

CONCEVOIR DES TRAITEMENTS SONORES AMBISONIQUES EN 2D ET EN 3D - L'EXEMPLE DE *PIANOTRONICS 2*

Alain Bonardi
CICM – EA 1572
Université Paris 8
alain.bonardi@gmail.com

Pierre Guillot
CICM – EA 1572
Université Paris 8
guillotpierre6@gmail.com

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous présentons la conception de deux traitements sonores ambisoniques en 2D puis leur migration vers la 3D, en utilisant la bibliothèque HOA développée pour *Max* et *PureData* par le CICM / Université Paris 8. Nous montrons sur l'exemple de *Pianotronics 2*, pièce pour piano et électronique temps réel comment nous avons développé un banc de modules de synthèse granulaire et un ensemble de *frequency-shifters* en les associant nativement à la spatialisation ambisonique.

1. INTRODUCTION

Dans son avant-propos à l'ouvrage collectif *La spatialisation des musiques électroacoustiques*, le compositeur et théoricien John Chowning souligne son intérêt conjoint pour la création sonore et la conception d'espaces électroacoustiques : « *j'étais convaincu que le contexte spatial du son est tout aussi important que le son lui-même, on entend le son, mais on sent aussi l'espace* » [4]. Cette citation a d'une certaine manière fait école : peu de compositeurs peuvent la réfuter, comme le montre l'intérêt croissant pour ce que l'on nomme au sens large la spatialisation, à savoir l'ensemble des procédés électroacoustiques appliqués dans l'intention de créer un espace d'écoute immersif particulier en utilisant plusieurs haut-parleurs.

Nous nous penchons plus particulièrement sur les systèmes entourant l'auditeur de manière panoramique, et n'abordons pas ici les acousmoniums et orchestres de haut-parleurs [3]. De plus, à l'opposé des systèmes liés à la diffusion d'une source ponctuelle [9], nous nous intéressons à la création de champs diffus. Du point de vue de l'acoustique, un champ diffus est un champ où l'énergie volumique moyenne possède la même valeur en tous les points et où l'intensité acoustique est la même dans toutes les directions. Du point de vue compositionnel, le champ diffus ouvre un vaste potentiel aux créateurs. Dans le sillage de travaux de recherche-créditation comme ceux de Natasha Barrett en musique acousmatique ambisonique [1][2] ou ceux de Nicholas Mariette consacrés à la granulation spatiale [7], nous nous

intéressons aux traitements pensés dès le départ comme « spatialisés ».

2. COMPOSER EN AMBISONIE D'ORDRE ÉLEVÉ

2.1. Rappels sur l'ambisonie d'ordre élevé

L'ambisonie [5] décompose un champ sonore en une somme pondérée de fonctions spatiales élémentaires appelées harmoniques, circulaires en deux dimensions, sphériques en trois dimensions. La bibliothèque HOA a été développée au CICM [10] dans le fil de travaux de recherche ayant mené à la réalisation et à la diffusion d'outils comme les '*CICM Tools*' ou le '*CICM Panner*'. Cette bibliothèque permet de dépasser le traditionnel format B (ambisonie d'ordre 1 à 3) et d'offrir aux musiciens un cadre d'expérimentation et d'appropriation artistique sur des plateformes comme *Max* et *PureData*.

Rappelons brièvement les conventions posées : la direction 0° se trouve exactement en face de l'auditeur idéal assis au centre d'un cercle ou d'une sphère. La rotation est notée positivement dans le sens anti-horaire. En 2D et pour un ordre de décomposition N , l'ambisonie¹ manipule $2N+1$ harmoniques référencées par un ordre n compris entre $-N$ et N (et prend aussi la valeur 0, d'où le nombre de $(2N+1)$ harmoniques). Par exemple, l'ordre 3 comporte 7 harmoniques, ce qui demande au minimum 7 haut-parleurs ; le rendu est généralement proposé sur une octophonie. Ces harmoniques sont numérotées ainsi : 0, -1, 1, -2, 2, -3 et 3.

La figure 1 donne l'allure des harmoniques, qui comportent des lobes positifs (habituellement en rouge, ici en gris clair) et des lobes négatifs (habituellement en bleu, ici en gris foncé). Au fur et à mesure que l'index croît, le nombre de lobes augmente mais la précision spatiale augmente considérablement.

¹ Le lecteur pourra se référer au glossaire suivant relatif à l'ambisonie : <http://ambisonics.ch/standards/channels/glossary>

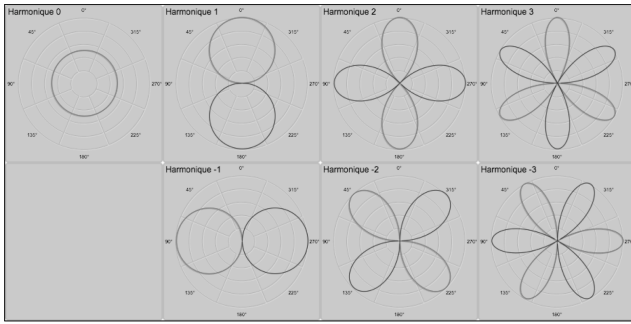


Figure 1. Les harmoniques circulaires de l'ambisonie 2D jusqu'à l'ordre 3.

