

# VERS UNE APPROCHE IMMERSIVE DE LA COMPOSITION MUSICALE PAR LE DÉVELOPPEMENT D'OUTILS DE SPATIALISATION SONORE: *ControlGRIS ET ServerGRIS*

David Ledoux  
CIRMMT  
Université de Montréal  
david.ledoux@umontreal.ca

Olivier Bélanger  
CIRMMT  
Université de Montréal  
olivier.belanger@umontreal.ca

Robert Normandeau  
CIRMMT  
Université de Montréal  
robert.normandeau@umontreal.ca

Christophe Lengelé  
CIRMMT  
Université de Montréal  
christophe.lengele@umontreal.ca

## RÉSUMÉ

Cet article présente les récents développements relatifs aux outils de spatialisation du son, conçus par le Groupe de Recherche en Immersion Spatiale (GRIS) – le *ControlGRIS* et le *ServerGRIS* – ainsi que les projets de développement à venir. Depuis 2009, ce projet de recherche-création poursuit l'objectif d'offrir une solution libre, gratuite, simple et efficace pour une spatialisation multidirectionnelle du son, intégrée tout au long du processus de composition, tant pour la création musicale, les arts et les installations sonores, ou encore le cinéma indépendant.

## 1. INTRODUCTION

Sur le plan acoustique, l'immersion sonore est comprise comme la capacité d'un environnement ou d'un dispositif technique à diffuser du son dans plusieurs directions autour d'un auditoire [11]. Toutefois, l'écoute est un phénomène complexe et il serait réducteur d'associer la sensation subjective d'immersion à la simple capacité de diffusion multidirectionnelle d'un dispositif – en la considérant indépendamment des autres paramètres simultanément composables du son, tel que le contenu spectral et l'intensité, ou encore, de l'intentionnalité d'écoute de l'individu [2]. Généralement, les outils de spatialisation audio-numériques représentent l'espace virtuel de diffusion en trois dimensions (3D), selon des coordonnées sphériques ou cartésiennes. Mais la perception du son dans l'espace ne dépend pas uniquement de la direction relative d'une source sonore virtuelle, par rapport à une position centrale, tel que fréquemment représentée dans la plupart des environnements de spatialisation actuellement disponibles. Elle dépend aussi de la nature des sons, de leur complexité, de leur contexte d'exposition, du sens qu'on peut leur inférer, ainsi qu'une foule d'autres facteurs que les compositeurs et créateurs sonores aiment pouvoir manipuler. Conséquemment, la position relative des sources sonores virtuelles, ainsi que leur mouvement dans l'es-

pace de diffusion, devraient pouvoir être composés simultanément aux autres propriétés du son évoluant dans le temps, tel que l'intensité et le timbre [6].

## 2. CONTEXTE ET MOTIVATIONS

Depuis 2009, le Groupe de Recherche en Immersion Spatiale (GRIS) poursuit le développement d'outils de spatialisation audio-numériques dans l'optique d'offrir aux compositeurs un contrôle indépendant sur la localisation des sources sonores dans l'espace de diffusion, tout en permettant une organisation simultanée de leurs mouvements en relation avec d'autres composantes du son. Le projet du GRIS s'appuie sur deux prémisses : (1) de nos jours, la majorité des compositeurs de musique électroacoustique emploient un environnement de travail audio-numérique (DAW) comme outil principal de composition; (2) la composition spatiale doit coïncider avec la composition temporelle du son, et ce, durant tout le processus de création plutôt qu'à une étape ultérieure de la production.

