à gauche et -7 et 7 à droite synthétisées grâce au module de synthèse *hoa.granular~* à un ordre de décomposition 7

1.2.5 CRITIQUE DU CHAMP SONORE

Nous retrouvons, grâce à la synthèse directe des canaux dépendant des harmoniques circulaires, les caractéristiques du champ sonore présenté par Wakefield. Il serait, à présent, intéressant de pouvoir décrire de manière plus précise la morphologie du champ sonore restitué par cette méthode, afin de pouvoir la comparer avec d'autres approches. Bien qu'il soit difficile de définir avec des mots l'impression immersive qui résulte de ce champ diffus, notons que l'apparition de couches sonores n'est pas sans rappeler (du moins pour l'auteur) les phénomènes « d'élargissement » de l'espace sonore qui sont réalisés dans les techniques stéréophoniques en créant une décorrélation temporelle entre le canal de droite et le canal de gauche. En effet, il semble que l'interaction des harmoniques circulaires agrandit l'espace sonore, que les harmoniques appartenant à des ordres élevés opèrent dans un espace plus distant et que les harmoniques de petits ordres, moins directives, et qui semblent plus proches de l'auditeur. Cette remarque, bien que totalement subjective, est validée par l'approche précédente de simulation de la distance lors de l'encodage d'une source sonore, où le rapprochement d'une source sonore dans le cercle s'opère par une diminution de la résolution angulaire de la source sonore. Nous verrons par la suite, si cette qualité sonore se retrouve dans d'autres approches. Cette technique de synthèse de champ diffus peut, bien sûr, être élargie à d'autres traitements sonores comme le filtrage par bandes de fréquences, la modulation d'amplitude ou encore l'utilisation de simples délais. Nous revenons, par la suite, sur certaines des propositions que nous avons soumises dans l'introduction³⁴. Il ne s'agit, dans le cas présent, que d'un exemple qui sert de base au musicien pour mettre en œuvre ses propres outils. Nous pouvons, à sujet, diriger le lecteur vers la pièce *Pianotronics I* pour piano et live électronique d'Alain Bonardi dans laquelle un champ diffus est créé grâce à une série d'*harmonizers*.

³⁴ Propositions présentées dans le prochain chapitre et dans le chapitre dédié à la réverbération.

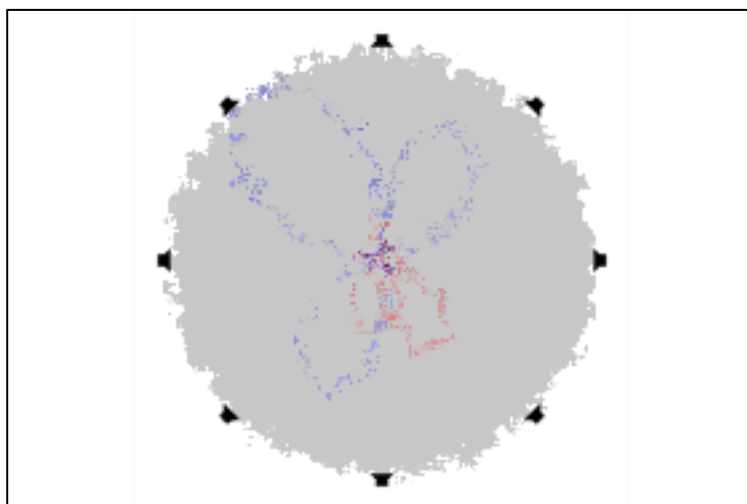


Figure 13 : Représentation imaginée des caractéristiques sonores et spatiales d'un champ diffus synthétisé par granulation.

Enfin, la question se pose de la possibilité de créer des paramètres de contrôle du champ sonore plus en adéquation avec notre perception de celui-ci. C'est en réalité par une écoute avertie que nous arrivons à discerner certaines correspondances entre la mise en échelle des paramètres de synthèse et les caractéristiques spatiales des harmoniques. Or, dans l'ensemble, le champ sonore est perçu comme granuleux et chaotique (Figure 13). Le champ sonore restitué par un tel processus nous apparaît, en réalité, difficile à prévoir mais, selon les remarques précédentes, le compositeur pourra néanmoins établir certaines stratégies compositionnelles même si, selon toute vraisemblance, il lui faille « rectifier le tir » en se fiant à son oreille. Notre objectif, en implémentant la synthèse granulaire dans le domaine des harmoniques circulaires, est de décorrélérer les différents signaux dépendant des harmoniques tant sur le plan temporel qu'au niveau de l'amplitude. Toutefois, le processus est radical (ceci est notamment dû à l'utilisation de lignes à retard) et implique une perte de contrôle. En effet, le musicien pourrait, somme toute, vouloir contrôler ce caractère diffus, avoir la possibilité de passer d'un champ diffus à une source sonore ponctuelle comme nous allons le suggérer.

1.3 DU CHAMP DIFFUS A LA SOURCE PONCTUELLE

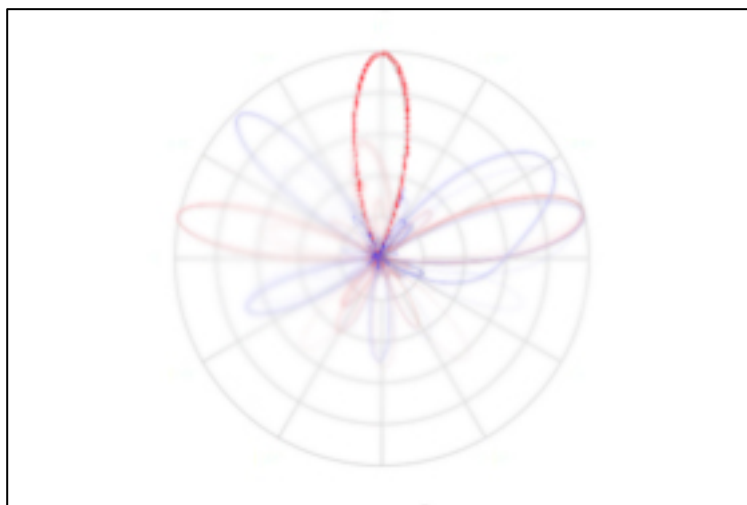


Figure 14 : Représentation imaginée du paradoxe d'un champ sonore entre source ponctuelle et champ diffus.

Nous avons présenté une première technique de synthèse de champ diffus utilisant des modules de synthèse générant directement les signaux dépendant des harmoniques circulaires. Par ce fait, et par le procédé de synthèse que nous avons mis en jeu, il nous est impossible de passer d'un champ diffus à une source sonore ponctuelle et inversement. Or, il paraît évident que ce genre d'approche possède un fort potentiel musical. Le musicien ne peut, en effet, se limiter à deux procédés de synthèse sonore qui sont aux antipodes l'un de l'autre ; mais il veut avoir accès à l'ensemble des possibilités sonores qui peuvent émerger de la fusion d'une approche ponctuelle et d'une approche chaotique de l'espace sonore. Dans ce chapitre, nous présentons donc la mise en œuvre des techniques de synthèse de champs sonores, constitués d'une ou plusieurs sources sonores ponctuelles, qui peuvent se transformer en un champ sonore diffus et chaotique et offrir cet état paradoxal où les sources sonores seraient à la fois ponctuelles et diffuses (Figure 14). Nous revenons ainsi sur certaines des techniques que nous avons envisagées et nous critiquerons les approches en mettant en valeurs leurs atouts et leurs inconvénients. C'est aussi, pour nous, l'occasion de faire part de la synthèse de champs diffus générés par modulation d'amplitude. Il nous faut rappeler que l'approche musicale des techniques ambisoniques n'ayant été à ce jour que très peu étudiée, il n'existe aucune littérature sur cette approche hybride du champ sonore. Ne pouvant, en somme, recouvrir l'ensemble des possibilités qui s'offrent à nous, nous espérons que ces premières recherches donneront lieu à de nouvelles techniques de synthèse de champs sonores que nous n'avons, pour le moment ni étudiées ni même envisagées. Nous revenons, à présent, sur le cas du *cross-fade* de champs sonores qui fut la première tentative de réponse à notre problème.

1.3.1 LE CROSS-FADE

Les musiciens que nous sommes, fondent leurs approches sur les expériences qu'ils ont pu réaliser au préalable. Ainsi, la première approche a été encouragée par l'analyse de techniques de « *morphing* » sonore. Le *morphing* sonore consiste à prendre deux sons possédant certaines caractéristiques morphologiques propres à chacun. Il s'agit, par la suite, de pouvoir passer de manière « linéaire » et « naturelle » d'un son à un autre de telle façon que l'auditeur ait l'impression que ce ne soit qu'un seul et même son qui se transforme³⁵. Le processus peut consister, par exemple, à créer une hybridation entre une voix et un son de violon. De nombreuses techniques permettent d'obtenir ce résultat en utilisant des séries de filtres, une convolution entre les deux sons ou encore un simple *cross-fade* d'amplitude.

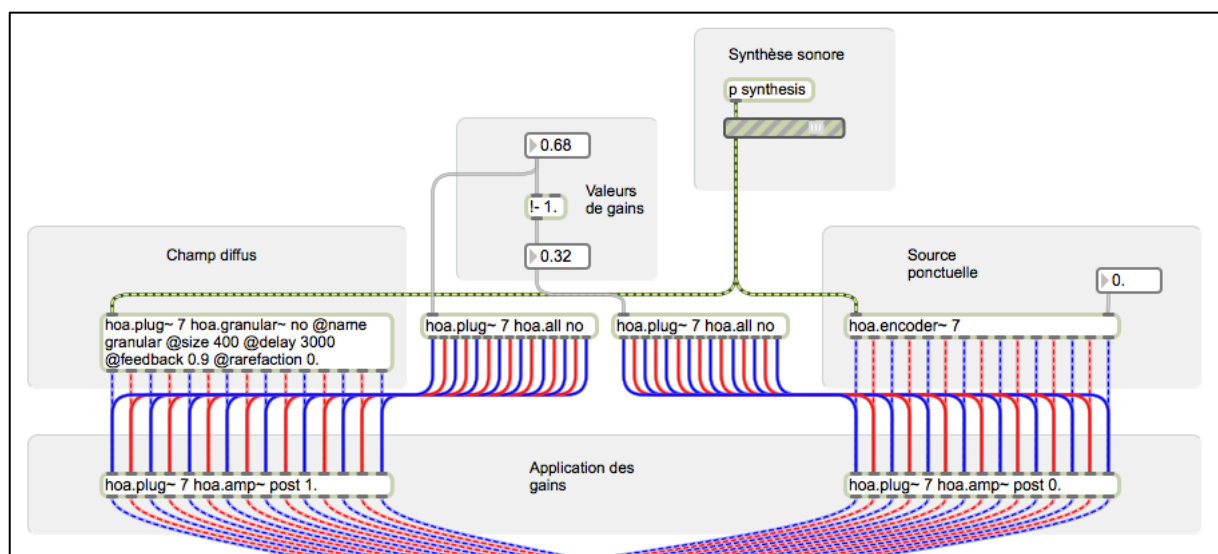


Figure 15 : Mise en œuvre Max/MSP d'un champ sonore hybride entre champ diffus (à gauche) et d'une source ponctuelle à droite.

Chaque approche possède ses artefacts qui sont plus ou moins dérangeants en fonction des morphologies des sons de bases. En somme, le *cross-fade*, bien que simpliste, reste en bien des cas une des meilleures solutions qui évite de dénaturer les sons. Notre première approche, simple et

³⁵ Le lecteur peut se référer à la pièce *Préfixes* de Michaël Levinas composée en 1991 pour 17 instrumentistes et dispositif électroacoustique.

basique, s'applique à transposer ce procédé pour deux champs sonores. Le processus consiste donc en un jeu de pondération entre deux synthèses parallèles de champs sonores possédant le même signal sonore en entrée. Le premier champ sonore est composé de sources sonores ponctuelles et le deuxième est un champ diffus (Figure 15).

Les résultats dans cette approche sont, dans un premier temps, très peu convaincants. Le *cross-fade* sonore n'est, à vrai dire, valable que pour des sons tenus se développant lentement dans le temps. De plus, il est préférable, en général, que les deux sons aient la même hauteur tonale afin qu'apparaisse progressivement un changement de la répartition fréquentielle. Si les morphologies sonores ne s'y prêtent pas, l'auditeur perçoit deux sons distincts où l'amplitude du premier décroît lorsque l'amplitude du second augmente. Ces contraintes liées aux morphologies sonores semblent être transposées dans le domaine ambisonique. Utiliser une synthèse granulaire pour générer le champ diffus offre un champ sonore à la morphologie bien trop éloignée de celle du son initial. Les enveloppes d'amplitude et la prolongation du son, dues à la ligne à retard avec réinjection « dénaturent » le son original de manière trop drastique et cela, sans possibilités d'atténuation. Nous discernons continuellement deux champs sonores distincts, l'un composé d'une source ponctuelle et l'autre chaotique. L'effet perceptif est extrêmement similaire, toutes proportions gardées, à un *cross-fade* appliqué entre deux sons aux caractères timbriques très distincts : le champ diffus apparaît et la source ponctuelle disparaît et inversement.

Il convient de réaliser un autre module de synthèse de champ sonore diffus qui se prête plus à ce genre d'expérimentation³⁶. Ce champ diffus doit donc, au regard des observations que nous venons de faire, garder au maximum les caractéristiques morphologiques du son initial tout en respectant les caractéristiques acoustiques du champ diffus, en offrant un champ sonore chaotique, immersif où le son semble provenir de toutes les directions. Nous proposons de répondre à cette demande par l'utilisation de la modulation d'amplitude. Ce choix pourrait sembler contradictoire au regard des exigences que nous venons de présenter. Cependant, la modulation d'amplitude peut prendre un tout autre aspect lorsqu'elle est implémentée dans le domaine des harmoniques circulaires. En effet, en traitement du signal « classique », la modulation est souvent utilisée pour transformer de manière

³⁶ Le lecteur pourra se référer au patch [hoa.am~](#) de la mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA.

radicale le timbre du son. Elle permet, entre autre, de donner un caractère métallique au timbre (modulation en anneau) ou de transposer le son (*frequency shifter*)³⁷.

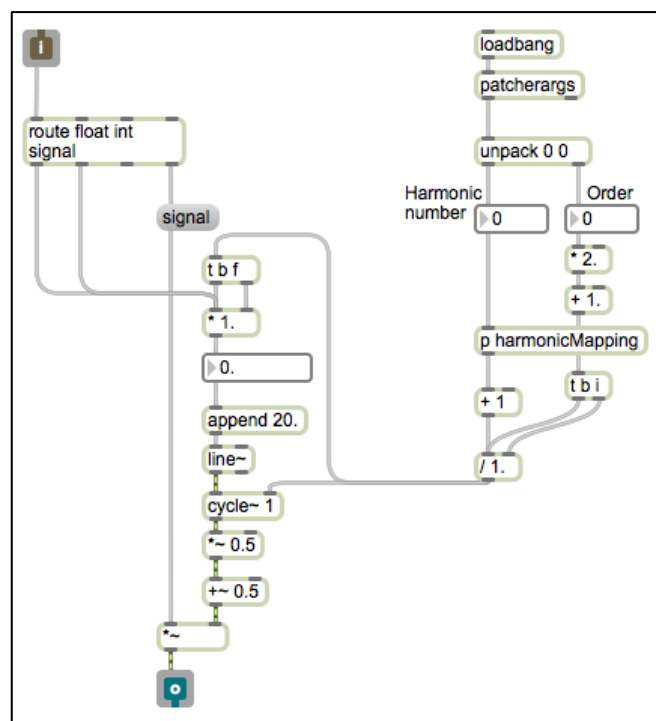


Figure 16 : Mise en œuvre de la modulation d’amplitude dans une abstraction Max/MSP.

Dans le domaine des harmoniques circulaires, nous utilisons une fréquence relativement faible pour la modulante, entre de 1 et 20 Hz. Nous préservons ainsi le timbre, en gardant la fréquence sous le seuil d’audibilité et évitons de faire apparaître de nouvelles fréquences de résonance dans le spectre du son. Cela revient, donc, à appliquer un gain différent sur chacun des signaux dépendant des harmoniques circulaires. Nous avons présenté le fait que l’encodage d’une source sonore ponctuelle dans le domaine ambisonique réside dans la création de signaux dépendant des harmoniques circulaires, corrélés les uns avec les autres, mais dont les gains respectifs sont établis en fonction des indices des harmoniques dont ils dépendent. Nous soumettons donc l’hypothèse, qu’en appliquant un gain différent pour chaque signal ne répondant pas à ce principe de relation définie par l’encodage, nous devrions, au moment du décodage ambisonique, obtenir un champ sonore reconstruit de manière « instable ». L’auditeur devrait, en effet, voir apparaître une source sonore identique au son initial mais aux propriétés spatiales mouvantes et totalement imprévisibles. Notons encore, que dans notre

³⁷ Le lecteur pourra se référer à l’article [Mays et al, 2013] qui expose un grand éventail des possibilités musicales offertes par la modulation d’amplitude ainsi qu’un très bon historique de ces techniques.

approche, afin de garder une certaine cohérence, nous faisons varier la fréquence de modulation de chaque module en fonction de l'indice des harmoniques dont dépendent les signaux afin d'assurer des différences entre les gains de chaque module (l'approche est similaire à celle présentée pour la synthèse granulaire) (Figure 16).

En appliquant ce type de traitement, le son semble, en effet, provenir de plusieurs endroits en même temps. Le champ sonore, ainsi créé, n'est pas à proprement parlé diffus. Il possède bien sûr, un fort caractère enveloppant mais ne provient pas, en tout instant, de toutes les directions. Nous considérons néanmoins admissible l'élargissement de cette notion afin de définir ce champ sonore synthétisé par modulation d'amplitude comme diffus, car pour une application musicale, ce procédé « fait son effet » et semble pertinent.

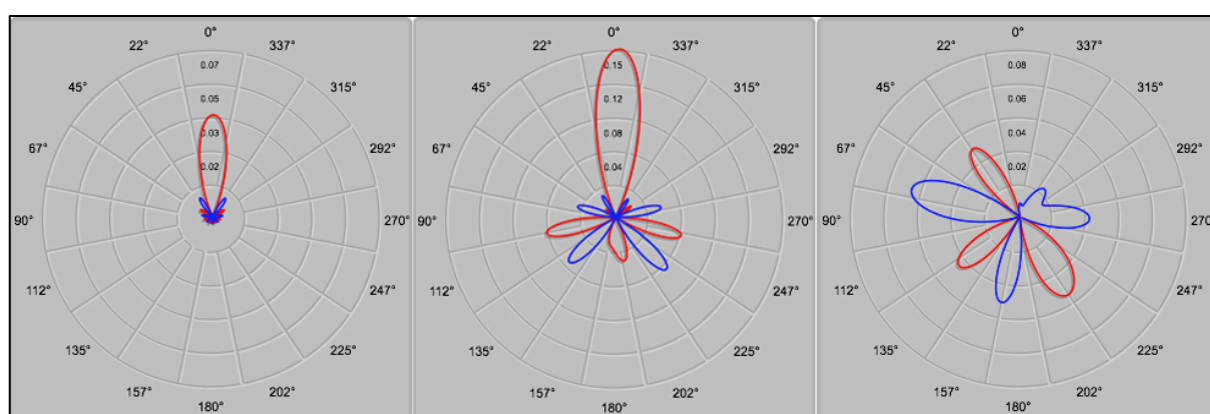


Figure 17 : Représentation en deux dimensions de la transition d'un champ sonore composé d'une source sonore ponctuelle (à gauche) vers un champ diffus (à droite) par technique de *cross-fade* pour un ordre de décomposition 7.

En appliquant le même procédé de *cross-fade* que nous avons réalisé pour la synthèse granulaire de champ diffus, nous obtenons, un rendu sonore bien plus homogène lors des transitions. Le champ diffus, ainsi généré, possède lui aussi certaines qualités spatiales intéressantes dans ce type de synthèse qui peut se traduire, comme nous l'avons fait avec la synthèse granulaire, par un agrandissement de l'espace. Cependant, dans le cas présent, cette sensation est moins clairement définie et elle se confond légèrement avec une impression de mouvements très rapides et chaotiques de multiples sources sonores. Or, cette caractéristique du champ diffus semble offrir pour le *cross-fade* de champs sonores un rendu bien plus efficace. En somme, il semble que la fusion des deux champs sonore opère. Nous pouvons valider une approche de *cross-fade* pour le passage d'un champ

sonore diffus à une source ponctuelle. Notons cependant que les qualités sonores du champ diffus doivent répondre à une contrainte : le timbre général du champ diffus doit être très similaire au timbre de la source ponctuelle. Nous remarquons encore que, dans une telle approche, le champ sonore diffus recouvre totalement l'ensemble de l'espace lorsqu'il apparaît (Figure 17). En d'autres termes, nous obtenons un champ diffus, à tout moment omnidirectionnel, dans lequel apparaît une dominance de source ponctuelle en un point. Or, il peut sembler souhaitable et plus musical que le champ diffus se « rétracte » en source ponctuelle et inversement. Il nous semble, à ce jour, difficile de remédier à cette « caractéristique » spatiale via cette méthode de *cross-fade*. Nous proposons donc une autre approche permettant d'offrir une « hybridation » différente des deux champs sonores.

1.3.2 LE FACTEUR DE DIFFUSION

L'objectif de cette nouvelle mise en œuvre est de pouvoir obtenir un traitement qui opère tel un flou gaussien ponctuel en traitement de l'image. En somme, nous souhaitons trouver un facteur de diffusion qui permette de créer, en fonction de sa valeur, une sorte d'élargissement chaotique de la source sonore jusqu'à obtenir un champ diffus enveloppant entièrement l'auditeur. Pour revenir à une vision imagée du processus, nous envisageons la source sonore comme un halo de lumière très directif, tel une lampe torche, et le champ diffus serait une lumière omnidirectionnelle, telle une ampoule. Si nous continuons notre métaphore, les états intermédiaires seraient ainsi des lampadaires dont les réflecteurs seraient de plus en plus petits à mesure que l'on souhaite obtenir une lumière omnidirectionnelle. Ce type de transition, transposé dans notre espace sonore circulaire, n'est pas sans rappeler le traitement lié aux ordres fractionnaires où la source sonore s'élargit ou se précise de façon homogène.