La combinaison des harmoniques avec leurs lobes positifs et négatifs peut donner un résultat très directionnel comme une source ponctuelle (exemple d'un encodage figure 2) ou au contraire très diffus comme sur la figure 3.

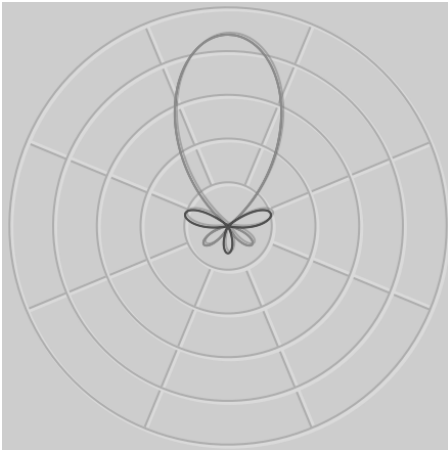


Figure 2. Encodage d'un signal constant unitaire à l'angle 0° en 2D en ambisonie d'ordre 3.

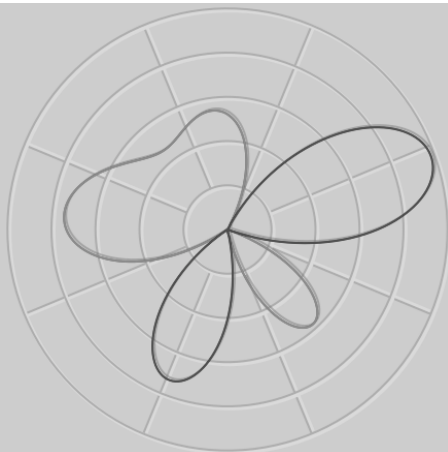


Figure 3. Représentation d'un champ diffus obtenu avec des signaux aléatoires comme harmoniques.

En 3D, pour un ordre de décomposition N , l'ambisonie comporte $(N+1)^2$ harmoniques réparties en bandes

organisées comme des séries d'harmoniques 2D. La 1^{ère} bande, de degré 0, ne comporte qu'une harmonique, d'ordre 0 et est référencée [0 0]. La 2^{ème} bande, de degré 1, comporte trois harmoniques, d'ordres -1, 0 et 1, référencées respectivement [1 -1], [1 0] et [1 1]; et ainsi de suite. La figure 4 montre la forme de ces harmoniques dans l'espace tridimensionnel : en la parcourant de haut en bas, on trouve les bandes de degrés successifs représentées horizontalement.

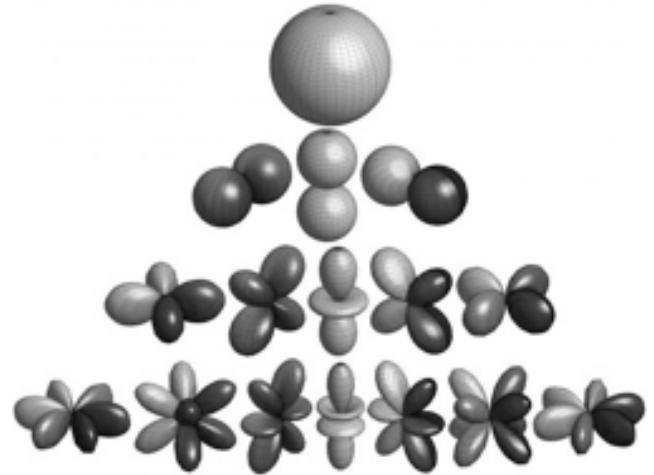


Figure 4. Les harmoniques sphériques de l'ambisonie 3D jusqu'à l'ordre 3.

2.2. Composer avec les harmoniques

L'organisation modulaire des objets s'inspire de la bibliothèque ambisonique créée par Graham Wakefield [11] et vise clairement une conception d'intégration des traitements dans le calcul de la spatialisation. Que ce soit en encodant les harmoniques d'une source ponctuelle ou en considérant un ensemble de signaux comme des harmoniques d'un champ diffus, l'approche correspond à une imbrication du traitement et de la spatialisation. L'objet *Max* ou *PureData* au cœur de cette conception est *hoa.2d.process~* en deux dimensions et *hoa.3d.process~* en trois dimensions, inspirés de l'objet *poly~* dont ils étendent les possibilités en termes d'entrées et de sorties². La figure 5 montre un exemple de lignes à retard traitées en ambisonie avec l'objet *hoa.2d.process~*.

² Alors que l'objet *poly~* (uniquement dans *Max*) fait la somme des sorties de toutes les instances, les objets *hoa.2d.process~* ou *hoa.3d.process~* permettent de les sortir séparément.

