

# SOUND TRAJECTORY EN PRATIQUE LIVE

Maxence Mercier

Université Côte d'Azur, CTELA<sup>1</sup>, XR2C2<sup>2</sup>, France

maxence.mercier@univ-cotedazur.fr

## RÉSUMÉ

Depuis 2017, le logiciel *Sound Trajectory*<sup>3</sup> propose des outils visant à simplifier les processus de création sonore immersive. Sa modularité est adaptée au modelage et à l'articulation en temps réel des principaux éléments de la spatialisation sonore.

A l'occasion des JIM 2023, le code source de ce logiciel sera mis à disposition sous licence GPL<sup>4</sup> afin de permettre une utilisation de ses fonctionnalités dans l'environnement Max et garantir une certaine pérennité de ces concepts au-delà du programme original. Cet article présente le logiciel et trois cas pratiques de production scénique qui documenteront la publication du code source. Le premier cas décrit l'usage de l'échantillonneur de *Sound Trajectory* en combinaison avec un processeur audio externe. Le deuxième cas envisage la recréation virtuelle du *Cybernéphone*, un des premiers dispositifs de diffusion pour la musique électroacoustique. Le troisième cas expose l'utilisation live du logiciel lors d'une performance solo pour piano, synthétiseur et électronique. Cette étude bénéficie d'un soutien du programme ANR-15-IDEX-01 dans le cadre d'un contrat doctoral en création/recherche à l'université Côte d'Azur.

## 1. INTRODUCTION

L'espace a longtemps été considéré comme un cadre de la représentation musicale plus que comme un paramètre de jeu musical. Si d'un point de vue historique on retrouve des considérations pour la spatialisation sonore déjà dans les chœurs antiphonaires [1], l'essor des musiques électroacoustiques dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle ont rapidement tiré parti des innovations de l'électronique pour jouer par l'intermédiaire des haut-parleurs sur la localisation du son et la cinétique de son déplacement. Depuis, chercheurs et compositeurs ont proposé une grande diversité d'approches techniques et esthétiques. Avec la montée en puissance de l'informatique, tout créateur sonore a désormais accès à une offre abondante de solutions de spatialisation. Cependant des besoins de documentations, de formations et de vulgarisations sont nécessaires pour démocratiser réellement l'utilisation effective de la spatialisation sonore dans les productions artistiques. L'ouverture du code source de *Sound Trajectory* vise à approfondir un

travail de documentation des processus d'écriture spatiale qu'il permet. Ce logiciel s'articule autour d'un éditeur de trajectoires tridimensionnelles permettant de spatialiser tout type de source sonore, de créer des masses spatiales, de synthétiser des espaces acoustiques virtuels réalistes ou abstraits. La problématique de cet outil est d'offrir le maximum d'expressivité avec le minimum de gestes, paramètres et commandes. Il apporte des solutions face à la complexité empirique des processus de création sonore immersive en offrant une interface dédiée à une écriture de la spatialisation utilisable en studio, sur scène, lors de la conception d'installations et pour la scénographie sonore en réalité virtuelle.

La vulgarisation récente du mixage objet comme technique indépendante de la configuration des haut-parleurs permet de réaliser des compositions spatiales pour de nombreux domaines d'applications. Les outils tels que les *panners* intégrés au *DAW* sont généralement simples d'emploi et nécessitent des connaissances minimales [2]. Mais lorsque la composition spatiale exige une approche plus élaborée, les méthodes d'organisation de la production d'un projet manquent de références.

La gestion des nombreux paramètres dans les systèmes audio 3d exige des méthodes rigoureuses pour gérer efficacement l'intégralité de l'écriture des mouvements de spatialisation. De plus, chaque domaine d'application a ses propres besoins, qu'il s'agisse du cinéma, du théâtre, de performances musicales en direct ou encore d'installations sonores interactives. Ces contextes partagent de nombreux outils, mais nécessitent souvent des interfaces adaptées à des contrôleurs spécifiques. La recherche sur l'interaction entre ces contrôles et les tâches audio immersives est cruciale pour développer des méthodes intuitives et fiables de gestion de scènes sonores en 3d, qui seront de plus en plus courantes dans le futur [3].

Le choix des workflows de création influence directement l'esthétique et la perception d'une œuvre spatialisée [4]. L'approche semi-modulaire proposée au sein de *Sound Trajectory* permet d'établir des stratégies de composition et de mixage flexibles tout en offrant des possibilités d'interconnexion aux solutions de spatialisation existantes.