Les ordres fractionnaires ne sont malheureusement pas applicables tels quels au processus que nous venons de présenter. Il aurait, bien sûr, été séduisant de pouvoir changer linéairement la résolution angulaire d'une source ponctuelle et la résolution spatiale du champ diffus afin d'arriver à nos fins. Cependant ce traitement spatial n'agit pas comme l'on pourrait l'envisager de manière instinctive. En effet, rappelons que la résolution angulaire diminue les contributions des signaux dépendant des harmoniques circulaires. Appliquer ce processus à un champ diffus revient à annuler les composantes spatiales des signaux dépendant des harmoniques d'ordres élevés. Il en résulte un appauvrissement du champ sonore jusqu'à ne garder que l'harmonique d'indice 0 lorsque la résolution spatiale est au plus faible. Dans le cas de la synthèse par modulation d'amplitude, que nous venons de

présenter, nous n'entendrions alors qu'une source sonore omnidirectionnelle à laquelle nous aurions appliqué une enveloppe d'amplitude.

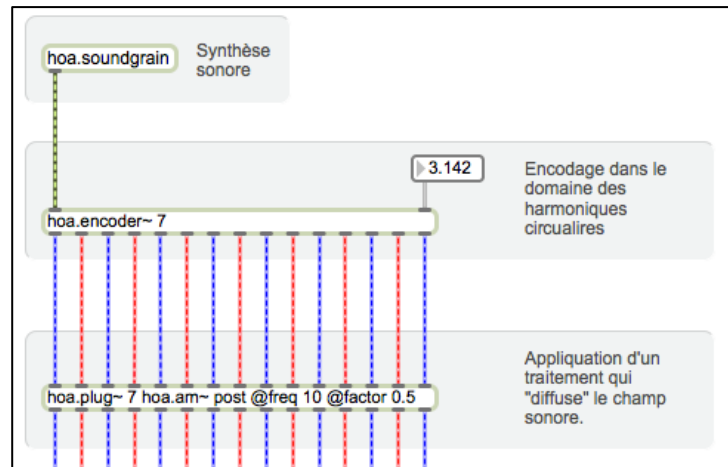


Figure 18 : Patch Max/MSP présentant l'enchaînement d'un encodage dans le domaine ambisonique avec un traitement permettant de rendre le champ sonore diffus.

Néanmoins, en détournant notre approche permettant de générer des ordres fractionnaires, nous avons pu mettre en œuvre un traitement sonore qui répond à notre demande et créer un facteur de diffusion. Le principe est relativement simple, il consiste à synthétiser une source sonore dans le domaine ambisonique et à appliquer aux signaux dépendant des harmoniques circulaires les traitements sonores identiques à ceux que l'on applique lors de la synthèse de champs diffus. Bien sûr, dans le cas présent, les modules de synthèse ne prennent plus le même signal en entrée, mais nous assignons à chacun le signal dépendant de l'harmonique qui lui correspond (Figure 18). Ils ne sont, alors plus des modules de synthèse de champs diffus, mais nous pouvons les définir comme des modules de « diffusion ». Rappelons donc que ce processus n'opère, *a priori* aucun désagrément, vu que les signaux synthétisés par le décodeur sont identiques à des facteurs de gains près (il existe néanmoins un artefact non négligeable, causé par l'enchaînement des deux traitements, sur lequel nous reviendrons par la suite). Les modules de diffusion permettent, à présent, la transformation d'une source ponctuelle en un champ sonore diffus. Afin d'avoir la possibilité de créer des transitions entre la source sonore ponctuelle et le champ diffus, il est alors nécessaire de procéder à quelques modifications sur les modules de diffusion.

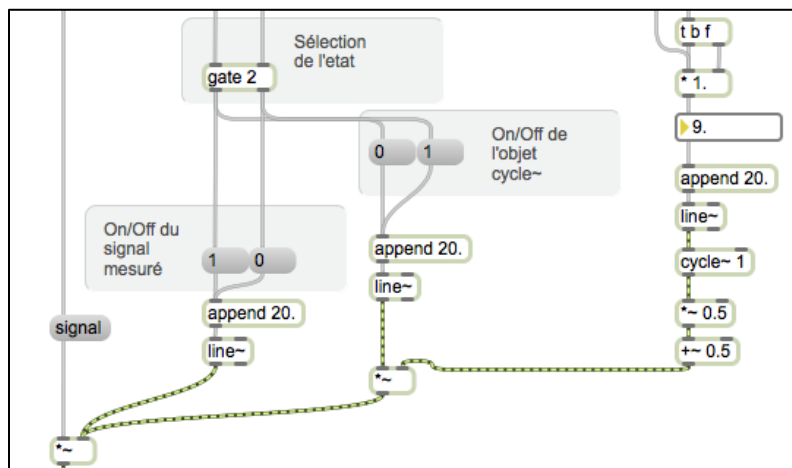


Figure 19 : Première adaptation de l'abstraction Max/MSP permettant la modulation d'amplitude.

Il faut alors définir quel est le paramètre du module de diffusion que nous pouvons varier afin d'annihiler les « transformations » du champ sonore. Si nous reprenons le cas de la modulation d'amplitude de la Figure 16, il est nécessaire de mettre en œuvre un outil pouvant annuler les variations du générateur de signal sinusoïdal (l'objet `cycle~`) et remplacer ce signal par un signal mesuré de valeur 1 (Figure 19). Nous pouvons alors choisir, à tout moment, si nous souhaitons appliquer une modulation d'amplitude à un des canaux dépendant des harmoniques circulaires ou, au contraire, laisser le signal original intact. Nous pouvons noter que cette implémentation est quelque peu « brutale », il pourrait sembler préférable pour certains musiciens d'appliquer une pondération entre le signal sinusoïdal et le signal mesuré afin d'avoir des états intermédiaires pour chacun des canaux grâce auxquels chaque canal pourrait être plus ou moins décorrélé. Le choix d'une mise en œuvre aussi drastique résulte, dans le cas présent, d'une volonté didactique. En effet, le processus se trouve largement complexifié s'il nous fallait créer un paramètre permettant de contrôler une pondération au lieu d'un simple paramètre d'activation/désactivation.

Nous en venons donc au contrôle de ce paramètre d'activation de la diffusion. L'opération consiste à créer un ensemble I d'index relatifs aux modules de diffusion. Ces index sont calculés à partir de l'indice de l'harmonique dont ils dépendent et de l'ordre de décomposition et sont distribués sur une échelle comprise entre 0 et 1 tel que

si $i \geq 0$

$$I(i) = \frac{2i + 1}{2N + 1}$$

sinon

$$I(i) = \frac{abs(2i)}{2N + 1}$$

où i est l'indice de l'harmonique et N l'ordre de décomposition.

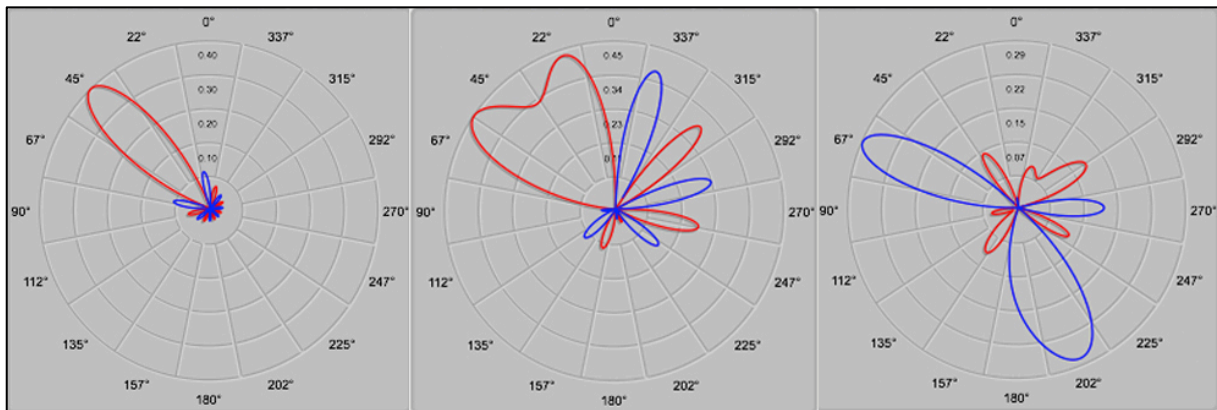


Figure 20 : Représentation en deux dimensions de la transition d'un champ sonore composé d'une source sonore ponctuelle (à gauche) vers un champ diffus (à droite) par l'utilisation d'un facteur de diffusion pour un ordre de décomposition de 7.

Grâce à un facteur global de diffusion compris entre 0 et 1, nous pouvons alors définir dans chaque module si la modulation d'amplitude est activée. Le processus répond à une simple comparaison : si le facteur est inférieur ou égal à l'index que nous avons calculé alors le signal dépendant de l'harmonique se référant à cet index subit une modulation d'amplitude. Nous retrouvons une approche très similaire à celle adoptée lors de la mise en œuvre des ordres fractionnaires. Si le facteur de diffusion prend la valeur 1, aucun module de diffusion n'active la modulation d'amplitude et le champ sonore reste « intact ». Au fur et à mesure que le facteur de diffusion se rapproche de 0, les modules activent la modulation d'amplitude en commençant par les modules dépendant des

harmoniques d'ordres élevés et le champ sonore se diffuse graduellement. Enfin, lorsque le facteur vaut 0, alors tous les modules activent la modulation d'amplitude et l'ensemble du champ sonore est diffus (notons que, pour la mise en œuvre il nous a semblé préférable d'inverser la valeur du facteur de diffusion : à 1, le champ sonore est diffus et à 0, le champ sonore est intact).

Sur le plan perceptif, nous considérons notre approche comme validée. Nous obtenons, bien sûr, une source ponctuelle ou un champ diffus lorsque le facteur de diffusion se trouve à ses extrêmes. Et l'enjeu essentiel de l'approche, qui est d'offrir un champ sonore qui se diffuse au début plus ou moins autour de la source ponctuelle pour petit à petit se répartir autour de l'auditeur, répond à nos exigences (Figure 20). Il est à noter que cette approche pourrait être appliquée en utilisant de nombreuses techniques de synthèse de champs diffus. Nous présenterons d'ailleurs et par la suite, l'utilisation de la décorrélation temporelle pour cet effet lorsque nous reviendrons sur la réverbération dans le domaine des harmoniques circulaires.

Il nous faut, à présent, revenir sur l'artefact dû à l'encodage que nous avons signalé auparavant. L'encodage ambisonique génère des signaux dépendant des harmoniques circulaires pouvant être nuls ou de faible amplitude. Prenons le cas d'un encodage à 0 degré ; en calculant les gains des signaux dépendant des harmoniques circulaires, nous pouvons noter que pour les signaux d'indices négatifs, la valeur du gain est nulle. Ceci ne génère aucune perte d'amplitude du champ sonore étant donné que les gains des signaux dépendant des harmoniques positives sont de 1. Cependant le processus agit comme un traitement en miroir sur le champ sonore³⁸ et l'aspect chaotique se trouve atténué. Une solution très simple est de réaliser l'encodage de la source sonore ponctuelle dans le module de diffusion et que les gains générés par l'encodage prennent une valeur 1 lorsque le module de diffusion est activé³⁹. Toujours en relation avec le processus d'encodage, il reste à noter que nous partons du principe, pour le moment, que l'utilisateur ne souhaite pas utiliser le module de compensation de la distance présente auparavant. Ce module implique l'utilisation d'ordre fractionnaire, or nous avons observé que ce type d'approche génère de nombreux artefacts sur un champ sonore diffus. La solution la plus évidente reste, ici encore, de procéder à l'encodage avec compensation de la distance dans le module de diffusion. Dans ce cas, l'activation du module de diffusion pour une harmonique appliquerait non seulement la valeur de pondération 1 au signal mais devrait ne pas prendre en compte l'ordre fractionnaire et appliquer aussi la diminution d'amplitude au

³⁸ L'annulation des harmoniques négatives crée un axe de symétrie sur le champ sonore, tous les lobes entre 0 et π se retrouve reproduit entre π et 2π , cette caractéristique des harmoniques peut être vue en soit comme un traitement spatial.

³⁹ Cette approche est présente dans la pièce d'Alain Bonardi, *Pianotronics 1* mais n'a pas encore été généralisée à l'ensemble des modules de synthèse de champ diffus de la bibliothèque HOA.

signal sonore si l'utilisateur souhaite préserver une certaine homogénéité dans les transitions entre sources ponctuelles et champ diffus⁴⁰.

Nous présentons, ici, une première solution qui peut être modifiée et arrangée selon les besoins compositionnels. Nous pouvons encore envisager d'autres approches permettant de créer des transitions entre sources sonores ponctuelles et champs diffus. L'une d'entre elles est réalisable grâce à la décomposition en ondes planes. Nous revenons donc, à présent, plus précisément, sur cette technique qui, non seulement permet ce type d'application, mais offre bien d'autres possibilités musicales.

⁴⁰ Signalons que cette approche ferait perdre à l'implémentation de la bibliothèque HOA dans Max/MSP le caractère modulaire des traitements sonores relatifs aux champs diffus.

2 LES TRANSFORMATIONS DU CHAMP SONORE

Nous venons de présenter une première approche musicale de l’ambisonie relative à la synthèse dans le domaine des harmoniques circulaires. Nous laissons, dès lors, libre champ au musicien d’expérimenter ce que bon lui semble en espérant que les propositions émises ont permis de faire émerger de nouvelles idées musicales. Il est, dès lors, nécessaire d’appréhender les transformations que nous pouvons opérer sur un champ sonore. Certaines sont déjà bien connues et font déjà partie des outils du musicien, telles que la rotation du champ sonore⁴¹ ou encore le traitement en miroir du champ sonore⁴², cependant d’autres restent encore affaires d’acousticiens. C’est à celles-là que nous souhaitons nous intéresser. Le présent sujet ne saurait néanmoins recouvrir l’ensemble de ces possibilités, nous avons donc choisi de revenir sur deux traitements offrant de multiples possibilités musicales : la décomposition en ondes planes et la réverbération. Les ondes planes et la réverbération dans le domaine lié à l’ambisonie font parties des outils auxquels les musiciens restent très hermétiques à la compréhension des fondements acoustiques sur lesquels ils reposent. C’est donc, en soi, un défi que nous souhaitons relever afin que les musiciens aient accès au potentiel musical offert par ces approches. Pour cela, nous présenterons dans un premier temps la décomposition en ondes planes, qui sous ses airs austères permet d’appréhender le champ sonore de manière très intuitive, en basant notre approche sur des utilisations concrètes de cet outil. Par la suite, nous reviendrons sur la réverbération dont la mise en œuvre, dans le domaine des harmoniques circulaires, soulève de nombreuses difficultés auxquelles nous espérons répondre de manière pertinente et musicale. De manière générale, nous procéderons encore ici de manière analogue aux chapitres précédents. En mettant en lumière les principes scientifiques inhérents à ces outils, nous espérons pouvoir les façonner afin d’en faire des traitements de l’espace et du son pertinents sur le plan musical.

⁴¹ Le lecteur pourra se référer à [Daniel, 2001].

⁴² Opération qui consiste à annuler les harmoniques d’indice négatif afin créer un axe de symétrie dans le champ sonore, le lecteur pourra se référer au patch *hoa.mirror~*.

2.1 LA DECOMPOSITION EN ONDES PLANES

Les techniques ambisoniques sont principalement basées sur la décomposition du champ acoustique en harmoniques sphériques ou circulaires. La représentation de l'espace sonore en fonctions spatiales nous permet de réaliser de nombreuses opérations musicales, nous venons d'ailleurs d'en présenter un petit éventail. Il existe, cependant, une autre forme de décomposition du champ sonore : la décomposition en ondes planes. Les ondes planes amènent à une représentation du champ sonore qui est plus proche sur bien des aspects de celle utilisée généralement par les musiciens lorsqu'ils se représentent l'espace via une série de haut-parleurs, et qui donne facilement accès à de nombreux traitements tant sur le plan sonore que spatial. L'intérêt de la décomposition du champ sonore en ondes planes réside dans la capacité que nous avons, par la suite, à réaliser certaines opérations telles que la distorsion de la perspective ou encore le filtrage spatial du champ sonore. Nous verrons, à travers ce chapitre, sur quelles bases se fonde cette représentation du champ sonore afin de permettre la compréhension des processus que nous mettons en jeu. Nous présenterons les différents traitements de la bibliothèque HOA mis en œuvre dans le domaine des ondes planes, et qui permettront alors de justifier ce type d'application, de par leur pertinence musicale et leur facilité de création.

2.1.1 LES ONDES PLANES

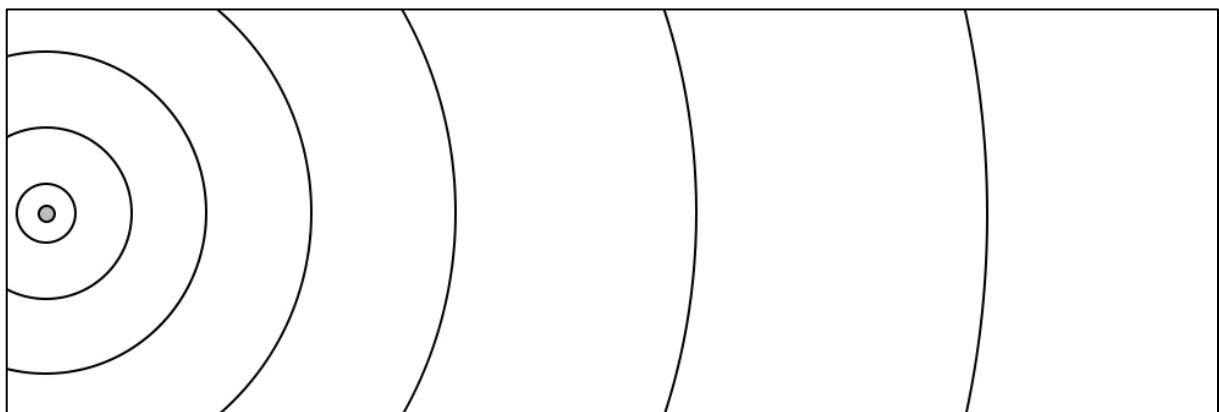


Figure 21 : Représentation bidimensionnelle des ondes émises par une source ponctuelle (en grise à gauche). A gauche, les ondes possèdent une forte courbure, à droite l'onde peut être considérée comme plane.

Dans notre représentation bidimensionnelle de l'espace, une onde plane peut être envisagée comme un ensemble de lignes parallèles se propageant de manière orthogonale. Ces lignes seraient une représentation des ondes émises par une source sonore ponctuelle éloignée. En effet, les ondes émises par une source sonore ponctuelle peuvent être représentées par des lignes possédant une forte courbure si l'on se place relativement proche de la source mais, si l'on se place à une distance suffisamment éloignée de la source, la courbure diminuant à mesure que la distance augmente, les ondes sont considérées comme planes (Figure 21). Ainsi, décomposer un champ sonore, consiste à représenter le champ sonore par une somme infinie d'ondes planes.

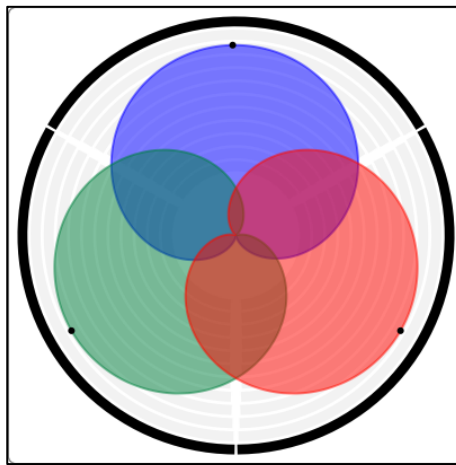


Figure 22 : Représentation de trois microphones (figures de directivité cardioïde en couleur) et de trois haut-parleurs (arcs noirs) qui discrétisent un cercle en trois points.

En pratique, nous utilisons une version discrète de ce processus et le champ sonore est alors représenté par une série d'ondes planes. C'est le principe sous-jacent au décodage ambisonique qui consiste à projeter le champ sonore décomposé dans le domaine des harmoniques circulaires sur un ensemble de points correspondant aux haut-parleurs. Ceux-ci sont alors considérés comme des émetteurs d'ondes planes et chacun resitue l'onde résultante de la projection à laquelle il correspond⁴³. Afin de mieux éclairer ce processus, nous pouvons mettre en valeur l'analogie qui existe entre la décomposition en ondes planes et le format A. Le format A résulte d'un enregistrement « *surround* » d'un champ sonore. Il est composé de quatre canaux (LF, LB, RF et RB) qui correspondent à l'enregistrement de quatre capteurs cardioïdes placés sur les faces d'un tétraèdre [Craven et al, 1977], [Gerzon, 1975a]. Si nous remplaçons, le format A dans sur plan à deux dimensions, nous obtenons trois canaux qui correspondent à l'enregistrement de trois capteurs cardioïdes placés au centre du champ

⁴³ Pour plus d'information sur le décodage ambisonique, le lecteur pourra se référer au chapitre traitant des optimisations et à [Daniel, 2001].

sonore et qui discrétisent le champ sonore de manière homogène (Figure 22). En remplaçant les microphones par des haut-parleurs, comme cela est représenté sur la Figure 22, le processus revient à projeter le champ sonore. Ainsi, nous pouvons considérer les canaux résultant d'une décomposition en ondes planes comme les canaux résultant d'un enregistrement virtuel du champ sonore. Les signaux sonores ont donc arbitrairement été nommés « signaux dépendant des microphones virtuels ». Cette application peut bien sûr être étendue à des ordres de décomposition supérieurs et bien entendu, le nombre de points discrétisant le cercle ambisonique augmente (de manière analogue au décodage ambisonique).