Historiquement, la spatialisation sonore fait partie intégrante de la musique électroacoustique <sup>1</sup>. De nombreux dispositifs de spatialisation d'objets sonores [12] ont depuis vu le jour et sont de plus en plus utilisés en dehors des centres de recherche universitaires – par l'industrie du cinéma, les planétariums, les dômes audiovisuels et la réalité virtuelle (RV), notamment. Mais, certains de ces outils peuvent être coûteux, conçus principalement comme outils de mixage et non de création, ou encore, pour une application liée à des domaines surtout visuels, tels que le cinéma, la RV ou les jeux vidéo. De plus, certains logiciels propriétaires se fondent sur un seul algorithme de spatialisation, dont le principe de fonctionnement est relativement contraignant et obscur. Du côté des outils libres de droit, ceux-ci offrent majoritairement une spatialisation

1. Notamment, le *potentiomètre d'espace*, employé avec un ensemble de 4 haut-parleurs, au début des années 50, par Pierre Schaeffer et Jacques Poullin [4, p.26]

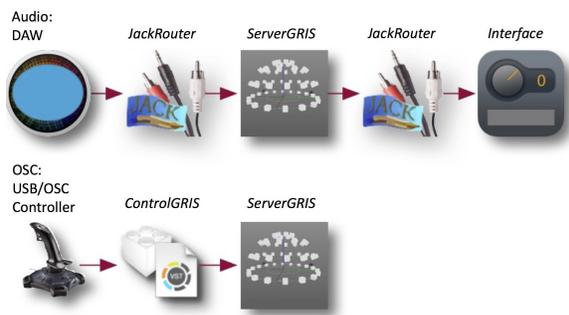


Figure 1. Architecture de connexion

uniquement fondée sur l’ambisonie d’ordre élevé (HOA) [3] et n’incluent pas d’autres algorithmes qui pourraient mieux s’appliquer dans certains contextes.

L’un des principaux objectifs du projet de développement présenté dans cet article est d’offrir aux artistes sonores et aux compositeurs un outils de spatialisation libre de droit, simple, ouvert et efficace, favorisant l’expérimentation dans la diffusion spatialisée du son, et ce, avec un minimum de contraintes sur le plan des ressources informatiques (CPU) tout en offrant une précision spatiale optimale. L’article présente les derniers progrès et les prochaines étapes de développement – effectués en collaboration avec les compositeurs-testeurs du GRIS<sup>2</sup> – pour les outils de spatialisation audionumériques *ServerGRIS* et *ControlGRIS*.

### 3. SERVERGRIS

#### 3.1. Présentation

Comme son nom l’indique, le *ServerGRIS* offre un « service » de spatialisation à des logiciels « clients » pouvant transmettre du signal audionumérique. Cette approche permet aux utilisateurs d’y connecter simultanément et dynamiquement plusieurs outils de création sonore, que ce soit pour un usage en temps réel ou différé.

#### 3.2. Architecture

Le *ServerGRIS* reçoit les signaux audio sortant de chaque client, selon leur nombre de canaux respectifs. Celui-ci peut recevoir jusqu’à 128 entrées et diffuser jusqu’à 128 sorties, grâce au plugiciel<sup>3</sup> HAL *JackRouter*, installé avec le serveur. En parallèle, le *ServerGRIS* reçoit des coordonnées spatiales (métadonnées), transmises au format Open Sound Control (OSC) par un contrôleur externe, notamment le *ControlGRIS* (section 4). En combinant les signaux entrant et leurs métadonnées correspondantes, le serveur s’occupe alors de redistribuer

2. L’article présente un point de vue de compositeur et non de programmeur.

3. Le terme *plugiciel*, formé à partir des mots *PLUs* et *LOGICIEL*, constitue un « plus » en augmentant les performances du logiciel principal. Ce terme a été proposé par l’Office québécois de la langue française en juin 1996 (2013).