1 Centre Transdisciplinaire en Épistémologie de la Littérature et des Arts vivants : <https://ctel.univ-cotedazur.fr/>

2 Centre de référence IDEX en réalité étendue : <https://xr2c2.univ-cotedazur.fr>

3 *Sound Trajectory* : <https://www.tripinlab.com>

4 <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>

## 2. HISTORIQUE

Le projet *Sound Trajectory* (ST) s'inscrit dans la lignée du logiciel Holo-Edit<sup>5</sup>, il en prolonge les principes conceptualisés dès la fin des années 90 dans les travaux de Laurent Pottier [5]. Il partage également les objectifs du logiciel *Spat Gris*<sup>6</sup> du Groupe de recherche en immersion spatiale à Montréal piloté par Robert Normandeau, visant à faciliter l'accès à des outils d'écriture spatiale robustes, simples et efficaces à destination de compositeurs et créateurs sonores employant l'espace comme paramètre expressif d'écriture [6]. *Sound Trajectory* propose néanmoins des logiques différentes car la gestion du temps est opérée par un seul contrôle continu définissant la position d'une source sonore sur une trajectoire. Pour l'utilisateur, un seul paramètre exprimé en pourcentage discrétise la gestion des triplets de coordonnées polaires ou cartésiennes couramment employés pour positionner une source sonore dans un espace tridimensionnel.

En 2014, j'ai élaboré les fondations du dispositif du Synesthésium<sup>7</sup>, un dôme géodésique équipé de 24 haut-parleurs destiné à une diffusion ambisonique 3d. Ce dispositif de création et diffusion était destiné à accueillir le Cauchemar merveilleux<sup>8</sup>, une œuvre sonore composée par Léonore Mercier sur un recueil de poésies d'Arthur H [7]. Léonore Mercier avait besoin d'un outil lui permettant de s'approprier seule les possibilités de mixage dans un espace 3d sans que cela n'implique un apprentissage trop complexe. Sur la base des développements réalisés pour mon opéra multimédia *Iquisme* [8], utilisant les matrices et les objets visuels en OpenGL<sup>9</sup> de la bibliothèque Jitter<sup>10</sup>, j'ai conçu un éditeur visuel permettant de positionner sur des trajectoires les sources sonores d'un mixage 3d. Une fois qu'une trajectoire était dessinée dans l'espace, le seul paramètre à automatiser depuis un DAW était une variable exprimée en pourcentage définissant la position de la source sonore sur cette trajectoire. Le logiciel Iannix<sup>11</sup> aurait pu permettre cet usage, mais l'implémentation des traitements audio dans une même application était plus commode à la gestion du projet [9]. Une application standalone Max fut alors réalisée en intégrant la bibliothèque Spat de l'Ircam [10].

Cet outil permettait le mixage de la scène spatiale avec une écriture intuitive, "à l'oreille", dynamique et flexible. Avec le plug-in Tosca [11] chargé dans des bus Pro-Tools<sup>12</sup>, il était alors possible d'automatiser la position et les éventuels mouvements de la source sur la trajectoire. La compositrice a pu réaliser en trois semaines un répertoire de plus d'une heure de musique entièrement composé en mixage objet, avec des pièces comprenant près d'une centaine de pistes sonores. Tout le processus d'écriture et de diffusion a été assuré par le même outil.

Ce projet est documenté par plusieurs vidéos lors de présentations publiques couvrant la création du Cauchemar merveilleux.

Le logiciel *Sound Trajectory* fut ensuite commercialisé en janvier 2018, il est la synthèse des outils d'écriture développés pour le projet du *Synesthésium*.

*Sound Trajectory* est aujourd'hui utilisé par une communauté d'un millier de créateurs sonores de styles et d'horizons divers : musique, cinéma, installations, jeux vidéo.

Le logiciel s'articule autour d'un éditeur de trajectoires tridimensionnelles permettant de spatialiser toute source sonore, de créer des masses spatiales, de synthétiser des espaces acoustiques virtuels vraisemblables ou à l'inverse totalement abstraits.

Le moteur audio de *Sound Trajectory* utilise la bibliothèque ambisonique de l'ICST développée par Jan Schacher, et Philippe Kocher [12].

Les derniers développements du logiciel explorent les possibilités de mixage en temps-réel par le biais de son interface modulaire offrant des processus d'automation en interaction avec des suiveurs d'enveloppes, par intensités ou analyses de spectres ainsi que par des contrôleurs OSC [13] et MIDI.

Le logiciel propose des sessions dynamiques, chacune pouvant embarquer un nombre illimité de scènes, ces dernières servant à sauvegarder et rappeler tous les paramètres édités. Les protocoles MIDI et OSC sont intégrés en entrée et sortie afin de contrôler *Sound Trajectory* depuis un autre logiciel et permettre le contrôle d'autres solutions de spatialisation, logiciels (Spat Révolution<sup>13</sup>, Panoramix [14], Dolby Atmos Panner etc.) ou matériels comme HoloPhonix<sup>14</sup>, L-ISA<sup>15</sup> parmi les plus courants. Une suite de *devices* Max4Live pour Ableton Live<sup>16</sup> est également disponible avec une intégration plus poussée des capacités d'automation du système.