Dans la mise en œuvre de la bibliothèque HOA pour le logiciel Max/MSP, l'objet *hoa.projector~*⁴⁴ permet de réaliser l'opération de projection. Rappelons alors que le processus de décodage ambisonique et la décomposition en ondes planes pouvant être un seul et même processus, l'objet *hoa.projector~* est dans notre mise en œuvre exactement similaire à l'objet *hoa.decoder~* en mode « ambisonics ». Cependant, l'objet *hoa.decoder~* permet d'autres opérations comme la restitution pour des systèmes de haut-parleurs irréguliers ou un casque ; il nous a donc semblé préférable d'offrir deux objets distincts pour plus de clarté. De plus, bien que ce processus ne soit généralement associé qu'à l'étape de restitution du champ sonore, la bibliothèque HOA souhaite offrir des traitements sonores dans le domaine des ondes planes et permettre à l'utilisateur de revenir dans le domaine des harmoniques sphériques⁴⁵. Ce fut une raison de plus pour créer un outil exclusivement destiné à cet effet.

2.1.2 LE FILTRAGE DU CHAMP SONORE

L'une des premières opérations qu'il nous a semblait intéressant de mettre en œuvre, brièvement présenté lors des JIM 2013⁴⁶ [Colafrancesco et al, 2013] est le filtrage spatial du champ sonore. Ce processus possède un fort potentiel musical, il permet de « redessiner » le champ sonore en appliquant de simples gains aux signaux dépendant des microphones virtuels. Le musicien ayant créé un champ sonore composé de sources ponctuelles peut, par exemple, cacher certaines sources sonores en appliquant un gain nul aux signaux dépendant des microphones virtuels qui possèdent les

⁴⁴ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

⁴⁵ Via l'objet *hoa.recomposer~*, nous revenons dessus par la suite lors de l'étude de la distorsion de la perspective.

⁴⁶ Journées d'informatique musicales

contributions des sources sonores qu'il souhaite cacher. Afin d'éclaircir le principe de ce type d'opération et de mettre en valeur le caractère intuitif de la décomposition en ondes planes, nous revenons sur une installation sonore que les membres de l'équipe HOA ont présenté lors de l'évènement *Savante banlieue* en 2012⁴⁷. A ce moment, nous ne pouvions utiliser la décomposition en ondes pour le traitement musical que nous allons présenter, et ainsi, il nous a fallu opérer dans le domaine des harmoniques circulaires.

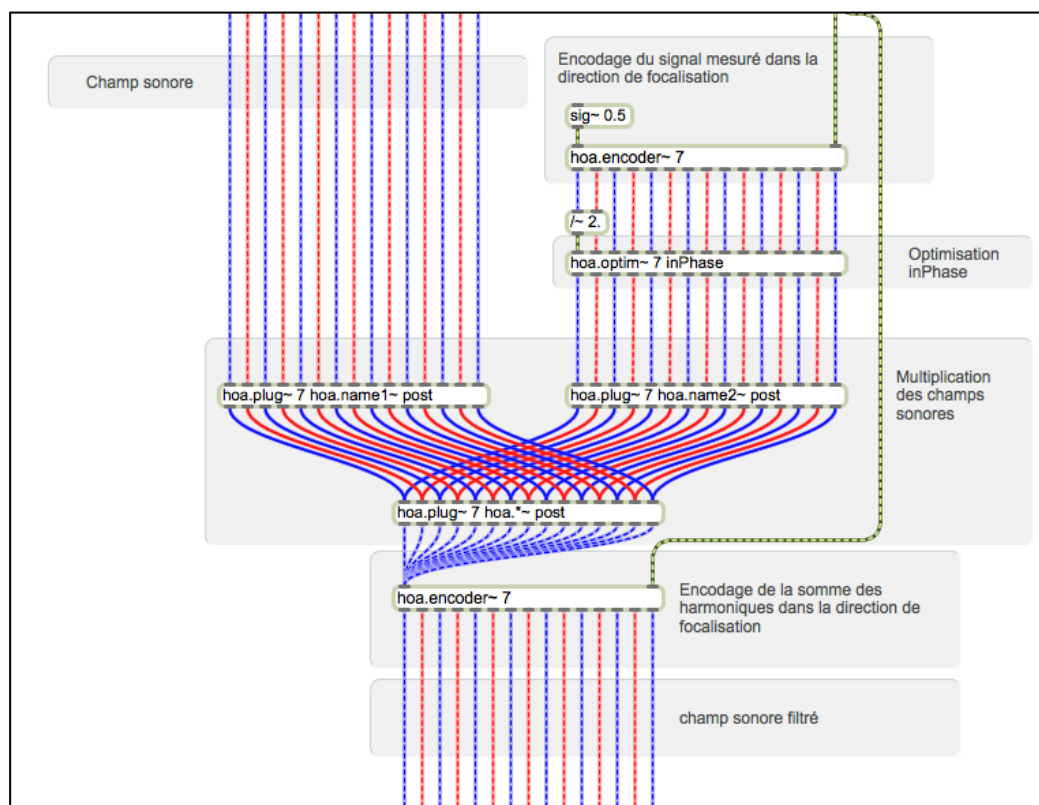


Figure 23 : Processus de focalisation sur un champ sonore dans le domaine des harmoniques circulaires.

Dans le cadre de cet évènement, nous avons préalablement créé un champ sonore complexe composé de multiples sources ponctuelles. L'auditeur qui se trouvait alors dans le cercle ambisonique pouvait, grâce à un capteur de type Kinect⁴⁸, simuler une prise de son dans une direction donnée en pointant de la main un espace défini. Ce traitement appelé *focalisation* ou *focus*, Daniel le définit pour un ordre de décomposition 1 comme imitant « [...] l'effet d'une prise de son directive dans le champ acoustique enregistré à l'aide d'un microphone cardioïde virtuel » et il précise que « l'analogie visuelle approximatif serait l'effet d'une lampe torche balayant l'obscurité » [Daniel, 2001]. Il note, par la suite

⁴⁷ <http://savantebanlieue.plainecommune.fr/> et <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/projets/>

⁴⁸ <http://www.xbox.com/fr-FR/Kinect>

que ce procédé est accessible pour des ordres de décomposition élevés. Dans le cas qui nous intéresse, nous utilisons un ordre de décomposition 7, la directivité du microphone s'en trouve donc largement augmentée. La mise en œuvre qu'il propose et que nous avons utilisée au moment de l'installation consiste à encoder dans la direction de focalisation la somme des signaux dépendant des harmoniques circulaires résultant de la multiplication du champ sonore, avec un champ sonore composé d'un signal mesuré encodé dans la direction de focalisation (ce signal doit être optimisé avec une optimisation *inPhase*⁴⁹) (Figure 23).

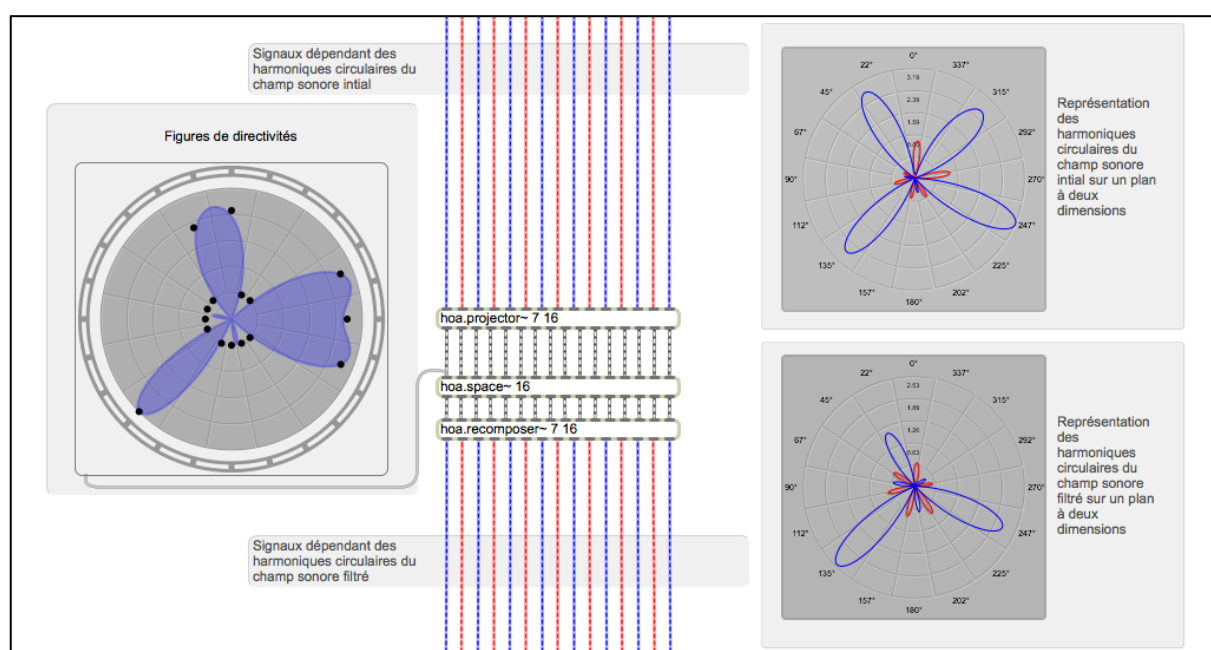


Figure 24 : Processus de focalisation avec de multiples figures de directivité sur un champ sonore dans le domaine des ondes planes.

Ce processus est des plus efficaces pour l'auditeur, nous avons d'ailleurs eu de nombreux retours positifs lors de l'installation sonore. Cependant, la mise en œuvre du procédé par des musiciens semblait être compromise par la complexité des processus mis en jeu dans le domaine des harmoniques circulaires. Nous pouvons d'ailleurs noter à ce sujet que la compositrice Cécile Le Prado a du faire appel à Véronique Larcher⁵⁰ pour mettre en place ce type de traitement dans une de ses compositions [Daniel, 2001]. En réalité, cette approche peut se résoudre très facilement dans le domaine des ondes planes en appliquant des gains sur les canaux dépendant des microphones virtuels, selon l'espace que nous souhaitons révéler. Afin d'appliquer les gains, nous avons mis en œuvre dans

⁴⁹ Nous revenons ce processus dans le chapitre dédié aux optimisations.

⁵⁰ Chercheuse et diplômée de Paris 6 pour sa thèse "Techniques de spatialisation des sons pour la réalité virtuelle" [Larcher, 2001].

le logiciel Max/MSP l'objet *hoa.space~* qui, associé à une interface graphique nommée *hoa.space*⁵¹, permet de simuler une grande variété de prises de son avec des figures de directivités qui peuvent être tout à fait incongrues. Il nous semblait, en effet, important de laisser au musicien un maximum de libertés quant aux choix du filtrage spatial (Figure 24).

L'approche offerte par la bibliothèque HOA se veut donc intuitive et elle permet de prendre plus de libertés quant à la figure de directivité que nous souhaitons appliquer au champ sonore. Il est aussi possible de simuler plusieurs prises de son directives sur un seul champ sonore en appliquant seulement un gain à chacun des signaux, alors que, dans la mise en œuvre dans le domaine des harmoniques circulaires, il nous faut dupliquer l'ensemble du processus à chaque fois que nous souhaitons simuler une prise de son supplémentaire. En outre, grâce au domaine des ondes planes, l'utilisation de traitements de type *focalisation* semble bien plus attractif et accessible⁵².

Notons, qu'un tel processus était déjà disponible sous forme de *plug-in* proposé par la société Harpex⁵³ [Berge et al, 2010b]. Cependant, la restriction à l'ordre de décomposition 1 de leur microphone *soundfield*, auquel est associé le logiciel, restreint toute adaptation de la directivité du microphone virtuel et il est impossible de varier les paramètres dans le temps. Néanmoins, certaines de leurs propositions sont des plus pertinentes, malgré une approche très orientée vers les techniques de studio, et peuvent faire émerger des idées de traitements sonores pour les compositeurs comme le filtrage spatial de l'enregistrement d'un orchestre dans un espace très réverbérant, permettant de ne garder que les réflexions arrières de la salle.

Nous venons donc de présenter un traitement de filtrage spatial qui s'applique aux signaux dépendant des microphones virtuels. Faute principalement de temps, nous n'avons pu explorer d'autres mises en œuvre à ce niveau de la chaîne de traitement. Nous soumettons cependant encore de nombreuses opérations pour de futures recherches comme l'utilisation de lignes à retard ou de filtres fréquentiels dont les déformations résultantes du champ sonore peuvent certainement être des plus musicales. Enfin, nous avons suggéré au préalable un outil qui permette de revenir dans le domaine des harmoniques circulaires. Lors de cette opération, nous avons accès à un nouveau traitement : la distorsion de la perspective, sur lequel nous revenons à présent.

⁵¹ Le lecteur pourra se référer aux fichiers d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

⁵² La compositrice Marisa Acuña pour sa pièce *Evoluciones* et le compositeur João Svidzinski pour sa pièce *Turdus* ont très rapidement pris en main les outils destinés à cet effet.

⁵³ <http://www.harpex.net/>

2.1.3 LA DISTORSION DE LA PERSPECTIVE

En 1992, Gerzon expose une manipulation du champ sonore que l'on appelle *distorsion de la perspective* [Gerzon, 1992]. Ce procédé est utilisé principalement pour une restitution du champ sonore pour des systèmes de haut-parleurs placés de manière irrégulière⁵⁴. Le résultat de l'opération est un « élargissement » ou un « resserrement » de la scène frontale. Dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA, la mise en œuvre de cette manipulation porte le nom de *fisheye* en raison de l'analogie que nous pouvons faire avec l'effet visuel résultant des objectifs éponymes. La distorsion de la perspective est le résultat dans le domaine des harmoniques circulaires d'une transformation de Lorentz qui n'est valable qu'à un ordre de décomposition de 1 : « L'extension de cette transformation aux ordres supérieurs n'est pas possible avec la loi de distorsion angulaire sauf à détériorer les caractéristiques d'onde plane, c'est-à-dire que la transformation appliquée aux composantes d'une onde plane ne fournit pas des composantes qui puissent être générées par l'encodage d'une onde plane. », [Daniel, 2001]. Fin 2012, une solution à ce problème est proposée et mise en œuvre dans la bibliothèque HOA [Colafrancesco et al, 2013]. Nous revenons donc sur la réponse qui a été offerte et présentons les variations expérimentées, par la suite, autour de ce processus.

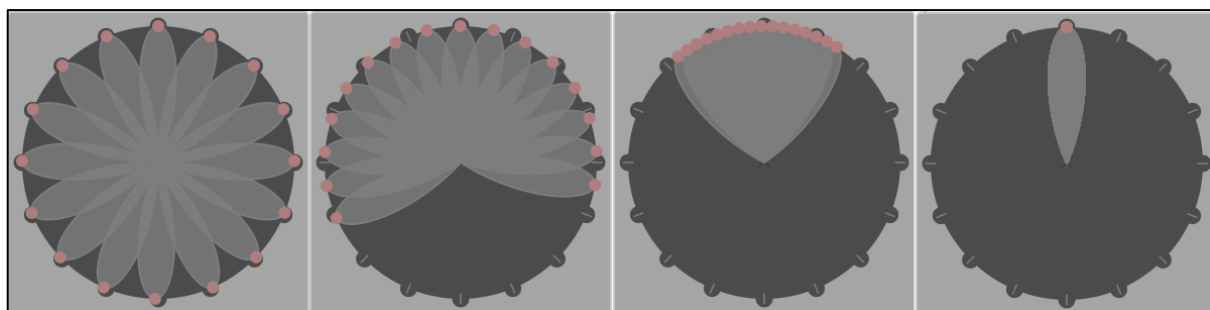


Figure 25 : Représentation des angles d'encodage des signaux dépendant des microphones virtuels lors d'un traitement de type *fisheye* correspondant à un resserrement de la scène frontale (de gauche à droite) et à un élargissement de la scène frontale (de droite à gauche).

Il est à noter que, dès lors, la solution proposée se base sur approche musicale du problème, elle ne résout pas le problème de conservation de l'onde plane mais sur le plan perceptif, la stratégie proposée a été validée notamment au travers de pièces⁵⁵ ou d'installations sonores⁵⁶. Nous notons

⁵⁴ Nous revenons sur la mise en œuvre de ce procédé pour cette application dans la partie consacrée à ce sujet.

⁵⁵ Telle que *Immersion* pour violoncelle et électronique d'Anne Sèdes.

d'ailleurs à ce sujet que : « 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. », [Colafrancesco et al, 2013].

La réponse que nous soumettons réside dans le processus de recomposition du champ sonore dans le domaine des harmoniques circulaire. Nous avons remarqué préalablement que la décomposition en ondes planes consiste à simuler une prise des prises de son avec une série de microphones virtuels. L'opération de recomposition disponible via l'objet *hoa.recomposer*⁵⁷ consiste alors à encoder les signaux dépendant des microphones virtuels dans la direction de leur prise de son. Notons, par ailleurs, que la directivité des microphones dépend du nombre de haut-parleurs avec lequel nous discrétisons le cercle qui dépend alors lui-même, comme nous l'avons dit, de l'ordre de décomposition du champ sonore initial. Ainsi, il est possible de passer d'une représentation à une autre sans aucune perte de qualité du champ sonore tant que nous conservons, bien sûr, un ordre de décomposition égal à l'ordre de décomposition original⁵⁸. L'opération de *fish-eye* semble, à présent, évidente et consiste à encoder tous les signaux dépendant des microphones virtuels en déplaçant les angles d'encodage vers le point où nous souhaitons que se concentre le champ sonore et en déplaçant de nouveau ces angles vers leurs positions d'origine, si nous souhaitons que le champ sonore s'élargisse (Figure 25).

Cette manipulation du champ sonore est une opération au fort potentiel musical, il permet donc de resserrer le champ sonore en un point sans pour autant déformer de manière nuisible les sources ponctuelles et offre ainsi un nouveau paramètre générateur de mouvement. Nous pouvons aussi noter, l'utilisation qu'en fait Anne Sédès dans sa pièce pour violoncelle et électronique *Immersion* et qui met en avant sa capacité à redonner un caractère ponctuel à un champ sonore diffus. Dans la pièce, le son du violoncelle est constamment transformé en champ diffus via l'utilisation de la synthèse granulaire que nous avons présentée précédemment. Afin de pouvoir varier les mouvements sonores dans l'espace, la compositrice utilise le traitement de type *fish-eye* afin de resserrer le champ

⁵⁶ Nous renvoyons le lecteur à l'évènement *Savante Banlieue* présenté précédemment.

⁵⁷ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

⁵⁸ Un ordre de décomposition inférieur diminue la qualité de restitution est un ordre supérieur n'augmente en aucun cas la qualité de restitution même si l'on discrétise le cercle avec plus de haut-parleurs que nécessaire.

sonore en un point et utilise l'objet *hoa.rotate~* comme un encodeur pour spatialiser la « source ponctuelle » créée par ce champ sonore resserré⁵⁹.

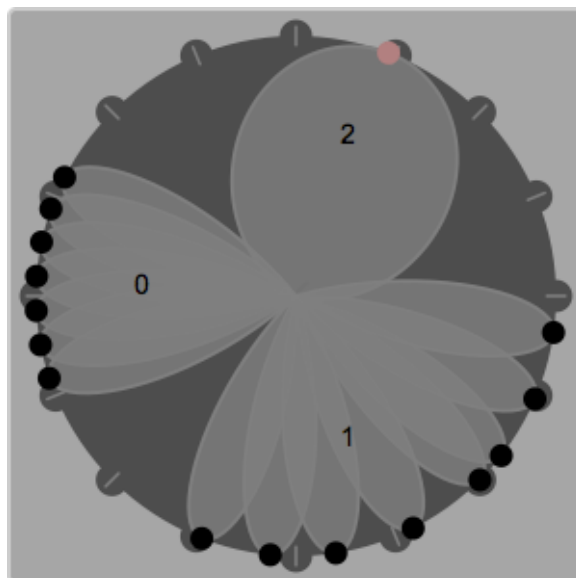


Figure 26 : Représentation des figures de directivité et des angles d'encodage des signaux dépendant des microphones virtuels lors d'un traitement de type *fisheye* sur les haut-parleurs compris entre 0 et π (0), lors d'un positionnement aléatoire (1) et lors d'une diminution de la résolution angulaire (0).

Cette représentation du champ sonore comme une somme d'ondes planes, nous offre la possibilité d'encoder ces ondes planes dans le domaine des harmoniques circulaires. La proposition que nous venons de présenter répond ici à un schéma précis restreint par une approche visant à resserrer ou élargir le champ sonore. Or, un compositeur pourrait envisager toutes sortes de mouvements. Avec la dernière version de la bibliothèque HOA, nous offrons la possibilité de définir de manière indépendante tous les angles d'encodage des signaux dépendant des microphones virtuels. Ce processus permet non seulement d'appliquer un traitement de type *fisheye* à l'ensemble du champ sonore mais aussi à une partie restreinte du champ sonore, en n'utilisant que les signaux dépendant des microphones virtuels correspondant à des angles allant de 0 à π par exemple (Figure 26 – 0). Nous pouvons encore envisager une distribution aléatoire des angles bouleversant complètement la restitution du champ sonore (Figure 26 – 1). Nous obtiendrions alors un champ sonore chaotique qui, bien que ne possédant pas les propriétés du champ diffus, n'en reste pas moins pertinent sur le plan musical et posséderait, là encore, la possibilité de se reformer en un champ sonore composé de sources ponctuelles si les angles d'encodage reviennent progressivement à leurs positions initiales. Enfin, comme nous considérons les signaux dépendant des microphones virtuels comme des sources sonores,

⁵⁹ Pour plus d'informations sur la pièce se référer à [Colafrancesco, 2012].

nous avons souhaité offrir aux musiciens la possibilité de contrôler la résolution angulaire de ces sources (Figure 26 – 2). Opération, qui nous le regrettons, n'a pas encore put être expérimentée mais dont nous supposons qu'elle permette de créer une sorte de «zoom » sur le champ sonore.

Le processus de décomposition en ondes plane offre un champ varié de traitements musicaux et il serait vain de vouloir les répertorier tant les possibilités offertes par les combinaisons des différents procédés ouvrent un large éventail de choix pour le musicien. Nous espérons que le temps fera ressurgir de nouvelles utilisations pertinentes tant sur l'aspect conceptuel que sur l'aspect perceptif. Nous proposons, à présent, de revenir, sur cet outil qu'est la réverbération.

