Master ATIAM

Rapport de stage :

Une application mobile pour le contrôle de la spatialisation sonore

Xavier FAVORY

encadré par

Jérémie GARCIA

Jean BRESSON

Février – Juillet 2015

Résumé

Ce travail réalisé à l'Ircam dans l'équipe Représentation Musicale s'intégrant dans le projet ANR Efficace ANR-13-JS02-0004 a été financé par le Labex SMART. Il explore les possibilités offertes par les dispositifs mobiles pour le contrôle et l'écriture de la spatialisation sonore dans un contexte de composition assistée par ordinateur. Une étude des outils existants, complétée par des entretiens avec des compositeurs nous ont amené à développer l'application TRAJECTOIRES pour la saisie de trajectoires de sources sonores, fonctionnant sur navigateur web depuis un mobile ou un ordinateur. Des collaborations conduites avec des compositeurs ont permis d'intégrer cet outil dans leur environnement. Par ailleurs, ils ont pu l'utiliser pour composer la spatialisation de leurs oeuvres.

Mots clés : spatialisation ; composition musicale assistée par ordinateur ; interface homme-machine ; dispositifs mobiles ; trajectoires.

Abstract

This work realized at Ircam in the Représentation Musicale team is integrated into the project Efficace ANR ANR-13-JS02-0004 and was financed by Labex SMART. It explores the possibilities offered by mobiles devices for the control and the writing of the sound spatialization in a context of computer-aided composition. A study of the existing tools, completed by interviews with composers brought us to the developement of TRAJECTOIRES, a web browser application accessible from a mobile or a computer, for the creation of sound trajectories. Collaborations with composers allowed them to integrate this tool into their environment to create the spatialization of their work.

Keywords : spatialization ; computer aided composition ; human-machine interface ; mobile devices ; trajectories.

Table des matières

1 État de l'art **6**
1.1 L'espace dans la musique électroacoustique 6
1.2 Techniques et procédés 6
1.3 Outils pour composer la spatialisation 8
1.4 Opportunité des dispositifs mobiles 13

2 Entretiens avec des compositeurs **15**
2.1 Méthode 15
2.2 Résultats 15

3 L'application Trajectoires **21**
3.1 Interface et fonctionnement 21
3.2 Implémentation 26
3.3 Exemples d'utilisation 27

4 Collaborations **32**
4.1 Méthode 32
4.2 Résultats 32

5 Conclusion et perspectives **37**

Bibliographie **39**

Introduction

La recherche en composition assistée par ordinateur produit des formalismes musicaux et calculatoires mis en relation dans des environnements informatiques de composition. Le compositeur est amené à créer, traiter, modifier le son et les structures musicales et à les organiser temporellement. Parmi les nombreux outils disponibles pour les compositeurs, *OpenMusic* [7] et *Max* [33] sont deux environnements de programmation visuelle qui permettent de développer des processus musicaux. Le premier est axé sur l'aspect compositionnel hors-temps permettant, par exemple, la génération d'objets musicaux par des processus algorithmiques ; le deuxième, sur les processus temps réels pour l'interaction lors de performances, par exemple.

La spatialisation sonore, est un aspect important de la musique électroacoustique qui s'attache à la distribution spatiale du son. Les compositeurs agencent les sons dans l'espace et placent l'auditeur dans un espace virtuel. Grâce aux outils informatiques performants, ils peuvent définir par exemple les emplacements des sources sonores ainsi qu'un grand nombre de propriétés telles que leur orientation ou les caractéristiques de l'espace acoustique virtuel [32]. Néanmoins, force est de constater que le contrôle et l'écriture de la spatialisation restent des tâches difficiles pour les compositeurs qui cherchent, d'une part, à faire varier les nombreux paramètres de spatialisation et, d'autre part, à les synchroniser avec des éléments musicaux de leurs processus compositionnels [32, 16]. De plus, un autre aspect compliqué de la spatialisation est qu'elle se réalise généralement en studio, et non dans la salle de représentation, ce qui amène à des dégradations pouvant perturber le rendu lors de la représentation [30]. Selon une étude [32], beaucoup de compositeurs estiment ne pas avoir à leur disposition d'interfaces haut niveau et intuitives pour contrôler la spatialisation.

L'objectif de ce travail de recherche est de concevoir des outils interactifs pour aider les compositeurs dans leur travail de spatialisation. En particulier, les dispositifs mobiles, largement répandus et accessibles, constituent une approche intéressante pour le contrôle et la composition de la spatialisation. Ils peuvent servir d'interface gestuelle favorisant le contrôle de multiples paramètres sonores, comme par exemple lors de la saisie rapide de trajectoires des sources sonores via le dessin sur l'écran tactile. Par ailleurs, l'aspect mobile des dispositifs permet de se déplacer dans l'espace de diffusion, ce qui facilite la détection d'éventuels problèmes de dégradation dans la zone où se situe le public et, en conséquence, d'adapter les trajectoires.

L'observation du travail de spatialisation de quatre compositeurs nous a guidé dans le développement de TRAJECTOIRES, une application accessible depuis un mobile ou un ordinateur, permettant la saisie et l'édition de trajectoires de sources sonores. Une première version nous a permis d'engager des collaborations afin de mieux comprendre comment une telle application peut s'intégrer efficacement dans les environnements de travail des compositeurs. Le développement de TRAJECTOIRES a ensuite été guidé par des collaborations avec des compositeurs qui en l'utilisant, ont pu réaliser la spatialisation de pièces électroacoustiques mixtes.

Ce rapport décrit d'abord un état de l'art des outils dédiés à la spatialisation et

discute des opportunités offertes par l'utilisation de dispositifs mobiles. L'observation du travail de quatre compositeurs est ensuite présentée. Puis, le fonctionnement et des exemples d'utilisation de l'application TRAJECTOIRES sont exposés. Enfin, nous reportons les résultats sur la collaboration avec trois compositeurs.

1 État de l'art

Cette partie traite d'abord de la présence de l'espace dans la musique électroacoustique. Différentes techniques pour obtenir un rendu spatialisé sont ensuite évoquées, puis sont exposés et discutés les différents outils disponibles pour les compositeurs. Enfin, nous étudions les opportunités offertes par les dispositifs mobiles.

1.1 L'espace dans la musique électroacoustique

La musique électroacoustique est née de la musique concrète avec les premières expérimentations de Pierre Schaeffer en 1948 et de la musique électronique allemande. Actuellement, elle regroupe plusieurs courants comme la musique mixte (composée de sons acoustiques et électroacoustiques), la musique acousmatique (sons enregistrés et diffusés par des haut-parleurs), ou de performances de *live electronic* [10].

Les nouvelles technologies ont permis aux compositeurs de s'intéresser à l'aspect spatial du son [2] et de recréer des événements sonores dans un espace de façon réaliste. Ce travail est réalisé grâce à de subtiles modifications de l'intensité, du timbre, du temps ou à en utilisant des traitements plus complexes. Par exemple, l'utilisation de plusieurs haut-parleurs et d'une console multi-pistes permettent de réaliser une spatialisation en jouant sur les gains et les temps de retard des différents canaux. Le compositeur est amené à considérer les sons comme des masses possédant une taille, une densité, une résolution et une géométrie [27]. Pour plonger l'auditeur dans un véritable espace sonore virtuel, le compositeur peut également simuler des espaces acoustiques en utilisant des effets de réverbération [24].

Selon Annette Vande Gorne [18] l'espace, considéré comme paramètre musical, permet aussi un nouveau figuralisme qui renforce le pouvoir des sons et la capacité de communication des oeuvres.

1.2 Techniques et procédés

Le développement de l'informatique, du traitement du signal et les études sur la perception ont produit des outils pour la spatialisation très puissants, généralisables sur plusieurs types de systèmes de reproduction.

Système stéréophonique

Sur un système de diffusion comprenant deux canaux, nous pouvons doser la quantité de signal transmis à chaque haut-parleur pour une source donnée. Cela permet d'approcher la différence d'intensité interaurale habituellement perçue par un auditeur. On obtient ainsi une variation de l'azimut de la source sonore. Ce principe est très simple à mettre en place et il est, d'ailleurs, disponible sur toutes les consoles de mixage en tant que réglage "panning". L'utilisation des différences intéraurales de temps peuvent produire des résultats similaires. En pratique, cette solution est peu employée car elle peut amener à des problèmes de phases en cas de réduction monophonique.

VBAP, DBAP

Sur des systèmes de plusieurs haut-parleurs (quadriphonie, octophonie, 5.1, ...), des techniques telles que VBAP (Vector-Based Amplitude Panning), DBAP (Distance-Based Amplitude Panning) sont utilisées. Le "Vector-Based Amplitude Panning" est une méthode de spatialisation développée par Pulki [34]. Elle permet le positionnement de sources dans un espace virtuel à l'aide d'un ensemble de haut-parleurs. Cette méthode est, en fait, une extension de la méthode "panning" sur les systèmes stéréophoniques. Il s'agit d'une technique applicable à toute configuration de haut-parleurs, mais son efficacité est très dépendante du lieu où est placé l'auditeur. Le "Distance Based Amplitude Panning" [23] est une méthode similaire qui présente l'avantage de ne pas prendre en compte la position de l'auditeur pour le calcul. Ceci rend cette technique plus robuste et peut donc être plus adaptée pour de grandes salles de spectacle.

Ambisonique

L'approche ambisonique [25], consiste en un procédé d'encodage et décodage de la scène sonore. Le champ acoustique est défini localement suivant des harmoniques sphériques d'ordre arbitraire. Par exemple, le B-format correspond à la décomposition du son en harmonique sphérique d'ordre 1. Ce procédé permet, grâce à l'utilisation de nombreux haut-parleurs disposés en dôme (voir figure 1.1), d'obtenir une spatialisation du son en trois dimensions [20].

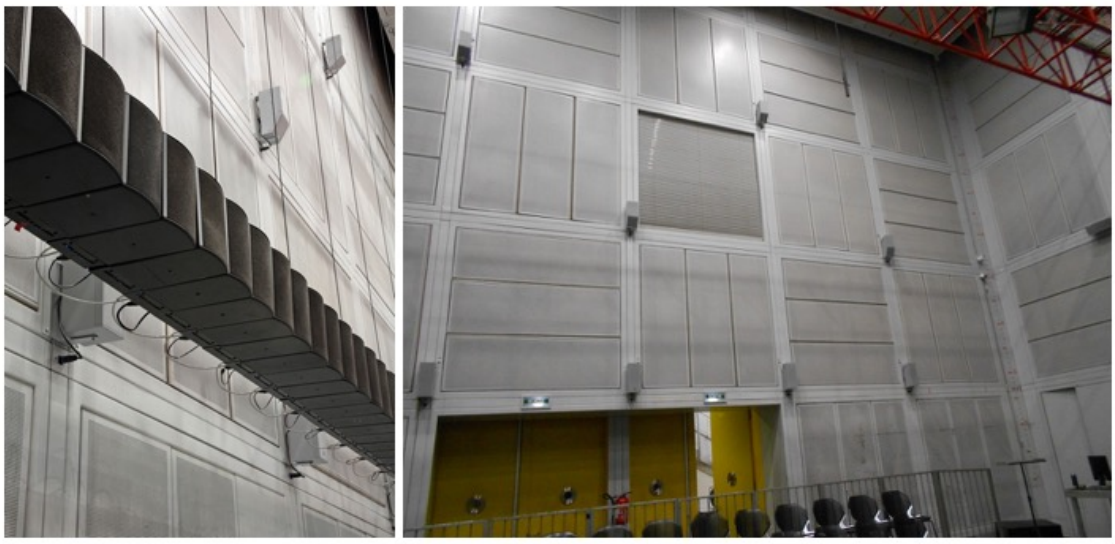


FIGURE 1.1: A gauche le système *WFS*, à droite l'*Ambisonique* de l'espace de projection de l'Ircam (photos tirées de www.ircam.fr)

Procédés Holophoniques

L'holophonie est un principe qui consiste à reproduire le champ acoustique en tout point d'une zone, au moyen de réseaux de haut-parleurs entourant la zone (voir figure 1.1). La méthode s'appuie sur le principe de Huygens, stipulant que l'on peut

considérer le front d'onde émis par la source primaire comme étant émis par plusieurs sources secondaires. Ainsi la technique de Wafe Field Synthesis (WFS) [4], permet de créer des front d'onde "artificiels". Cette technique offre l'opportunité à l'auditeur de se déplacer dans l'espace et de garder un rendu sonore cohérent.

Binaural

L'écoute binaurale se fait grâce à l'utilisation d'un casque ou d'écouteurs. L'idée est de reconstruire, à partir d'un son monophonique, les signaux gauche et droit qui parviendraient aux oreilles si une source sonore était placée à une certaine distance et sous un certain angle par rapport à l'auditeur. Pour obtenir un rendu binaural, il faut soit avoir enregistré un son avec une tête artificielle et disposer ainsi des deux canaux gauche et droite, soit simuler les effets par des procédés de traitement se basant sur des convolutions [40]. La mesure de réponses impulsionnelles des canaux de propagations de la source vers les oreilles du locuteur, permet de déterminer la fonction de transfert liée à sa tête (Head Related Transfert Function - HRTF). On peut ensuite par convolution obtenir un rendu sonore spatialisé.

Le nombre important de techniques pour la diffusion de sons spatialisés rend la tâche compliquée pour les compositeurs. Ces techniques sophistiquées n'offrent pas toujours un rendu optimal et demande un travail d'installation, de réglage et d'adaptation selon la salle de représentation et le système utilisé.

1.3 Outils pour composer la spatialisation

Ecriture multiphonique

Une des méthodes employée par les compositeurs de musique acousmatique consiste à diffuser le son sur de nombreux canaux, donnant lieu parfois à de vrais orchestres de haut-parleurs. Le compositeur adopte alors une démarche d'interprète jouant sur les niveaux des haut-parleurs pendant ou avant la performance. Giot et al. [17] ont produit des outils permettant d'assister la mise en place de telles configurations, en proposant une interface graphique offrant différentes possibilités, comme placer les hauts-parleurs, assigner les pistes audio, etc...

Dans les stations audio-numériques, la technique la plus accessible est l'utilisation de tables d'automation des gains des différents canaux de sorties haut-parleurs. Le compositeur peut ainsi définir des trajectoires de façon implicite en créant des effets de mouvements entre les haut-parleurs, mais ne dispose pas d'une vision synthétique et intégrée de l'espace à proprement parler.

Contrôle perceptif

De nombreuses interfaces fournissent aux compositeurs une visualisation de l'espace en deux ou trois dimensions. Le *Spatialisateur* de l'Ircam [21] (*Spat*) [1]) est l'un des outils les plus utilisés par les compositeurs de musique électroacoustique. Disposant de paramètres de contrôle dits "perceptifs", il permet à l'utilisateur de positionner des sources et de spécifier de manière intuitive des caractéristiques sonores

1. `http://forumnet.ircam.fr/fr/product/spat/`

de l'espace virtuel (voir figure 1.2). Il est intégré dans *Max*[2] [33] et *OpenMusic*[3] [7], deux environnements populaires de programmation visuelle dans le domaine de la création musicale contemporaine, dédiés respectivement au traitement audio temps réel et à la composition assistée par ordinateur [1].