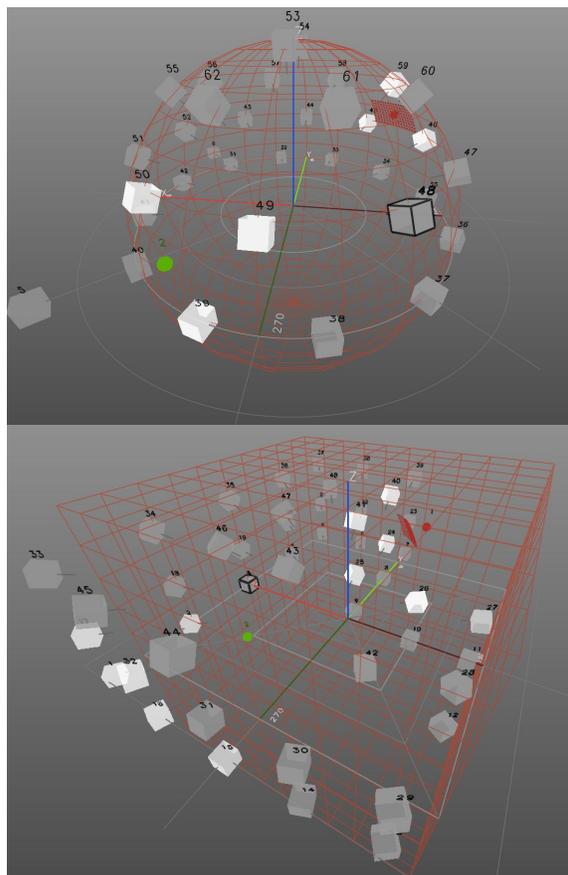


Figure 2. Configurations de haut-parleurs représentées en 3D dans le *ServerGRIS*, un dôme en mode VBAP (en haut) et une structure quelconque en mode LBAP (en bas).

chaque signal en fonction de la configuration de haut-parleurs sélectionnée pour la diffusion. Par définition, ce type de système – combinant des signaux audio avec des métadonnées – présente une spatialisation basée sur des *objets sonores* [12], ce qui permet de facilement composer un espace sonore virtuel, en abstraction du dispositif de diffusion actuel. En somme, l’architecture (figure 1) du *ServerGRIS* permet : une intégration facile des outils audionumériques privilégiés ; d’adapter toute diffusion à une variété de configurations de haut-parleurs ; et d’employer différents algorithmes de spatialisation, selon les ressources disponibles et les besoins des créateurs.

#### 3.3. Algorithmes de spatialisation

La version actuelle du *ServerGRIS*<sup>4</sup> offre quatre modes de spatialisation différents [7] :

**VBAP (Vector-Based Amplitude Panning)** [9] qui spatialise les sources sonores sur la surface d’un dôme de haut-parleurs préalablement configuré ;

**LBAP (Layer-Based Amplitude Panning)** nouvel algorithme dont le principe de fonctionnement se

4. La version 1.04 au moment d’écrire ces lignes.

trouve décrit à la section 3.3.1 ;

**Binaural** pour une écoute simulant la spatialisation au casque d'écoute. Ce mode exploite une banque de 16 réponses impulsionnelles (RI) de type HRTF<sup>5</sup> ;

**Stéréo** pour l'écoute sur un système domestique.

### 3.3.1. Layer-Based Amplitude Panning (LBAP)

Le LBAP est un algorithme de spatialisation inédit, entièrement conçu et développé par Olivier Bélanger, programmeur en titre du GRIS. Il se distingue du VBAP par son cadre de référence spatiale non-concentrique. C'est-à-dire que la position des sources sonores n'est pas représentée en fonction d'une position centrale à l'intérieur d'une sphère, communément appelé *sweetspot*, mais plutôt en fonction des dimensions et des frontières de l'espace de diffusion [12, p. 253-254]. En ce sens, l'algorithme de spatialisation LBAP consiste en la superposition – suivant l'axe d'élévation – de « couches » (*layers*) de haut-parleurs librement positionnés dans l'espace de diffusion. Cette stratification permet notamment de redistribuer le signal vers les haut-parleurs tout en considérant l'élévation propre à chaque couche. L'algorithme pré-calculé des matrices de volume en fonction de la position des haut-parleurs dans l'espace 3D. Tous les haut-parleurs dont la position en élévation se situent dans une tranche de 5 degrés sont considérés comme faisant partie d'une même couche. L'algorithme utilise la moyenne des valeurs d'élévation comme valeur nominale d'élévation pour cette couche. Ces matrices de volume sont ensuite lues, avec interpolation, selon la position de la source sur le plan horizontal (2D). Si une source est placée à un niveau d'élévation situé entre deux couches, le gain de la source pour chacun des haut-parleurs des deux matrices correspondantes sera pondéré en fonction de la distance de la source du niveau d'élévation de chacune des deux couches.