2.2 LA REVERBERATION

Deux approches du champ sonore sont généralement proposées dans le domaine acoustique permettant de répondre à deux manières différentes d'envisager l'espace : la propagation en champ libre, c'est à dire sans contraintes, où l'espace est considéré de manière infinie sans parois ; et celle où l'espace est considéré de manière finie impliquant des phénomènes comme les réflexions, la diffraction ou encore l'absorption du milieu (problème dit aux limites) [Daniel, 2001]. Les propositions musicales offertes jusqu'à présent permettent de positionner et déplacer une source sonore dans un champ libre via l'encodage d'une source dans le domaine ambisonique. Nous avons suggéré l'utilisation d'un filtre passe-bas permettant de simuler l'absorption du milieu, tel que le propose Wakefield [Wakefield, 2006]. Nous souhaitons, à présent, offrir une réponse musicale à l'application des phénomènes de diffraction et de réflexions en ambisonie par la mise en œuvre de réverbérations dans le domaine des harmoniques circulaires.

2.2.1 L'APPROCHE

La réverbération est un outil essentiel de musicien, elle permet de donner une spécificité à l'espace sonore, de rajouter du « corps » au son et, comme nous l'avons sous-entendu dans le premier chapitre, de faciliter la localisation d'une source sonore dans l'espace. De nombreuses recherches ont été réalisées sur le sujet⁶⁰, cependant l'application d'un tel procédé dans le domaine lié à l'ambisonie est encore très peu développée. En somme, aucune mise en œuvre dans le domaine des harmoniques circulaires ou sphériques n'est aujourd'hui disponible pour le musicien⁶¹. Nous souhaitons alors revenir sur les quelques suggestions de mises en œuvre de réverbération liées à l'approche ambisonique et qui ont pu être présentées à ce jour afin de les critiquer et de pouvoir présenter de nouvelles mises en œuvre qui nous semblent, sur plusieurs aspects, pertinentes pour une utilisation musicale. En effet, bien que la simulation d'espace réverbérant soit principalement une affaire d'acousticiens, notre approche reste très orientée vers des réponses musicales, les propositions soumises peuvent ainsi volontairement prendre des libertés vis à vis d'un réalisme acoustique afin d'offrir un outil pertinent sur le plan artistique. Nous espérons, encore ici, que notre approche incitera

⁶⁰ Pour une très bonne présentation générale des techniques liées à la réverbération, le lecteur pourra se référer à [Smith, 2010] ainsi qu'à [Roads, 2001].

⁶¹ Notons à ce sujet, que la seule mise en œuvre de module de réverbération associé une spatialisation utilisant l'ambisonie à laquelle nous ayons pu avoir accès sous forme logiciel, appliquer une réverbération avant l'encodage ; pratique qui implique que la réverbération se déplace avec la source sonore ce qui est tout sauf naturel.

à de nouvelles recherches pour des applications musicales car il nous semble qu'il reste énormément de choses à découvrir sur l'adaptation des techniques de réverbération à l'ambisonie.

2.2.2 REVERBERATION ET ONDES PLANES

La première solution que nous souhaitons présenter est, somme toute, des plus évidentes dans le sens où elle consiste, au départ, à appliquer une réverbération sur les canaux des haut-parleurs. Cette proposition se base sur les usages « habituels » des musiciens où pour appliquer une réverbération à l'ensemble d'un champ sonore pour une restitution sur des systèmes standardisés (stéréophonique, 5.1, etc.), l'approche consiste en général à appliquer un module de réverbération à la fin de la chaîne de traitement. Les algorithmes qui sont utilisés sont d'ailleurs mis en œuvre pour ces systèmes de restitution (l'algorithme de réverbération *Freeverb*⁶², par exemple, a été élaboré pour une restitution stéréophonique) ou offrent la possibilité de s'adapter à ces configurations de haut-parleurs.

Pour la mise en œuvre dans le domaine ambisonique, prenons un cas concret, d'un champ sonore encodé à un ordre de décomposition 1. Ce champ sonore peut alors être restitué sur un cercle d'au minimum trois haut-parleurs, les usages habituels amènent en général à l'utilisation d'un système de type quadraphonie. Il s'agit alors d'appliquer pour chaque canal d'un haut-parleur, un module de réverbération adapté à la direction des haut-parleurs. Cette approche permet ainsi d'obtenir un champ sonore cohérent avec le type de réverbération appliqué. Cette approche est donc des plus acceptables sur le plan perceptif et musical car elle offre la possibilité de varier l'acoustique selon, dans notre cas, quatre directions. Cette possibilité est cependant très restreinte par les outils mis à notre disposition. En effet, dans le cas de notre champ sonore restitué pour quatre haut-parleurs, nous devons posséder un algorithme de réverbération adapté à ce type de restitution. Des mises en œuvre existent [Smith, 2010], bien sûr, mais ne sont pas très répandues comparé à des mises en œuvre pour des systèmes stéréophoniques ou 5.1. Notons d'ailleurs, à ce sujet, que les mises en œuvre pour le 5.1 ne répondent que difficilement à une adaptation pour de la quadraphonie, les usages ayant favorisé la scène frontale dans ce type de standards alors que notre approche plus générale ne veut, en aucun cas, favoriser de manière arbitraire une direction spécifique. Prenons le cas, à présent, d'une restitution pour huit ou seize haut-parleurs, les algorithmes de réverbération se font plus rares encore, voire inexistants. Tant bien même, ces algorithmes existeraient, il serait normal de souhaiter que l'on puisse appliquer une

⁶² Algorithme libre de droit développé par « Jazar at Dreampoint », pour plus d'information sur cette réverbération se référer à [Smith, 2010].

même réverbération pour différentes configurations de haut-parleurs. Nous souhaitons donc créer une réverbération qui s'adapte à de multiples configurations de haut-parleurs.

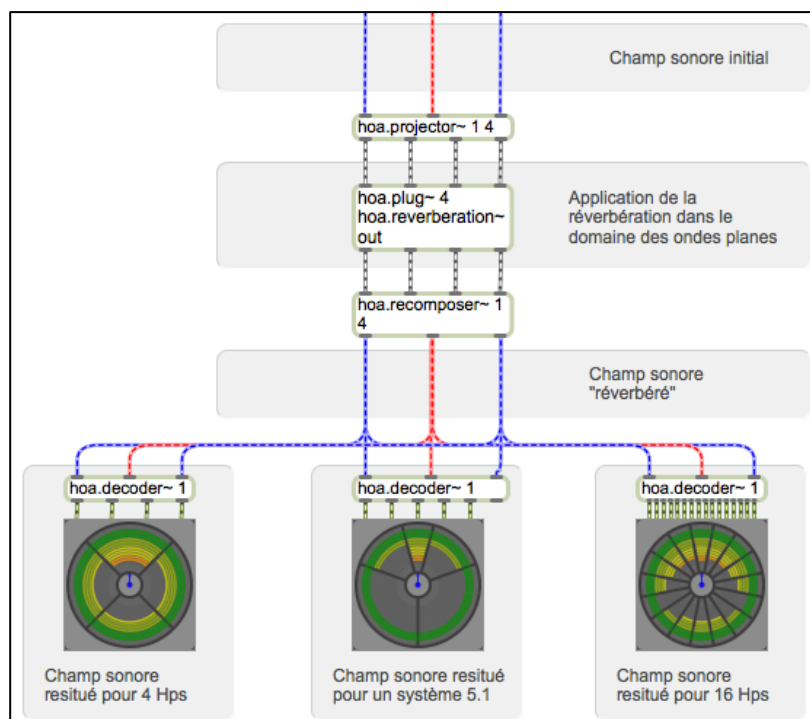


Figure 27 : Représentation du processus d'application de réverbération dans le domaine des ondes planes pour un ordre de décomposition 1.

Nous pouvons répondre à ce problème par l'application d'une réverbération dans le domaine des ondes planes telle que la présente Watson et Clark [Watson, 2010]. En effet, en mettant en œuvre les modules de réverbération sur les signaux dépendant des microphones virtuels, il est alors possible de recomposer le champ sonore réverbéré dans le domaine des harmoniques circulaires pour, par la suite, décoder le champ sonore sur une grande variété de configurations de haut-parleurs. Rappelons, en effet, qu'un système de restitution ambisonique n'est contraint que par un minimum de haut-parleurs⁶³ et, étant donné les possibilités de restitution pour des systèmes irréguliers, le système de restitution n'est en réalité restreint que par la limite de dégradation du champ sonore acceptée par le musicien⁶⁴ (Figure 27). Il faut alors noter que nous sommes, néanmoins, dans cette approche, contraints par l'ordre de décomposition. En effet, la projection du champ sonore doit être réalisée sur un nombre minimum de microphones virtuels. De manière concrète, l'utilisation d'une réverbération

⁶³ $2 * \text{ordre de décomposition} + 1$.

⁶⁴ Nous présentons dans le troisième chapitre le décodage associé à ce type de restitution et la dégradation du champ sonore qui en résulte.

adaptée pour quatre canaux nécessite de restreindre l'ordre de décomposition à 1. Nous retombons ainsi sur le problème de posséder un module de réverbération qui s'adapte à toutes les configurations régulières de haut-parleurs. Cette proposition ne pouvant être retenue car impliquant, entre autres, une perte de qualité de la résolution spatiale du champ sonore, nous avons décidé d'expérimenter l'utilisation de réponse impulsionnelle dans le domaine des harmoniques circulaires.

2.2.3 REPONSES IMPULSIONNELLES AMBISONIQUES

Dans sa thèse, Daniel propose d'utiliser des réponses impulsionnelles au format ambisonique car l'approche possède un réel avantage de réalisme acoustique : « Les réponses impulsionnelles ambisoniques qui pourraient être mesurées en un point donné, dans une salle et pour une source données, constituent en effet une représentation acoustique "réaliste", à la fois temporelle et spatiale, de l'effet de salle. Cette représentation [...] est facilement transmissible, et peut, par la suite être exploitée pour une écoute binaurale ou sur haut-parleurs. » [Daniel, 2001]. Le processus consiste donc, dans un premier temps à enregistrer au format ambisonique la réponse impulsionnelle d'une salle.

Un premier problème se pose dans cette approche de la réverbération. Il existe, en effet, des microphones ambisoniques d'ordre supérieur [Colafrancesco, 2011] [Farina et al, 2006] cependant ils ne sont que très peu répandus, et nous ne pouvons-nous permettre de demander au musicien l'acquisition d'un tel matériel pour l'utilisation de la bibliothèque HOA⁶⁵. Daniel note un problème du même ordre car en 2001, les réponses impulsionnelles ne peuvent encore être enregistrées au-delà d'un ordre de décomposition 1 dû à une lacune matériel. Afin de répondre à ce problème, il suggère l'utilisation d'un logiciel d'acoustique prévisionnel afin de synthétiser des réponses. Là encore, nous retombons dans un problème majeur, ce genre d'outil dépasse nos problématiques musicales. Nous avons ainsi décidé de mettre en œuvre un outil permettant à tous les musiciens l'enregistrement de réponses impulsionnelles dans le domaine des harmoniques circulaires.

Ainsi, afin de satisfaire à des exigences matérielles élémentaires, nous proposons un processus qui peut être réalisé via seulement un microphone cardioïde et un haut-parleur. Notons, dès à présent, que cette démarche n'a pas été retenue, nous allons en voir les raisons, mais il semble nécessaire de

⁶⁵ Nous ne possédons pas nous ce type de matériel et créer un banque de réponse impulsionnelle au format ambisonique sort de notre problématique dans ce travail de recherche.

présenter cette approche qui est à la base des démarches suivantes. L'opération consiste, dans un premier temps, à obtenir un nombre fini de réponses impulsionnelles correspondant à la discrétisation d'un cercle ambisonique par des points équidistants (discrétisation présentée dans le chapitre se référant aux ondes planes)⁶⁶. Par la suite, il faut recomposer les réponses dans le domaine des harmoniques circulaires grâce à une opération similaire au processus de recombinaison des ondes planes dans le domaine des harmoniques circulaires. Cette opération était facilitée par l'objet *hoa.irconverter*⁶⁷ mis en œuvre dans la bibliothèque Max/MSP. L'enjeu consiste alors à appliquer une convolution entre les réponses impulsionnelles au format ambisonique et les signaux dépendant des harmoniques circulaire ; cette opération est disponible via l'objet *hoa.convolve*⁶⁸.

La bibliothèque Hoa a pour vocation d'offrir un ensemble de traitements audionumériques dans le domaine des harmoniques circulaires contraint par les spécificités liées au temps réel. Il est donc nécessaire d'offrir à l'utilisateur des traitements sonores peu coûteux en matière de calculs et possédant un temps de latence négligeable. Parce qu'il répond à cette exigence, l'algorithme de réverbération par convolution proposé par Gardner [Gardner, 1993] semble le plus adéquat. Afin de permettre au lecteur la compréhension de l'approche proposée de la réverbération par convolution dans le domaine des harmoniques circulaires, il semble important de revenir sur les fondements de l'algorithme de Gardner et sur sa mise en œuvre qui, bien que hors de ce domaine, n'en reste pas moins à la base des processus qui seront, par la suite, mis en lumière.

La convolution sans latence proposée par Gardner est une méthode hybride combinant à la fois des convolutions directes et des convolutions dans le domaine fréquentiel. Les convolutions via FFT possèdent l'avantage d'être très peu coûteuses en CPU en comparaison avec une convolution directe et cet avantage s'accroît de manière significative lorsque la taille des fenêtres augmente. Cependant, le passage dans le domaine fréquentiel implique de la latence liée au temps nécessaire à l'obtention des échantillons qui croît donc avec la taille de fenêtrage. L'approche présentée par Gardner permet de tirer parti de la faible demande en ressources des convolutions dans le domaine fréquentiel et de l'absence de latence des convolutions appliquées dans le domaine temporel. La réponse impulsionnelle est partitionnée en une série de blocs de différentes tailles. Le premier bloc est destiné à une convolution directe et permet ainsi d'obtenir les premiers échantillons du signal convolué sans latence, sa taille doit être définie afin d'être relativement peu coûteuse au regard d'une opération

⁶⁶ L'enregistrement de réponses impulsionnelles ne peut être traité ici, de multiples tutoriels peuvent être sur internet. Nous conseillons la lecture de l'aide de *Impulse Response Utility* développé par Apple.

⁶⁷ L'objet n'est plus disponible étant donné que la démarche n'a pas été retenue.

⁶⁸ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

similaire dans le domaine fréquentiel. Les blocs suivant sont destinés à une convolution dans le domaine fréquentiel et sont de tailles croissantes de telle sorte que tous les deux blocs, la taille des blocs est multipliée par deux. Ainsi, le temps nécessaire à l'obtention des échantillons pour appliquer une FFT à un bloc est égal au temps de délai à appliquer au signal convolué. Cette approche offre une convolution où le temps nécessaire à chaque processus est optimisé afin d'éviter toute latence, tout en permettant une utilisation minimale des ressources du processeur au regard du résultat escompté. En rappelant que la demande en CPU d'une convolution dans le domaine fréquentiel croît de manière logarithmique en fonction de la taille des fenêtres de FFT, une telle approche offre une optimisation croissante lorsque la taille des réponses impulsionnelles augmente, permettant ainsi d'appliquer des réverbérations de plusieurs secondes.

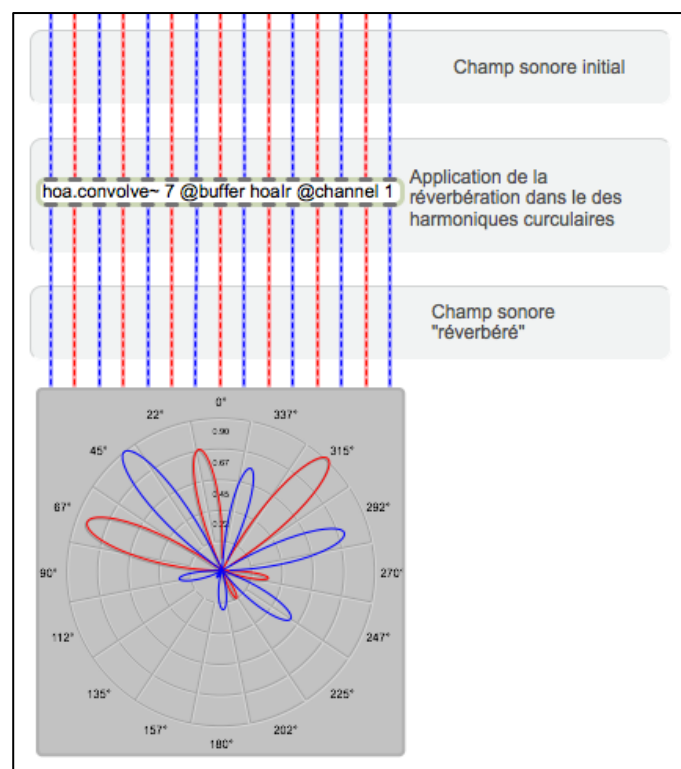


Figure 28 : Représentation du processus d'application de la réverbération par convolution dans le domaine des harmoniques circulaires.

Revenons, à présent, à l'application de la convolution. Il est, dans un premier temps, possible de mettre en valeur l'avantage principal d'une telle approche dans le domaine des harmoniques circulaires. Bien que peu coûteuse vis à vis des processus mis en jeu, appliquer une réverbération par convolution reste néanmoins une opération importante pour des ordinateurs personnels surtout lors des calculs de plusieurs convolutions parallèles [Battenberg et al, 2011]. Appliquer la convolution

directement sur les signaux dépendant des harmoniques circulaires permet de garder un nombre d'opérations fixes, quelle que soit le système de restitution utilisé (Figure 28).

Cependant, à des ordres élevés, le nombre de calculs mis en jeu devient trop important pour une utilisation en temps réel. Or, il nous semble que nous pouvons encore tirer profit de l'algorithme de Gardner en utilisant le découpage des réponses impulsionnelles. Les premières réflexions sont généralement omnidirectionnelles et l'harmonique de l'ordre 0 possède la même propriété. Soulignons à présent que la scission de la réponse impulsionnelle en plusieurs blocs peut, selon la taille des blocs, être mise en relation avec le découpage perceptif d'une réverbération entre premières réflexions et sons diffus. En partant de cette constatation, il peut être envisagé de n'appliquer la convolution directe qui correspond aux premières réflexions qu'au signal dépendant de l'harmonique 0. En extrapolant ce processus, nous pouvons soumettre l'hypothèse que plus l'ordre des harmoniques augmente, moins il devient nécessaire d'appliquer les premières parties des réponses impulsionnelles. Ainsi, plus l'ordre dont dépend une harmonique augmente, plus la convolution sera restreinte aux queues des réponses impulsionnelles. Non seulement nous diminuons le nombre de convolutions dans le domaine temporel, mais aussi dans le domaine fréquentiel et de manière significative. La mise en œuvre de ce processus nous a donc permis d'avoir accès à des ordres supérieurs et de pouvoir commencer à expérimenter cette implémentation en étant assuré du fonctionnement de ce genre d'outil sur une grande majorité des ordinateurs personnels. Nous pouvons, à présent, proposer une approche critique de ce type de méthode.

Autant l'utilisation de réponses impulsionnelles à un ordre de décomposition 1 nous semble correspondre à un certain réalisme perceptif, autant la mise en œuvre à des ordres supérieurs nous semble engendrer de nombreux artefacts. En effet, en utilisant la réponse acoustique d'un espace décomposé en seize enregistrements et encodé dans le domaine des harmoniques circulaires à un ordre de décomposition 7, nous avons remarqué de nombreux filtrages non désirables dans les basses fréquences et une déformation de l'espace telle, qu'une source encodée ne pouvait plus être clairement perçue ponctuellement. Nous avons alors comparé cette mise en œuvre avec une mise en œuvre dans le domaine des ondes planes et nous avons pu déduire certaines causes de ces artefacts. La mise en œuvre dans les ondes planes n'engendre pas de filtrages autres que ceux liés à l'acoustique de la salle. Cela implique que notre encodage dans le domaine des harmoniques circulaires et le processus de troncation des réponses impulsionnelles dégradent l'application de la réverbération. Il nous faudrait un peu plus d'expérimentations pour déterminer avec précision comment chaque processus influence le résultat perceptif. Enfin, l'application de la réverbération dans le domaine des ondes planes possède

aussi une déformation de la réverbération acoustique. C'est donc que l'enregistrement des réponses impulsionnelles est aussi la cause de cette déformation spatiale.

Nous avons enregistré ces réponses impulsionnelles en respectant les angles de prise de son, sans pour autant, notons-le, se positionner dans une approche aussi précise que celle que pourrait avoir un technicien de studio ou un acousticien. Il semble que nous ayons réalisé un certain nombre d'erreurs⁶⁹ dans la création de certaines des seize réponses impulsionnelles. En outre, ce processus nécessite un matériel adapté comme le propose Zotkin et Duraiswami [Zotkin et al, 2009] et ne peut se faire d'une méthode si élémentaire. Plutôt que de poursuivre dans cette voie, il nous a paru évident qu'un tel processus n'est en aucun cas réalisable par le musicien et que cette démarche est mauvaise sur de nombreux aspects. L'enregistrement d'autant de réponses est fortement sujet aux erreurs, d'autant plus que les processus sont longs à mettre en œuvre. Il nous a paru, dès lors, nécessaire de mettre en œuvre une approche plus simple pour le musicien et de recentrer notre démarche vers une application plus musicale et accessible.