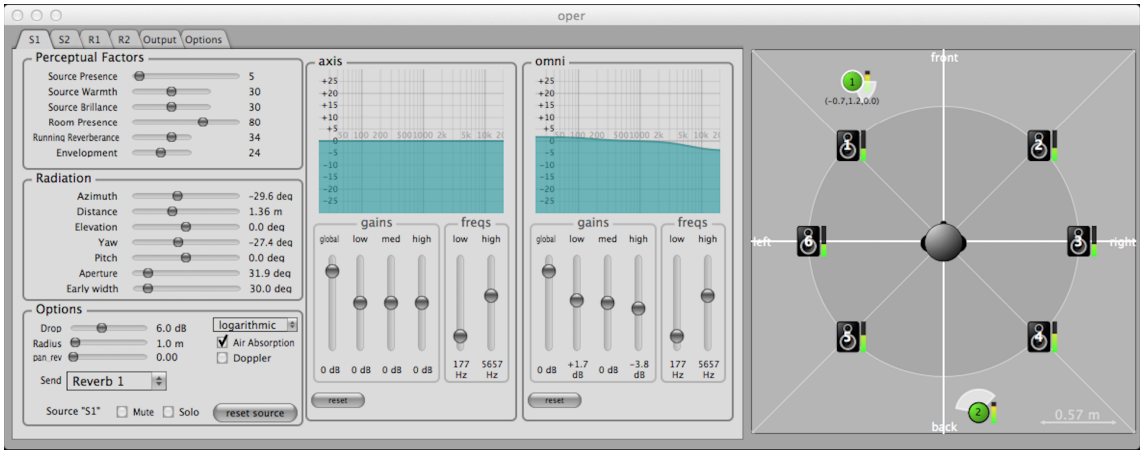


FIGURE 1.2: Vue de l'interface du Spatialisateur de l'Ircam

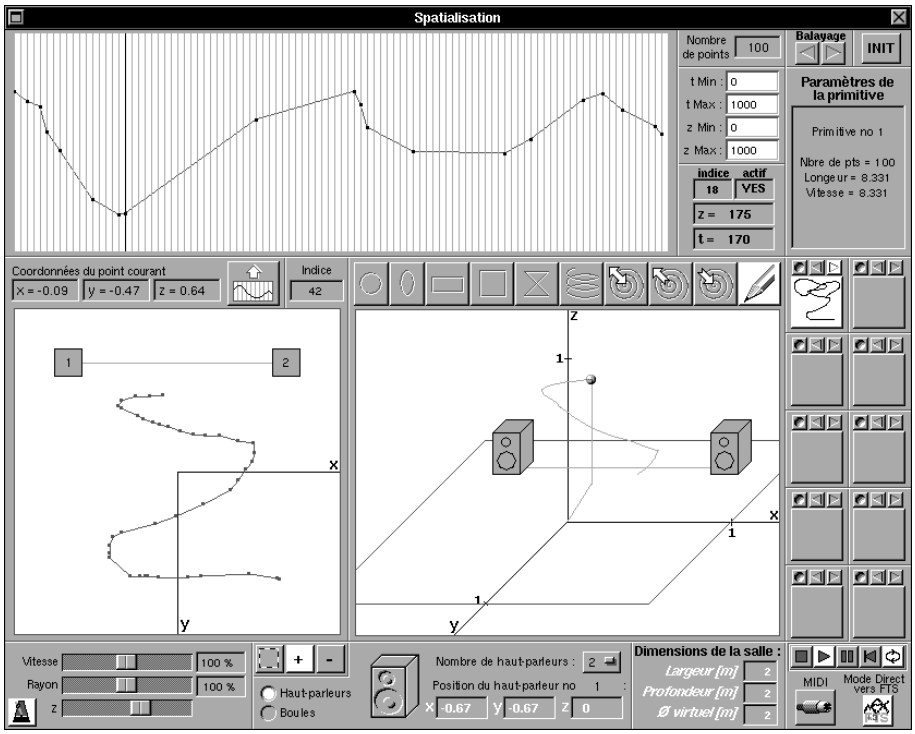


FIGURE 1.3: Vue de l'interface MoveInSpace pour la création de trajectoires (image tirée de www.mustudio.fr)

Le projet MoveInSpace [38] propose une interface de contrôle pour la construction et la visualisation de trajectoires dans un espace à trois dimensions à partir

2. https://cycling74.com/
3. http://repmus.ircam.fr/openmusic/

de différentes représentations. Dans cet environnement, il est possible de définir et d'enregistrer des trajectoires qui seront communiquées à un moteur de traitement de son temps réel, qui réalise la spatialisation du son. Un éditeur temporel fournit à l'utilisateur les outils nécessaires à la définition et l'édition de trajectoires (voir figure 1.3).

Le Groupe de Recherche Musicale a récemment développé *SPACES*, un outil permettant de déplacer une source sonore dans un espace. L'utilisateur peut alors tracer des trajectoires ou faire se déplacer aléatoirement les sources (voir figure 1.4). L'interface propose de placer les haut-parleurs dans l'espace, sur lesquels il est possible de voir la valeur des gains de chaque canaux tout en ayant un rendu sonore temps réel. Il est possible de transformer les trajectoires en temps réel, en utilisant des outils de manipulation de la taille global des courbes ("spread"), ou en translatant plusieurs trajectoires simultanément.

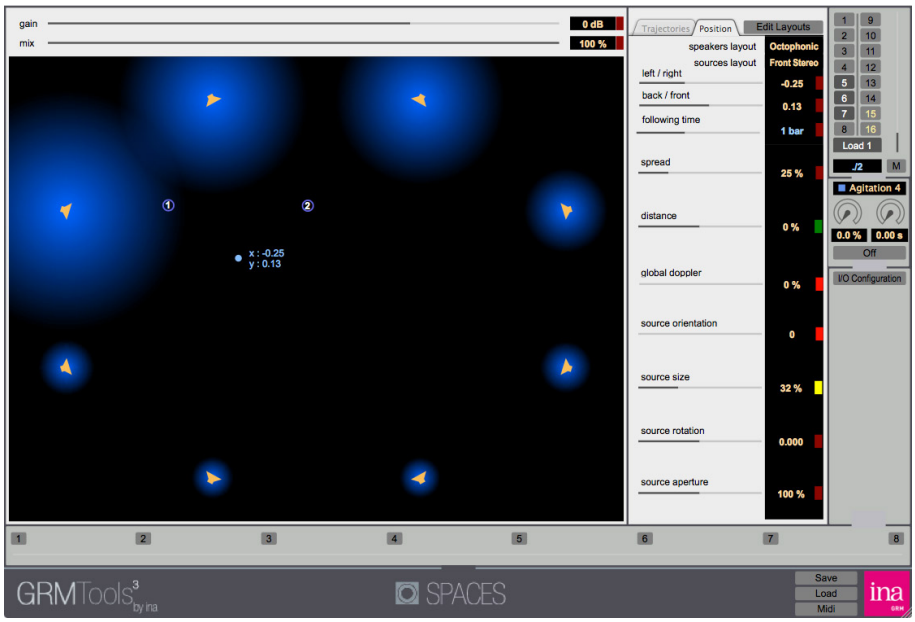


FIGURE 1.4: Vue de l'interface GRM Tools - Spaces (image tirée de www.inagrm.com)

Génération "algorithmique" de trajectoires

Le projet Holophon développé par le GMEM (Centre National de Création Musicale) est destiné à produire des outils informatiques pour la spatialisation du son [9]. Le projet se compose de deux outils logiciels : Holo-Spat, un moteur temps réel de spatialisation écrit dans l'environnement *Max* et Holo-Edit, un éditeur graphique pour la création de trajectoires. Holo-Edit permet également de définir les trajectoires de façon algorithmique. Des primitives de construction sont mis à dispositions : cercles, spirales, trajets aléatoires, ... Des transformations élémentaires comme des symétries, rotations et translations permettent de manipuler et combiner les trajectoires. Cet outil a été utilisé pour la réalisation de diverses pièces, comme par exemple *Resonant Sound Spaces* de Jean-Claude Risset [35].

OpenMusic est le fruit de nombreux travaux visant à rendre accessibles des outils de formalismes de calcul et de programmation aux compositeurs. De précédents travaux s'intéressaient déjà aux outils d'interactions pour le contrôle de la spatialisation de sons [29, 6, 8], en offrant des outils pour la construction de scènes spatiales, c'est à dire un ensemble de sources sonores associées à des positions, des trajectoires, des directivités ou d'autres paramètres spatiaux ou acoustiques. Des méthodes et structures adaptées au contrôle de la spatialisation sont rassemblées dans la bibliothèque *OMSpat*. L'objectif est, premièrement, de générer et sauvegarder des paramètres représentants les trajectoires et d'autres paramètres liés à la spatialisation (voir figure 1.5). Deuxièmement, de les traiter en temps différé par le *Spat*.

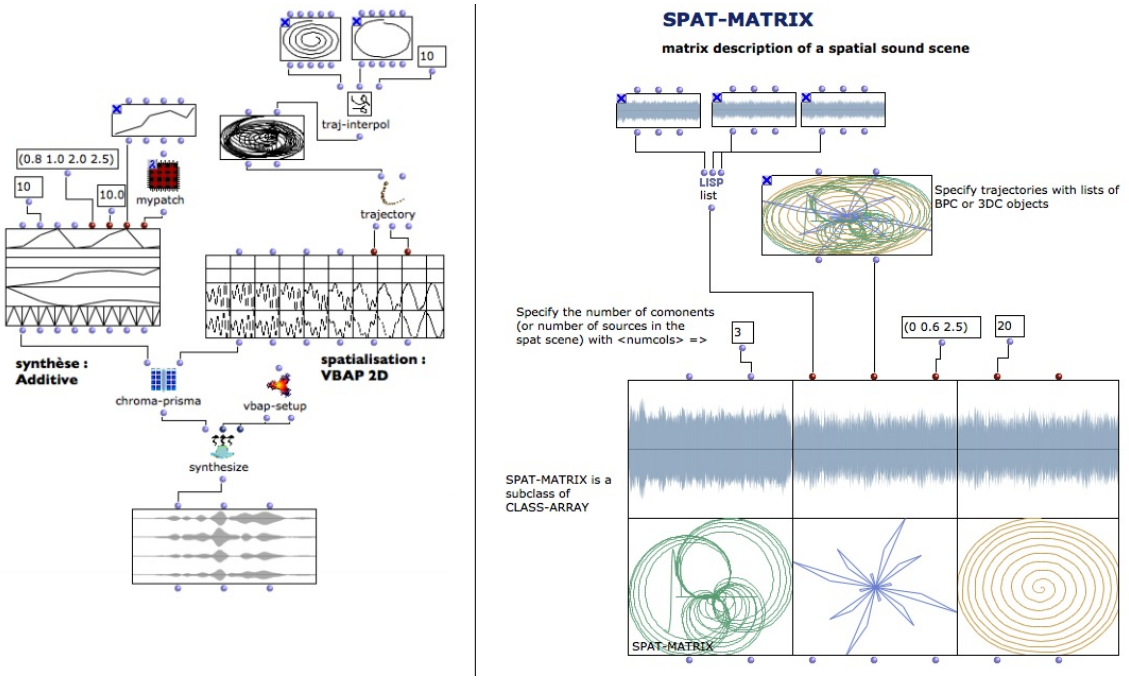


FIGURE 1.5: A gauche, Synthèse sonore spatialisée avec *OMChroma* et *OMPrisma* : chaque composant du processus de synthèse (partiels, ici dans le cas d'une synthèse additive) est spatialisé suivant une trajectoire calculée par interpolation (image tirée de l'article [8]). A droite, programme *OpenMusic* qui permet la création d'une scène spatiale grâce à *OMSpat*. Ici, trois trajectoires sont associées à trois sources sonores

MusicSpace [11] est une interface de contrôle de la spatialisation par principes de contraintes. Ce système permet de définir un ensemble de relations portant sur plusieurs sources qui composent la scène sonore. Ainsi, il est par exemple possible de manipuler plusieurs objets sonores simultanément en gardant un rendu cohérent. Ce principe de contrainte offre aux compositeurs un moyen de déclarer des règles et de pouvoir ensuite manipuler les sources sonores intuitivement.

Interfaces 3D

Définir des trajectoires en trois dimensions est une tâche complexe. Le *Spat* propose des vues selon différents plans pour visualiser clairement les mouvements.

D'autres outils, comme ceux de *OpenMusic* et *MoveInSpace*, proposent une vue perspective qui offre une bonne représentation mais ne facilite pas la manipulation. Des projections selon différents plans sont également disponibles pour définir les trajectoires. L'objet 3DC de *OpenMusic* permet de représenter des courbes par une suite de points en trois dimension. L'objet 3D-Trajectory en est une extension prenant en compte la dimension temporelle en associant une date aux différents points.

Lier la spatialisation aux processus compositionnels

OpenMusic permet de générer des courbes et des trajectoires dans l'espace, de structurer le contrôle de la spatialisation de sources sonores ou de créer des sons spatialisés [8]. *OMPrisma*, une bibliothèque *OpenMusic*, étend à la spatialisation le système de contrôle de la synthèse *OMChroma*. Grâce à l'utilisation de matrices, il est possible d'associer les paramètres de positionnement spatial à différentes sources sonores et de réaliser ensuite un rendu sonore par synthèse via *Csound* [5]. L'intérêt d'une telle structure est de placer la spatialisation au même niveau qu'un autre processus de traitement du signal, comme par exemple lors d'une synthèse additive, pour laquelle nous pouvons associer différentes trajectoires aux différents partiels d'un son (voir figure 1.5 [8]).

HoloEdit propose de représenter la spatialisation dans la partition (voir figure 1.6).