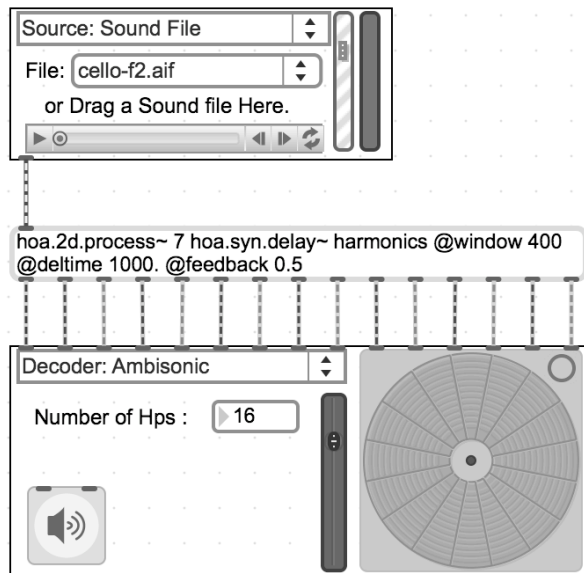


Figure 5. Un banc de lignes à retard imbriquées dans le calcul ambisonique 2D à l'ordre 7.

Un traitement simple autour d'une ligne à retard, codé dans un patch nommé *hoa.syn.delay~* (figure 6) est encapsulé dans *hoa.2d.process~* et instancié autant de fois qu'il y a d'harmoniques. Cela crée *de facto* des harmoniques d'un champ diffus (ici au nombre de 15 à l'ordre 7) qui ensuite peuvent être décodées pour obtenir le rendu sonore sur 16 haut-parleurs.

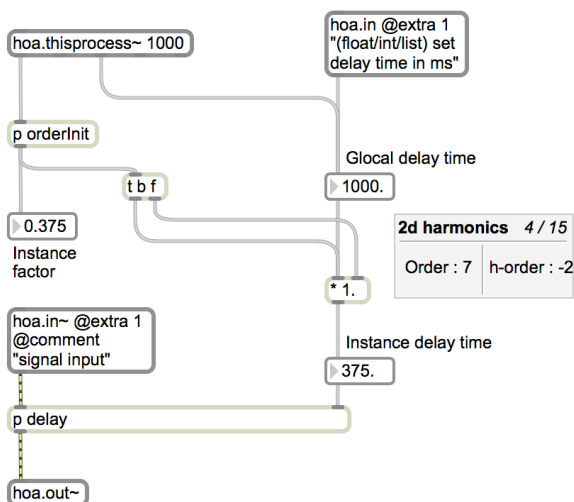


Figure 6. Copie d'écran d'une instance du traitement *hoa.syn.delay~*.

Le sous-patch *p orderInit* en haut à gauche dans ce traitement (figure 6) permet d'initialiser la durée du retard

en fonction de l'indice de l'harmonique : pour l'harmonique 0, la durée est 125 millisecondes, pour les harmoniques -1 et 1 elle monte à 250 millisecondes, et ainsi de suite jusqu'aux harmoniques -7 et 7 pour lesquelles le retard vaut 1000 millisecondes.

3. CONCEPTION BI-DIMENSIONNELLE DE *PIANOTRONICS 2*

3.1. Présentation de *Pianotronics 2*

Dans le cadre du projet de recherche intitulé « La spatialisation du son par les musiciens »³ développé par le CICM avec le soutien du LABEX H2H, la participation des musiciens et compositeurs – étudiants et enseignants-chercheurs, a été sollicitée pour explorer la spatialisation ambisonique lors de la création d'œuvres mixtes.

Elaborée dans ce cadre, *Pianotronics 2*⁴ appartient à un cycle de 12 pièces pour piano et électronique temps réel explorant une configuration technique fixée, comportant notamment la bibliothèque HOA. Il s'agit d'approfondir la relation voulue comme concertante entre piano et électronique selon douze voies différentes. Dans un premier temps (fin 2013-début 2014), nous avons avancé sur la version 2D de *Pianotronics 2*, puisque la version 3D de HOA n'était encore qu'une esquisse.

Dans *Pianotronics 2*, l'écriture pianistique est articulée sur deux plans :

- d'une part, un travail de pédale harmonique par plages de plusieurs mesures, fondé sur les variations d'un accord dont la partie inférieure est empruntée à la *Marche Funèbre* de la *Troisième Année de Pèlerinage* de Liszt. La figure 7 montre l'accord initial joué au début de la pièce.
- d'autre part, un travail mélodique à la main droite sur la pédale harmonique qui prend pleinement son sens dans sa relation avec l'électronique par des transformations timbrales et des transpositions du piano.

³ Ce projet est régulièrement soutenu par le LABEX H2H depuis l'année universitaire 2012/2013. Pour sa troisième année, il est plus particulièrement orienté vers la spatialisation ambisonique en 3D.

⁴ Commande de PuceMuse en 2013, créée en 2014, *Pianotronics 2* a été composée par Alain Bonardi pour piano et électronique temps réel. La pièce a été donnée plusieurs fois en 2014 : dans le cadre du Festival Puce Muse à Saint-Merri, du concert Modes de Jeu à l'Université Paris 8 (en partenariat avec le Conservatoire de Saint-Denis), à la Toho Gakuen Music School à Tokyo, au NYCEMF Festival à New York, à l'Eglise Américaine de Paris, au CIRMMT à Montréal.