Le mode LBAP permet de représenter et spatialiser les sources virtuelles non seulement sur la surface des haut-parleurs, comme c'est le cas avec le VBAP, mais également à l'intérieur et à l'extérieur de l'environnement d'écoute délimité par les haut-parleurs. Cette possibilité requiert toutefois que l'interface du logiciel – qui transmet les coordonnées spatiales des sources virtuelles au *ServerGRIS* – permette non seulement un contrôle en 2D (azimut et distance<sup>6</sup>), mais aussi en 3D (X, Y et Z ; ou encore, azimut, distance et élévation). C'est pourquoi nous avons développé le *ControlGRIS*.

## 4. CONTROLGRIS

Le *ControlGRIS* est né de la réécriture complète de son prédécesseur, le *SpatGRIS*. Conçu pour transmettre des

5. *Head-Related Transfer Function*

6. Selon l'algorithme VBAP, la distance d'une source par rapport au point central est toujours constante. Ainsi, la valeur de distance d'une source représentée en 2D (cercle) sur l'interface du logiciel devient l'angle zénithal dans l'environnement 3D (hémisphère).

métadonnées de spatialisation en provenance des pistes d'un séquenceur vers le *ServerGRIS*, ce dernier avait initialement été développé sur la base d'une spatialisation à distance (radius) constante, par rapport à un point central d'un dispositif concentrique (*sweetspot*) comme un dôme de haut-parleurs (haut de la figure 2). En effet, l'interface graphique 2D du *SpatGRIS* (haut de la figure 3) ne permettait d'assigner le positionnement et le mouvement d'une source que sur la surface d'une sphère. L'interface du *ControlGRIS* (bas de la figure 3), en contrepartie, permet non seulement de modifier l'élévation des sources à l'intérieur du dispositif, mais également de les positionner au-delà des frontières établies par l'environnement de haut-parleur<sup>7</sup>. Le bas de la figure 2 présente un exemple dans le *ServerGRIS* où des sources sont respectivement situées à l'intérieur (en vert) et à l'extérieur (en rouge) de l'environnement de haut-parleurs virtuels. Le remplacement du *SpatGRIS* par le *ControlGRIS* permet de remédier à cette contrainte d'interface 2D, en plus d'ajouter une dimension de contrôle pour la distance des sources.

Un autre changement notable concerne la suppression du mode de spatialisation audio au sein même du logiciel, qui excluait alors l'emploi du *ServerGRIS*. Or, cette spatialisation ne s'effectuait que sur le plan horizontal (2D) et n'était à toute fin utile qu'avec les DAW offrant la possibilité d'avoir plusieurs pistes multicanales au sein d'un même projet. À cet effet, le couple *ControlGRIS* / *ServerGRIS* simplifie le processus en faisant converger toute spatialisation vers le *ServerGRIS*. Cela rend l'outil d'autant plus accessible aux utilisateurs de DAW n'offrant que des pistes mono ou stéréo, outre la sortie maître.

De plus, le couple *ControlGRIS* / *ServerGRIS* peut être contrôlé par plusieurs interfaces externes (voir figure 1), incluant le joystick, le iPad, la Leap Motion et, plus récemment, le Lemur. D'autres interfaces de contrôle pourront éventuellement s'ajouter à cette liste dans le futur.