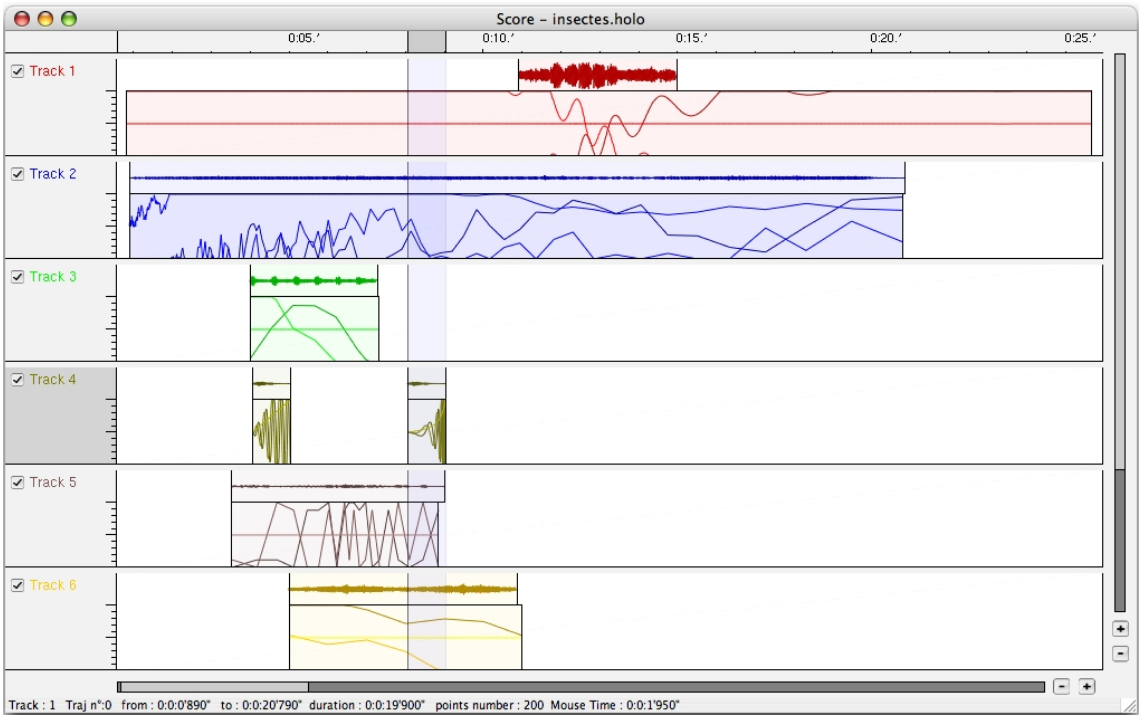


FIGURE 1.6: Vue de l'interface Holo-Edit pour la synchronisation des trajectoires (image tirée de www.gmem.org)

Intégrabilité des outils

MoveInSpace était un système connecté (basé sur une communication de type client-serveur) et présentait l'intérêt d'être intégrable au sein d'autres environnements par l'intermédiaire d'une communication MIDI permettant de relier les paramètres de sorties aux paramètres d'entrées d'une autre application ou à un moteur de traitement du son effectuant la spatialisation.

Les environnements comme *OpenMusic* et *Max* peuvent recevoir des données par l'intermédiaire du protocole de communication *OpenSoundControl* [42] (OSC). Ainsi il est possible d'utiliser des interfaces de type *joystick* pour générer des trajectoires de sources sonores [16]. En utilisant un contrôleur *GameTrak* permettant de localiser des points en trois dimensions par l'intermédiaire de fils, il est possible de générer dans l'espace des trajectoires de façon gestuelle.

Le nombre important d'outils de composition amène des problématiques de compatibilité et d'échange de données entre environnements. Des formats de représentation de scènes sonores comme SpatDif [31], qui propose un standard pour la communication entre logiciels par protocole OSC [42] sont alors nécessaires.

1.4 Opportunité des dispositifs mobiles

Les dispositifs mobiles suscitent un intérêt grandissant dans le domaine des applications musicales, notamment du fait qu'ils disposent d'écrans tactiles et intègrent de nombreux capteurs tels que des accéléromètres ou des gyroscopes [3, 37].

Plusieurs travaux se sont intéressé à l'utilisation d'interfaces tactiles pour la spatialisation. Giot *et al.* proposent des outils qui peuvent contrôler le déplacement de plusieurs sources sonores en simultanément en utilisant plusieurs doigts [22]. Nixdorf *et al.* ont également conçu une interface tactile permettant de positionner des sources sonores dans l'espace. Parmi les directions futures, ils évoquent la possibilité d'enregistrer et de rejouer les chemins des sources sonores. Concernant les interfaces gestuelles, Marshall *et al.* proposent des stratégies de *mapping* afin de contrôler de nombreux paramètres de spatialisation et de production sonore simultanément et de manière expressive [26].

Bien que les outils de traitement sonore spatialisé soient généralement adaptables à plusieurs types et systèmes de reproduction, une adaptation après écoute en condition de spectacle reste souvent nécessaire. En effet, les caractéristiques de la salle peuvent perturber le rendu sonore et dénaturer l'oeuvre [30]. De plus, la plupart des technologies de reproduction sonore spatialisée fonctionnent de façon optimale dans une zone précise de la salle, où se trouvent la console de mixage, l'ingénieur et l'ordinateur. Comme mis en avant par Delerue et Warusfel [12], les dispositifs mobiles favorisent également une exploration de la spatialisation de façon non statique, en permettant de détecter des éventuels problèmes de dégradation dans la zone où se situe le public et d'adapter les trajectoires en conséquence.

Les dispositifs mobiles offrent donc la possibilité de combiner une interface graphique tactile multipoints pour le dessin, la visualisation et la manipulation de données de spatialisation et l'utilisation des capteurs pour un contrôle riche et expressif.

Ils répondent également au besoin de mobilité nécessaire à certains contextes musicaux, en particulier pour la mise en situation du rendu sonore spatialisé.

2 Entretiens avec des compositeurs

A partir des précédents travaux réalisés dans le domaine, nous avions déjà une idée d'application mobile à développer qui serait pertinente pour les compositeurs. Pour guider la conception de l'application, nous avons appliqué une démarche centrée sur l'utilisateur [28] en commençant par réaliser des entretiens avec des compositeurs, une méthodologie adaptée à la réalisation d'interface pour une tâche créative comme la composition [13]. Nous avons ainsi mieux compris les outils et les méthodes qu'ils utilisent pour la composition de la spatialisation, ce qui a permis d'engager efficacement la phase de développement.

2.1 Méthode

Participants

Nous avons rencontré trois étudiants en composition et un compositeur professionnel à l'Ircam. Ce sont tous des hommes, âgés de 27 à 55 ans, expérimentés dans l'utilisation de logiciels d'aide à la composition tels que *Max*, *OpenMusic* ou *Audiosculpt*[4]. Nous les identifions par leurs initiales DC, CG, EP et MJ.

Les quatre compositeurs étaient en cours de réalisation d'une pièce pour instrument soliste avec électronique. MJ est aidé par un réalisateur en informatique musicale (RIM). Les œuvres sont toutes conçues pour être jouées sur des systèmes octophoniques.

Procédure

Les entretiens, d'une durée d'environ 1h30, ont été partiellement filmés. Les compositeurs ont apporté leurs esquisses et leurs ordinateurs personnels. Nous leur avons demandé de décrire leur œuvre en cours et son évolution. Nous avons ensuite posé des questions spécifiques à la spatialisation, sur des problèmes concrets. Par exemple, nous leur avons demandé sur quel(s) environnement(s) ils travaillaient, quelle(s) technologie(s) ils utilisaient, a quel(s) moment(s) intervenait le travail de spatialisation et sous quel forme (idées, papiers, ordinateur), etc... A la fin de l'entretien, nous leur avons présenté un prototype d'application sur tablette permettant de dessiner des courbes, afin d'engager une réflexion sur les possibilités d'un tel outil pour l'écriture de la spatialisation.

2.2 Résultats

Approches de la spatialisation

Les compositeurs ont chacun leur manière de travailler avec la spatialisation. CG est inspiré par l'architecture et souhaite créer un espace acoustique réaliste lié à un bâtiment particulier. MJ explique vouloir *"mettre en mouvement tout l'espace,*

4. `http://anasynth.ircam.fr/home/software/audiosculpt`

comme une vibration" avec la spatialisation du son. Son approche consiste généralement à utiliser plusieurs plans sonores qu'il superpose comme des couches, mais également des sons en mouvement.

DC explore différentes trajectoires sur le papier dès le début du projet. La figure 2.1 montre une esquisse sur laquelle il a commencé par représenter la salle en disposant les haut-parleurs, puis a dessiné des trajectoires et des indications de mouvements. Il développe également des idées sur des "textures", qu'il exprime par ce moyen graphique, par exemple grâce à des lignes représentant des "crescendos" ou des nuages de points représentant des "granulations". Il emploie une technique de spatialisation "aléatoire" pour laquelle le son est joué sur un canal de façon aléatoire. Ou encore, il a expérimenté des méthodes de spatialisation utilisant des enveloppes temporelles pour chaque canal haut-parleur (voir figure 2.2). Le travail sur la spatialisation permet à DC d'enrichir sa pièce grâce à de nouvelles idées.

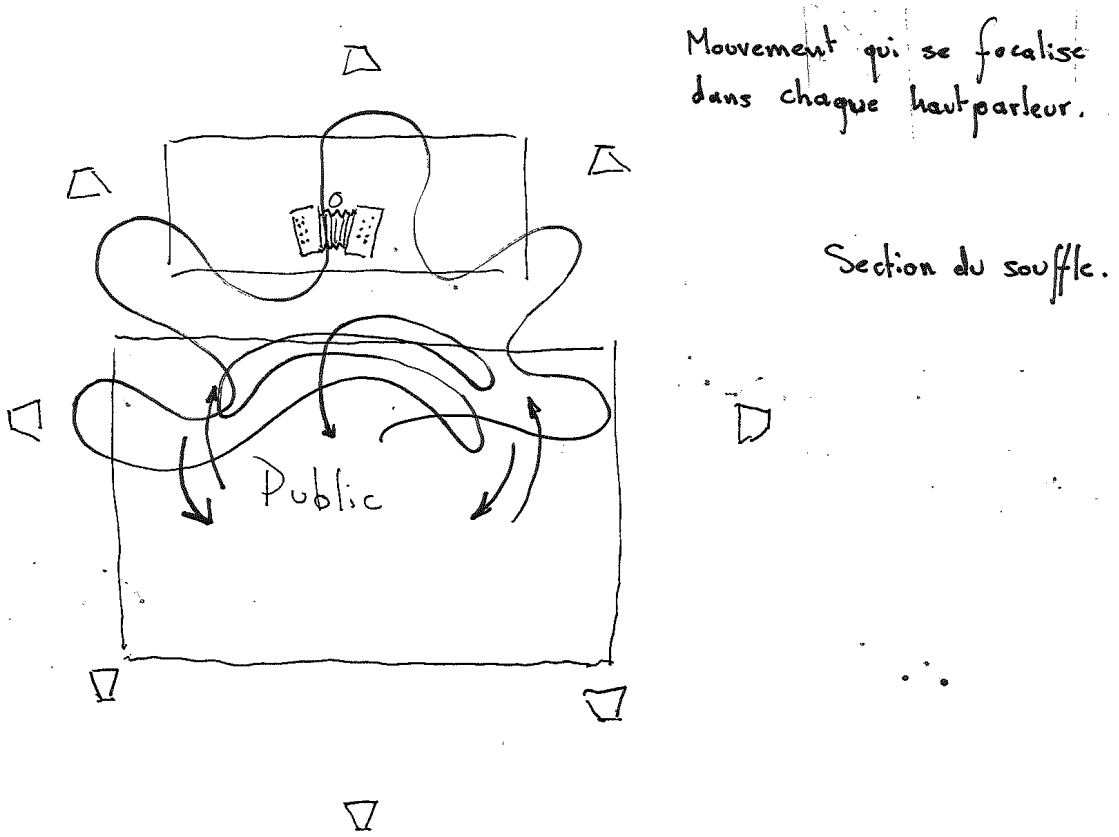


FIGURE 2.1: Esquisse de DC contenant des dessins de trajectoires et la disposition des haut-parleurs.

Tous les compositeurs expliquent penser à la spatialisation très tôt dans leur travail. Pourtant, excepté DC, aucun n'avait encore à ce stade mis en œuvre d'outils ou d'essais concrets avec la spatialisation. EP explique que *"la spatialisation est une des dernières choses à réaliser, de préférence après les premiers tests dans le lieu de représentation"*. Néanmoins, il réalise dès le début de sa pièce de nombreuses analyses, avec lesquels il crée des séquences sonores, qu'il voudrait également utiliser

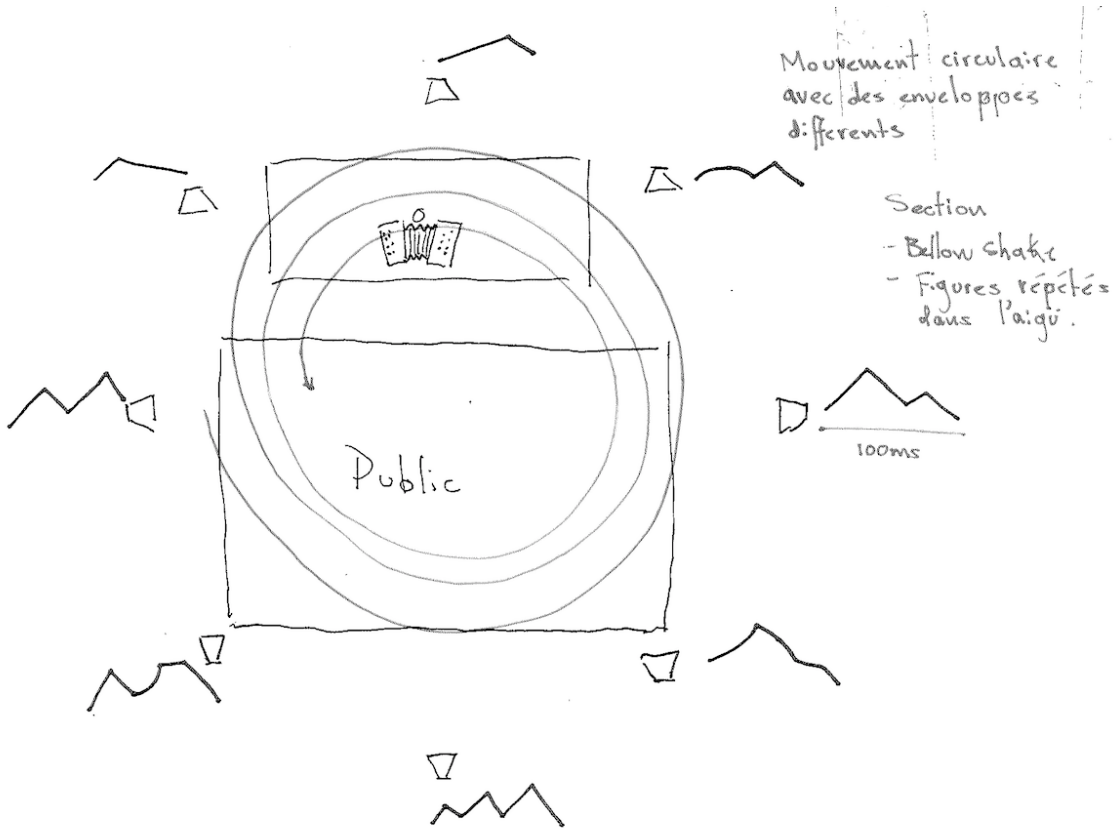


FIGURE 2.2: Esquisse de DC montrant le fonctionnement d'une spatialisation avec application d'enveloppes temporelles sur chaque canal.

ultérieurement pour créer la spatialisation. Dans tous les cas, la réalisation pratique des aspects liés à la spatialisation et l'exploration musicale approfondie intervient après la création de sons ou les répétitions avec les musiciens. En effet, il est nécessaire d'avoir à la fois de la matière sonore et des outils fonctionnels pour effectuer des essais.

Contextes technologiques

Avant de pouvoir explorer concrètement leurs idées, les compositeurs doivent mettre en place leur environnement de création musicale, décider des techniques qu'ils vont utiliser pour la spatialisation ou pour transformer et travailler le son. Pour MJ, cette étape est prise en charge par le RIM, son assistant, qui lui fournit et maintient un programme réalisé dans l'environnement *Max* afin de réaliser la synthèse sonore et spatialiser le résultat via l'interface graphique du *Spat*. Cela permet la réalisation de techniques avancés avec par exemple l'utilisation d'*Antescofo*, un programme pour la synchronisation de sons électroniques sur le jeu du musicien.