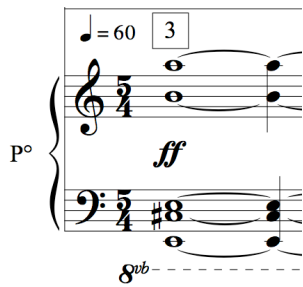


Figure 7. Accord initial de *Pianotronics 2* (source : partition de *Pianotronics 2*, Editions Fortin). La main gauche est empruntée à la *Marche Funèbre* de la *Troisième Année de Pèlerinage* de Liszt.

Entre ces deux plans apparaissent des figures intermédiaires, comme par exemple des accords arpégés, relevant aussi bien du vertical que de l’horizontal.

Chacun de ces deux plans correspond à un type de traitement particulier au niveau de l’électronique :

- d’une part, un ensemble de sept modules de synthèse granulaire décalés d’un septième de période, explorant le matériau sonore du grave de la partie de piano en faisant appel à une série d’accords préenregistrés. Ces accords s’intègrent au travail harmonique évoqué ci-dessus selon une approche spatialisée que nous détaillons au paragraphe 3.2.
- d’autre part, un ensemble de trois *frequency-shifters*, créant chacun deux sons (sortie plus et sortie moins séparées) modulés à partir du piano, soit six sons auxquels sont appliqués des lignes à retard avec réinjection. L’ensemble de cette transformation timbrale et harmonique est décrit au paragraphe 3.3.

Nous montrons en détail ces deux types de traitement et leur intégration compositionnelle dans les paragraphes 3.2 et 3.3.

3.2. De l’*overlapping* au traitement granulaire spatial

L’idée initiale dans la conception de ce traitement est de séparer puis de recombinaer spatialement des composantes de synthèse granulaire. Nous partons du principe d’*overlapping*⁵, qui, pour diminuer la perception de l’enveloppe de grain placée sur un générateur sonore, propose une moyenne de n modules de ce générateur dont les enveloppes sont déphasées de $1/n$ période. Ainsi, partant par exemple d’un synthétiseur granulaire monophonique, le principe d’*overlapping* consiste à superposer n instances de ce module, chacune étant

déphasée au niveau de son enveloppe de $1/n$ période par rapport à la précédente (cf. figure 8).

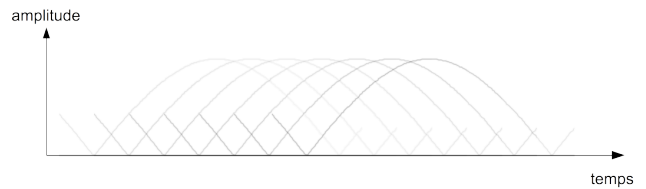


Figure 8. Principe d’*overlapping* de n enveloppes granulaires déphasées de $1/n$ période (ici $n=7$).

Dans *Pianotronics 2*, nous avons repensé ce principe en l’intégrant au modèle ambisonique. D’une part, un module générique monophonique de synthèse granulaire a été créé en *Max* ; il est présenté à la figure 9. Il initialise automatiquement les déphasages des enveloppes des modules de synthèse granulaire en fonction de l’index de l’harmonique concernée et de l’ordre de l’ambisonie. Mais au lieu de sommer et pondérer les sorties des sept instances sous la forme d’un signal mono comme le propose le principe d’*overlapping*, nous considérons les sept sorties de ces générateurs comme les sept harmoniques circulaires de l’ambisonie de niveau 3 que nous mettons en œuvre. La première enveloppe est connectée à l’harmonique 0, la deuxième – déphasée de $1/7$ de période, à l’harmonique -1, la troisième – déphasée de $2/7$ de période, à l’harmonique 1, etc. La figure 10 montre comment ces sept instances sont intégrées à l’ambisonie par l’objet *hoa.2d.process~* avec des paramètres de contrôle communs aux sept modules.

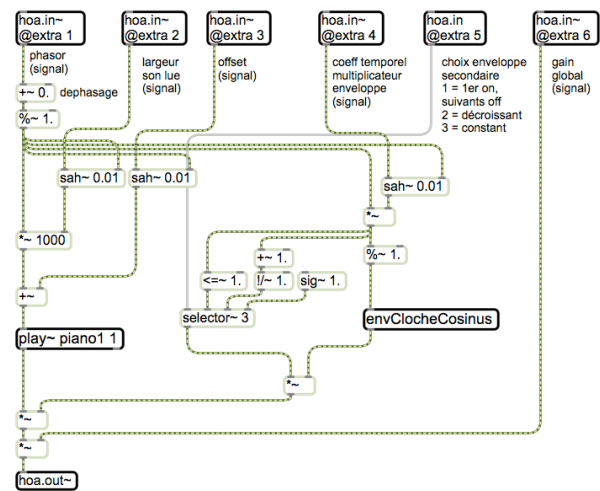


Figure 9. Module générique de synthèse granulaire conçu pour s’intégrer à HOA.

⁵ Nous avons conservé le terme anglais en italique, plutôt que de le traduire par ‘chevauchement’ ou ‘superposition’ moins employés dans la communauté francophone d’informatique musicale.