Enfin, l'interface du *ControlGRIS* permettra prochainement d'y dessiner des trajectoires graphiques, qui pourront ensuite être parcourues par les sources sonores virtuelles à des vitesses variables, contrôlables durant l'enregistrement de celles-ci sous forme d'automation dans le DAW. Cette nouvelle possibilité facilitera et accélèrera grandement l'écriture et l'arrangement spatial d'un certain nombre de trajectoires, et ce, de manière très intuitive. Un exemple du type de dessin graphique a déjà été intégré dans le logiciel audionumérique *Soundgrain*<sup>8</sup>, également développé par notre programmeur Olivier Bélanger.

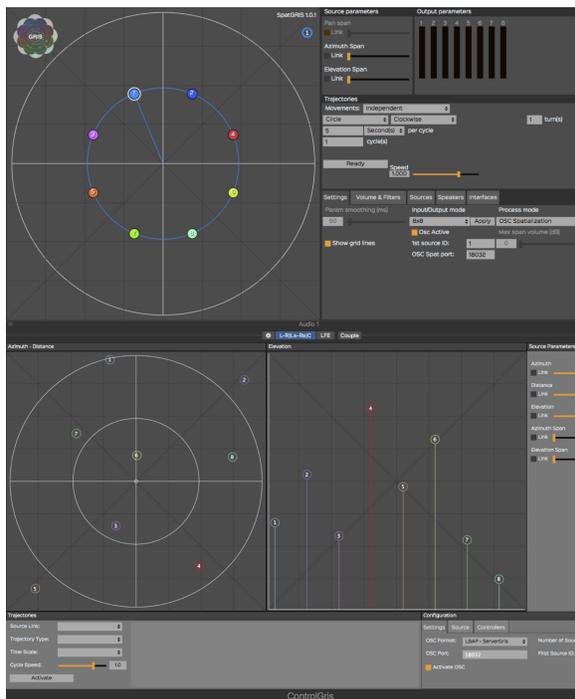
## 5. DÉVELOPPEMENTS FUTURS

### 5.1. L'essence du projet

Depuis le début, les outils de spatialisation développés par le GRIS ont toujours évolué en fonction des besoins et des souhaits exprimés par leurs utilisateurs, soit

7. Ceci n'est vrai que pour le mode LBAP ; le mode VBAP impose tout positionnement des sources sur la surface d'une sphère.

8. Voir le site web : <http://ajaxsoundstudio.com/software/soundgrain/>



**Figure 3.** Interfaces graphiques du *SpatGRIS* (en haut) et du *ControlGRIS* (en bas).

les compositeurs et/ou artistes sonores. C'est dans cet esprit que les projections ci-présentées visent à rendre le couple *ControlGRIS / ServerGRIS* plus polyvalent et à multiplier leur usage possible, que ce soit : pour une application dans les domaines du cinéma, des jeux vidéo ou de la réalité virtuelle ; dans un contexte d'exposition artistique ou d'installations sonores ; pour faciliter le mixage spatial et l'écriture de trajectoires, en fonction du spectre des différentes sources ; ou encore, pour favoriser la circulation des œuvres spatialisées.

## 5.2. Trajectoires concrètes

À ce jour, le *SpatGRIS* comporte un système basé sur le contrôle direct de trajectoires linéaires – cercles, pendules, spirales et autres mouvements aléatoires – dont les paramètres ne sont modifiables que par l'utilisateur, sans toutefois permettre de tenir compte de la nature des sons. Ces trajectoires demeurent donc abstraites du contenu sonore. Or, notre perspective de développement va plutôt dans le sens de trajectoires *concrètes* (au sens de musique « concrète ») où celles-ci pourraient être directement associées à des propriétés du son, notamment grâce à l'analyse de signal. Cela implique que le *ControlGRIS* puisse intégrer des données issues de l'analyse du signal de sa piste audio, afin de moduler certains paramètres de spatialisation envoyés vers le *ServerGRIS* sous forme de métadonnées (OSC).