CG utilise de nombreux outils pour "reconstruire" des sons existants à partir d'analyses sonores et de synthèse par modèles physiques [15]. Il utilise le logiciel *Ableton Live*[5] afin de contrôler la spatialisation des sons avec des courbes d'auto-

5. `https://www.ableton.com/en/live/`

mations définissant le volume de sortie sur chaque enceinte. La figure 2.3 montre un exemple de courbes d'automations contrôlant le volume d'une source sonore dans quatre haut-parleurs. Il utilise de nombreuses pistes audio (environ 40) qu'il veut spatialiser indépendamment pour obtenir un "espace complexe et travaillé".

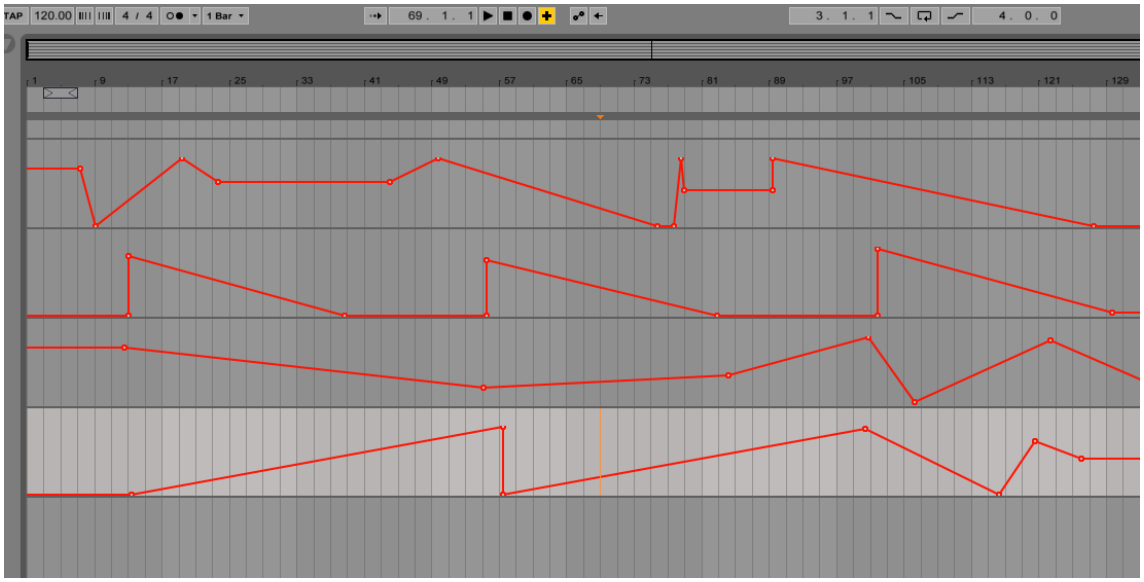


FIGURE 2.3: Courbes d'automation contrôlant le volume d'une source sonore sur quatre canaux de sortie.

DC a développé un système de spatialisation dans *Max*, basé sur plusieurs outils dont le *Spat* et des réverbérations. Il utilise une matrice pour assigner les sources sonores aux différents systèmes de spatialisation, et ainsi créer des plans statiques ou des objets sonores en mouvement. La figure 2.4 présente le *patch* (ou programme visuel) de sa pièce. Il explique "improviser" en essayant différentes combinaisons des paramètres disponibles dans ce patch. Son dispositif lui permet également d'enregistrer les mouvements d'objets graphiques et de les stocker afin de les rejouer lors de la performance.

EP crée des sons et utilise des analyses spectrales [14] de ces sons pour les organiser temporellement. Les sons sont ensuite spatialisés en temps réel avec le *Spat* (toujours dans *Max*) lors de la performance.

DC et EP utilisent aussi des messages de contrôle et des générateurs de rampes pour produire des trajectoires circulaires, ou des mouvements d'allers et retours dans l'espace, abordant ainsi la question de la temporalité dans le contrôle de la spatialisation par le biais de la programmation. La figure 2.5 montre un patch de EP réalisé dans *Max*, dédié au déclenchement de mouvements circulaires appliqués à une source sonore.

Problèmes de contrôle

DC explique qu'il trouve *"compliqué d'obtenir quelque chose de gestuel et naturel"* avec le dessin à la souris. EP estime également ne pas avoir à sa disposition de représentation graphique lui permettant de réaliser les trajectoires qu'il souhaite :

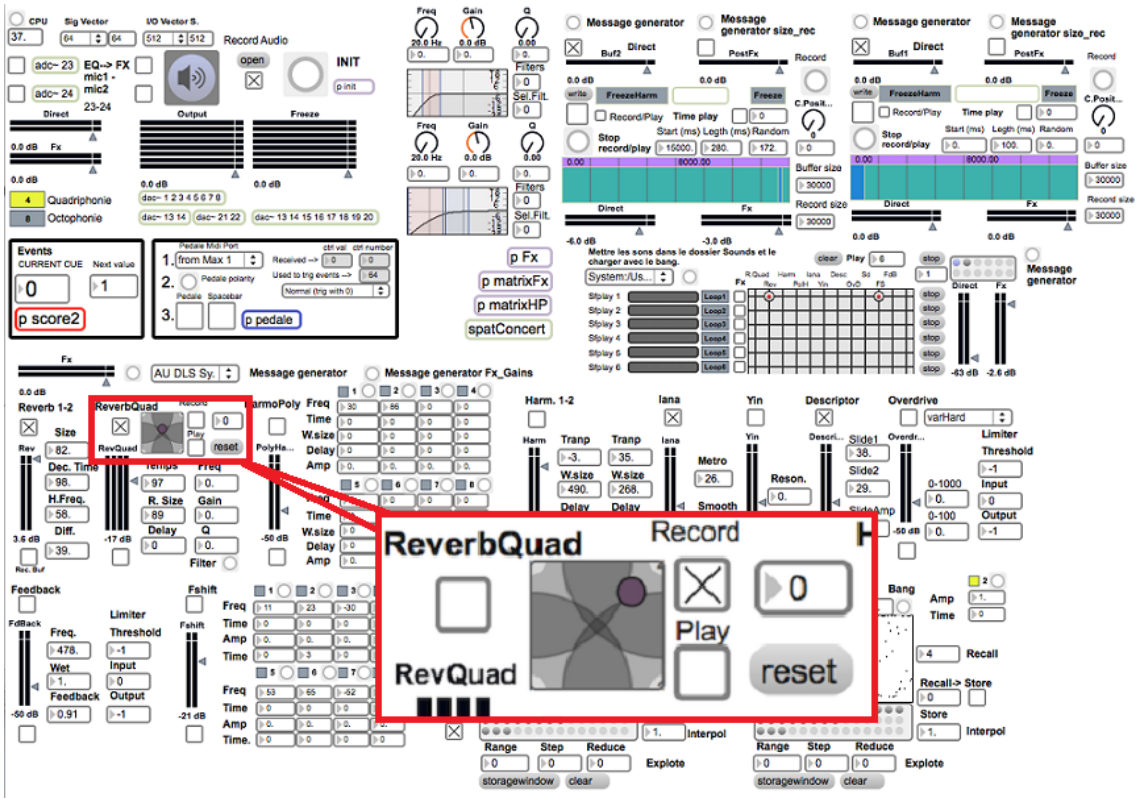


FIGURE 2.4: Environnement de DC dans *Max*. La zone agrandie montre la zone dédiée à l'enregistrement de trajectoires à la souris.

il est contraint d'utiliser des générateurs de rampes pour contrôler l'azimut et la distance des sources (voir figure 2.5). Pour CG, l'écriture des automations dans *Ableton Live*, facilite la synchronisation des effets spatiaux avec les fichiers sonores, mais rend complexe l'identification visuelle de la position spatiale des sources. Par ailleurs, le compositeur fait face à des problèmes de gestion de multiples canaux de sortie, le logiciel étant limité à une sortie stéréo.

Pour MJ, les problèmes se situent principalement lors de l'application de trajectoires de spatialisation aux source sonores. Il explique que des effets acoustiques et perceptifs surviennent lors de la diffusion sonore, et peuvent dénaturer le son ou sa présence dans l'espace. Il doit donc fréquemment modifier plusieurs fois une trajectoire avant d'être satisfait.

Attentes d'une application mobile

La présentation d'un prototype préliminaire permettant le dessin de courbes sur tablette a suscité un intérêt chez DC, EP et MJ, qui ont exprimé le souhait d'inclure un tel système dans la composition de leur œuvre actuelle.

MJ a directement évoqué la nécessité d'un retour auditif en temps réel lors du dessin d'une trajectoire afin de se rendre compte très rapidement du rendu et des dénaturations éventuelles. De même, EP propose de rejouer des trajectoires dessinées, avec un retour à la fois graphique et auditif du parcours de la trajectoire. Il souhaite

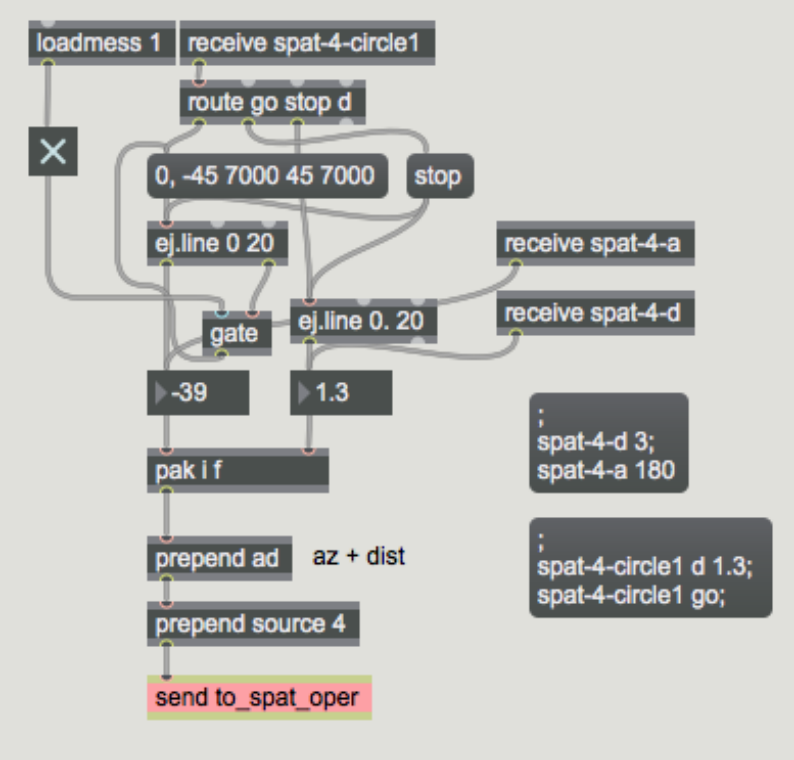


FIGURE 2.5: Programme *Max* réalisé par EP permettant la création de trajectoires circulaires en utilisant des générateurs de rampes.

générer plusieurs trajectoires, les comparer et sélectionner la plus intéressante.

DC est attiré par le côté gestuel et facile d'utilisation : *"je trouve ça génial (...), c'est très intuitif de bouger quelque chose et de voir ce que ça donne"*. Pour lui, dessiner est très intéressant puisque cela revient à "improviser" tout en écoutant le résultat.

La possibilité d'éditer les trajectoires est aussi très importante pour DC : elle permet de ne pas avoir à refaire un geste en entier pour lequel *"on aura jamais la même chose"*. Il ajoute qu'il a besoin de connaitre la position des haut-parleurs pour comprendre directement à quoi correspond la représentation graphique.

MJ est intéressé par la représentation graphique de la vitesse pour estimer si une trajectoire est lente ou rapide sans avoir à la rejouer. D'autres paramètres du *Spat* seront également pertinents à visualiser et contrôler, comme l'orientation ou l'angle d'ouverture de la source sonore.

En nous basant sur ces observations, nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur la conception d'un outil permettant le dessin et la lecture de trajectoires de sources sonores, et sur son étude en collaboration avec les compositeurs.

3 L'application Trajectoires

TRAJECTOIRES est une application permettant de dessiner et de rejouer des trajectoires de sources sonores spatialisées. Elle est disponible sur le site `http://repmus.ircam.fr/efficace/wp/trajectoires`, qui propose également plusieurs vidéos montrant des utilisations possibles, ainsi que des programmes *Max* et *OpenMusic* d'exemples. La figure 3.1 montre l'interface de cette application. Plusieurs trajectoires sont dessinées dans la zone centrale.

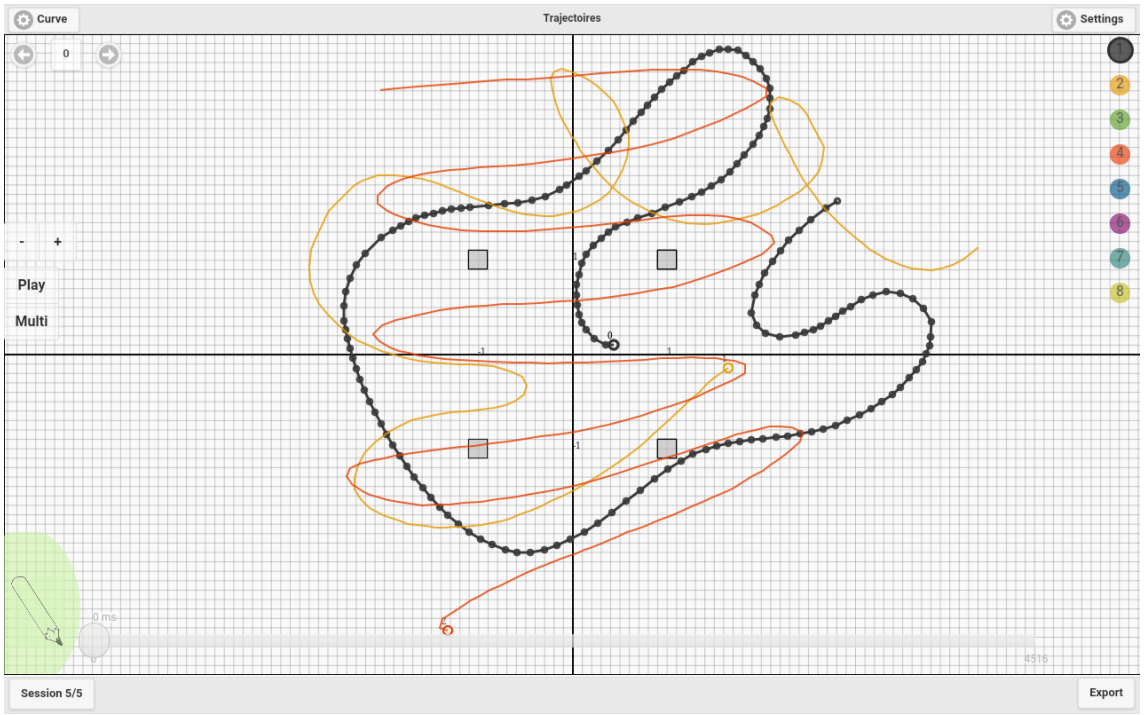


FIGURE 3.1: Interface de l'application *Trajectoires* contenant plusieurs trajectoires.