2.2.4 UTILISATION D'UN MODULE DE DIFFUSION

Notre démarche a consisté dans un premier temps à réutiliser, notre outil de réverbération par convolution dans le domaine des harmoniques circulaires en appliquant la même réponse impulsionnelle à l'ensemble des signaux dépendant des harmoniques circulaires. Le champ sonore ainsi transformé possède la même caractéristique acoustique en tout point de la salle. Notons alors que cette approche, bien que non conforme à un réalisme acoustique, est en réalité déjà très pertinente pour une application musicale. Cette application, très simple, offre ainsi la possibilité au musicien d'appliquer toutes les réponses impulsionnelles auxquelles il a accès⁷⁰. Cette approche possède néanmoins un inconvénient. En effet, il ne lui est plus possible de modifier les réponses impulsionnelles afin d'avoir accès à une modification ponctuelle de l'espace tel que « raccourcir l'espace » à l'arrière d'un champ sonore - il serait intéressant de procéder à des recherches afin de voir si de telles applications sont néanmoins possibles dans le domaine des harmoniques circulaires.

⁶⁹ Haut-parleur mal dirigé, mauvaise déconvolution, etc. les possibilités sont multiples.

⁷⁰ Internet foisonne de réponses impulsionnelles libres de droit.

Le domaine des harmoniques circulaires offre cependant d'autres paramètres plus simples à mettre en œuvre mais tout aussi pertinents à explorer. Daniel ne se limite pas à proposer dans son application de la réverbération dans le domaine ambisonique une simple convolution, il propose d'ajouter au champ sonore un module de champ diffus par modélisation statistique [Daniel, 2001]. Son modèle de synthèse d'acoustique virtuelle lui permet de synthétiser le front d'onde et les premières réflexions d'un champ sonore réverbérant pour une source ponctuelle et il rajoute à cela un module permettant de synthétiser les réflexions tardives via la synthèse d'un champ diffus [Daniel et al, 2003].

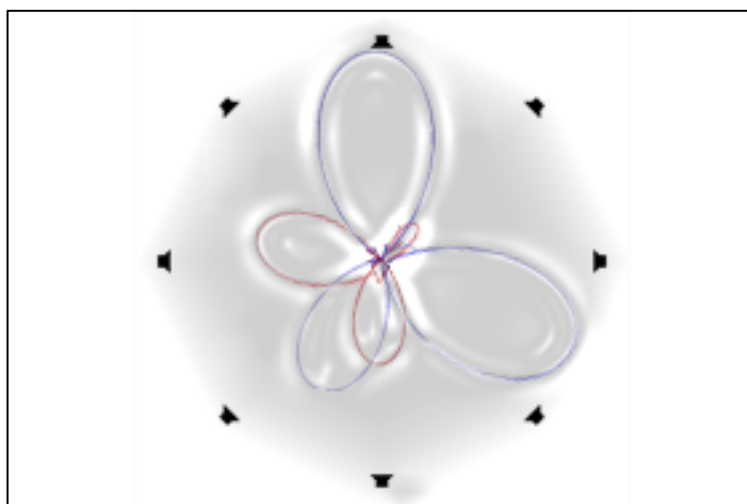


Figure 29 : Représentation imaginaire de l'application d'une réverbération par convolution et avec un module de diffusion par décorrélation sur un champ sonore.

Or, lors de la mise en œuvre de notre réverbération aux signaux dépendant des harmoniques circulaires, nous appliquons d'une certaine manière l'ensemble de ces caractéristiques acoustiques à ce signal. La différence réside dans le fait que nous appliquons une même et unique réponse impulsionnelle à l'ensemble des signaux, ce qui empêche, notamment, l'apparition du caractère diffus dans notre champ sonore. Toutes nos réponses impulsionnelles étant corrélées, nous ne possédons que les informations qui proviennent de notre source sonore et qui correspondent aux premières réflexions. Nous perdons ainsi l'ensemble des informations qui proviennent d'une autre direction et qui correspondent aux dernières réflexions définies par un champ diffus [Smith, 2007a]. Il nous faut alors rajouter un champ diffus à notre champ sonore pour retrouver une vraisemblance d'espace réverbérant. La mise en œuvre que propose Daniel tente de recréer le champ diffus « idéal ». Or, par notre approche musicale, il nous a semblé pertinent d'orienter de nouveau notre approche vers une

conception du champ diffus plus éloignée des problématiques d’acousticien afin que ce traitement devienne un « vrai paramètre de jeu ».

Notre approche propose donc de mettre en œuvre un champ diffus par décorrélation temporelle qui permet en même temps de se rapprocher d’un certain réalisme acoustique. En effet, il semble nécessaire que la mise en œuvre offre un rendu sonore qui puisse se confondre avec la réverbération. Ainsi l’utilisation de la synthèse granulaire ou de la modulation d’amplitude ne semble pas adaptée à la simulation du champ diffus d’un espace réverbérant. Les principes sous-jacents à la mise en œuvre de la décorrélation restent dans l’ensemble les mêmes que lors de la mise en œuvre d’un champ diffus par modulation d’amplitude⁷¹. Nous obtenons ainsi un facteur permettant de mettre plus ou moins en valeur le champ diffus et offrant la possibilité de créer un espace réverbérant surréaliste (Figure 29), sans champ diffus ou avec un champ diffus « exagéré».

2.2.5 PERSPECTIVES

Nous pouvons, entrevoir de nombreuses possibilités de champ diffus possédant des caractéristiques sonores qui sont suffisamment proches d’une certaine réalité acoustique pour pouvoir se fondre avec une réverbération et en même temps offrir un aspect musical pertinent. Nous avons expérimenté la mise en œuvre d’une série de filtres passe-bande associée à la réverbération. Cette expérience réalisée, pour le moment, à un ordre de décomposition 7 fut des plus fructueuses et une mise en œuvre permettant l’adaptation à tous les ordres devrait rapidement voir le jour. Il est aussi possible, d’extrapoler ce processus à d’autres algorithmes de réverbération. Nous proposons déjà les algorithmes de Freeverb et Gigaverb disponibles via les objets *hoa.freeverb~* et *hoa.gigaverb~*. Algorithmes qui, comme nous l’avons signalé, ont été créés pour de la stéréophonie et sur lesquels par des procédés quelque peu similaires, nous nous sommes appliqués à trouver un moyen d’adaptation au domaine des harmoniques circulaires. Bien qu’étant déjà intéressant pour une application musicale, le travail associé à ces mises en œuvre est encore sujet à des modifications.

⁷¹ Nous invitons le lecteur à se référer à mise en œuvre dans le logiciel Max/MSP sous la forme du patch *hoa.decorrelation~* afin d’éviter une redondance de nos propos.

Il semble que par ces derniers outils, il soit donné aux musiciens la possibilité de créer des champs sonores aux couleurs et morphologies aussi variées que sans limites. Nous espérons, grâce à eux, voir et entendre se réaliser de nouvelles œuvres. Mais pour cela faut-il encore que les champs sonores restitués soient à la hauteur des espérances artistiques des musiciens. C'est donc afin de satisfaire à une qualité sonore nécessaire que nous revenons à présent sur les outils de restitution ambisonique.

3 LA RESTITUTION DU CHAMP SONORE

Nous venons de présenter les deux champs d'étude musicaux majeurs liés aux techniques ambisoniques. Il était alors question d'outils permettant de répondre aux besoins créatifs du musicien. Cependant, l'ensemble des procédés que nous avons soumis au lecteur n'appartient qu'au domaine des idées tant que les champs sonores composés ne sont pas restitués. Or, la restitution du champ sonore fait elle aussi appel à de nombreuses opérations complexes et difficiles à appréhender pour un musicien. Les usages ont généralement tendance à rendre opaques certaines étapes des processus de spatialisation afin d'offrir au musicien des outils simples à utiliser⁷² et cela se justifie par les possibilités offertes par ces outils. Si notre approche ne consistait qu'à mettre une source sonore ponctuelle dans l'espace, nous aurions sûrement adopté la même approche. Cependant, nous souhaitons justement offrir aux musiciens la possibilité de prendre en main, de moduler, de jouer avec les harmoniques. Il résulte de ce choix de nombreuses possibilités musicales qui ne répondent pas aux mêmes techniques de restitution du champ sonore. Il est donc nécessaire de notre part, d'offrir aux musiciens les outils flexibles lui permettant d'adapter le processus de restitution du champ sonore en fonction de ses considérations créatives et du système de restitution qu'il a en sa possession. Ce processus de restitution consiste en deux étapes : l'application d'optimisations et le décodage. Ces applications ayant été formalisées pour des approches de l'ambisonie ne répondant pas à nos contraintes, il nous importait de nous les approprier et de les modifier afin qu'elles répondent à nos problématiques. L'enjeu dans ces chapitres est de présenter les choix que nous avons faits et les mises en œuvre qui en résultent afin que le musicien puisse les prendre en main. Nous reviendrons ainsi, dans un premier temps sur les optimisations afin de pouvoir adapter la restitution aux champs sonores composés. Par la suite, nous présenterons les techniques de décodage afin de pouvoir tirer le meilleur parti des systèmes de restitution.

⁷² Les outils basés sur les techniques de « *panning* » d'amplitude ou certaines bibliothèques ambisoniques, prenons en exemple les objet Max/MSP *vbapan~* et *ambipan~* développés au CICM.

3.1 LES OPTIMISATIONS

En ambisonie, le processus permettant de restituer un champ sonore encodé dans le domaine des harmoniques circulaires pour un ensemble de haut-parleurs est l'opération de décodage. Seulement, la mise en œuvre du processus de décodage semble dans certains cas opérer de nombreux artefacts en fonction du champ sonore synthétisé et de la position de l'auditoire. Ainsi, le champ sonore nécessite par moments l'application d'optimisations afin d'offrir à l'auditeur une restitution convenable. A travers ce chapitre, nous présenterons donc dans un premier temps l'opération de décodage afin de comprendre d'où proviennent ces artefacts. Par la suite, nous étudierons les différentes optimisations proposées dans la littérature et les situations pour lesquelles elles doivent être appliquées. Enfin, nous présenterons le cas concret, de l'utilisation d'optimisations en fonction des champs sonores synthétisés, du système de restitution et du positionnement de l'auditoire à travers une présentation de l'installation réalisée dans le cadre des JIM 2013⁷³.

3.1.1 LE DECODAGE AMBISONIQUE

Comme nous l'avons sous-entendu dans le chapitre traitant de la décomposition du champ sonore en ondes planes, le décodage ambisonique consiste en une projection du champ sonore représenté dans le domaine des harmoniques circulaires pour un ensemble de haut-parleurs. L'ambisonie permet de restituer un champ sonore en un point donné : le centre du cercle de haut-parleurs. L'opération de décodage consiste alors à créer les signaux qui alimenteront les haut-parleurs pour une restitution « idéale » du champ en ce point [Gerzon, 1974].

⁷³ Les journées d'informatique musicales. Le lecteur pourra se référer aux sites internet : <http://www.mshparisnord.fr/JIM2013/> et <http://www.afim-asso.org/> ainsi qu'à la section projet du site internet de la bibliothèque HOA : <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/projets/>.

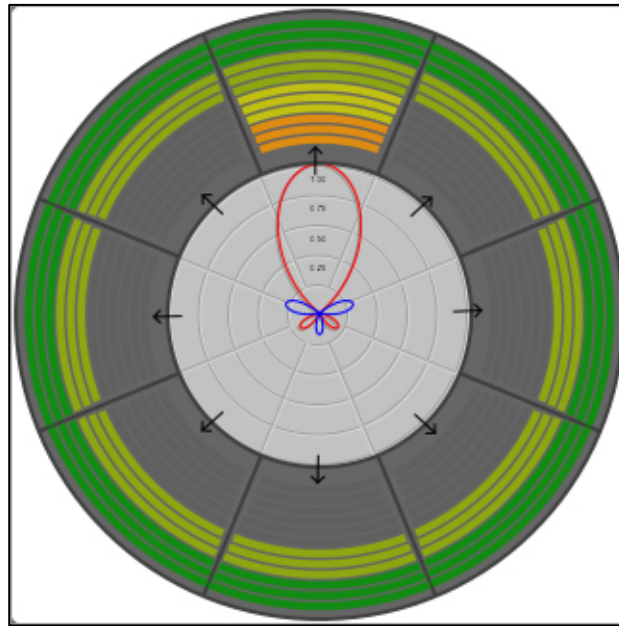


Figure 30 : Représentation de la projection d'un champ sonore synthétisé pour un ordre de décomposition 3 vers huit haut-parleurs.

Afin de préciser ce processus pour des oreilles de mélomane, considérons un champ sonore constitué d'une source sonore encodé à 0 degré à un ordre de décomposition 3. Une représentation de la scène sonore sur un plan en deux dimensions, nous offre une représentation de la somme des contributions des harmoniques sur l'ensemble du cercle. Nous obtenons une figure composée en l'occurrence de six lobes dont un, particulièrement proéminent, dirigé vers 0 degré. Notons alors que la représentation du champ sonore affiche moins de lobes que le champ sonore n'en possède réellement. En effet, les contributions peuvent être positives, négatives et nulles, comme nous l'avons mis évidence lors de la présentation de l'encodage dans le domaine des harmoniques circulaires. En un point de l'espace, les contributions vont alors, par leur somme, accentuer, diminuer ou annuler la contribution générale du champ sonore en ce point. Le processus de discrétisation de la sphère, nous permet alors de projeter les contributions du champ sonore correspondant à l'angle d'incidence d'un haut-parleur sur ce haut-parleur (Figure 30). Dans notre exemple, les signaux dépendant des harmoniques circulaires sont tous corrélés étant donné que le champ sonore n'est composé que d'une même source sonore. Le processus revient dans ce cas particulier, à envoyer le signal de la source sonore dans tous les haut-parleurs et à appliquer à chaque haut-parleur un gain correspondant à la distance entre le centre du cercle et le point de la contribution générale du champ sonore correspondant à l'angle d'incidence du haut-parleur.

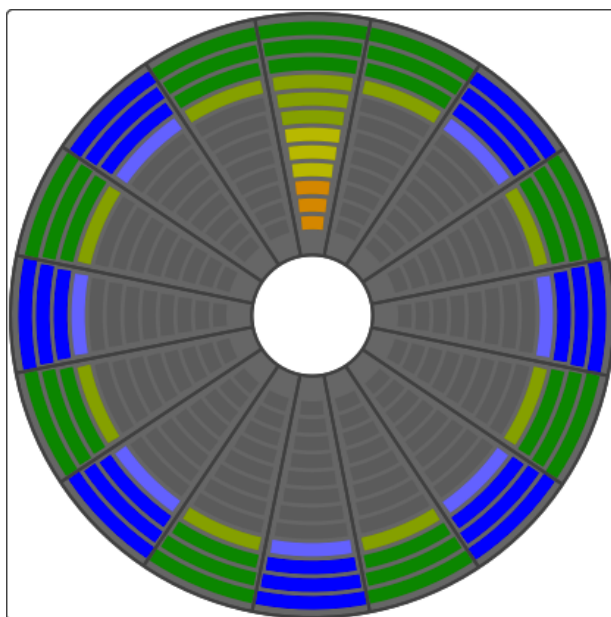


Figure 31 : Représentation des contributions de seize haut-parleurs placés sur un cercle à égale distance les uns des autres pour une source virtuelle encodée à 0 degré pour un ordre de décomposition 7. En vert, les signaux en phase et en bleu, les signaux en opposition de phase.

Nous pouvons alors remarquer que les haut-parleurs opposés à une source sonore virtuelle participent de manière non négligeable à la restitution de cette source sonore. En effet, c'est grâce à une contribution de l'ensemble des haut-parleurs et un « jeu » sur la phase des signaux que la restitution d'une source sonore virtuelle reste homogène quelle que soit la position de la source sur le cercle (Figure 31) (ces inversions de phase sont en relation avec la polarité des lobes de la représentation du champ sonore sur un plan à deux dimensions). En cela réside la restriction du nombre de haut-parleurs et leurs positionnements autour du cercle. Une discrétisation imparfaite du cercle ambisonique empêcherait, en effet, de recréer ce jeu de contribution⁷⁴. Nous pouvons alors identifier le désavantage majeur du décodage ambisonique : la restitution du champ sonore n'est valable qu'au centre du cercle de haut-parleurs. Selon l'approche acoustique, même pour un auditeur idéalement placé au centre du cercle, la restitution du champ sonore n'est pas valable car comme le souligne Daniel : « la tête (de l'auditeur, avec ses oreilles) est un "instrument de mesure" volumineux qui perturbe fortement le champ sonore, et qui ne peut pas se suffire, du moins à l'échelle des petites longueurs d'onde (hautes fréquences), de la reproduction locale de caractéristiques locales du champ » [Daniel, 2001]. Il souligne alors que, ne pouvant offrir une restitution exacte du champ sonore pour un auditeur, il faille tirer partie des informations spatiales que nous possédons afin de recréer un champ sonore valable sur le plan perceptif. Cet ensemble de procédés permettant d'offrir une restitution du

⁷⁴ Notons à ce sujet qu'un dispositif possédant un nombre supérieur de haut-parleurs que l'ordre de décomposition l'exige n'améliore pas pour autant la résolution spatiale mais « consolide » la restitution sonore au centre du cercle. Pour plus d'information se référer à Daniel, 2001].

champ sonore pour un auditoire est développé par Gerzon [Gerzon, 1992] dans un premier temps puis par Malham [Malham, 1992], Daniel lui donne le nom de décodage « psychoacoustique » car basant le décodage ambisonique sur certains aspect subjectifs liés à notre perception [Daniel, 2001]. Ces procédés passent ainsi par l'utilisation d'optimisations du champ sonore sur lesquels nous allons revenir à présent.

3.1.2 LES TYPES D'OPTIMISATION

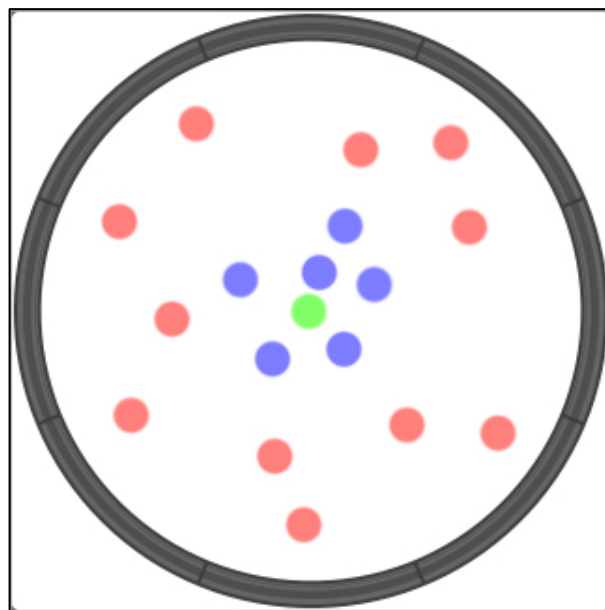


Figure 32 : Représentation des trois configurations de l'auditoire, un auditeur idéalement centré (en vert), un auditoire limité et confiné au centre du cercle (en bleu) et un auditoire étendu réparti dans l'ensemble du cercle (en rouge).

Revenons à un exemple pratique et considérons un point d'écoute excentré, la perception des contributions respectives de chaque haut-parleur est encore plus faussée que pour une position d'écoute centrée. Cela est dû à l'augmentation perçue de l'énergie des haut-parleurs proches de l'auditeur et à la diminution de ceux éloignés, ceci est lié notamment aux distances différentes qui séparent l'auditeur de chaque haut-parleur. Il devient alors difficile de localiser clairement la position d'une source sonore virtuelle. De plus, cette impression est accentuée par la perception asynchrone des différentes contributions des haut-parleurs. En outre, l'auditeur perçoit une pulsation non-souhaitée lorsque la source se déplace autour du cercle. Considérons encore le cas répandu d'un système de restitution non-optimal (un système de restitution hémicirculaire par exemple) ; les oppositions de

phases liées à la polarité de chaque contribution et les « trous » dans le système de restitution déforment le champ sonore et font apparaître de nombreux artefacts. Selon Daniel, nous pouvons définir trois figures typiques d'auditoires auxquels nous pouvons associer trois optimisations. Ces configurations de l'auditoire sont un auditeur idéalement centré, un auditoire limité et confiné au centre du cercle et un auditoire étendu réparti dans l'ensemble du cercle, pouvant à priori se situer à l'extérieur du cercle [Daniel, 2001] (Figure 32). Ces optimisations peuvent aussi permettre une restitution pour des configurations irrégulières de haut-parleurs, nous reviendrons plus précisément sur le sujet dans le chapitre suivant.

Un décodage ambisonique sans optimisation est qualifié de « basic ». Gerzon propose une « optimisation » du champ sonore dit « maxRe » [Gerzon, 1992] qui offre plus de liberté quant au positionnement de l'auditoire et Malham [Malham, 1992] propose une optimisation « inPhase » efficace dans des conditions d'écoute très critiques et pour des systèmes de restitution irréguliers. Nous revenons sur ces opérations, afin de clarifier pour le musicien les optimisations à appliquer au champ sonore en fonction de la configuration de l'auditoire disponible via l'objet *hoa.optim*⁷⁵ de la mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA.

3.1.2.1 BASIC

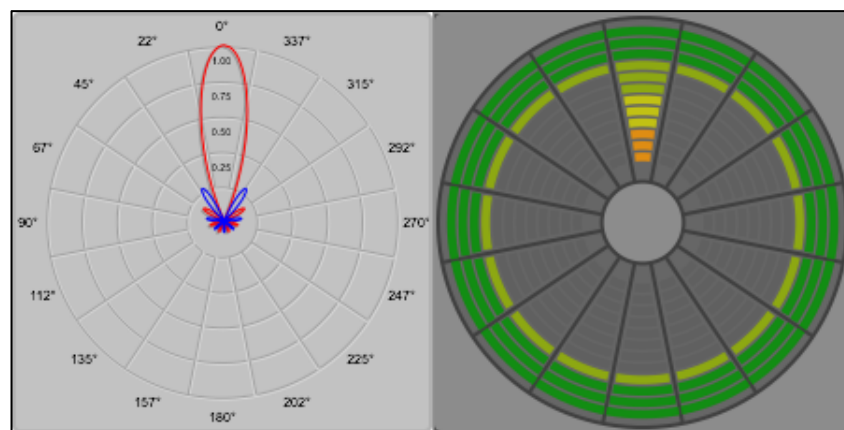


Figure 33 : Représentation du champ sonore sans optimisation dans le domaine de harmoniques circulaires (à gauche) et des contributions de seize haut-parleurs après le décodage de ce champ sonore.