## 5.3. Analyse de signal

En intégrant des outils d'analyse du signal – les Vamp Plugins, développés à la Queen Mary, University of London (UK) [1] – à ceux du GRIS, il deviendrait possible d'exploiter une certaine quantité de données complexes adaptées à l'audition pour moduler certains paramètres de spatialisation. À l'instar du *ControlGRIS*, ces plugiciels ne transmettent pas de signal audio en tant réel. Ils extraient plutôt des données d'un signal en entrée afin de les étiqueter par composante du son. Par exemple, en analysant le signal audio, transmis par un client connecté au *ServerGRIS*, le compositeur pourra alors choisir d'associer le centroïde et l'étendue spectrale du signal reçu à la redistribution spatiale de celui-ci dans l'environnement de diffusion. Si le centroïde se situe dans l'aigu, le signal serait spatialisé vers le haut de l'environnement de diffusion. À l'inverse, si le centroïde est plus grave, le signal serait distribué vers le bas. Dans un autre cas, la position du centroïde spectral pourrait plutôt servir à moduler la vitesse de déplacement de certaines trajectoires sonores. Au final, les artistes auraient la liberté de redéfinir toute relation signal/spatialisation et d'en modifier les paramètres de redistribution, afin de créer des situations musicales inouïes. Une telle approche – qui fait d'ailleurs écho à une technique de spatialisation du timbre présentée par NORMANDEAU (2009) – n'est qu'un exemple très simple parmi une foule d'autres applications rendues possibles par l'intégration prochaine des outils d'analyse de signal à nos outils de spatialisation audionumériques.

## 5.4. Ambisonie d'ordre élevé (HOA)

Enfin, nous prévoyons également intégrer au *ServerGRIS* un décodeur ambisonique d'ordre élevé (HOA<sup>9</sup>), afin d'offrir une solution adaptée à l'univers sonore des jeux vidéo et, surtout, de la réalité virtuelle qui utilisent en abondance ce format. Jusqu'à maintenant, nos efforts se sont plutôt concentrés sur des modèles de spatialisation employant le *panning* d'amplitude des sources sonores virtuelles, comme le VBAP et le LBAP. Puisque la plupart des solutions de spatialisation 3D libres de droits actuellement offertes – comme les plugiciels développés par l'IEM<sup>10</sup>, par exemple – exploitent déjà le modèle ambisonique (HOA), nous avons jusqu'ici choisi de concentrer nos efforts sur d'autres types d'algorithmes, excluant ainsi l'ambisonie. Bien que la qualité spatiale et sonore des rendus en HOA soit relativement comparable à celle du VBAP [5], le HOA a l'avantage de facilement permettre le décodage de contenus audio vers différents formats et plate-formes de diffusion. En contrepartie, plus un projet comporte un nombre élevé de sources et de haut-parleurs, plus le HOA tend à consommer davantage de CPU, puisque l'algorithme doit sans cesse calculer la diffusion de chaque source vers tous les haut-parleurs simultanément. Une telle contrainte se trouve minimisée dans le cas du VBAP, par exemple, qui permet d'employer un

9. *High Order Ambisonics*

10. *Institute of Electronic Music and Acoustics*

plus grand nombre de sources avec un plus grand nombre de sorties haut-parleur pour un même système informatique. Dans l'optique où nous développons des outils visant à favoriser la composition de l'espace simultanément au contenu sonore – incluant les situations de musique en direct –, l'économie des ressources est importante, surtout pour les projets complexes comportant un grand nombre de sources spatialisées et de traitements audionumériques. C'est pourquoi nous avons, jusqu'à ce jour, concentré nos efforts sur l'intégration de modèles de spatialisation VBAP et LBAP, plutôt que le HOA. Maintenant que cette étape s'achève, le HOA sera le prochain mode de spatialisation à être intégré au *ServerGRIS*.