## 3. FONCTIONNALITÉS

L'objectif du logiciel est d'appréhender l'expressivité de la spatialisation avec le minimum de gestes. Sa modularité est adaptée au modelage et à l'articulation en temps réel des composantes de la synthèse spatiale pour tout type de dispositif.

Son interface permet de naviguer dans un espace 3d pour y dessiner des trajectoires. Les points de chaque trajectoire sont modifiables dans la visualisation 3d ou dans un tableau de valeurs exprimées en coordonnées cartésiennes ou polaires. Les trajectoires peuvent être transformées par différents procédés de rotation, changement d'échelle, translation, symétrie et inversion. L'éditeur offre différents modes de visualisation et angles

5 Holo-Edit : <https://gmem.org/holophon>

6 Spat Gris : <http://gris.musique.umontreal.ca/>

7 Le Synesthésium : <https://www.synesthesium.com>

8 Le cauchemar Merveilleux, reportage fondation Hermès, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=v1hIFdBnls0>

9 <https://www.opengl.org/>

10 <https://cycling74.com/products/jitter>

11 Iannix : <https://www.iannix.org/fr/>

12 Pro-Tools <https://www.avid.com/fr/pro-tools>

13 Spat Révolution : <https://www.flux.audio/project/spat-revolution/>

14 HoloPhonix : <https://holophonix.xyz/>

15 L-ISA : <https://l-isa.l-acoustics.com/>

16 Ableton Live : <https://www.ableton.com/fr/live/>

de vue activables depuis un bandeau d'icônes représentant les fonctions disponibles. La figure 1 présente l'éditeur d'espace sonore en point de vue libre, on distingue le chutier des différentes pistes et la courbe d'atténuation des sources par la distance.

Le logiciel gère jusqu'à 64 trajectoires, associées à des sources audio, mono comme multipistes. Les sources multipistes supportent elles-mêmes jusqu'à 16 canaux.

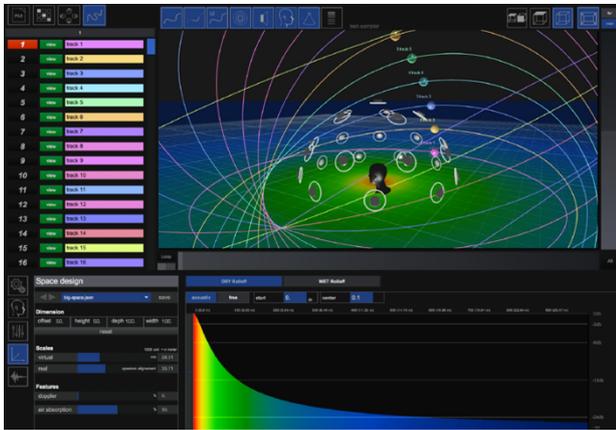


Figure 1 interface principale de Sound Trajectory

### 3.1. Écriture de trajectoire

Les trajectoires sont la fonctionnalité emblématique de *Sound Trajectory* et la majorité des autres fonctions du programme en sont dépendantes.

La trajectoire invite à faire se mouvoir les sons, mais elle peut se contenter de n'être qu'un guide voire simplement un repère visuel. Elle est représentée sous la forme d'un trait, l'élément le plus simple après le point, essentiel au dessin, à la notation et l'écriture. Au sein de *Sound Trajectory*, la trajectoire est un support d'écriture et repère de déploiement du son dans l'espace. La trajectoire est une virtualité reproductible et appréhendable indépendamment des contraintes imposées par les dispositifs de diffusion. Ainsi, elle peut traverser les époques en bénéficiant des avancées technologiques liées aux questions d'algorithmes d'encodage et de décodage des sources sonores.

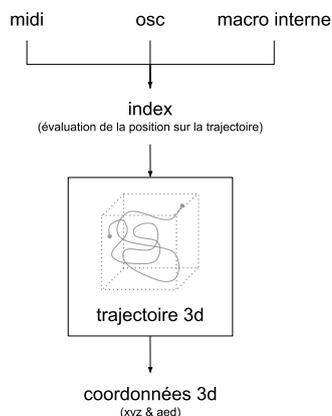


Figure 2 Évaluations des coordonnées d'une trajectoire

Les facteurs influençant la perception du son en mouvement sont nombreux, la représentation simplifiée d'une trajectoire invite à expérimenter les modalités d'expression du son dans l'espace. Ce potentiel ne se heurte pas à des limites techniques.