⁷⁵ Le lecteur pourra se référer au fichier d'aide disponible dans l'implémentation Max/MSP de la bibliothèque HOA.

L'optimisation « basic » n'opère donc aucune opération sur le champ sonore (Figure 33), elle est donc théoriquement valable pour un auditeur idéalement placé au centre du système de haut-parleurs bien que, comme nous l'avons souligné, il semble nécessaire d'appliquer un décodage dit « psychoacoustique ». Notons encore, que le système de restitution doit être composé d'une série de haut-parleurs également répartis sur un cercle pour une restitution en deux dimensions (ou l'un cinq solides de Platon [Colafrancesco, 2011] pour une restitution en trois dimensions).

3.1.2.2 MAXRE

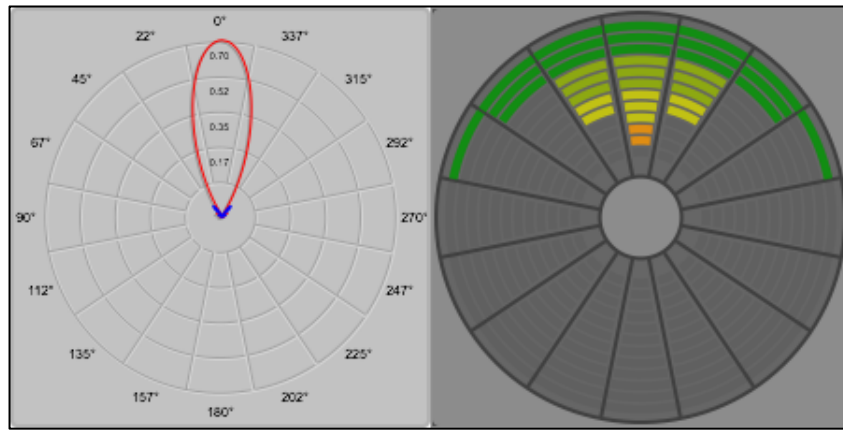


Figure 34 : Représentation du champ sonore avec une optimisation dit « maxRe » dans le domaine des harmoniques circulaires (à gauche) et des contributions de seize haut-parleurs après le décodage de ce champ sonore

L'optimisation « maxRe » permet une meilleure restitution du champ sonore pour des positions d'écoute excentrées (en vert sur la Figure 32) en augmentant les contributions énergétiques des haut-parleurs proches des sources virtuels [Gerzon, 1992] (Figure 34). Les optimisations sont des gains appliqués aux signaux dépendant des harmoniques circulaires en fonction des indices de celles-ci et de l'ordre de décomposition. C'est en réalité un cas particulier des ordres fractionnaires permettant de réduire les lobes opposés aux sources sonores et donc de concentrer l'énergie. L'optimisation « maxRe » est définie par

$$g(i) = \cos \left(n_i \frac{\pi}{2N + 2} \right)$$

où g est le gain dépendant d'une harmonique, i l'indice de l'harmonique, n_i l'ordre auquel appartient l'harmonique d'indice i et N l'ordre de décomposition.

3.1.2.3 INPHASE

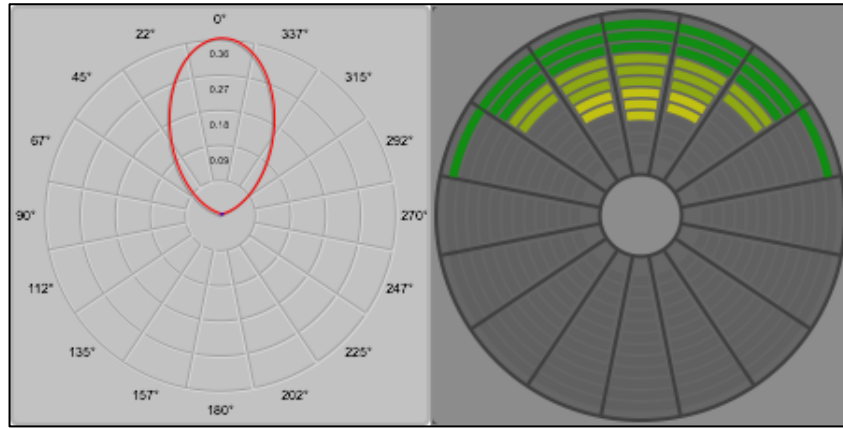


Figure 35 : Représentation du champ sonore avec une optimisation dit « inPhase » dans le domaine des harmoniques circulaires (à gauche) et des contributions de seize haut-parleurs après le décodage de ce champ sonore.

L'optimisation « inPhase » permet de répondre à la situation critique où l'auditoire se trouve extrêmement proche ou même à l'extérieur du cercle de haut-parleurs [Malham, 1992]. Il permet de mettre l'ensemble des signaux des haut-parleurs en phase et de complètement annuler les contributions des haut-parleurs opposés aux sources sonores (Figure 35). L'optimisation « inPhase » permet de recréer un signal cohérent pour des positions d'écoutes critiques. C'est encore un cas particulier des ordres fractionnaires qui consiste à appliquer des gains aux signaux dépendant des harmoniques circulaires définis par

$$g(i) = \frac{N!^2}{(N + n_i)! (N - n_i)!}$$

où g le gain dépendant d'une harmonique, i l'indice de l'harmonique, n_i l'ordre auquel appartient l'harmonique d'indice i et N l'ordre de décomposition.

3.1.2.4 ASPECTS GENERAUX

Notons donc que les optimisations consistent, de manière générale, à diminuer les contributions des lobes des harmoniques opposés à la source sonore virtuelle. Cependant alors que la disposition de l'auditoire devient moins contraignante, la précision angulaire diminue de manière probante (Figure 4, 5 et 6). Il peut paraître envisageable de réaliser ainsi un compromis entre la résolution angulaire et les contraintes liées à la disposition de l'auditoire. Cependant, dans bien des cas, il est préférable de favoriser l'utilisation d'optimisations, les artefacts liés à la restitution sonore pouvant être plus critiques que ceux liés à l'optimisation. Il peut, dès lors, paraître superflu d'utiliser l'optimisation « basic » au profit d'une optimisation « inPhase », nous verrons néanmoins que selon les champs sonores utilisés, il est en réalité préférable d'utiliser l'optimisation « basic ». Notons encore que la restitution binaurale⁷⁶ permet de simuler cette position où l'auditeur ne serait qu'un point au centre du cercle de haut-parleur. C'est pourquoi, nous recommandons vivement d'utiliser un décodage « basic » dans le cas d'une restitution au casque.

Le décodage « psychoacoustique » est une optimisation hybride utilisant plusieurs optimisations qui, dans un premier temps, sont appliquées afin de permettre à un auditeur idéalement placé au centre du cercle d'avoir une représentation « optimale »⁷⁷ du champ sonore. Nous avons signalé que l'artefact principal pour cet auditeur apparaît dans les hautes fréquences. Le principe consiste alors à séparer le champ sonore entre basses et hautes fréquences, de laisser les basses fréquences sans optimisations et d'appliquer une optimisation « maxRe » dans les hautes fréquences. Ce processus hybride peut être élargi afin de satisfaire toutes les possibilités d'auditoires intermédiaires à celles que nous avons présenté. Pour une approche musicale, où le placement de l'auditoire peut ne pas être connue à l'avance ou sensiblement varier entre deux représentations ou bien pendant une représentation, les trois optimisations présentées semblent satisfaire à nos exigences. En ce sens, il ne nous a pas semblé souhaitable de mettre en œuvre ce procédé. Pour plus d'information à ce sujet le lecteur peut se référer à [Daniel, 2001].

Daniel utilise les appellations « basic », « maxRe » et « inPhase » pour parler du décodage, le lecteur pourra noter que nous préférons utiliser ces termes pour définir un processus d'optimisation qui n'est pas forcément directement associé au décodage. En effet, nous ne considérons pas le champ sonore comme « unique » au moment du décodage, il peut être composé de plusieurs champs sonores,

⁷⁶ Nous revenons par la suite sur ce procédé de restitution pour le casque.

⁷⁷ Le point de vue est, ici, subjectif.

l'un composé de sources ponctuelles, l'autre étant par exemple un champ diffus. Comme nous l'avons suggéré, il est préférable d'appliquer différentes optimisations qui varient selon les caractéristiques du champ ; ainsi il est nécessaire de séparer le processus d'optimisation du processus de décodage. Enfin, nous rappelons qu'appliquer une optimisation consiste à appliquer des gains ; cela nous permet, dans la plupart des cas, d'utiliser les optimisations à n'importe quel endroit de la chaîne de traitement entre la synthèse et le décodage. Nous présentons, à présent, comment il nous semble préférable d'appliquer les optimisations en fonction des champs sonores dans l'exemple concret de la représentation des JIM 2013.

3.1.3 CHAMPS SONORES ET OPTIMISATIONS



Figure 36 : Installation sonore des JIM 2013 composée de seize haut-parleurs disposés à égale distance sur un cercle.

Lors de l'édition 2013 des JIM, nous avons mis en place une installation sonore pour un système de restitution de seize haut-parleurs, répartis à égal distance les uns des autres sur un cercle, offrant donc un dispositif de restitution idéal pour un champ sonore synthétisé à un ordre de décomposition 7 (Figure 7). Nous avons composé un champ sonore « hybride » via la mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA⁷⁸ constitué d'une part, de sources ponctuelles passant dans notre module de réverbération et d'autre part, d'un champ diffus synthétisé par le module de granulation *hoa.granular~*. Un point important, lors de cette présentation, fut de mettre en avant les artefacts qu'engendre un champ sonore composé de sources ponctuelles lorsqu'aucune optimisation n'est pas appliquée. En effet, lors de la présentation, nous avons recréé de A à Z, l'ensemble du patch passant par toutes les étapes intermédiaires où le champ sonore n'est pas encore « structuré ». Or, lorsque nous

⁷⁸ Le patch permettant la synthèse du champ sonore est disponible avec la mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA et dans la section projet du site internet de la bibliothèque HOA : <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/projets/>.

eûmes fini la partie relative aux sources sonores, nous appliquions une « large » réverbération accentuée par le module de champ diffus *hoa.décorrélation~* sur lequel nous avions quelque peu exagéré les paramètres de diffusion.

En diminuant le facteur de diffusion de ce module, les sources sonores sont apparues plus ponctuelles mais un artefact (un train de pulsations) déranger la restitution pour l'ensemble de l'auditoire. Le champ sonore n'était, en effet, pas « optimisé ». Nous avons eu là un exemple concret nous permettant de mettre en œuvre l'optimisation. Le champ sonore est devenu bien plus « stable » lors du passage vers l'optimisation « maxRe » et enfin l'ensemble de l'auditoire approuva le passage vers l'optimisation « inPhase ». Nous pouvons noter par cet exemple qu'un champ sonore au caractère diffus ne possède pas la nécessité de l'application d'une optimisation. Notre expérience nous a d'ailleurs montré que l'application d'un tel processus pour un champ diffus génère à l'inverse des sources ponctuelles une augmentation des artefacts. En effet, l'« agrandissement » de l'espace sonore qui résulte de la synthèse de champ diffus est perceptiblement moins net lors d'une optimisation « maxRe » ou « inPhase ».

Comme nous venons de le démontrer, il est donc nécessaire d'appliquer une optimisation au regard des champs sonores synthétisés. De manière générale nous conseillerons, lors de l'enregistrement d'un champ sonore complexe dans le domaine des harmoniques circulaires⁷⁹, d'enregistrer séparément chaque champ sonore en fonction de ses caractéristiques (champ diffus ou sources ponctuelles) et sans optimisations pour permettre d'adapter par la suite ces optimisations aux dispositifs de restitutions tels qu'un cercle de haut-parleurs, un casque ou un système 5.1, système de restitution nécessitant une adaptation du processus de décodage que nous allons présenter à présent.

⁷⁹ Enregistrement possible grâce à l'objet *hoa.record~* de la mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA.

3.2 BINAURALE ET SYSTEMES DE RESTITUTION IRRÉGULIERS

Nous avons présenté dans la partie précédente comment les techniques ambisoniques résolvent le problème du décodage pour un système de restitution circulaire dans lequel les haut-parleurs sont équidistants. Nous avons aussi soumis la possibilité d'une restitution du champ sonore pour des systèmes de restitution dits « irréguliers », dont les haut-parleurs ne sont pas forcément à des distances égales les uns des autres. Rappelons que la décomposition ou la synthèse d'un champ sonore dans le domaine des harmoniques circulaires est destinée à une restitution pour un point situé au centre du cercle ambisonique, offrir une restitution convenable pour un auditeur placé en ce point nécessite déjà de résoudre certains problèmes, que nous avons déjà évoqués, par l'utilisation d'optimisations. Le problème d'une restitution pour des systèmes irréguliers est alors d'autant plus difficile à résoudre que les principes sous-jacents à l'ambisonie n'admettent pas ces cas particuliers. Néanmoins, dans le but d'une commercialisation des techniques ambisoniques, une grande partie des développements a été dirigée afin de trouver une solution à ce problème et permettre de restituer un champ sonore pour des dispositifs de haut-parleurs standardisés tels que le 5.1 [Moore et al, 2008], le casque ou encore la stéréophonie [Fellgett, 1975] [Gerzon, 1975b]. Nous possédons nous aussi les mêmes contraintes, même s'il est vrai que les enjeux divergent, notre but est d'offrir des outils utilisables par des musiciens dans un cadre qui puisse être personnel. Il nous est, dès lors, indispensable de leur permettre de restituer les champs sonores composés pour des systèmes de restitutions plus répandus. Cependant, par notre approche particulière de l'ambisonie, les propositions faites dans la littérature ou sous forme logicielle ne répondent que partiellement à nos contraintes. En effet, ces techniques ont, comme nous le verrons, en général, été développées en se basant sur des normes ambisoniques tels que le format B⁸⁰, or, ce format restreint l'ordre de décomposition à 3. De plus, ces démarches généralisent l'utilisation de l'optimisation « inPhase » au décodage qui comme nous l'avons vu génère dans notre champ sonore des artefacts. En somme, il nous a paru nécessaire de proposer une approche permettant de répondre à nos exigences d'ordre musicale. Nous revenons ainsi sur plusieurs approches librement inspirées de ce que la littérature scientifique a pu fournir. Nous rappelons encore que nous n'avons aucunement la prétention d'avoir une approche pertinente d'un point de vue acoustique mais souhaitons juste répondre à ce problème de restitution en tirant partie de notre écoute de musicien. Nous commencerons notre étude par le cas particulier de la restitution au casque que nous avons déjà présentée lors des JIM [Colafrancesco et al, 2013] et qui implique des contraintes complètement différentes de celles de la restitution pour des systèmes de haut-parleurs irréguliers. Nous

⁸⁰ Pour de plus amples explications sur les formats le lecteur peut se référer à la documentation de la bibliothèque HOA : *Les formats*, Guillot Pierre, 2012-2013, téléchargeable sur le site <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/> ou à [Daniel, 2001].

présenterons, par la suite, les premières approches que nous souhaitons soumettre pour résoudre ce dernier cas.

3.2.1 LA BINAURALE

La binaurale est un ensemble de techniques d'enregistrement et de synthèse permettant la restitution de sources sonores au casque d'écoute. La synthèse binaurale, qui est le procédé qui nous intéresse, permet donc la restitution au casque d'environnements réalistes en deux ou trois dimensions. Cela consiste à reproduire et contrôler différents indices acoustiques permettant la localisation des sons dans l'espace. Ces indices sont liés aux transformations subies par le son lorsque celui-ci rencontre le torse, le crâne et les oreilles de l'auditeur [Batteau, 1967] et peuvent être caractérisés sous formes de filtres FIR⁸¹ spécifiques à chaque oreille et à l'angle d'incidence du son ; ils portent le nom d'HRTF (Head-Related Transfert Function). La synthèse binaurale permet ainsi de restituer, pour un auditeur, une source sonore à une position donnée en appliquant un filtrage spécifique à chacun des canaux relatifs à l'oreille droite et à l'oreille gauche en fonction de l'angle d'incidence désiré⁸².

Il est possible de combiner la synthèse binaurale aux techniques ambisoniques afin de permettre la restitution d'un champ sonore encodé dans le domaine des harmoniques circulaires ou sphériques au casque. Cette proposition est déjà présente dans certaines bibliothèques de spatialisation du son telles que le Spat⁸³ ou Harpex⁸⁴ [Berge et al, 2010a]. Ce procédé offre de nombreux avantages en tirant parti des atouts des deux techniques de spatialisation, comme cela nous est présenté dans [Noisternig et al, 2003]. L'une des contraintes majeures de la synthèse binaurale est qu'elle ne permet de synthétiser qu'une source sonore à la fois. Ce processus, cependant, nécessite une grande capacité de calculs des ordinateurs. En combinant les deux techniques, c'est le champ sonore que l'on restitue et non des sources sonores⁸⁵. Ce champ sonore pouvant être constitué de multiples sources sonores et cela à moindre coût, une telle méthode devient alors de plus en plus avantageuse à mesure que le nombre de sources spatialisées augmente. Nous noterons encore à ce sujet, la possibilité de restituer des champs sonores diffus enveloppant l'auditeur, chose impossible à réaliser avec la mise en œuvre de la synthèse binaurale seule. Une des complexités majeures de la synthèse binaurale est de devoir

⁸¹ Finite impulse response (réponse impulsionnelle finie)

⁸² Pour plus d'informations sur la synthèse binaurale, le lecteur pourra se référer à [Larcher, 2001].

⁸³ <http://www.ircam.fr/>

⁸⁴ <http://www.harpex.net/>

⁸⁵ Nous revenons sur la mise en œuvre du processus par la suite.

utiliser un grand nombre d'HRTFs et de réaliser des interpolations entre elles. En effet, les banques d'HRTFs résultent d'enregistrements où la sphère (ou le cercle) enveloppant l'auditeur est discrétisée selon plusieurs points à des angles d'incidences prédéterminés. Ainsi, lorsque l'on souhaite simuler le déplacement d'une source sonore, toutes les positions où l'angle d'incidence de la source est intermédiaire aux angles d'incidences utilisés lors de l'enregistrement, il est nécessaire de faire une interpolation entre les filtres correspondants à ces angles d'incidences. Grâce à l'ambisonie, les filtrages s'effectuent pour des angles d'incidences fixes et correspondent aux angles d'incidences des enregistrements⁸⁶. Le processus mis en œuvre s'en trouve simplifié sur ce point et nécessite moins de calculs. Le lecteur pourra se référer à [Noisternig et al, 2003] pour une mise en œuvre « usuelle » de l'ambisonie associée à la binaurale.

En théorie, combiner une approche ambisonique à une restitution binaurale est très simple. Cela consiste à faire correspondre les canaux des haut-parleurs à des filtres en fonctions de l'angle d'incidence de chacun d'eux. Prenons le cas concret qui correspond à la mise en œuvre la plus simple. Nous possédons une banque d'HRTFs comprenant huit réponses impulsionnelles qui correspondent aux enregistrements pour les angles 0°, 90°, 180° et 270° pour l'oreille gauche et pour l'oreille droite. Nous décodons alors un champ sonore, synthétisé à un ordre de décomposition 1, pour quatre haut-parleurs dont les angles d'incidences correspondent à ceux que nous venons d'énumérer. Pour générer le signal relatif à une oreille, il suffit alors d'appliquer à chaque signal de haut-parleur le filtre qui lui est associé et d'additionner les signaux résultants. Un problème de coût de calcul apparaît dès que nous souhaitons mettre en œuvre ce processus pour une restitution d'un champ sonore encodé à un ordre élevé. En effet, pour un ordre de décomposition 7, le processus nécessite trente deux filtrages⁸⁷. Il nous a paru alors nécessaire de proposer une nouvelle approche afin de pouvoir réaliser cette opération sur des ordinateurs personnels⁸⁸.

L'approche permettant la restitution sonore combinant la synthèse binaurale et les techniques ambisoniques a donc été revisitée afin d'offrir un rendu pour les ordres supérieurs. Notons que nous aurions pu choisir d'utiliser un filtrage par convolution dans le domaine fréquentiel via la FFT, *a priori* bien moins coûteux en calculs, [Smith, 2007b] mais cela implique de la latence, ou par filtres IIR, qui semble moins gourmand en ressources [Larcher, 2001] tel que le propose le Spat de l'IRCAM. Cependant, l'efficacité de l'approche présentée réside dans son optimisation grâce aux

⁸⁶ Idem.

⁸⁷ Nombre de haut-parleurs virtuels fois deux (pour chaque oreille).

⁸⁸ Le Spat de l'IRCAM utilise l'approche que nous venons de présenter et il nous a été impossible de réaliser une restitution du champ sonore à un ordre de décomposition 7 en raison de la trop grosse demande en calcul que cela nécessite.

bibliothèques de calculs matriciels qui permet d'offrir une restitution préservant la linéarité des variations de phase via l'utilisation de filtres FIR [Smith, 2007a] tout en restant accessible sur des ordinateurs personnels. Pour de petites réponses impulsionnelles, et sur des machines favorisant la parallélisation et la vectorisation des calculs, effectuer une convolution directe peut comme nous allons le voir être un choix judicieux.

Obtenir une restitution binaurale à partir d'un champ sonore représenté dans le domaine des harmoniques circulaires revient donc, 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. La solution proposée par la bibliothèque HOA réside dans la création d'une nouvelle matrice de décodage prenant en compte les filtres binauraux définie par

$$C'_{left} = C^+ F_{left}$$

et

$$C'_{right} = C^+ F_{right}$$

et

$$C' = \begin{bmatrix} C'_{left} \\ C'_{right} \end{bmatrix}$$

où C^+ est la matrice de décodage telle que définie dans [Colafrancesco, 2012], F_{left} et F_{right} , les matrices comprenant respectivement les réponses impulsionnelles de l'oreille gauche et de l'oreille droite et C' est la matrice résultante composée de C'_{left} , la matrice à associée à l'oreille gauche et de C'_{right} , la matrice à associée à l'oreille droite.