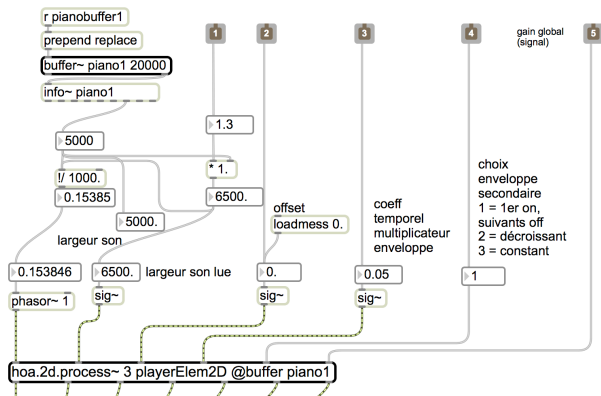


Figure 10. Intégration spatiale de sept instances de granulation en lieu et place de l'*overlapping*.

Le résultat sonore produit des figures rythmico-spatiales liées aux particularités de traitement : en effet, le déphasage de lecture du *buffer* est un phénomène au départ temporel, que l'on relie directement à un modèle mettant en œuvre les fonction d'espace que sont les harmoniques circulaires.

Pour pouvoir élaborer plus finement et tester ces figures, nous avons ajouté un matricage des sept sorties issues du traitement de synthèse granulaire avant leur décodage. Quatre figures liées à quatre permutations ont été mises en évidence à l'écoute, comme le montre la figure 11. De gauche à droite, nous avons : la permutation « identité », la permutation inverse de l'identité, et deux autres permutations ayant une forme de « chevron » vertical ou horizontal.

Les deux premières permettent de séquencer des parcours rythmico-spatiaux allant d'une diffusion isotrope (harmonique 0) à une diffusion très localisée (harmoniques -3 et 3) ou dans l'autre sens, lors du déroulement temporel du cycle des modules. En revanche, les deux dernières permutations mettent à mal les figures rythmiques et laissent entendre un champ sonore beaucoup plus diffus⁶.

Pianotronics 2 est organisée en deux grandes parties qui sont assez semblables du côté de l'électronique temps réel, mais dissemblables côté piano. Les deux parties proposent une évolution de l'électronique qui combine un raccourcissement de la taille de la fenêtre de lecture granulaire et une modification de la spatialisation sonore, en proposant une variation sur les permutations choisies depuis les deux premières avec leurs séquencements rythmiques jusqu'aux formes en « chevron » donnant un champ sonore de plus en plus diffus mais sur des sons de plus en plus éclatés.

⁶ Il est évident que la largeur d'enveloppe granulaire entre directement en compte au niveau temporel en raison des déphasages de 1/7 de période entre les harmoniques successives : la perception n'est pas la même lorsque la période est courte ou longue. A l'oreille, il apparaît qu'un recouvrement minimal entre les harmoniques est nécessaire.

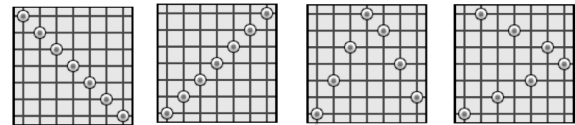


Figure 11. Permutations des sorties des sept synthétiseurs granulaires avant entrée dans le décodeur ambisonique.

3.3. Conception spatiale d'un traitement rythmico-timbral

L'autre partie du traitement sonore est comme nous l'avons présenté au 3.1 un traitement du son direct du piano par un ensemble de trois *frequency-shifters* pilotés par trois fréquences de modulation f_1 , f_2 et f_3 . Ainsi le spectre du piano subit six décalages (*shifting*) fréquentiels : décalé de $+f_1$, $+f_2$, $+f_3$ vers l'aigu, décalé de $-f_1$, $-f_2$, $-f_3$ vers le grave⁷. Le *frequency-shifter* produit à la fois une transposition du son du piano et une altération de son timbre, particulièrement lorsque la fréquence de modulation ne correspond pas à l'une des harmoniques de la note de piano jouée en entrée. La première fonction de ce traitement est donc harmonique et timbrale.

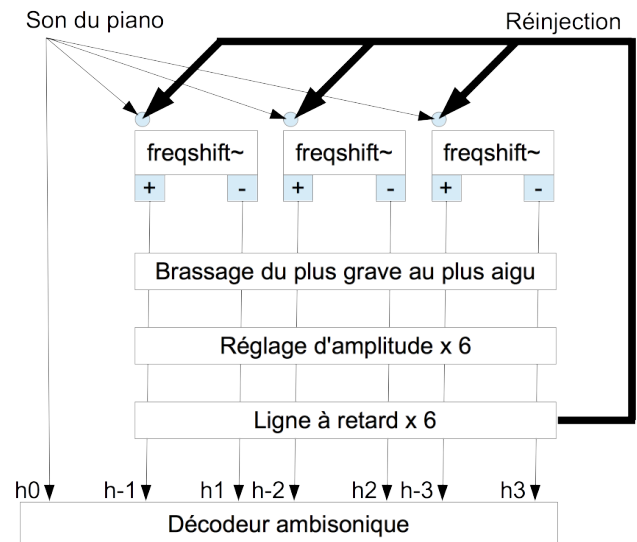


Figure 12. Schéma fonctionnel des *frequency-shifters* avec réinjection dans *Pianotronics 2*.