L'application ne produit pas de son directement, mais envoie des messages via le protocole OpenSoundControl (OSC) [41] pour communiquer avec la plupart des environnements de composition. Lorsqu'une trajectoire est dessinée ou rejouée, les coordonnées de chaque point sont envoyées via OSC. La figure 3.2 présente un programme développé dans *Max* utilisant le *Spat* afin de produire un rendu sonore spatialisé correspondant aux messages reçus.

3.1 Interface et fonctionnement

Saisie de trajectoires

Pour fournir aux compositeurs des outils de saisie et d'édition de trajectoires facilement accessibles, il a fallu mettre en place un système de modes. En posant un doigt sur la zone en bas à gauche de l'application (voir figure 3.1), on passe en mode dessin. Différents éléments disparaissent pour laisser place au dessin d'une trajectoire de source sonore avec la main dominante (voir figure 3.3) Lors du passage

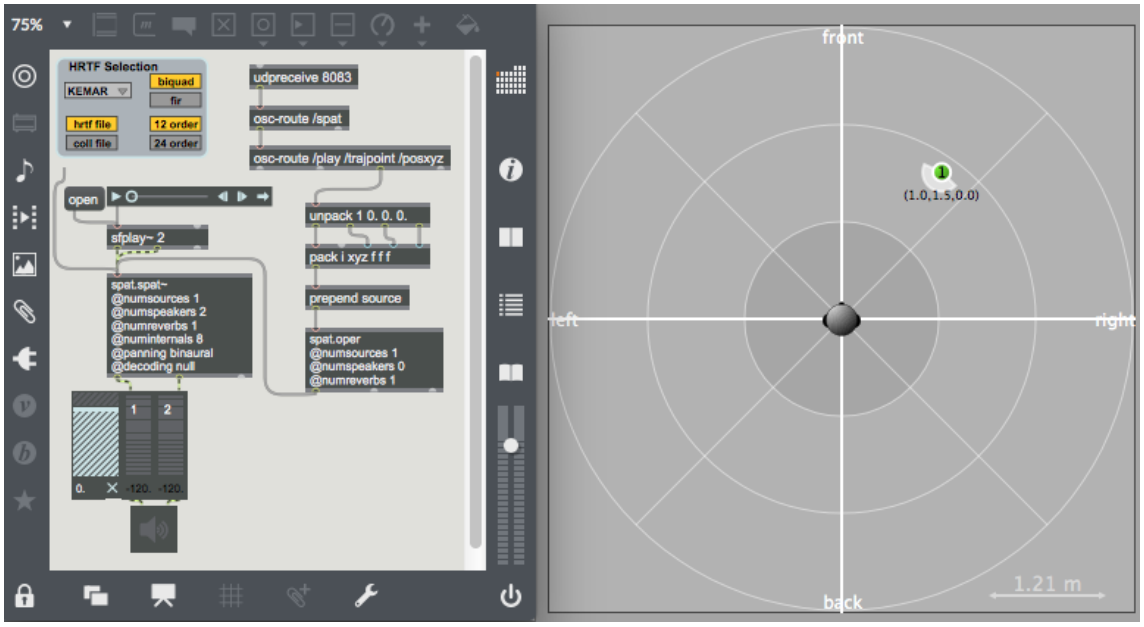


FIGURE 3.2: Programme *Max* permettant de contrôler le *Spat* lors de la réception de messages OSC.

en mode dessin, on a accès aux boutons de sélection de source contrôlée en haut à droite pour laisser la possibilité à l'utilisateur de choisir quelle source du *Spat* est contrôlée en temps réel. Le placement de la zone de mode de dessin est inspiré des résultats d'une étude sur le positionnement de telles zones [39].

Transformation de trajectoires

Sans appui sur la zone de dessin, l'utilisateur reste en mode édition. L'aspect multi-points nous a permis d'associer des transformations à des gestes. Il est possible de réaliser différentes actions (voir figure 3.3) :

Sélection : sélectionner une trajectoires en posant le doigt dessus.

Translation : réaliser une translation sur la trajectoire sélectionnée avec un geste de glissement à un doigt.

Rotation et étirement : lorsque l'utilisateur utilise deux doigts, il peut réaliser une rotation et un étirement ou une compression de la trajectoire sélectionnée.

Étirement selon un axe : avec trois doigts, l'utilisateur peut réaliser un étirement par rapport à un axe formé à partir des deux premiers doigts posés ou un effet miroir.

Curseur temporel

Le curseur temporel en bas permet de se déplacer le long d'une ou plusieurs trajectoires. Il offre le moyen de rejouer une trajectoire de façon plus lente ou plus rapide et de s'attarder sur des passages importants pour l'utilisateur (voir figure 3.4).

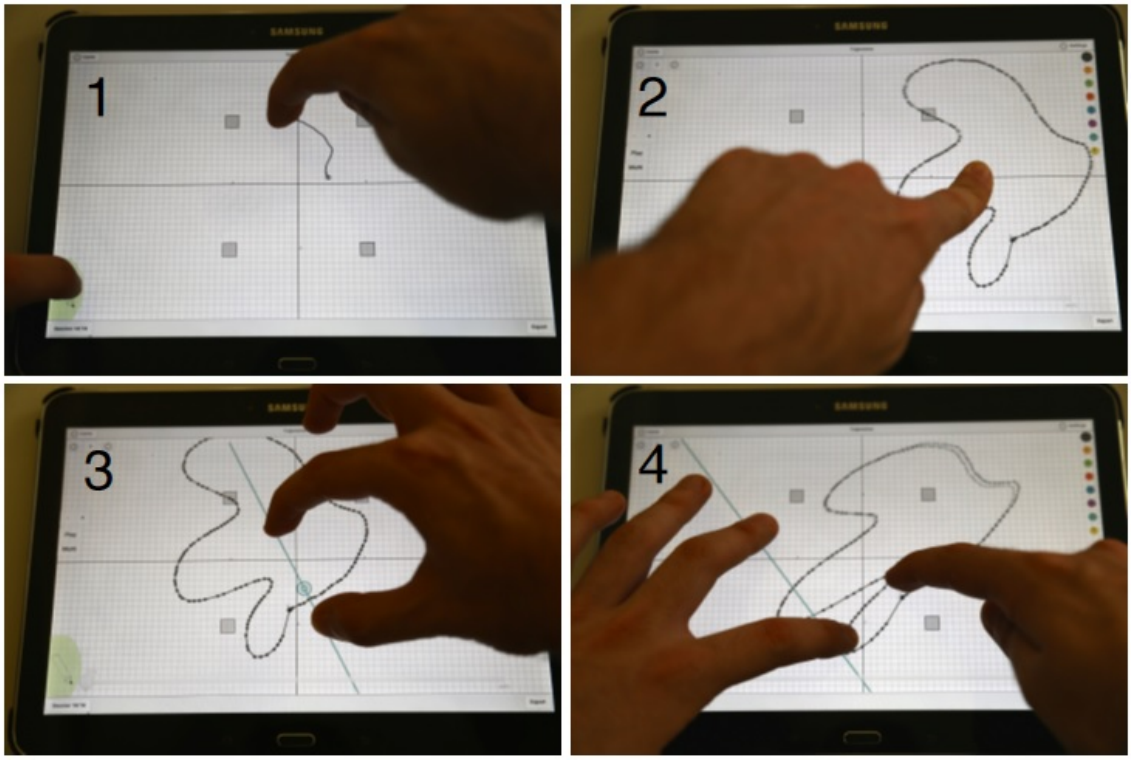


FIGURE 3.3: 1) mode dessin ; 2) translation ; 3) rotation et étirement ; 4) étirement selon un axe.

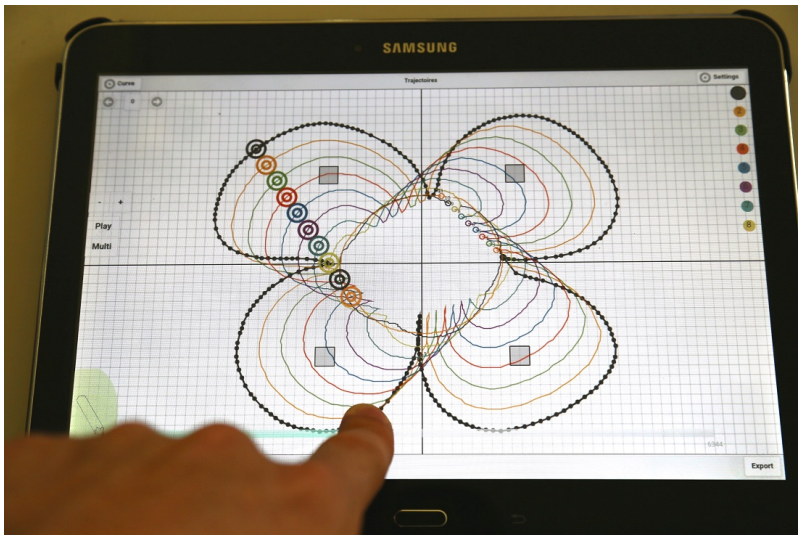


FIGURE 3.4: Utilisation du slider temporel pour le contrôle de plusieurs sources sonores.

Éditer une trajectoire

Un autre moyen d'édition permet de redessiner une portion de trajectoire. Cette commande est accessible via le menu "Actions" des courbes, ou depuis le menu apparaissant lors d'un appui long. Cette méthode permet de placer deux marqueurs à l'aide du curseur temporel, puis de redessiner la portion entre ces deux points. La

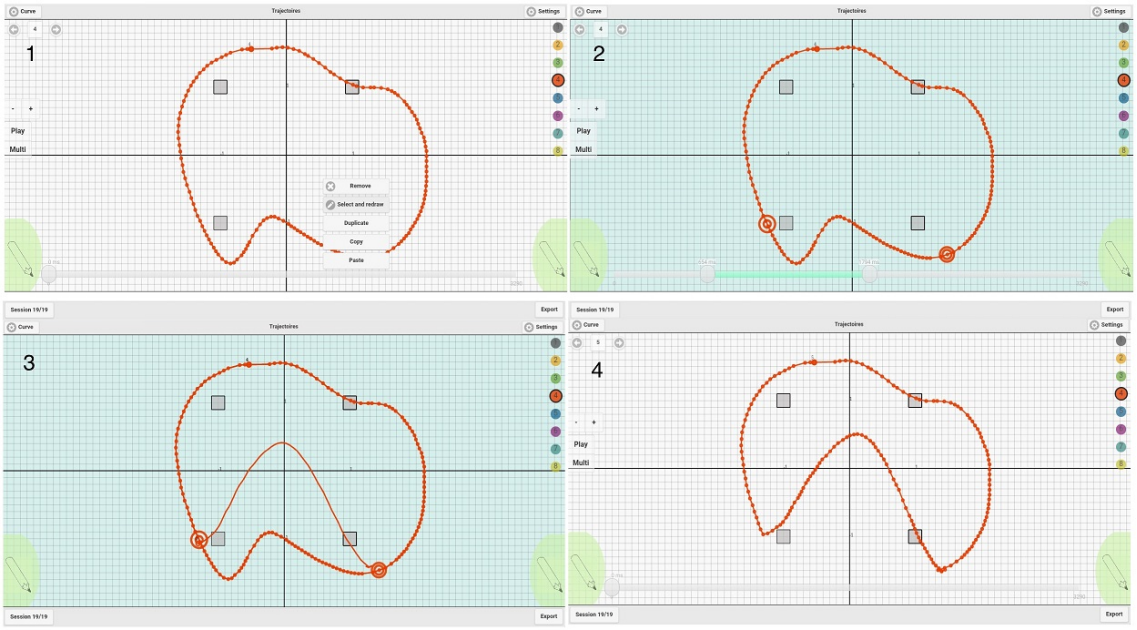


FIGURE 3.5: *Select and Redraw* : 1) Menu lors d'un touché long ; 2) Sélection d'une portion grâce à deux curseurs du slider temporel ; 3) Dessin de la portion ; 4) Remplacement de la portion.

portion dessinée est ensuite déformée pour finalement remplacer la portion sélectionnée (voir figure 3.5).

Jouer une ou plusieurs trajectoires

Il est possible de rejouer une trajectoire grâce aux boutons qui sont accessibles sur la zone de dessin à gauche. Un bouton "Multi" permet de jouer plusieurs trajectoires simultanément, contrôlant le déplacement de différentes sources sonores. Lors de la lecture d'une trajectoire, le curseur temporel défile pour que l'utilisateur se repère temporellement.

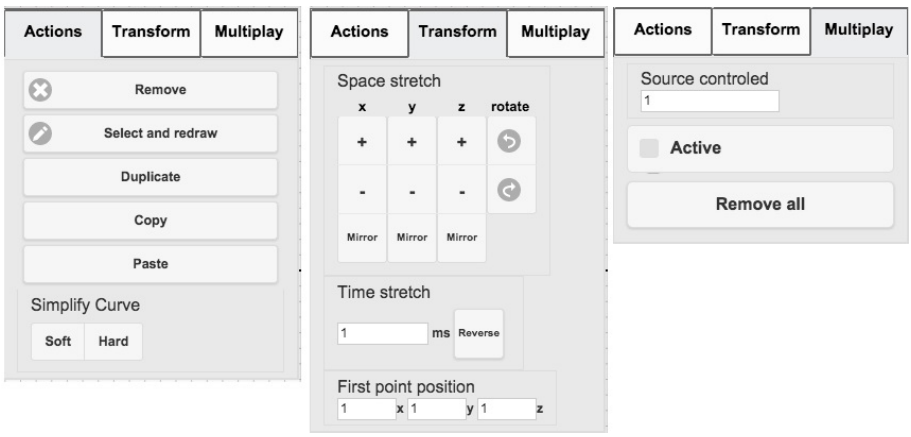


FIGURE 3.6: Les différents menus relatifs aux trajectoires

Menu des courbes

Les trajectoires peuvent être sélectionnées avec les boutons de défilement en haut de l'interface. Un menu associé aux courbes est disponible et permet d'accéder à diverses fonctionnalités liées aux trajectoires comme par exemple des transformations spatiales ou temporelles, des actions de suppression ou simplification (voir figure 3.6). La transparence du menu permet à l'utilisateur de voir le résultat de ses actions, même sur un écran de petite taille.

Commandes accessibles

Les boutons à gauche, superposés sur la zone de dessin, permettent de contrôler le niveau de zoom et de rejouer ou arrêter la lecture d'une ou plusieurs trajectoires. Ce sont des tâches qui sont ressorties des collaborations avec les compositeurs comme très récurrentes, d'où le choix de les superposer sur la zone de dessin de trajectoires.

Contrôle de différentes sources sonores

Les boutons de couleur en haut à droite permettent de sélectionner la source contrôlée par la trajectoire sélectionnée. Nous avons choisi d'associer la couleur d'une trajectoire avec la source qu'elle contrôle pour une compréhension rapide.

zSlider

Un curseur contrôlant l'élévation d'une source sonore peut être affiché. Sur la figure 3.7 on peut voir l'utilisation du *zSlider*. La main droite dessine la trajectoire dans le plan et la main gauche contrôle l'élévation de la source sonore.