La mise en œuvre est par la suite relativement similaire à celle d'un décodage ambisonique classique dans le sens où elle consiste à procéder à une simple multiplication matricielle⁸⁹, nous permettant ainsi d'économiser un grand nombre de calcul. Notons que l'ordre de décomposition est cependant contraint par le nombre de réponses impulsionnelles. Dans la bibliothèque HOA, nous

⁸⁹ En pratique, nous optimisons aussi le processus en tirant partie de la taille des vecteurs audionumériques. Ces questions ne saurait être traitées dans ce mémoire, les codes sources étant libres, le lecteurs pourra s'y référer : <https://github.com/CICM/HoaLibrary>.

utilisons la banque d'HRTFs du laboratoire CIPIC⁹⁰, qui comporte 178 réponses impulsionnelles horizontales pour chaque oreille, l'ordre maximal est donc de 35 et nous tirons parti des bibliothèques de calcul matriciel MKL⁹¹, pour le système d'exploitation Windows, et vDSP⁹², pour le système d'exploitation Mac OS, pour optimiser l'ensemble des calculs matriciels.

Au delà du fait que cette technique permet de spatialiser une multitude de sources sonores sans pour autant augmenter le nombre de filtrages, elle offre aux utilisateurs un accès au casque à l'ensemble des traitements ambisoniques proposés par la bibliothèque HOA⁹³. Nous pouvons noter que ce procédé simule pour nos oreilles, le positionnement idéal où notre corps n'entrerait pas en conflit avec le champ sonore restitué et où nos deux oreilles seraient réunies en ce point unique au centre du cercle ambisonique. Nous obtenons donc théoriquement une restitution parfaite du champ sonore ne nécessitant aucune optimisation. Notons, cependant, que la synthèse binaurale engendre des artefacts dus aux réponses impulsionnelles qui ne sont pas basées sur notre physiologie personnelle. La qualité de restitution du champ sonore varie donc selon chacun. Il est fréquent de percevoir une confusion entre le champ sonore avant et le champ sonore arrière. Malgré cela, la synthèse binaurale est intéressante, nous pouvons dire, d'un point de vue totalement subjectif, qu'il « se passe quelque chose ». Elle peut être d'une réelle utilité lors de la composition afin d'avoir un aperçu des champs sonores ou pour partager des œuvres sur internet par exemple.

3.2.2 LES ORDRES FRACTIONNAIRES

Nous avons signalé en introduction de ce chapitre que des propositions de décodages ambisoniques pour des systèmes de restitution irréguliers existent, cependant aucun d'entre eux ne répond à la fois à une utilisation de l'ambisonie à des ordres élevés et à notre approche musicale. L'enjeu était donc de trouver un moyen de restituer le champ sonore pour les contraintes matérielles que nous avons évoquées sans pour autant utiliser nécessairement une optimisation de type *inPhase* afin d'empêcher la dégradation du champ sonore diffus. Il nous faut noter, par ailleurs, que certaines propositions présentées dans la littérature pourraient potentiellement répondre à nos contraintes, cependant la complexité des processus mis en jeu où les cas particuliers auxquels ceux-ci tentent de

⁹⁰ <http://interface.cipic.ucdavis.edu/>

⁹¹ <http://software.intel.com/en-us/intel-mkl>

⁹² <https://developer.apple.com/>

⁹³ Le décodage pour une restitution au casque est disponible via l'objet `hoa.decoder~` de la mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA.

répondre ne leurs ont pas permis de trouver un écho dans nos oreilles quelque peu dépassées par certaines approches acoustiques. Ainsi, nos approches supporteront sûrement assez mal une critique acoustique, nous sommes néanmoins dans la capacité de les valider ou de les réfuter (comme nous allons le voir pour cette première approche selon des critères purement subjectifs et musicaux).

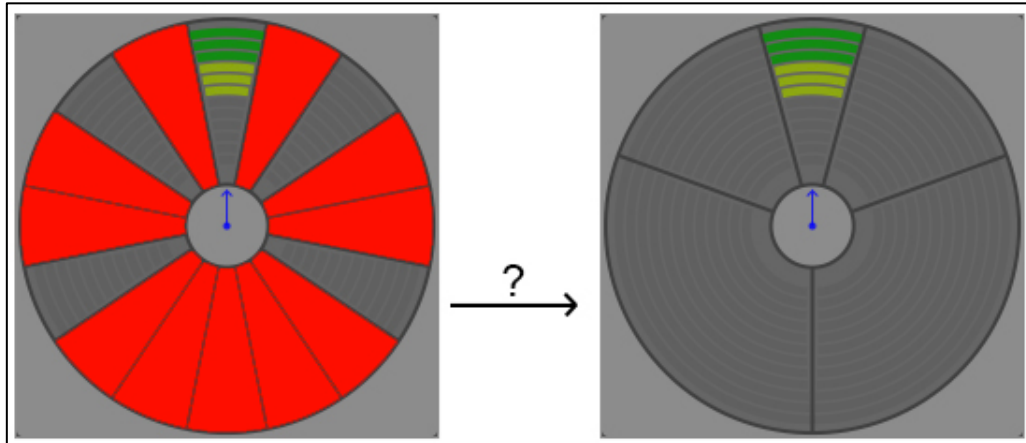


Figure 37 : Représentation de la problématique du passage d'un système de restitution ambisonique à 16 haut-parleurs vers un système de restitution 5.1.

Notre première approche est partie du cas concret où nous souhaitons restituer un champ sonore encodé à un ordre de décomposition 7 pour un système 5.1 en espérant pouvoir, par la suite, adapter l'approche pour d'autres configurations de systèmes de restitution et à des ordres de décomposition différents. Le problème que nous souhaitons résoudre est donc le suivant : En partant du principe que sur un système 5.1, les haut-parleurs sont répartis sur un cercle, comment compenser la perte des contributions relatives aux haut-parleurs manquant au cercle ambisonique tel que présenté dans la Figure 37.

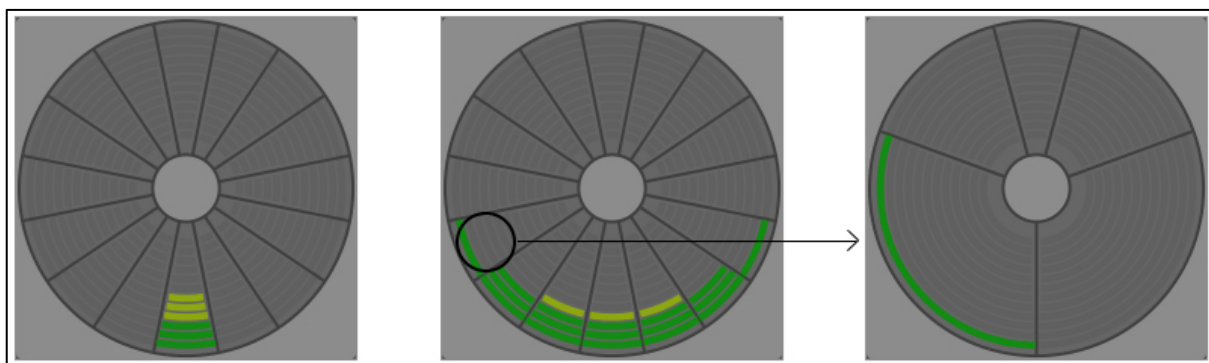


Figure 38 : Représentation de l'étape d'un décodage basé sur une technique d'ordre fractionnaire pour le canal « surround » gauche d'un système de restitution 5.1, où à partir d'un champ sonore (à gauche), on applique un traitement d'ordre fractionnaire générant un champ sonore (au centre) duquel, suite au décodage, on ne garde que le 6ème canal afin de l'assigner au canal « surround » gauche.

La solution proposée consiste à procéder à plusieurs décodages différents du même champ sonore auxquels nous appliquons au préalable des ordres fractionnaires. Selon nous, dans un système de restitution 5.1, si nous gardons, tels qu'il sont présentés dans la Figure 37, les canaux d'un système de restitution ambisonique pour les associer aux canaux du système de restitution 5.1, il faut pour cela que le champ sonore restitué par les canaux en rouge se retrouve dans les canaux du système de restitution 5.1 les plus proches angulairement. En appliquant un ordre fractionnaire au champ sonore, nous diminuons la résolution du champ sonore ; ainsi une source sonore qui se trouve principalement sur un canal spécifique devrait « baver » sur les canaux adjacents. Il est possible grâce à cette mise en œuvre de « récupérer » le champ sonore « manquant » dans les canaux que nous gardons. La solution alors soumise est de procéder à une projection différente du champ sonore pour chacun des canaux du système 5.1. Avant chaque projection, nous appliquons le traitement relatif aux ordres fractionnaires au champ sonore en fonction suivant la taille du champ sonore que nous souhaitons « récupérer » (Figure 38).

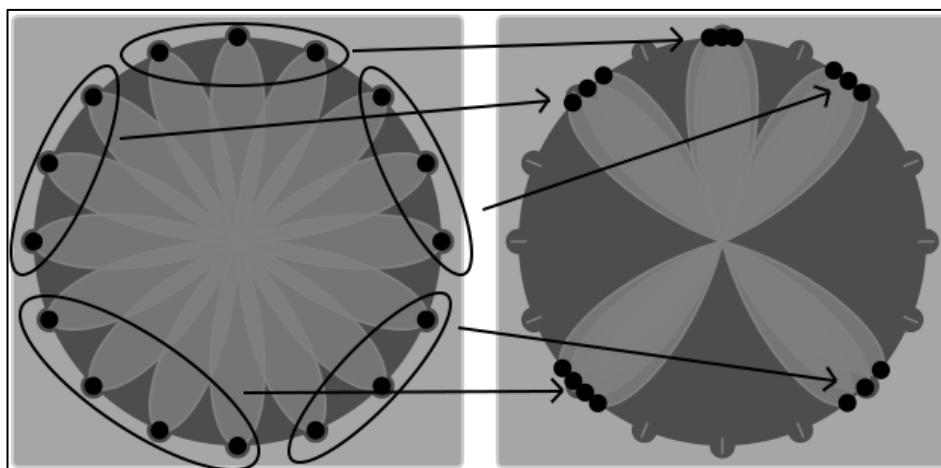


Figure 39 : Représentation de plusieurs traitements de type *fish-eye* (basée sur la proposition de Gerzon) afin de restituer un champ sonore pour un système de restitution 5.1.

Cette approche nécessite énormément d'ajustements. Il est, en effet, vraisemblablement impossible de déterminer de manière automatique l'ordre fractionnaire à appliquer au champ sonore autant qu'il est difficile d'entrevoir quelles parties du champ sonore nous souhaitons récupérer dans chaque canal. Notre point de jugement consiste alors à percevoir une moyenne énergétique du champ sonore relativement stable pour une source sonore encodée à n'importe quelle angle d'incidence⁹⁴. Après de nombreux essais, nous parvenons à un résultat convainquant sur l'aspect énergétique du champ sonore. Cependant, le processus d'ordre fractionnaire dégrade de manière notable la restitution, les sources sonores perdent énormément en résolution angulaire et les champs diffus perdent leur qualité première « d'élargissement » de l'espace⁹⁵. Il est aussi important de noter que cette approche est très difficilement généralisable à des configurations et des ordres variables. Il est néanmoins possible d'entrevoir une certaine concordance avec l'approche présentée par Gerzon du décodage ambisonique pour des systèmes standardisés. Celui-ci propose d'appliquer de manière relativement similaire une distorsion de la perspective (le lecteur pourra se référer à la présentation du traitement *fish-eye*) afin de « ramener » sur un canal voulu le champ sonore restitué sur les canaux adjacents [Gerzon, 1992]. Cependant, cette approche ne tente pas de répondre aux mêmes contraintes, elle veut par ce traitement compenser une prédominance énergétique à l'arrière du champ sonore. Nous décidons donc d'assimiler cette proposition et proposons notre interprétation du traitement *fish-eye* permettant de restituer un champ sonore pour un système de restitution 5.1 (Figure 39). Cette suggestion est à la base des propositions que nous avons retenues par la suite.

⁹⁴ Notons que nous n'avons pas encore mis en œuvre l'outil permettant de calculer cette moyenne, nous y revenons par la suite.

⁹⁵ Nous sommes déjà revenu sur les artefacts liés à l'application d'une diminution de la résolution spatiale sur un champ diffus.

3.2.3 LE PANNING D'AMPLITUDE

La proposition que nous venons de soumettre peut être envisagée de manière plus simple. Il s'agit d'associer à chaque canal que nous souhaitons restituer une série de canaux résultant d'un décodage ambisonique. Il reste alors à définir quels canaux ambisoniques nous devons associer à tel ou tel canal du système de restitution irrégulier. De plus, lors de la mise en œuvre de ce procédé, nous avons remarqué qu'en fonction des dispositifs de restitution, la balance énergétique du champ sonore était fortement déséquilibrée. Prenons le cas concret d'un système de restitution à trois haut-parleurs où deux haut-parleurs sont placés tels une stéréophonie resserrée et le troisième haut-parleur est à 180° (l'arrière du champ sonore). En appliquant, le processus que nous venons de présenter nous aurons tendance à assigner les signaux des haut-parleurs placés dans la partie arrière du cercle au haut-parleur situé à 180° engendrant un poids énergétique disproportionné entre une source placée à l'avant du champ sonore par rapport à une source placée à l'arrière du champ sonore.

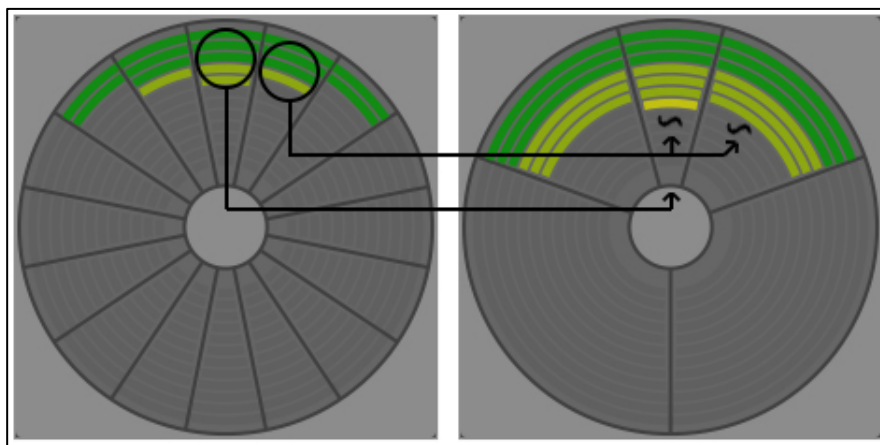


Figure 40 : La figure représente la répartition des signaux des haut-parleurs virtuels vers les haut-parleurs réels lors d'un décodage pour un système de restitution 5.1 utilisant une technique basée sur le « *vector base amplitude panning* ». Les flèches annotées d'un « ~ » indique que le signal du haut-parleur virtuel est assigné à deux haut-parleur réels à un facteur de gain près. L'autre flèche indique que le signal est directement envoyé au haut-parleur réel car il possède le même angle d'incidence que le haut-parleur réel.

Afin de remédier à ces problèmes nous proposons de baser notre approche sur une adaptation du « *vector base amplitude panning* » [Pulkki, 2002]. Le principe consiste donc à décomposer le champ sonore pour un système ambisonique générant ainsi les signaux des haut-parleurs virtuels. Pour

un haut-parleur virtuel, $HP_{virtual}$, nous définissons les deux haut-parleurs du système de restitution qui sont les proches angulairement (Figure 40), HP_{real}^1 et HP_{real}^2 . Ces deux haut-parleurs reçoivent les signaux des haut-parleurs virtuels qui leurs sont assignés et auxquels nous appliquons des gains définis par

$$g(HP_{virtual}, HP_{real}^1) = \cos\left(\frac{\pi d_{real}}{2d_{virtual}^1}\right)$$

et

$$g(HP_{virtual}, HP_{real}^2) = \cos\left(\frac{\pi d_{real}}{2d_{virtual}^2}\right)$$

où g est le gain dépendant d'un haut-parleur virtuel et d'un haut-parleur réel, d_{real} la distance angulaire entre les deux haut-parleurs HP_{real}^1 et HP_{real}^2 , $d_{virtual}^1$ la distance angulaire entre le haut-parleur $HP_{virtual}$ et le haut-parleur réel HP_{real}^1 et $d_{virtual}^2$ la distance angulaire entre le haut-parleur $HP_{virtual}$ et le haut-parleur réel HP_{real}^2 .

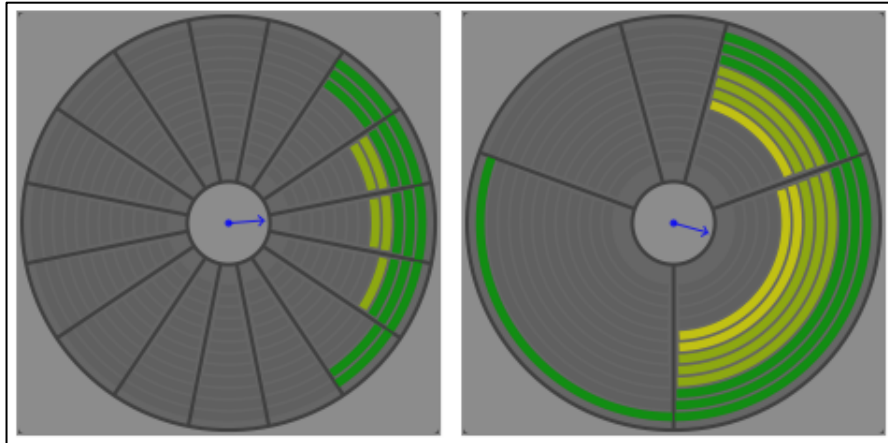


Figure 41 : Représentation par le vecteur énergie (flèche bleue) de divergence entre la position à laquelle nous devrions percevoir la source sonore et la position à laquelle nous la percevons réellement et des contributions des haut-parleurs pour un système de restitution 5.1 (à droite) lors d'un décodage basée sur le « *vector base amplitude panning* ».

Le décodage ambisonique basé sur le « *vector base amplitude panning* » offre un champ sonore que nous considérons comme convenable au regard des divergences du système de restitution par rapport au modèle ambisonique original. Nous pouvons néanmoins noter un artefact majeur lié au « *vector base amplitude panning* ». Daniel note à ce propos : « Pour Pulkki, le VBAP offre en toute direction une “précision maximale” à l’image sonore compte-tenu des haut-parleurs présents. En particulier, seul un haut-parleur est alimenté lorsque la source virtuelle est placée dans sa direction. En réalité, la propriété de “précision maximale” est inexacte: pour les images placées entre plusieurs haut-parleurs » [Daniel, 2001]. Nous notons le même artefact, lorsque nous synthétisons un champ sonore composé d’une source sonore placée sur un des haut-parleurs réels, la source sonore semble perceptivement provenir de cette direction. Mais lorsque la source sonore est placée entre deux haut-parleurs réels l’angle d’incidence perceptible diverge de l’angle d’encodage. En outre, nous percevons des « sauts » de la source sonore pour atteindre un haut-parleur après l’autre. Le vecteur énergie indique « la direction moyenne de provenance de l’énergie » [Daniel, 2001], il permet lors de l’encodage d’une seule source sonore de définir l’angle d’incidence perçu de la source sonore. Dans le cas présent, ce vecteur nous permet donc de représenter et quantifier la divergence entre la position à laquelle nous devrions percevoir la source sonore et la position à laquelle nous la percevons réellement (Figure 41). Notons, encore une diminution de la résolution spatiale qui, cependant, n’agit pas comme un ordre fractionnaire, nous pouvons ainsi utiliser l’ensemble des traitements ambisoniques que nous avons présentés. Enfin, comme pour un décodage ambisonique, il peut être préférable d’appliquer des optimisations notamment lors de l’encodage de sources ponctuelles. D’avantage de recherches seraient à réaliser dans le cadre des champs diffus. En effet, l’addition de canaux en opposition de phase semble créer des filtrages. Cependant, ceux-ci semblent engendrer moins d’artefacts que l’application d’une optimisation *inPhase*.

Cette proposition qui est toujours en développement est déjà suffisamment acceptable selon nous pour être utilisée par les musiciens, tout au moins lors de la phase compositionnelle de leur œuvre. La mise en œuvre est disponible via l’objet *hoa.decoder~* en mode « *irregular* », nous proposons à l’utilisateur un autre mode de décodage pour des systèmes de restitution irréguliers qui peut selon les cas offrir un meilleur rendu sonore. Nous revenons sur cette approche, elle aussi en cours de développement, basée sur une projection particulière du champ sonore.

3.2.4 LA PROJECTION ADAPTEE

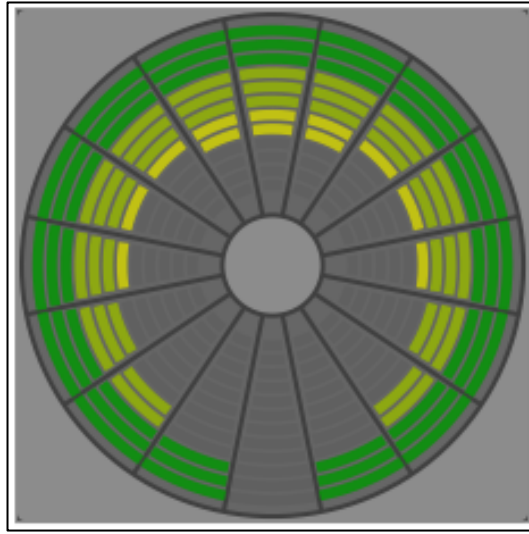


Figure 42 : Représentation de la figure de directivité d'un microphone virtuel orienté à 0° via les contributions de 16 haut-parleurs virtuels utilisé lors d'un décodage pour un système de restitution irrégulier par projection.

Nous avons mis en évidence que l'artefact majeur réside dans la déformation de l'image sonore lorsque une source ponctuelle est située entre deux haut-parleurs réels. Nous avons donc tenté par cette approche de réduire cette caractéristique non-souhaitable de la restitution pour un système de haut-parleurs irréguliers. Cette approche consiste à simuler des prises de son par des microphones virtuels. A la différence de la projection, réalisée pour passer dans le domaine des ondes planes, nous contrôlons dans le cas présent le nombre, les figures de directivité ainsi que les angles d'incidence des microphones. La figure de directivité utilisée n'existe pas pour des microphones « réels » et est arbitrairement définie pour recouvrir l'ensemble du champ tel que plus un point du champ sonore est angulairement éloigné de l'angle d'incidence, moins le champ sonore n'aura d'impact sur cet enregistrement virtuel. Cette figure de directivité est basée sur une fonction sinusoïdale (Figure 42).