Chacune des sorties de ces trois *frequency-shifters* (soit un total de six sorties) est envoyée dans une ligne à retard avec réinjection. Les sons issus des *frequency-shifters* sont donc entendus de manière arpégée. D'autre part, la

⁷ Sur le détail de fonctionnement du *frequency-shifter*, nous renvoyons le lecteur à [8].

réinjection produit de nouveaux décalages vers l'aigu ou le grave, puisque les sons réinjectés repassent dans les entrées des *frequency-shifters*. Les durées des six lignes à retard conditionnent donc le profil des figures rythmiques générées.

En associant le son direct du piano aux six sorties des *frequency-shifters*, nous obtenons sept sons utilisés comme harmoniques circulaires de la manière suivante : le son du piano constitue l'harmonique 0 qui est isotrope (et constitue une référence sonore), alors que les transpositions sont dirigées vers les autres harmoniques en envoyant les sons les plus graves vers les harmoniques d'index le plus bas qui sont moins directionnelles.

4. PASSER DE LA 2D À LA 3D

À l'automne 2014, avec les avancées de la partie 3D de HOA dans le cadre du projet H2H, nous nous sommes penché sur la création d'une version 3D de *Pianotronics 2*. Il s'agissait d'explorer dans quelle mesure une pièce conçue pour un traitement ambisonique 2D pourrait non seulement supporter une extension à la 3D mais aussi d'évaluer quel pourrait en être l'intérêt compositionnel, et ouvrir la voie à une recomposition de l'œuvre originale.

La première difficulté aussi bien du point de vue compositionnel que de celui de la mise en œuvre technique a été la compréhension et la manipulation des contributions spatiales des harmoniques sphériques présentées au 2.1. Nous avons conduit une première expérimentation en studio⁸ avec 16 haut-parleurs, donc sur 16 harmoniques à l'ordre 3 d'ambisonie en 3D, puis deux séries de tests dans le dôme de 32 haut-parleurs de l'Université de Montréal⁹. Nous montrons dans les paragraphes 4.1 et 4.2 comment nous avons modifié en conséquence respectivement le traitement granulaire et le *frequency-shifting*¹⁰.

4.1. Extension du traitement granulaire en 3D

L'extension technique de la 2D à la 3D ne pose ici aucun problème de réalisation en *Max* car le traitement granulaire considéré est générique, et il suffit d'utiliser l'objet *hoa.3d.process~* au lieu de *hoa.2d.process~*. Il y aura alors 16 instances de granulation au lieu de 7 en 2D.

⁸ Dans le cadre du projet soutenu par le LABEX H2H évoqué ci-dessous, Pierre Guillot et Elliott Paris, doctorants au CICM/Université Paris 8, ont installé un studio d'ambisonie 3D dans les locaux de la Plateforme Arts, Sciences, Technologies, de la Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord.

⁹ Les tests à la MSH Paris Nord ont eu lieu en octobre-novembre 2014. Ceux menés à Montréal se sont déroulés en décembre 2014 puis en avril 2015.

¹⁰ Il est possible d'écouter le rendu sonore en binaural des tests effectués en téléchargeant un dossier complet de fichiers WAV à l'adresse suivante : http://www.alainbonardi.net/pianotronics/pt2_fr.html. Pour chacun des tests effectués sont donnés le son obtenu en 2D et les différents sons en 3D

Toutefois, l'initialisation des déphasages des enveloppes granulaires pose problème. Rappelons que ce traitement, que l'on pourrait qualifier « d'*overlapping spatialisé* » nécessite d'établir l'ordre des n granulateurs instanciés de manière précise, pour gérer les déphasages de $1/n$ période entre deux instances successives. En suivant la figure 4, comment ordonner temporellement les différentes harmoniques ?

Nous avons pensé à deux possibilités d'ordonnement. Dans la première, nous étendons le schéma prévu en 2D, qui allait de l'harmonique 0 aux harmoniques d'ordre plus élevé, en faisant ce parcours des harmoniques horizontales (par exemple [2 -2]) aux harmoniques verticales (cf. figure 4), successivement : [0 0], [1 1], [1 -1], [2 2], [2 -2], [3 3], [3 -3], [1 0], [2 1], [2 -1], [3 2], [3 -2], [2 0], [3 1], [3 -1] et [3 0]. En reprenant la disposition des harmoniques de la figure 4, nous obtenons le séquençage temporel montré sur la figure 13 : les chiffres en gras indiquent l'ordre de parcours des harmoniques.