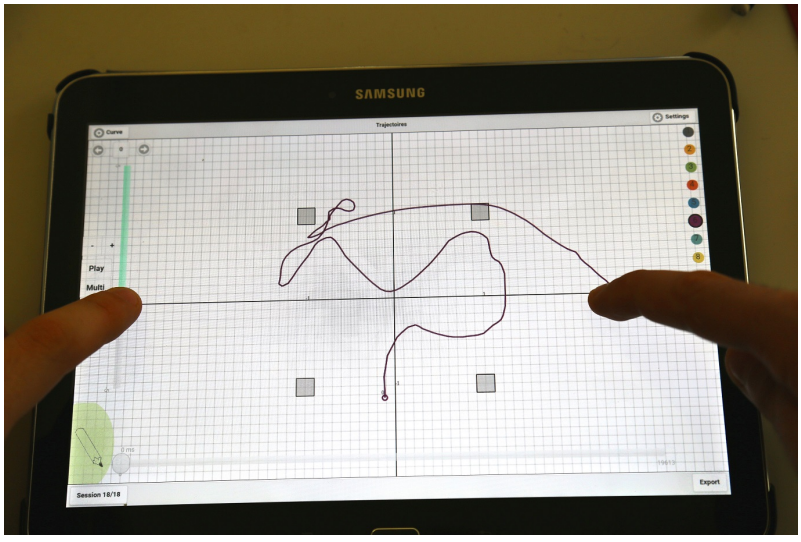


FIGURE 3.7: Utilisation du zSlider pour le contrôle de l'élévation

Menu d'option

Un menu d'option offre d'autres possibilités, comme voir toutes les courbes en fond ou seulement la courbe sélectionnée, activer un mode de répétition pour la

lecture des trajectoires, envoyer les données d'orientation du dispositif ou afficher le curseur temporel et/ou d'élévation.

3.2 Implémentation

TRAJECTOIRES est développé en Javascript et HTML, et fonctionne sur la majorité des dispositifs comprenant un navigateur internet. L'application s'appuie sur la librairie *Interface.js* [36] qui fournit une architecture client/serveur pour convertir des messages envoyés par *WebSocket* vers des messages OSC. Le serveur sur l'ordinateur héberge l'application, à laquelle on accède depuis un dispositif mobile à travers le réseau. Il est possible d'utiliser l'application avec plusieurs clients simultanément, par exemple le navigateur de l'ordinateur et une tablette. La figure 3.8 illustre l'architecture client/serveur utilisée et les différents protocoles de communication mis en jeu. Afin de faciliter l'utilisation par les compositeurs, le serveur dispose d'une interface graphique intégrée dans une application grâce à la librairie *Node-WebKit* (*NW.js*)[6] qui indique l'adresse internet à laquelle se connecter pour ouvrir TRAJECTOIRES.

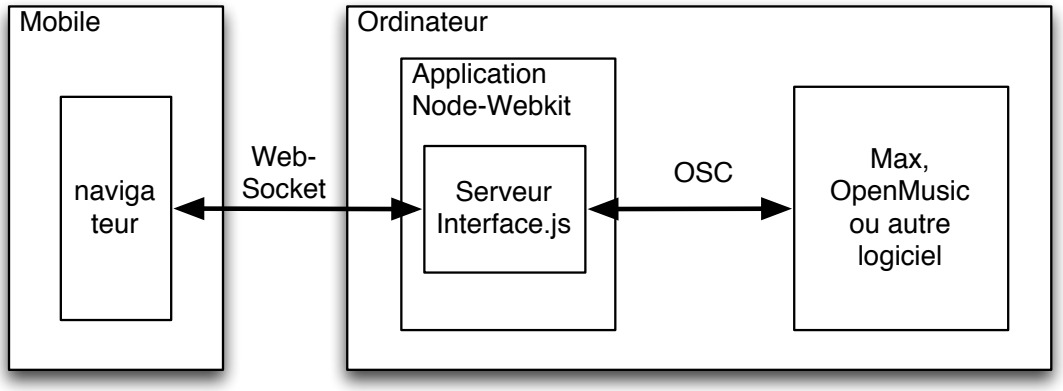


FIGURE 3.8: Architecture et protocoles de communication utilisés pour réaliser TRAJECTOIRES

L'architecture du code s'inspire légèrement du modèle-vue-contrôleur, un paradigme regroupant les fonctions nécessaires au fonctionnement d'applications interactives. Le "modèle" propose une gestion des données, la "vue" s'occupe de la présentation et de l'interface utilisateur et le "contrôleur" gère la logique de contrôle et les événements. Les parties "modèle", "vue" et "contrôleur" sont en fait scindées en plusieurs espaces de noms ou classes : une classe pour les trajectoires regroupant les propriétés de base d'une courbe temporelle, des gestionnaires pour les événements, les trajectoires, les sessions, la vue, la communication OSC, le lecteur de trajectoire, ... (voir figure 3.9).

6. `http://nwjs.io/`

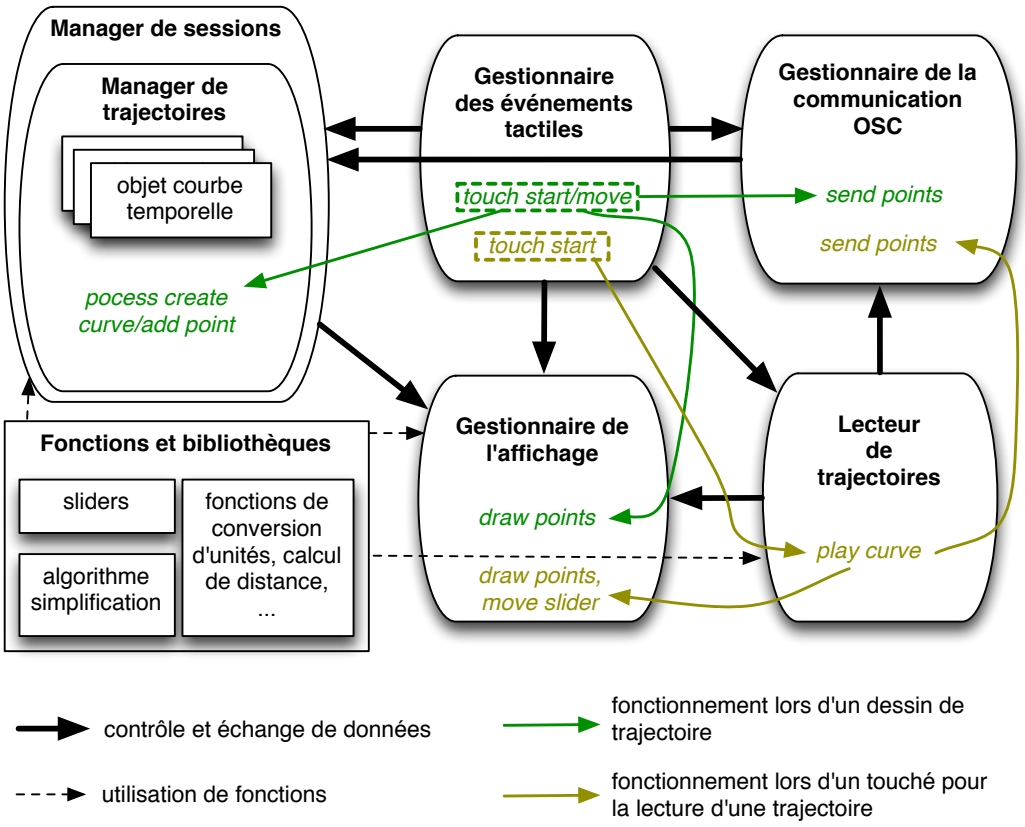


FIGURE 3.9: Architecture de de l'application TRAJECTOIRES

3.3 Exemples d'utilisation

Cette partie montre des utilisations possibles de l'application avec des environnements comme *Max* ou *OpenMusic*.

3.3.1 Exemple 1, contrôle temps réel dans Max

Contrôle de la position de sources du *Spat*

La figure 3.10 représente un programme *Max* permettant de contrôler le *Spat* grâce à une tablette ou à la souris via un navigateur. L'utilisateur peut ainsi dessiner des trajectoires pour différentes sources sonores en écoutant le résultat en temps réel.

Contrôle d'autres paramètres du *Spat*

La figure 3.11 représente un programme *Max* permettant de contrôler le Spat *Spat*. Nous avons ajouté ici quelque fonctions qui étendent le contrôle à d'autres paramètres comme l'orientation et l'ouverture des sources. L'application envoie les coordonnées des points avec leur temps associés vers *Max*. En utilisant la valeur de temps, on peut générer des paramètres supplémentaires préalablement choisis dans l'objet "function" de *Max*.

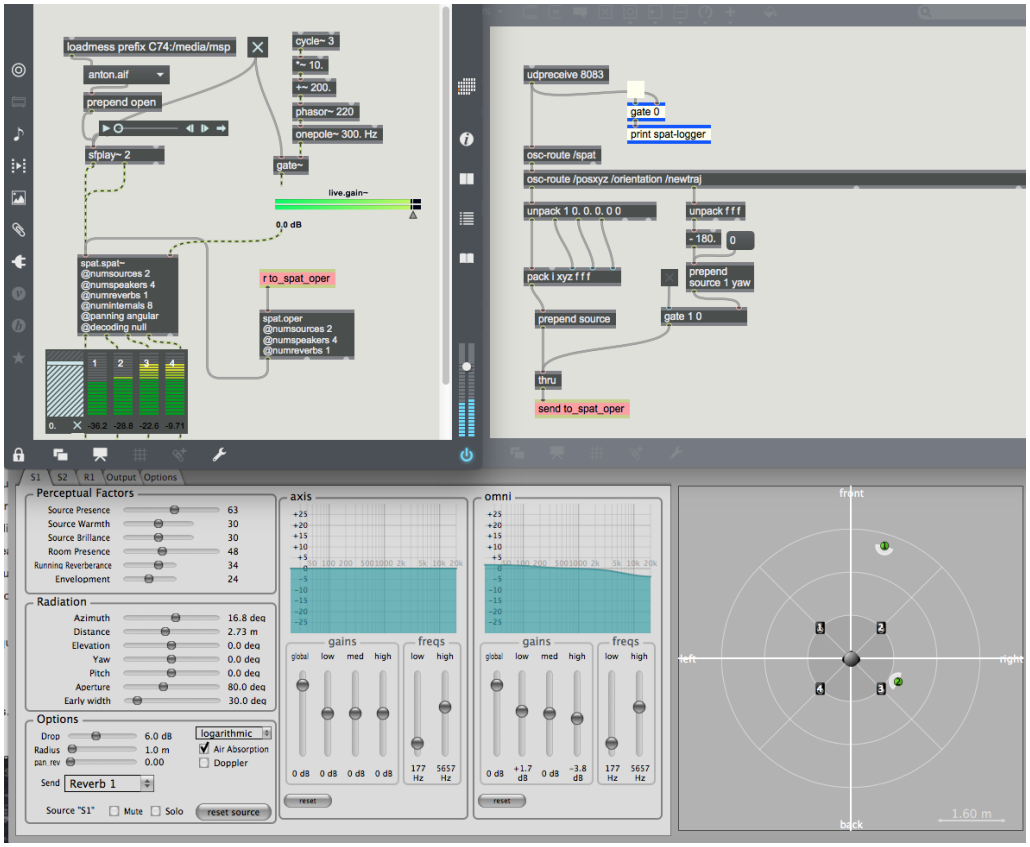


FIGURE 3.10: En haut, programmes Max permettant le contrôle du *Spat* via l'application TRAJECTOIRES. En bas, vue du SpatOper.

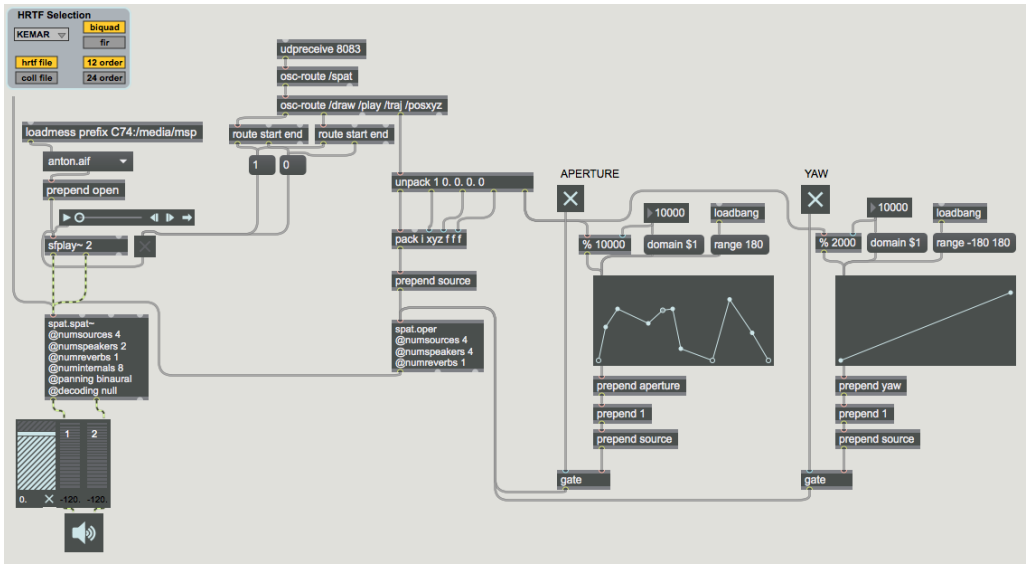


FIGURE 3.11: Programme Max permettant le contrôle de paramètres du *Spat*

3.3.2 Exemple 2, récupération et traitement dans OpenMusic

OpenMusic est un environnement de programmation visuel. Les compositeurs assemblent des blocs correspondant à des fonctions et des structures de données pour

créer et manipuler des structures musicales [1, 7].

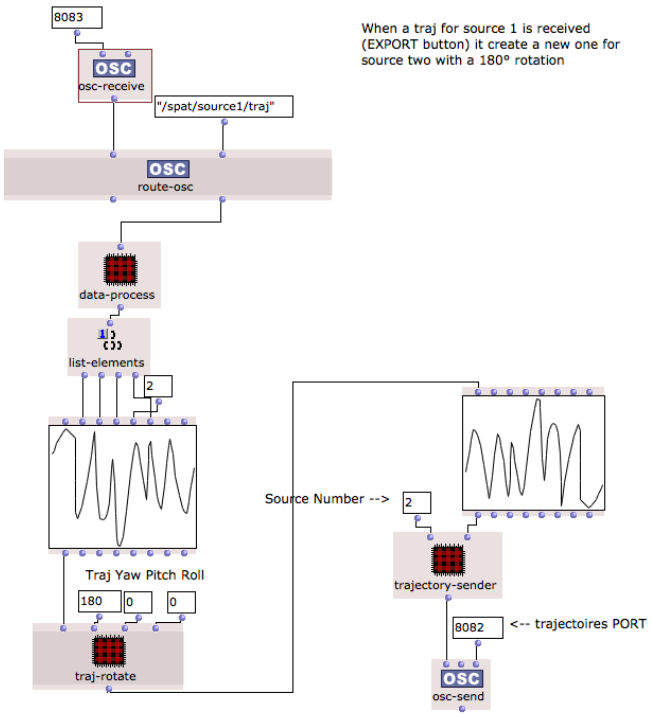


FIGURE 3.12: Programme *OpenMusic* permettant de recevoir une trajectoire dessinée, d'effectuer une rotation, et de l'envoyer vers TRAJECTOIRES

Il est intéressant d'interfacer notre application avec *OpenMusic* pour étendre les possibilités offertes aux compositeurs dans la génération et la manipulation de trajectoires de sources sonores. Ainsi, nous avons mis au point un protocole de communication *OSC* qui permet de recevoir et d'envoyer des courbes depuis l'application TRAJECTOIRES. Quelques exemples d'utilisation sont montrés ici. L'intérêt étant de donner aux compositeurs les moyens de développer leurs propres techniques.