### 5.5. Lecteur multipiste autonome et standard de diffusion 16.2

Enfin, l'ajout d'un lecteur multipiste universel, destiné à la circulation des œuvres de musique spatiale conçues pour un nombre indéterminé de haut-parleurs, nous apparaît nécessaire. En effet, un des problèmes soulevés par la création d'œuvres immersives est qu'elles sont souvent destinées à un dispositif spécifique, rendant leur circulation très difficile. Nous avons donc fait la proposition au ICMC18<sup>11</sup> d'incorporer un encodeur/décodeur au format 16.2 (48kHz, 24 bits) qui permettrait aux compositeurs d'encoder leur musique et aux auditeurs de l'écouter sous ce format ou en mode binaural [7], grâce au lecteur multipiste qui les décoderait.

À l'heure actuelle, contrairement au cinéma, par exemple, qui a uniformisé sa distribution à travers un standard<sup>12</sup>, la circulation des musiques autres que stéréophoniques est très limitée. Néanmoins, avec le concept du dôme de haut-parleurs, employé tant pour le VBAP que le HOA, une certaine forme de standardisation peut être envisagée. En effet, ces modes de spatialisation permettent la portabilité d'une œuvre déjà spatialisée vers n'importe quelle autre configuration en forme de dôme. Dans ce contexte, la composition d'une musique spatiale est alors indépendante de toute configuration de haut-parleurs. Si cela s'applique actuellement aux situations de concert, ce n'est pas toujours le cas dans un contexte d'écoute individuelle, pour la diffusion sur le web, ou encore lors d'un appel d'œuvre dans le cadre d'un concours. C'est pourquoi nous ajouterons au *ServerGRIS* un lecteur multicanal entièrement autonome, qui ne nécessitera plus l'usage d'un DAW. Il sera désormais possible d'y lire un fichier audio multipiste directement.

Nous avons décidé de privilégier le format 16.2 – avec une disposition à trois niveaux : 8-6-2 plus deux haut-parleurs de graves – ce qui correspond au format par défaut du *ServerGRIS* car celui-ci nous a démontré, au fil des ans, être une configuration minimale adéquate pour la reproduction de musiques immersives multicanales. De plus, ce format étant destiné à une écoute individuelle, il

constitue un bon compromis sur le plan de la taille des fichiers (environ 2,3 Go, pour une durée de 15 minutes). Ce format aurait été impensable il y a 10, voire 5 ans, mais maintenant les réseaux de distribution sont aujourd'hui suffisamment performants pour une telle distribution.

#### 5.5.1. Amélioration du mode binaural

Grâce à ce lecteur multipiste et au format de transmission 16.2, le *ServerGRIS* sera en mesure d'appliquer chaque piste à son haut-parleur virtuel correspondant – représentant une RI de type HRTF – dans l'espace de diffusion binaural. En transmettant les œuvres de cette façon plutôt qu'au format binaural – déjà réduit à partir d'une banque de RI (HRTF) génériques dont l'efficacité peut considérablement varier d'une personne à l'autre – cela permettrait éventuellement aux auditeurs de choisir une banque de RI (HRTF) adaptée à leur écoute.

#### 5.5.2. Écoute en ligne

Parallèlement, les fournisseurs de contenu audio en ligne (web), pourraient appliquer le *ServerGRIS* en amont de leur chaîne de diffusion et ainsi ne transmettre que le contenu binaural d'un fichier audio 16.2, réduisant ainsi la taille de la bande passante requise. Encore là, l'application de RI (HRTF) personnalisées sur l'écoute en ligne deviendrait également possible.

## 6. CONCLUSION

En développant des outils de spatialisation en phase avec les idées, les souhaits et les besoins exprimés par les compositeurs et créateurs sonores, le *GRIS* vise à offrir un moyen accessible (gratuit et libre de droits), polyvalent (plusieurs modes de contrôle, de spatialisation et d'écoute) et peu contraignant (consommation faible en CPU pour un nombre élevé de sources et de haut-parleurs) aux artistes qui désirent expérimenter avec la spatialisation sonore. Notamment, le *ServerGRIS* est un logiciel qui peut facilement être utilisé dans les situations de musique en direct, puisque la combinaison logiciel/logiciel lui permet de s'intégrer facilement dans la boîte à outils des artistes de la scène. Pour résumer, à travers le développement du couple *ControlGRIS* / *ServerGRIS*, nous souhaitons contribuer au progrès des pratiques artistiques employant l'espace comme terrain de jeu expérimental pour la création : en facilitant le contrôle et l'écriture (automatisations) simultanés du son et de l'espace ; en mettant en place un système d'analyse de signal permettant d'associer directement des propriétés sonores à des trajectoires ; en favorisant la transmission et la diffusion des œuvres spatialisées ; et en intégrant de manière continue de nouveaux modes de spatialisation et outils de contrôle.