Dans le second ordonnancement, nous avons au contraire privilégié un parcours par bandes d'harmoniques sphériques, telles que représentées horizontalement sur la figure 4, en conservant la logique qui consiste à partir de l'index 0 jusqu'aux index plus élevés. L'ordre des harmoniques obtenu est le suivant : [0 0], [1 0], [1 1], [1 -1], [2 0], [2 1], [2 -1], [2 2], [2 -2], [3 0], [3 1], [3 -1], [3 2], [3 -2], [3 3], et [3 -3]. Le résultat est donné figure 14.

| | | | | | | | | | |
|--------------|----|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------|
| <i>Degré</i> | | | | | | | | | |
| 0 | | | 0 | | | | | | |
| 1 | | | 2 | 7 | 1 | | | | |
| 2 | | | 4 | 9 | 12 | 8 | 3 | | |
| 3 | | | 6 | 11 | 14 | 15 | 13 | 10 | 5 |
| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | <i>Ordre</i> | |

Figure 13. Premier ordonnancement des granulateurs par rapport aux harmoniques 3D à l'ordre 3 d'ambisonie.

| | | | | | | | | | |
|--------------|----|----|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|--------------|-----------|
| <i>Degré</i> | | | | | | | | | |
| 0 | | | 0 | | | | | | |
| 1 | | | 3 | 1 | 2 | | | | |
| 2 | | | 8 | 6 | 4 | 5 | 7 | | |
| 3 | | | 15 | 13 | 11 | 9 | 10 | 12 | 14 |
| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | <i>Ordre</i> | |

Figure 14. Second ordonnancement des granulateurs par rapport aux harmoniques 3D.

Ces deux ordonnancements ont été codés sous la forme de scripts Javascript dans le patch *Max* de la version 3D de *Pianotronics 2*. Les deux ont été testés en studio avec 16 puis 32 haut-parleurs : le premier ordonnancement a eu nettement notre préférence dans les deux situations. En effet, il permet de mieux conserver l'appréhension des profils rythmico-spatiaux.

Par ailleurs, nous avons élaboré un contrôle – toujours sous la forme d'un code Javascript, de « l'ouverture verticale » du champ sonore. Ce paramètre varie de 0 à 3 en ambisonie d'ordre 3, correspondant respectivement à une diffusion purement horizontale pour 0 et allant jusqu'à une diffusion sur l'ensemble des dimensions pour la valeur 3. La figure 15 montre le *mapping*¹¹ pour la valeur 0. Ce paramètre, apporté par l'ambisonie 3D, s'est révélé très pertinent pour *Pianotronics 2*. Dans chacune des deux parties qui constituent la pièce, nous associons la progressive diminution de la largeur d'enveloppe des modules de synthèse granulaire à l'évolution de la verticalité de la diffusion sonore, allant du plan strictement horizontal vers le plein volume tridimensionnel.

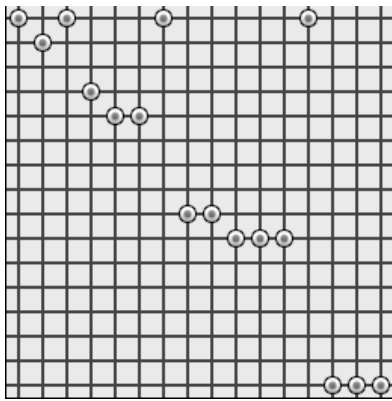


Figure 15. *Mapping* des harmoniques sphériques uniquement vers les harmoniques horizontales (paramètre de *mapping* à 0).

4.2. Extension du traitement du piano par *frequency-shifters* à la 3D

Nous avons également repris le traitement du son du piano par *frequency-shifter*. Pour cette partie, il n'est pas possible d'étendre le nombre de *frequency-shifters*. En effet, le choix de six sorties (deux pour chacun des trois *frequency-shifters*) est lié à l'écriture de la pièce, puisque le dispositif génère des accords arpégés. Associées au son direct du piano, ces six sorties étaient directement prises

¹¹ Comme dans le cas de l'*overlapping*, nous conservons ici le terme anglais 'mapping' en italique. L'équivalent français serait « mise en correspondance ».

en compte en 2D comme harmoniques circulaires dans la spatialisation.

En 3D, une telle association n'est plus possible : nous avons 7 signaux du côté du piano et de ses transformations, et au moins 16 harmoniques sphériques en 3D. Nous avons procédé à une série de tests de *mapping* des 7 signaux issus du piano vers les harmoniques sphériques. Dans un premier temps, à l'ordre 3 d'ambisonie 3D, nous avons constaté un manque de résolution spatiale. Nous sommes donc passés à l'ordre 5 d'ambisonie 3D (soit 36 harmoniques) pour avoir une représentation suffisamment fine que nous avons ensuite projetée par décodage sur 16 haut-parleurs. La résolution obtenue était meilleure.

Nous avons donc travaillé sur une matrice avec en entrée les 7 signaux issus du piano et en sortie les 36 harmoniques de l'ordre 5 de l'ambisonie 3D. Les premiers *mappings* choisis sur la matrice étaient décevants et produisaient des situations sonores avec des « creux » dans l'espace sonore que nous avons attribué à des oppositions de phase¹² entre lobes des harmoniques. Nous avons donc opéré un premier traitement de simple déphasage des harmoniques sphériques, en multipliant par (-1) les bandes d'harmoniques de rang impair (dans notre cas les bandes 1, 3 et 5).

Après plusieurs tentatives, le choix retenu pour le *mapping* a été le suivant : nous avons numéroté tout d'abord les 7 sources issues du piano pour *i* variant de 0 à 6. Puis nous envoyons le son de la source n° *i* vers toutes les harmoniques comportant *i* ou (-*i*) comme index. Par exemple, la source 5 est envoyée vers les harmoniques [5 -5], [5 5], [6 -5] et [6 5]. La figure 16 donne la matrice correspondante.