Recevoir des trajectoires sur l'application

La réception des trajectoires sur *OpenMusic* se fait en écoutant un port sur le réseau. Le protocole *OSC* offre la possibilité de donner une adresse à chaque message envoyé. Ainsi, les trajectoires sont envoyées comme des points temporels à l'adresse "/spat". Ensuite vient le nom de la source contrôlée ("/source1" par exemple), et enfin le mot "/traj". Les points d'une trajectoire sont ensuite envoyés à la suite : d'abord les coordonnées X Y Z, puis le temps t associé. Le protocole de communication admet une limite de quantité de données envoyées à travers le réseau. Scinder la trajectoire en plusieurs parties peut être nécessaire pour les trajectoires très longues.

Envoi, transformation, réception

La figure 3.12 présente un patch permettant de dessiner une trajectoire sur l'application TRAJECTOIRES envoyée dans l'environnement *OpenMusic*, transformée, puis

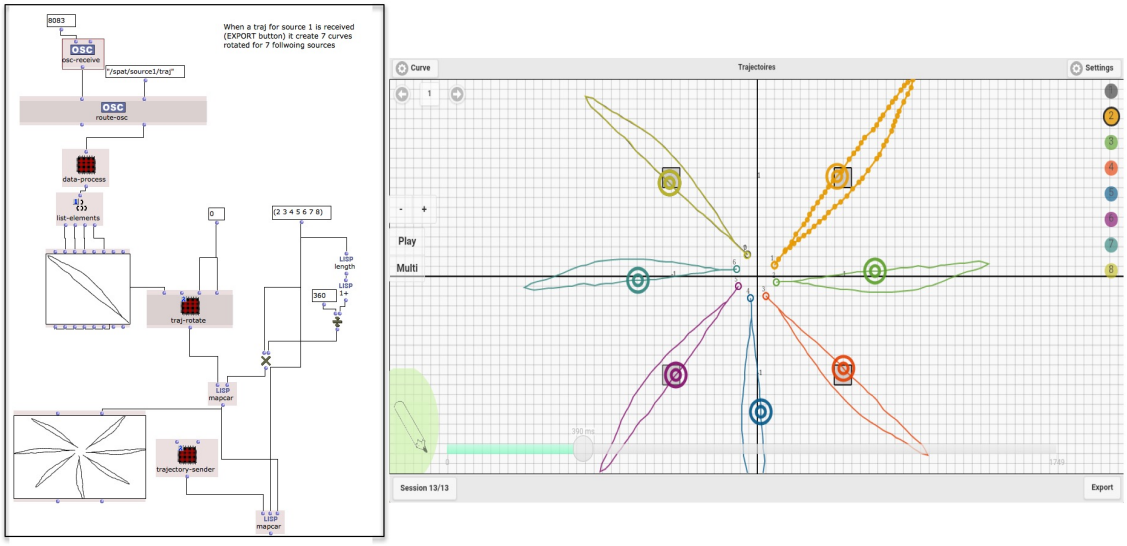


FIGURE 3.13: Programme *OpenMusic* à gauche, résultat des multiples rotations sur l'application à droite

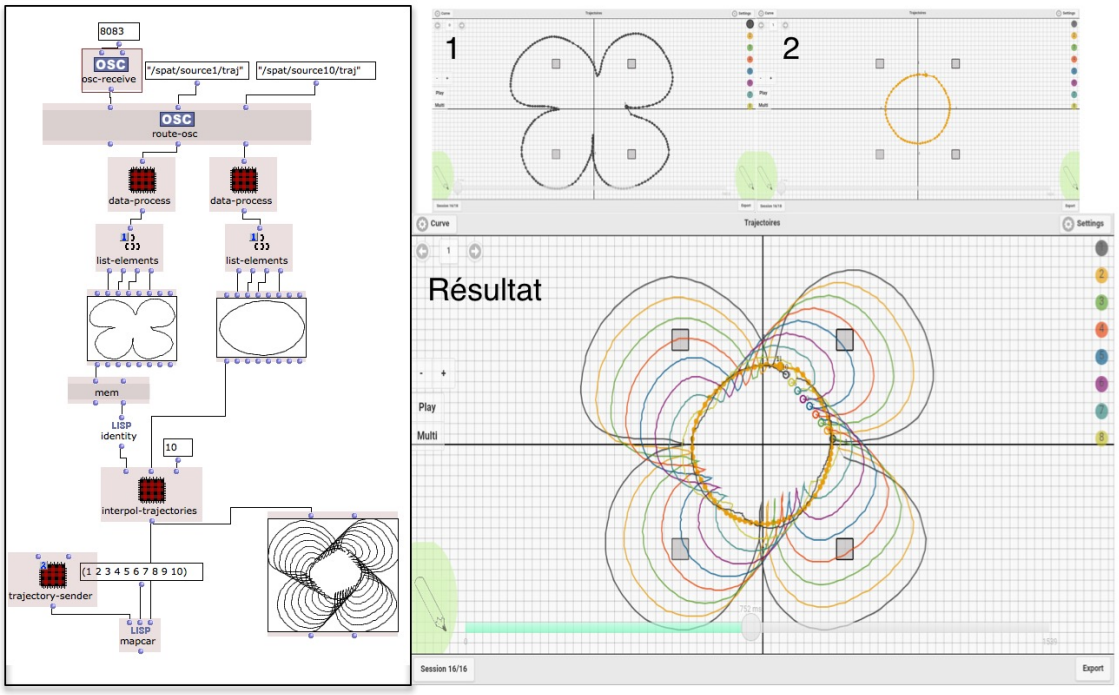


FIGURE 3.14: Programme *OpenMusic* à gauche, les deux courbes à interpoler et le résultat à droite

renvoyée vers l'application TRAJECTOIRES. Dans ce cas, on réalise une rotation de la trajectoire dessinée. La figure 3.13 présente un patch réalisant plusieurs rotations de la trajectoire reçue et les renvoie vers l'application mobile.

Interpolation de trajectoires

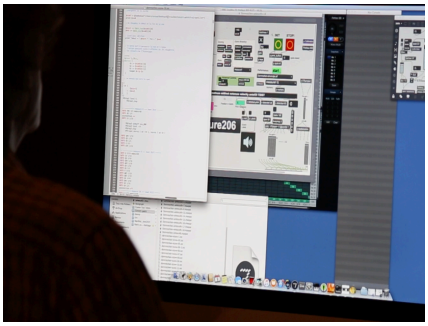
OpenMusic offre la possibilité de réaliser de nombreuses opérations permettant par exemple de produire des trajectoires interpolées. En dessinant deux trajectoires, le patch génère 10 courbes interpolées qu'il associe à 10 sources sonores différentes (voir figure 3.14).

3.3.3 Exemple 3, export des trajectoires vers Antescofo

Antescofo est un système de suivi de partition capable de suivre la position et le tempo du musicien en temps réel et de synchroniser des processus électroniques. Il est disponible dans l'environnement *Max*.

En utilisant une "NIM" (*new interpolated map*), structure pour la définition de fonctions interpolées, comme argument d'une "Curve", cela permet de dynamiquement construire les valeurs interpolées d'une trajectoire. L'application TRAJECTOIRES offre le moyen d'exporter une trajectoire sous la forme d'une structure "NIM" qui pourra être ensuite chargée dans une "Curve" (voir figure 3.15). Ensuite, il sera possible de manipuler la trajectoire en utilisant les outils d'étirement ou il sera également possible de synchroniser la trajectoire avec le jeu du musicien.

```
; --> chargement de la courbe (donner l'adresse)

$nim0 := @loadvalue("/traj/1.txt")
print $nim0


; On récupère le début et la fin de la nim

$start := (@min_key($nim0))[0]
$end := (@max_key($nim0))[0]


; juste pour vérifier et ça print dans la fenêtre max
print "debut = " $start "  fin = " $end


; la curve sert à parcourir la nim en n temps
; l'action consiste juste à affecter $x. On récupèrera
; les valeurs via l'historique

curve
@grain 1./20.s,
@action {
    $x := $nim0($t)[0]
    $y := $nim0($t)[1]
        $z := $nim0($t)[2]
    tospat $x $y $z
}


; on envoie xyz vers le spat

{
$t {
    {$start}
        4 {$end}
  }
}


; On joue le fichier dans max

VPplay2 level 0.
        VPplay2 play
```



```
$___save_then_load_value____system_dummy_variable___ :=
NIM {
0 TAB[-0.8216216216216217, 0.9945945945945946, 0],
65 TAB[-1.491891891891892, 0.8108108108108109, 0],
52 TAB[-1.8054054054054056, 0.2594594594594595, 0],
69 TAB[-1.8594594594594596, -0.3567567567567568, 0],
104 TAB[-1.5351351351351352, -0.9621621621621622, 0],
101 TAB[0.08648648648648649, -1.0918918918918918, 0],
33 TAB[0.5081081081081081, -0.9621621621621622, 0],
103 TAB[1.2756756756756757, -0.3783783783783784, 0],
155 TAB[1.308108108108108, 0.4756756756756757, 0],
119 TAB[0.7351351351351352, 1.0270270270270272, 0],
120 TAB[0.032432432432432434, 1.1891891891891893, 0],
218 TAB[-0.8216216216216217, 0.9945945945945946, 0]
}
```

FIGURE 3.15: A gauche : programme Antescofo permettant de charger et jouer la "NIM". A droite : photo d'un RIM exportant une trajectoires vers Antescofo et structure "NIM" exportée de l'application TRAJECTOIRES

4 Collaborations

Nous avons collaboré avec trois compositeurs en utilisant une version moins évoluée de TRAJECTOIRES comme sonde technologique [19] afin d'observer son utilisation dans un contexte réel, d'évaluer son fonctionnement et d'inspirer de nouvelles idées. Nous avions mis à disposition des compositeurs une application permettant seulement de dessiner des trajectoires contrôlant en temps réel le positionnement de sources sonores. Cette application était simple, flexible et pouvait s'adapter aux besoins des compositeurs. Les résultats obtenus nous ont permis d'itérativement développer l'application TRAJECTOIRES.

4.1 Méthode

Participants

Les compositeurs DC, EP et MJ qui ont également participé aux interviews.

Procédure

Nous avons collaboré avec DC et EP pendant un mois, jusqu'à la représentation de leurs pièces. Nous les avons rencontrés respectivement quatre et cinq fois au cours de sessions d'environ 45 minutes. Les premières rencontres se sont concentrées sur l'intégration de l'application avec les différents systèmes de spatialisation des compositeurs. Nous leur avons ensuite prêté durant plusieurs périodes une tablette dotée de TRAJECTOIRES en leur demandant de noter leurs activités et les problèmes rencontrés lors de son utilisation.

Nous avons également conduit une rencontre d'environ une heure avec MJ, en présence du RIM (assistant musical) qui l'accompagne, pour réaliser des essais préliminaires sur sa pièce. Nous avons ensuite poursuivi les collaborations avec le RIM avant et après la représentation.

4.2 Résultats

Les compositeurs ont réussi à intégrer TRAJECTOIRES dans leurs environnements de composition respectifs. La figure 4.1 montre le compositeurs EP lors de l'utilisation de l'application. Il a développé un outil spécifique dans *Max* pour stocker et rejouer des trajectoires lors du concert. DC a réutilisé ses outils d'enregistrement de trajectoires basés sur un échantillonnage du mouvement. L'assistant de MJ a adapté ses outils actuels pour ajouter le contrôle via l'application en plus de l'interface du *Spat*.

Utilisation et appropriation

Les trois compositeurs ont utilisé l'application pour créer des trajectoires associées à différentes sources sonores qu'ils déclenchaient sur l'ordinateur. Tous ont commencé

FIGURE 4.1: EP lors de l'envoi de trajectoires de sources sonores dans son *patch* de travail.

par tester le rendu de la spatialisation sur le système de reproduction du studio. DC et MJ ont tout d'abord dessiné des trajectoires simples comme des cercles ou des rectangles tout en se déplaçant dans la salle. La figure 4.2 montre MJ écoutant une trajectoire dans un endroit particulier du studio.

Les participants ont apprécié le retour en temps réel qui permet d'adopter des mouvements en cohérence avec la dynamique du son. Par exemple, MJ a utilisé ce retour pour répéter plusieurs trajectoires sur un même échantillon sonore avant de trouver une trajectoire qui lui convienne. Pour synchroniser la trajectoire avec le fichier son, il a demandé au RIM de déclencher les fichiers sonores à son signal.

Les compositeurs ont également utilisé la fonctionnalité permettant de rejouer une courbe déjà dessinée pour comparer plusieurs alternatives. DC et EP ont sauvegardé plusieurs trajectoires qui ont été utilisées lors des répétitions et du concert.

EP nous a expliqué que pour lui, le *Spat* fonctionnait de façon optimale pour des sources situées dans un rayon compris entre 1 et 3 mètres du centre. Il a donc créé un programme contraignant le rayon des sources dans cette zone spécifique. Il a également utilisé des données provenant du jeu du musicien comme le volume sonore pour moduler le rayon de la source sonore lors du concert. Ces modulations entre paramètres lui permettent d'explorer d'autres possibilités créatives et de lier

FIGURE 4.2: MJ écoutant le rendu d'une trajectoire.

les trajectoires de spatialisation au jeu du musicien.

Lors des différentes sessions de travail avec les compositeurs, nous avons pu proposer des solutions à certains des problèmes rencontrés. Par exemple, DC, utilise des trajectoires très longues et à expliqué trouver cela *"fatiguant d'effectuer la saisie en un seul geste"*. La figure 4.3 illustre la lecture d'une trajectoire de plusieurs minutes crée par DC. L'ajout d'une option permettant de continuer la trajectoires précédente à permis de faciliter la saisie.

Etant donné que EP souhaitait contrôler de nombreuses sources différentes, nous avons ajouté un moyen de sélection de la source du *Spat* contrôlée directement sur l'application. Le compositeur à également développé des outils dans son environnement pour permettre de choisir une partie de la pièce et une source pour lesquelles il veut réaliser une spatialisation puis de déclencher le son lors du dessin de la trajectoire. Il écoute ensuite le résultat et peut, lorsqu'il est satisfait, enregistrer la courbe sur l'ordinateur par l'intermédiaire d'un bouton "export".