La mise en œuvre consiste à simuler plusieurs enregistrements du champ sonore aux angles d'incidence correspondant aux haut-parleurs réels. Pour cela, nous décodons le champ sonore pour un système de restitution ambisonique « idéal ». Pour chaque enregistrement virtuel, nous appliquons des gains à chacun des signaux des haut-parleurs virtuels en fonction de l'angle d'incidence de l'enregistrement et de la figure de directivité. Il suffit alors d'additionner l'ensemble des signaux pondérés pour obtenir le signal du haut-parleur réel relatif à l'angle d'enregistrement.

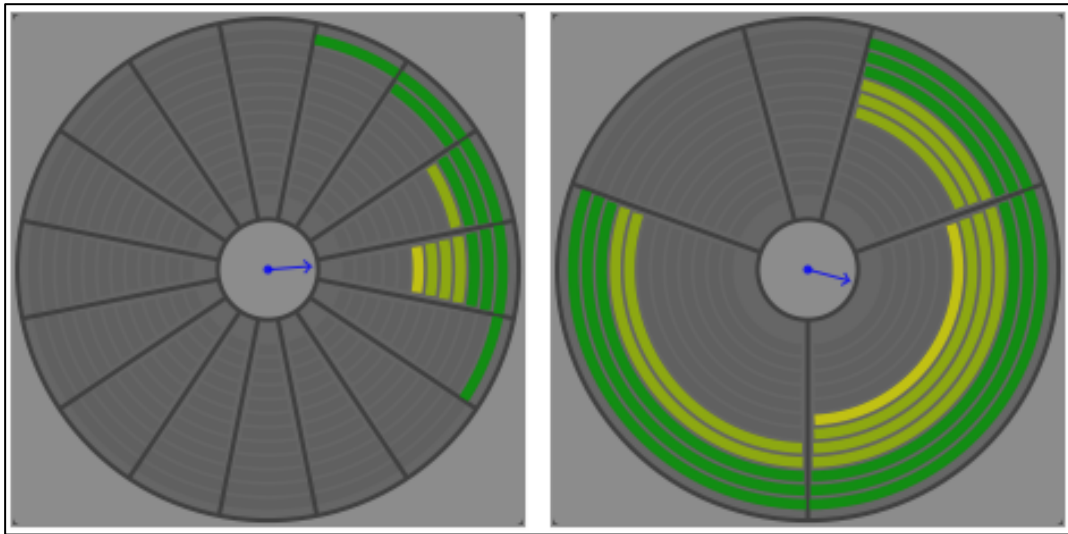


Figure 43 : Représentation par le vecteur énergie (flèche bleu) de divergence entre la position à laquelle nous devrions percevoir la source sonore et la position à laquelle nous la percevons réellement pour un système de restitution 5.1 (à droite) lors d'un décodage par projection.

Nous notons tout d'abord que cette approche diminue énormément la résolution spatiale. Néanmoins, malgré une divergence toujours notable entre la position encodée de la source sonore et la position perçue, les « sauts » de la source sonore disparaissent. Lors de l'encodage d'une source sonore faisant une rotation à vitesse constante autour du cercle ambisonique, nous percevons un mouvement continu de la source, composé d'accélération et de ralentissement relativement linéaires (Figure 43).

3.2.5 PERSPECTIVES

Nous ne pouvons affirmer quelle approche semble la plus pertinente entre la technique de projection adaptée et la technique basée sur le « *vector base amplitude panning* ». Remarquons alors que ces deux techniques peuvent être vues comme des cas particulier d'une seule et même technique de restitution utilisant des microphones virtuels. Dans le premier cas, les figures de directivité dépendent des positions des haut-parleurs virtuels par rapport aux haut-parleurs réels et sont basées sur une technique de « panning » d'amplitude. Dans le deuxième cas, la figure de directivité est fixe. Il semble alors possible d'envisager des mises en œuvre hybrides où l'utilisateur puisse définir « l'élargissement » ou le « rétrécissement » des figures de directivité de chaque microphone virtuel

afin de répondre d'une manière plus fine aux différentes configurations de haut-parleurs et aux différents ordres de décomposition. Notons encore que l'ensemble des procédés présentés a été « fractionné » afin de mettre en lumière les procédés sous-jacents, chacun de ces procédés devrait pouvoir être appliqué via une simple multiplication matricielle. Enfin, nous pouvons remarquer que ces procédés règlent le problème de changement de systèmes de restitution et évite ainsi au musicien tout changement d'ordre de décomposition et les artefacts qui y sont liés.

CONCLUSION

L'ambisonie est un ensemble de techniques de synthèse et de reproduction du son destinées à la spatialisation. Elle est basée sur une représentation physique du champ sonore dans le domaine des harmoniques sphériques ou circulaires qui permet de nombreuses opérations telles que la rotation ou la distorsion de la perspective [Daniel, 2001]. Cependant, les recherches en ambisonie étant principalement abordées selon une démarche d'acousticien, les traitements du champ sonore proposés jusque-là ne semblent pas répondre à une approche musicale et sont, selon nous, peu développés par rapport aux multiples opérations possibles que semble pouvoir nous offrir la décomposition en harmoniques circulaires. Nous avons donc pris le postulat qu'en approchant l'ambisonie selon une perspective musicale, nous pourrions proposer de nombreux traitements musicaux. L'ensemble de nos travaux a présenté quelques traitements du son et de l'espace qui déjà offrent un large éventail de possibilités musicales. Ils peuvent servir de base pour la prise en main de l'ambisonie par le musicien et pour la création de nouveaux traitements.

Dans la première partie, nous avons abordé les techniques de synthèse de champs sonores. Il nous a, dès lors, été possible de nous approprier les principes acoustiques et mathématiques de l'ambisonie afin d'offrir un outil simple et efficace de mise en espace d'une source sonore ponctuelle. Sur ce, nous avons souhaité proposer une nouvelle approche musicale de l'espace via la synthèse de champ diffus basée sur des techniques connues par le musicien telles que la synthèse granulaire, la modulation d'amplitude ou encore la décorrélation temporelle. Entre cet objet usuel, qu'est la source sonore ponctuelle, et cet espace artificiel, qu'est le champ diffus, nous avons alors présenté les variations possibles de champs sonores en effectuant une balance entre champ diffus et sources ponctuelles et en présentant la mise en œuvre de facteurs de diffusion. Par la suite, nous proposons certaines transformations du champ sonore qui n'ont, jusqu'à présent, été que très peu développées pour des utilisations musicales mais qui possèdent, selon nous, un fort potentiel artistique. En présentant la décomposition en ondes planes, nous avons pu familiariser le musicien avec cet outil afin de lui permettre de concevoir de nombreuses opérations sur le champ sonore telles que le filtrage spatial ou encore le traitement de type *fisheye*. Les connaissances que nous avons acquises nous ont alors permis de proposer de nouvelles approches de la réverbération. En nous appropriant les notions acoustiques de l'espace, nous avons présenté une technique de réverbération liée aux harmoniques circulaires offrant la possibilité de contrôler la diffusion de l'espace et ainsi simuler des acoustiques hétéroclites oscillant entre réalisme et artifice. Notre approche particulière et musicale des techniques de synthèse et de transformations du champ sonore ne pouvant se satisfaire des techniques de

restitution des champs sonores proposées dans la littérature scientifique, il nous a alors semblé nécessaire de proposer des outils aux musiciens pouvant répondre à la fois à ses choix compositionnels et au dispositif matériel en sa possession. En revenant sur les optimisations *basic*, *maxRe* et *inPhase*, nous soumettons des démarches permettant d'adapter au mieux la restitution des champs sonores composés selon leurs morphologies, leurs caractères ponctuels ou diffus. Enfin, nous présentons des outils permettant des décodages ambisoniques pour tous types de systèmes de restitution offrant la possibilité aux musiciens de reproduire les champs sonores composés avec un cercle de haut-parleurs ambisonique mais aussi, au casque, ou encore sur des systèmes de restitutions standardisés tels que le 5.1 ou la stéréophonie.

Les traitements musicaux que nous proposons se retrouvent dans une première mise en œuvre pour le logiciel Max/MSP qui a déjà atteint dans le milieu musical une certaine popularité avec, depuis octobre 2012⁹⁶, plus de 2600 visiteurs uniques du site internet du projet HOA⁹⁷ répartis sur quatre continents. C'est notamment grâce à leurs retours d'utilisation que nous avons pu orienter nos démarches et améliorer nos propositions. En outre, le projet a déjà pu voir se réaliser un certain nombre de pièces électroacoustiques et mixtes, ainsi que des installations où l'ensemble des traitements musicaux évoqués a été pris en main par les compositeurs afin d'offrir des expériences nouvelles. Nous invitons le lecteur à découvrir la pièce *Immersion* pour violoncelle et électronique d'Anne Sédès qui s'est appropriée le traitement *fisheye* et la synthèse de champs diffus par granulation, la pièce *Pianotronics 1* pour piano et électronique d'Alain Bonardi⁹⁸ qui a mis en œuvre une nouvelle manière de générer un champ diffus via des *harmonizers* dans un objet *hoa.plug~* et dans laquelle une approche pertinente permet de passer du champ diffus à une source ponctuelle. Les étudiants de l'université Paris 8 ont, eux aussi, pris en main la bibliothèque HOA, notamment dans le cadre de l'atelier de composition de José Manuel Lopez Lopez où les objets permettant la spatialisation de sources ponctuelles ou le filtrage spatial semblent avoir trouvé un écho particulier dans leurs approches compositionnelles⁹⁹. L'équipe du CICM a aussi présenté des installations musicales dans le cadre de l'évènement Savante Banlieue ou lors des JIM 2013, où elle a reçu le *Prix du Jeune Chercheur*. Nous avons déjà évoqués ces installations qui, via une démarche à la fois

⁹⁶ La première version utilisable de la bibliothèque HOA a été mise en ligne le 23 octobre 2012.

⁹⁷ <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/>.

⁹⁸ Le lecteur peut se référer pour ces deux pièces à [Colafrancesco et al, 2013] au concert qui a eu lieu dans le cadre des JIM 2013.

⁹⁹ Le lecteur peut se référer à la pièce *L'oublie* pour flûte, harpe, baryton, percussion, violoncelle et électronique de Rosa Castilla, la pièce *Evolution* pour flûte, violoncelle et électronique de Marisa Acuña ou encore la pièce *Turdus* pour flûte et électronique de João Svidzinski.

didactique et musicale, présentent la synthèse de sources ponctuelles, la synthèse de champs diffus et les traitements liés à la décomposition en ondes planes et, la réverbération¹⁰⁰.

La bibliothèque HOA offre, à ce jour, un certain nombre de traitements disponibles via la mise en œuvre pour le logiciel Max/MSP. Nous travaillons aussi à des mises en œuvre de ces outils vers d'autres logiciels tels que Pure Data¹⁰¹ ou sous forme de *plug-ins* tels que les VST¹⁰² qui impliquent des démarches compositionnelles différentes et donc un renouvellement de certaines des approches que nous proposons. Ces approches sont d'autant plus intéressantes qu'elles peuvent faire émerger de nouvelles idées de traitements sonores. Nous avons eu l'occasion, lors d'un séjour au GRAME¹⁰³, de partager nos connaissances avec l'équipe de chercheurs et de créer une version de la bibliothèque dans le langage de programmation fonctionnel Faust (Functional Audio Stream). La bibliothèque HOA écrite dans ce langage informatique possède, à présent, les nombreux avantages liés à ce langage qui permettent notamment de créer des programmes pour un grand nombre de plateformes ou de générer une documentation automatique des processus mis en œuvre, ce qui est un atout fort pour la compréhension et la pérennité de la bibliothèque.

Nous avons fait le choix de ne répondre qu'à la problématique de la représentation bidimensionnelle de l'espace sonore. Nous souhaitons offrir un ensemble d'outils permettant aux musiciens de s'approprier les techniques ambisoniques. Notre démarche nécessite donc de prendre en considération les systèmes de restitutions les plus répandus et qui sont en deux dimensions (quadriphonie, octophonie, 5.1, etc.). De plus, le nombre de haut-parleurs dépend de l'ordre de décomposition (et inversement). Alors que le nombre de haut-parleurs nécessaires à une restitution ambisonique augmente de façon linéaire avec l'ordre de décomposition dans un système en deux dimensions, ce nombre de haut-parleurs augmente de façon quadratique pour un système tridimensionnel. De nombreux traitements n'auraient pu être alors envisagés car certaines approches nécessitent un ordre de décomposition élevé. Cependant, en admettant que ce qui est applicable dans un espace bidimensionnel l'est également dans un espace tridimensionnel, nous pouvons espérer que nos approches restent pertinentes dans un espace à trois dimensions. Nous n'excluons donc pas, à présent, la déclinaison future de la bibliothèque HOA pour ce type de représentation.

¹⁰⁰ Le lecteur peut se référer à la section Projets du site internet de la bibliothèque HOA où nous mettons en ligne un certains nombres d'informations sur les utilisations et les pièces utilisant la bibliothèque.

¹⁰¹ <http://puredata.info/>.

¹⁰² <http://www.steinberg.fr/>.

¹⁰³ <http://www.grame.fr/>.

Notre principal objectif, à présent, est de suivre les pratiques et les démarches artistiques de nombreux compositeurs. La bibliothèque HOA suscitant un réel intérêt pour les musiciens, il nous semble qu'en tirant parti de leurs retours et en qu'en écoutant et analysant leurs œuvres, nous allons pouvoir entrevoir la possibilité de nouveaux traitements musicaux.

BIBLIOGRAPHIE

[Batteau, 1967] Dwight W. Batteau, *The role of the pinna in human localization*, Proceedings of the Royal Society of London Vol. 168, Londres, Royaume-Unis, 1967.

[Battenberg et al, 2011] Eric Battenberg, Rimas Avizienis, *Implementing Real-Time Partitioned Convolution Algorithms On Conventional Operating Systems*, Proceedings of the 14th International Conference on Digital Audio Effects, Paris, France, 2011.

[Berge et al, 2010a] Svein Berge, Natasha Barrett, *A New Method For B-Format To Binaural Transcoding*, AES 40th International Conference, Tokyo, Japon, 2010.

[Berge et al, 2010b] Svein Berge, Natasha Barrett, *High Angular Resolution Planewave Expansion*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics, Paris, France, 2010.

[Colafrancesco, 2011] Julien Colafrancesco, *Caractérisation Du Champ Sonore Dans Les Salles*, Mémoire de stage IRCAM – Université Paris 6, Paris, France, 2011.

[Colafrancesco, 2012] Julien Colafrancesco, *L'ambisonie D'ordre Supérieur Et Son Appropriation Par Les Musiciens : Présentation De La Bibliothèque Max/Msp Hoa.Lib*, Actes des Journées d'Informatique Musicales 2012, Mons, Belgique, 2012.

[Colafrancesco et al, 2013] Julien Colafrancesco, Pierre Guillot, Eliott Paris, Anne Sedes, Alain Bonardi, *La bibliothèque Hoa, bilan et perspectives*, Actes des Journées d'Informatique Musicales 2013, Paris, France, 2013.

[Craven et al, 1977] Peter Craven, Michael Gerzon, *Coincident Microphone Simulation Covering Three Dimensional Space*, "Brevet US 4042779 A" National Research Development Corporation, Londres, Royaume-Unis, 1977.

[Daniel, 2001] Jérôme Daniel, *Représentation De Champs Acoustiques*, Thèse de l'Université Paris 6, 2001.

[Daniel et al, 2003] Jérôme Daniel, Rozenn Nicol, Sébastien Moreau, *Further Investigations of High Order Ambisonics and Wavefield Synthesis for Holophonic Sound Imaging*, AES 114th International Conference, Amsterdam, Pays-Bas, 2003.

[Daniel, 2006] Jérôme Daniel, *Spatial Sound Encoding Including Near Field Effect: Introducing Distance Coding Filters and a Viable, New Ambisonic Format*, AES 23rd International Conference, Copenhagen, Danemark, 2003.

[Farina et al, 2006] Angelo Farina, Paolo Martignon, Andrea Capra, Simone Fontana, *Measuring Impulse Responses Containing Complete Spatial Information*, Journal of the Acoustical Society of America Vol. 120, 2006.

[Fellgett, 1975] Peter Fellgett, *Ambisonics. Part One: General System Description*, Reproduced from Studio Sound Vol. 17 by permission of IPC Media Ltd, 1975.

[Gardner, 1993] William Gardner, *Efficient Convolution Without Input-Output Delay*, JAES Vol. 43, 1993.

[Gerzon, 1974] Michael A. Gerzon, *Surround-sound psychoacoustics : Criteria for the design of matrix and discrete surround-sound systems*, Reproduced from Wireless World, 1974.

[Gerzon, 1975a] Michael Gerzon, Ambisonics. *Part two: Studio techniques*, Reproduced from Studio Sound Vol. 17 by permission of IPC Media Ltd, 1975.

[Gerzon, 1975b] Michael Gerzon, *Compatible 2-Channel Encoding Of Surround Sound*, Electronics Letters Vol. 11, 1975.

[Gerzon, 1992] Michael Gerzon, *General Metatheorie Of Auditory Localisation*, AES Preprint, 1992.

[Larcher, 2001] Véronique Larcher, *Techniques De Spatialisation Des Sons Pour La Réalité Virtuelle*, Thèse de l'Université Paris 6, Paris, France, 2001.

[Malham, 1992] Dave Malham, *Experience With Large Area 3-D Ambisonic Sound Systems*, Proceedings of the Institute of Acoustics, 1992.

[Malham, 2003] Dave Malham, *Higher order Ambisonic systems* from “*Space in Music - Music in Space*”, Thèse de l'Université de York, York, Royaume-Unis, 2003.

[Mays et al, 2013] Tom Mays, Pedro Bittencourt, *Modulateurs En Anneau Et Saxophone : Le Dispositif D'écriture Mixte Et L'interprétation Participative Dans L'œuvre Le Patch Bien Tempéré II*, Actes des Journées d'Informatique Musicale 2013, Paris, France, 2013.

[Moore et al, 2008] David Moore, Jonathan Wakefield, *The Design of Ambisonic Decoders for the ITU 5.1 Layout with Even Performance Characteristics*, AES 124th International Convention, Amsterdam, Pays-Bas, 2000.

[Morell et al, 2012] Martin J. Morrell, Joshua D. Reiss, *A 2D Variable-Order, Variable-Decoder, Ambisonics based Music Composition and Production Tool for an Octagonal Speaker Layout*, 9th International Symposium on Computer Music Modeling and Retrieval, Londres, Royaume-Unis, 2012.

[Neukom, 2007] Martin Neukom, *Ambisonic Panning*, AES 123rd International Convention, New York, Etats-Unis, 2007.

[Neukom et al, 2008] Martin Neukom, Jan C. Schacher, *Ambisonic Equivalent Panning*, ICMC, Belfast, Irlande, 2008.

[Noisternig et al, 2003] Markus Noisternig, Alois Sontacchi, Thomas Musil, Robert Holdrich, *A 3D Ambisonic Based Binaural Sound Reproduction System*, AES 24th International Conference, Graz, Autriche, 2003.

[Pulkki, 2002] Ville Pulkki, *Compensating Displacement of Amplitude-panned Virtual Sources*, AES 22nd International Conference, Espoo, Finlande, 2002.

[Roads, 1996] Curtis Roads, *The Computer Music Tutorial*, The MIT Press, Cambridge, Etats-Unis, 1996.

[Roads, 2001] Curtis Roads, *Microsound*, The MIT Press, Cambridge, Etats-Unis, 2001.

[Schacher et al, 2006] Jan Schacher, Philippe Kocher, *Ambisonics Spatialization Tools for Max/MSP*, ICMC, New Orleans, Etats-Unis, 2006.

[Schacher, 2010] Jan Schacher, *Seven Years Of Icst Ambisonics Tools For Maxmsp - A Brief Report*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics, Paris, France, 2010.

[Smith, 2007a] Julius O. Smith, *Partial Fraction Expansion, in Introduction to Digital Filters with Audio Applications*, <https://ccrma.stanford.edu/~jos/>, 2007, Livre en ligne, accès 2013.

[Smith, 2007b] Julius O. Smith, *Fourier Theorems for the DFT", in Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications*, Second Edition, <https://ccrma.stanford.edu/~jos/>, 2007, Livre en ligne, accès 2013.

[Smith, 2010] Julius O. Smith, *Physical Audio Signal Processing*, Second Edition, <https://ccrma.stanford.edu/~jos/>, 2007, Livre en ligne, accès 2013.

[Watson et al, 2010] Barry Watson, D. F. Clark, *Real-Time Ambisonic Simulation Of Auditorium Acoustics Within A Digital Audio Workstation Environment*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics, Paris, France, 2010.

[Wakefield, 2006], Graham Wakefield, *Third-Order Ambisonic Extension for Max/MSP with Musical Applications*. ICMC, New Orleans, Etats-Unis, 2006.

[Zotkin et al, 2009] Dmitry N. Zotkin, Ramani Duraiswami, *Plane-wave decomposition of a sound scene using a cylindrical microphone array*, IEEE Transactions Vol. 18, 2009.

ANNEXES

La mise en œuvre Max/MSP de la bibliothèque HOA, disponible sur le site du projet HOA : <http://www.mshparisnord.fr/hoalibrary/>.

L'ensemble des classes C/C++ de la bibliothèque HOA, disponible sur le répertoire Git du projet HOA : <https://github.com/cicm/hoalibrary>.

La publication des JIM 2013 : Julien Colafrancesco, Pierre Guillot, Eliott Paris, Anne Sédès, Alain Bonardi, *La bibliothèque Hoa, bilan et perspectives*, Actes des Journées d'Informatique Musicales 2013, Paris, France, 2013.