Cette configuration donne une relation intéressante entre le geste du pianiste et le rendu sonore tridimensionnel : en effet, ce dernier se déploie plutôt verticalement, dans l'énergie du geste du pianiste, notamment sur les accords arpégés de la deuxième partie.

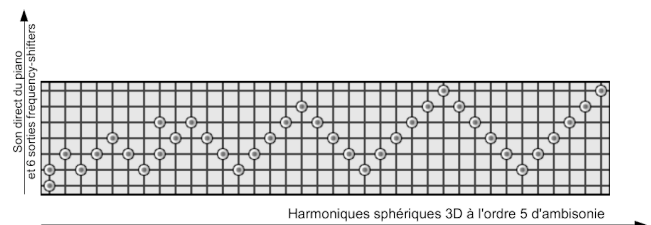


Figure 16. Matricage des 7 sources issues du piano vers les 36 harmoniques sphériques à l'ordre 5 d'ambisonie.

¹² En complément de l'écoute, l'observation graphique du résultat sonore en termes de représentation d'harmoniques a été obtenue grâce à l'objet *hoa.3d.scope*.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons montré comment la conception des traitements électroniques dans *Pianotronics 2* a été imbriquée avec l'organisation de l'espace sonore ambisonique. En passant de la 2D à la 3D, deux approches ont été mises en évidence : d'une part, la mise en parallèle d'instances d'un granulateur couplées aux harmoniques sphériques ; d'autre part, le *mapping* d'un petit nombre de signaux audio issus des *frequency-shifters* vers un nombre élevé d'harmoniques. Dans les deux cas, nous avons travaillé sur des matrices de *mapping*, et cherché des configurations intéressantes et pertinentes au niveau sonore en effectuant des tests sur des installations de 16 et 32 haut-parleurs. Au-delà de *Pianotronics 2*, nous pensons dans un second temps formuler ces questions de *mapping* entre traitements et harmoniques circulaires ou sphériques de manière plus générique et plus systématique.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions le LABEX Arts H2H pour son soutien à ce projet, notre collègue Anne Sèdes du CICM, ainsi que Elliott Paris, doctorant. Nous exprimons notre reconnaissance aux pianistes Franco Venturini et Sophia Vaillant qui ont monté *Pianotronics 2*. Merci également à Robert Normandeau et Pierre Michaud, professeurs à l'Université de Montréal d'avoir accueilli des sessions de test du dispositif en 3D ; aux Editions Fortin, qui éditent la partition de *Pianotronics 2*, pour leur soutien indéfectible et leur autorisation à en publier des extraits, ainsi qu'à PuceMuse et Serge de Laubier plus particulièrement.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Barrett, N., Ambisonics and acousmatic space: a composer's framework for investigating spatial ontology. In *Proceedings of the Sixth Electroacoustic Music Studies Network Conference*, Shanghai, 21-24 juin 2010.
- [2] Barrett, N., Kernel Expansion: A Three-Dimensional Ambisonics Composition Addressing Connected Technical, Practical and Aesthetical Issues. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics*, Paris, 6-7 mai 2010.
- [3] Bayle, F., « Le concert pourquoi ? Comment ? ». In *Cahiers Recherche/Musique n°5* : Ed. Ina-GRM, Paris 1977.
- [4] Chowning, J., Avant-Propos (traduction Laurent Pottier) à l'ouvrage *La Spatialisation des musiques électroacoustiques*, Publications de l'université de Saint-Etienne, Saint-Etienne : 2012, pages 19-21.
- [5] Colafrancesco, J., L'ambisonie d'ordre supérieur et son appropriation par les musiciens, présentation de la

- bibliothèque Hoa.lib. *Actes des Journées d'Informatique Musicale 2012*, Mons, Belgique, 2012.
- [6] Guillot, P., *Les traitements musicaux en ambisonie*, Mémoire de Master 2, Université Paris 8, 2013.
 - [7] Mariette, N., AmbiGrainer - A Higher Order Ambisonic Granular in Pd. In *Proceedings of the 2009 Ambisonics Symposium*, Graz, Austria, 25-27 juin 2009.
 - [8] Mays, T., Bittencourt, P., Modulateurs en anneau et saxophone : le dispositif d'écriture mixte et l'interprétation participative dans l'œuvre *Le patch bien tempéré II*. In *Actes des Journées d'Informatique Musicale 2013*, Saint-Denis, pages 121-130.
 - [9] Pottier, L., Le contrôle de la spatialisation. In *La spatialisation des musiques électroacoustiques*, Publications de l'université de Saint-Etienne, Saint-Etienne : 2012, pages 81-104.
 - [10] Sèdes, A., Guillot, P., Paris, E., The HOA Library, review and prospect. In *Proceedings of the 2014 ICMC-SMC Conference*, Athens, Greece, pages 855-860.
 - [11] Wakefield, G., Third-Order Ambisonic Extensions for Max/MSP with Musical Applications. In *Proceedings of the International Computer Music Conference 2006*, pages 123-126.