Limitations et suggestions

La principale limitation évoquée par les compositeurs concerne l'édition de trajectoires existantes. Au début des collaboration, aucun moyen d'édition n'avait encore été mis en place. DC était intéressé par des outils de sélection et de remplacement de portions de trajectoires. Il explique qu'il *"faudrait avoir accès aux valeurs de temps*

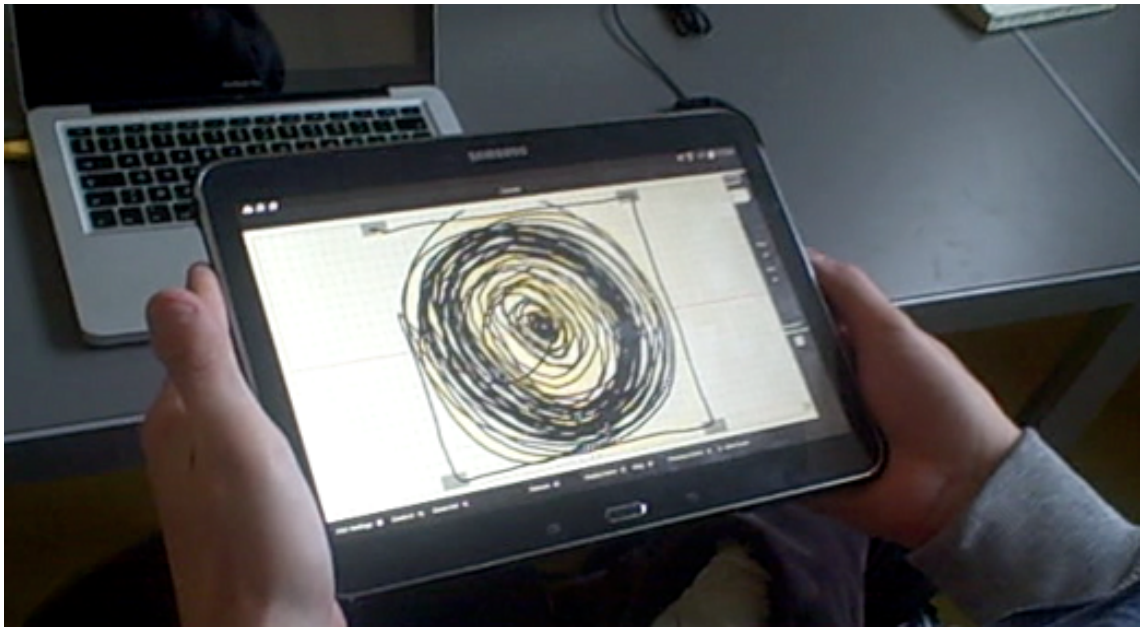


FIGURE 4.3: DC lors de la lecture d'une trajectoire de plusieurs minutes.

des points d'une trajectoire pour pouvoir facilement sélectionner la portion à redessiner". EP souhaitait également disposer de plusieurs modes d'édition en changeant soit la forme soit le temps, alors que l'application ne proposait pour l'instant qu'une visualisation spatiale des trajectoires. Les trois compositeurs ont suggéré de pouvoir visualiser et parcourir une trajectoire dans le temps implémentée sous forme d'une barre de progression temporelle (voir figure 3.4).

Les trois participants ont exprimé un intérêt pour appliquer des transformations sur les trajectoires comme des translations ou des rotations. EP a également évoqué l'application d'interpolations entre trajectoires. Pour lui, ces transformations, bien que réalisables dans *Max* ou *OpenMusic*, devraient être possibles ou du moins observables sur la tablette, avec un retour en temps réel de la trajectoire et de la position de la source sonore. Nous nous sommes donc concentré sur un protocole d'échange de donnée, compatible avec les différents environnements (voir Section 3.3).

Un autre aspect problématique a été le stockage et la réutilisation des courbes. Au bout de quelques jours d'utilisation, EP avait créé et gardé en mémoire plus d'une centaine de courbes sur la tablette. Afin de faciliter la navigation et la réutilisation, il a suggéré de mettre en place des bibliothèques de trajectoires pour les organiser par groupes et réduire le nombre d'éléments à traiter. Ces bibliothèques appelées "Sessions" sont maintenant accessibles via un menu en bas à gauche de l'application (voir figure 3.1). De plus, deux compositeurs ont proposé d'ajouter une bibliothèque par défaut, comprenant des trajectoires de base, comme des cercles des rectangles ou des spirales. Celles-ci pouvant servir de trajectoires initiales à éditer pour obtenir des choses plus complexes.

DC a expliqué apprécier voir les haut-parleurs sur l'interface graphique, mais souhaiterait pouvoir spécifier lui-même une configuration spécifique à la situation du concert. EP souhaite plus d'aide pour se repérer dans l'espace et propose d'utiliser

une représentation circulaire comme dans la visualisation du *Spat* présentée sur la figure 3.2. C'est un point qui reste à développer pour l'application TRAJECTOIRES. Un mode dans lequel on pourrait dessiner et/ou placer des éléments graphiques aiderait les utilisateurs à se repérer dans l'espace.

5 Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail de recherche était de concevoir des outils interactifs pour aider les compositeurs dans leur travail de spatialisation sonore. Pour ce faire, nous nous sommes centrés sur les dispositifs mobiles aujourd'hui très répandus, qui disposent d'une entrée tactile pour la captation de données gestuelles et autorise l'utilisateur à se déplacer dans l'espace.

Premièrement, pour mieux comprendre comment la spatialisation intervient dans le processus de création musicale des compositeurs, nous avons conduit des entretiens avec quatre compositeurs. Ensuite, nous avons développé une version simple de l'application mobile TRAJECTOIRES permettant la saisie de trajectoires de sources sonores via le dessin sur l'écran tactile. Cette première application nous a permis d'engager des collaboration avec trois compositeurs qui étaient en pleine réalisation de pièces électroacoustiques. Ces collaborations ont permis de développer itérativement TRAJECTOIRES, et de développer des outils pertinents pour les compositeurs.

Les résultats de nos recherches ont été positifs. En effet, d'une part, ils nous ont mené à la rédaction et à l'acceptation d'un article à IHM 2015, conférence francophone sur l'interaction Homme-Machine. D'autre part, l'application développée a déjà permis à plusieurs compositeurs de composer la spatialisation de pièces électroacoustiques mixtes, représentées dans la grande salle du Centre Pompidou :

- Daniel Cabanzo, *Hidden lines in Electrical dimensions*
- Emmanuele Palumbo, *Corps-sans-Organe*
- Michael Jarrell, *Dornröschen (Nachlese IVb)*

Concernant les perspectives de notre travail, des collaborations futures sont nécessaires pour évaluer et tester les nouvelles fonctionnalités de TRAJECTOIRES, notamment au niveau des outils d'édition. De plus, nous soutenons que des moyens permettant de contrôler d'autres paramètres liés à la spatialisation devraient être rajoutés, comme par exemple la directivité et l'ouverture des sources. Pour ce faire, il nous parait intéressant de mettre en place un système par enregistrement de couches successives afin d'offrir la possibilité de saisir des paramètres de façon séquentielle.

En outre, l'utilisation des capteurs de type accéléromètre et gyroscope a été envisagé. L'application permet d'utiliser l'orientation du dispositif pour le contrôle de l'orientation des sources. Néanmoins, ce contrôle se fait uniquement en temps réel, et les structures trajectoires n'incluent pas la possibilité d'enregistrer la variation d'un tel paramètre. Par ailleurs, il semble intéressant de pouvoir définir à des points particuliers d'une trajectoire, des valeurs d'autres paramètres comme l'orientation et l'ouverture des sources ou des caractéristiques de réverbération.

Enfin, les compositeurs ont montré un intérêt pour l'utilisation de "modèles physiques", permettant d'agir sur des sources en mouvement. Hors temps, il serait intéressant de pouvoir déposer des contraintes dans l'espace, en disposant par exemple des "points répulsifs", déformant ainsi les trajectoires des sources. En effet, ceci correspondrait à un moyen simple d'éviter des zones non optimales de positionnement des sources, comme par exemple l'intérieur du cercle unité du *Spat*, qui donne de mauvais rendus selon les compositeurs. De façon dynamique, il serait intéressant de

pouvoir communiquer des actions aux sources par des gestes. Ainsi, un “swipe” sur une source provoquerait son déplacement plus ou moins rapide dans une certaine direction.

En résumé, ce travail démontre l’intérêt de l’utilisation des dispositifs mobiles pour la saisie de trajectoires de source sonores et propose des pistes pour le contrôles d’autres paramètres liés à la spatialisation.

Bibliographie

[1] G. Assayag, C. Rueda, M. Laurson, C. Agon, and O. Delerue. Computer Assisted Composition at IRCAM : From PatchWork to OpenMusic. *Computer Music Journal*, 23(3), 1999.

[2] Marije AJ Baalman. Spatial composition techniques and sound spatialisation technologies. *Organised Sound*, 15(03) :209–218, 2010.

[3] F. Behrendt. From calling a cloud to finding the missing track : Artistic approaches to mobile music. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 2005.

[4] Augustinus J Berkhout, Diemer de Vries, and Peter Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(5) :2764–2778, 1993.

[5] R Boulanger. The csound book : Perspectives in software synthesis. *Sound Design*, 1999.

[6] Jean Bresson. Spatial Structures Programming for Music. In *Spatial Computing Workshop (colocated w. AAMAS'12)*, Valencia, Spain, 2012.

[7] Jean Bresson, Carlos Agon, and Gérard Assayag. OpenMusic : Visual Programming Environment for Music Composition, Analysis and Research. In *Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia*, pages 743–746. ACM, 2011.

[8] Jean Bresson, Carlos Agon, and Marlon Schumacher. Représentation des données de contrôle pour la spatialisation dans openmusic. *Actes de Journées d'Informatique Musicale (JIM'10)*, 2010.

[9] Benjamin Cabaud and Laurent Pottier. Le contrôle de la spatialisation multisources-nouvelles fonctionnalités dans holophon version 2.2. *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, 2002.

[10] Michel Chion and Guy Reibel. *Les musiques électroacoustiques*. 1976.

[11] Olivier Delerue. *Spatialisation du son et programmation par contraintes : le système MusicSpace*. PhD thesis, UNIVERSITÉ PARIS 6, 2004.

[12] Olivier Delerue and Olivier Warusfel. Mixage mobile. In *Proceedings of the 18th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, pages 75–82. ACM, 2006.

[13] Barry Eaglestone, Nigel Ford, Ralf Nuhn, Adrian Moore, and G Brown. Composition systems requirements for creativity : what research methodology. In *Proc. MOSART Workshop*, pages 7–16, 2001.

[14] Joshua Fineberg. Spectral music. *Contemporary Music Review*, 19(2) :1–5, 2000.

[15] J. Florens and C. Cadoz. The physical model : modeling and simulating the instrumental universe. In G. De Poli, A. Piccialli, and C. Roads, editors, *Representation of Musical Signals*. MIT Press, 1991.

[16] Jérémie Garcia, Jean Bresson, and Thibaut Carpentier. Towards interactive authoring tools for composing spatialization.

[17] Rudi Giot, Alexis Boilley, and Ludovic Laffineur. Logiciel d'aide à la configuration d'un système de spatialisation sur acousmonium.

[18] Annette Vande Gorne. L'interprétation spatiale. essai de formalisation méthodologique'. *Démeter*, 2002.

[19] Hilary Hutchinson, Wendy Mackay, Bo Westerlund, Benjamin B Bederson, Allison Druin, Catherine Plaisant, Michel Beaudouin-Lafon, Stéphane Conversy, Helen Evans, Heiko Hansen, et al. Technology probes : inspiring design for and with families. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 17–24. ACM, 2003.

[20] Jean-Marc Jot, Véronique Larcher, and Jean-Marie Pernaux. A comparative study of 3-d audio encoding and rendering techniques. In *Audio Engineering Society Conference : 16th International Conference : Spatial Sound Reproduction*. Audio Engineering Society, 1999.

[21] Jean-Marc Jot and Olivier Warusfel. Spat˜ : A spatial processor for musicians and sound engineers. In *CIARM : International Conference on Acoustics and Musical Research*, 1995.

[22] Gwendal Le Vaillant, Rudi Giot, and Rafael Muñoz Gomez. Interface Multimodale pour la Spatialisation de Musique Acousmatique. In *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, Montreal, Canada, 2015.

[23] Trond Lossius, Pascal Baltazar, and Théo de la Hogue. *DBAP–distance-based amplitude panning*. Ann Arbor, MI : MPublishing, University of Michigan Library, 2009.

[24] David G Malham. Approaches to spatialisation. *Organised sound*, 3(02) :167–177, 1998.

[25] David G Malham and Anthony Myatt. 3-d sound spatialization using ambisonic techniques. *Computer Music Journal*, pages 58–70, 1995.

[26] Mark T Marshall, Joseph Malloch, and Marcelo M Wanderley. Gesture control of sound spatialization for live musical performance. In *Gesture-Based Human-Computer Interaction and Simulation*, pages 227–238. Springer, 2009.

[27] Bertrand Merlier. À la conquête de l'espace. In *Journées d'Informatique Musicale*, number 148, pages D1–1, 1998.

[28] Donald A Norman and Stephen W Draper. User centered system design. *Hillsdale, NJ*, 1986.

[29] Gilbert Nouno and Carlos Agon. Contrôle de la spatialisation comme paramètre musical. *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, pages 115–119, 2002.

[30] Felipe Otondo. Creating Sonic Spaces : An Interview with Natasha Barrett. *Computer Music Journal*, 31(2) :10–19, 2007.

[31] Nils Peters, Sean Ferguson, and Stephen McAdams. Towards a spatial sound description interchange format (spatdif). *Canadian Acoustics*, 35(3) :64–65, 2007.

[32] Nils Peters, Georgios Marentakis, and Stephen McAdams. Current technologies and compositional practices for spatialization : A qualitative and quantitative analysis. *Computer Music Journal*, 35(1) :10–27, 2011.

[33] M. Puckette. Combining Event and Signal Processing in the Max Graphical Programming Environment. *Computer Music Journal*, 15(3), 1991.

[34] Ville Pulkki. Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(6) :456–466, 1997.

[35] Jean-Claude Risset. Ouvrir l'espace sonore : Max mathews, john chowning, holophon.

[36] Charles Roberts, Graham Wakefield, and Matthew Wright. The web browser as synthesizer and interface. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pages 313–318, 2013.

[37] Norbert Schnell, Sébastien Robaszkiewicz, Frederic Bevilacqua, and Diemo Schwarz. Collective sound checks – exploring intertwined sonic and social affordances of mobile web applications. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pages 685–690, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[38] Todor Todoroff, Caroline Traube, and Jean-Marc Ledent. Nextstep graphical interfaces to control sound processing and spatialization instruments. In *Proceedings : International Computer Music Conference 1997, Thessaloniki, Hellas, 25-30 september 1997*, pages 325–328. The International Computer Music Association, 1997.

[39] Julie Wagner, Stéphane Huot, and Wendy Mackay. Bitouch and bipad : designing bimanual interaction for hand-held tablets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 2317–2326. ACM, 2012.

[40] Frederic L Wightman and Doris J Kistler. Headphone simulation of free-field listening. i : Stimulus synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(2) :858–867, 1989.

[41] M. Wright. Open Sound Control : An Enabling Technology for Musical Networking. *Organised Sound*, 10(3) :193–200, 2005.

[42] Matthew Wright. Open sound control-a new protocol for communicationg with sound synthesizers. In *Proceedings of the 1997 International Computer Music Conference*, pages 101–104, 1997.