## 7. REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche-crédation est soutenu par : le Centre interdisciplinaire de recherche en musique, médias

11. International Computer Music Conference, tenue à Daegu en Corée du sud en août 2018.

12. Le Dolby Surround™ en format 5.1, 6.1 ou 7.1 et ATMOS (jusqu'à 64 canaux).

et technologie (CIRMMT); le Conseil de Recherches en Sciences Humaines (CRSH) du Canada, avec le numéro de subvention 435-2016-1080; le Fond de Recherche du Québec - Société et Culture (FRQSC), avec le numéro de subvention 2017-RC-198003; la Fondation Canadienne pour l'Innovation, avec le numéro de subvention 33558; et la faculté de musique de l'Université de Montréal.

## Références

- [1] University of London CENTRE FOR DIGITAL MUSIC Queen Mary. *The Vamp audio analysis plugin system*. online. URL : <https://www.vamp-plugins.org>.
- [2] David LEDOUX et Robert NORMANDEAU. « An Immersive Approach to 3D-Spatialized Music Composition. Tools and Pilot Survey ». Dans : *AM'18 : Proceedings of the Audio Mostly 2018 on Sound in Immersion and Emotion*. dir. de Stuart CUNNINGHAM et Richard PICKING. Wrexham, United Kingdom : ACM, 2018.
- [3] David G. MALHAM. « Higher Order Ambisonic systems for the spatialisation of sound ». Dans : *Proceedings of the 1999 International Computer Music Conference (ICMC 1999)*. Pékin, Chine, oct. 1999.
- [4] Peter MANNING. *Electronic and Computer Music*. New York : Oxford University Press, 2013.
- [5] G. MARENTAKIS, F. ZOTTER et M. FRANK. « Vector-Base and Ambisonic Amplitude Panning : A Comparison Using Pop, Classical, and Contemporary Spatial Music ». Dans : *Acta acustica united with Acustica. the journal of the European Acoustics Association (EAA); international journal on acoustics* 100.5 (oct. 2014), p. 945-955.
- [6] Robert NORMANDEAU. « Timbre Spatialisation : The medium is the space ». Dans : *Organised Sound* (déc. 2009), p. 277-285.
- [7] Robert NORMANDEAU et al. « SPATGRIS/ServerGRIS, Creative tools for 2D and 3D sound spatialization ». Dans : *Proceedings of the 2018 international computer music conference*. Daegu, Korea : The International Computer Music Association, 2018, p. 291-297.
- [8] OQLF. *Banque de terminologie du Québec. Plugi-ciel*. français. Office québécois de la langue française. 2013.
- [9] Ville PULKKI. « Virtual Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning ». Dans : *Journal of the Audio Engineering Society* 45 (1997), p. 456-466.
- [10] Agnieszka ROGINSKA et Paul GELUSO, dir. *Immersive Sound : The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio*. New York et Londres : Routledge, 2018.
- [11] Agnieszka ROGINSKA et Paul GELUSO. « Introduction ». Dans : *Immersive Sound : The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio*. dir. d'Agnieszka ROGINSKA et Paul GELUSO. New York et Londres : Routledge, 2018, p. 1-4.
- [12] Nicolas TSINGOS. « Object-Based Audio ». Dans : *Immersive Sound : The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio*. dir. d'Agnieszka ROGINSKA et Paul GELUSO. New York et Londres : Routledge, 2018, p. 244-275.