### 3.2. Space designer

Le module *Space designer* définit les paramètres de réverbération et d'amplitude par rapport à l'auditeur (*listener*). Le module représente les dimensions et les propriétés acoustiques de la scène virtuelle.

#### 3.2.1. Doppler & atténuation du son par la distance

La gestion de l'effet *doppler* et de l'atténuation du son par la distance, couplés à la réverbération, permettent de jouer sur les rapports physiques de l'environnement virtuel. Au bas de la figure 1, on visualise la courbe d'atténuation du volume par la distance calculée entre le *listener* et la source. Elle est paramétrable suivant des caractéristiques acoustiques vraisemblables ou abstraites. Cet outil est particulièrement utile pour contrôler les sensations d'enveloppement du son par rapport à la gestion du point chaud de l'environnement (*sweet spot*). En dehors des conventions acoustiques, ce paramètre a un fort pouvoir créatif pour simuler la propagation du son dans des environnements non aériens : solide, liquide ou gazeux.

#### 3.2.2. Réverbération

La réverbération à convolution de ST est basée sur l'algorithme *convolve~* de la bibliothèque *HISSTool* [15], Le logiciel est livré avec une collection d'une quarantaine d'impulsions et l'utilisateur peut charger ses propres impulsions. La réverbération est calculée sur un bus auxiliaire. Le traitement est appliqué sur un encodage HOA décodé en double octophonie (une couronne pour le haut et une autre pour le bas) puis recodé en HOA.

### 3.3. Échantillonneur

L'échantillonneur permet de déclencher la lecture de sons sur des trajectoires avec une précision proche de l'échantillon audio. Il résout les problématiques de latence d'un système OSC dans le cadre d'interaction rapide en temps-réel.

### 3.4. Motion Listener

Il s'agit d'un principe élémentaire utilisé dans les moteurs audio 3d de jeux vidéo permettant de déplacer la position d'écoute virtuelle. Cette fonctionnalité calcule la position de toutes les sources sonores par rapport à la position du *listener*. C'est une des premières fonctions implémentées dans *Sound Trajectory*. Les options de visualisation permettent d'adapter la vue 3d à la manière de la vue subjective des jeux vidéo. Ses coordonnées sont modifiables manuellement ou définies par une trajectoire.

Le module est entièrement accessible par OSC et peut donc être contrôlé par des capteurs de *headtracking*.

### 3.5. Mapping interactif

Cette page est destinée à la programmation semi-modulaire d'interactions pouvant contrôler les principales fonctions du logiciel. La variété des modules à base de descripteurs audio, MIDI et OSC ouvre la perspective de scénarios interactifs entièrement dynamiques et relativement simples d'usage. Des triggers et des contrôles continus sont à affecter à une action (séquenceur, boucle, compteur et autres fonctions), elle-même affectée à un paramètre spatial de trajectoires, de sources ou du *listener*.

Les modules *Analyser* et *Events* se combinent pour explorer de multiples couples d'interactions spatiales. Les modules d'analyse produisent des signaux sous forme d'impulsion ou de continuum. Le signal d'impulsion déclenche une action. Il est activé par le franchissement d'un seuil d'amplitude audio, une note, un contrôleur MIDI ou un événement OSC.

La description de chaque module dépasse le cadre de cet article, mais quelques possibilités peuvent être évoquées comme : les modules de marche aléatoire qui vont contraindre une source à bouger sur une trajectoire ; le module de morphing entre deux modèles de trajectoire ; une collection de différents types de séquenceurs activés selon des conditions logiques ; quelques opérateurs permettant de boucler le système sur lui-même pour des processus auto-générateurs par rétroactions.

### 3.6. Type de pistes audio

Différents types de pistes audio sont disponibles pour couvrir des fonctions particulières.

Les modèles *Ambisonic mix* et *Dbap mix* sont dédiés au mixage d'entrées audio acceptant une à seize sources sonores. L'ordre HOA est défini par le réglage de la session. L'algorithme DBAP est quant à lui dépendant de la configuration des haut-parleurs [16].

Le modèle *Ambisonics HOA input* permet de mixer une piste au format Ambix du 1er au 11e ordre.

Le modèle *direct output* est destiné à la conception de consoles pour l'interprétation des musiques électroacoustiques. Des fonctionnalités de pitchshift, délais et filtrages sont implémentées en suivant les paradigmes du Gmebaphone conceptualisé par Christian Clozier pour créer des registres de voix de diffusion différenciés par bande de fréquences, phases et transpositions de quelques commas.

### 3.7. Multi-délai

Le multi-délai offre une palette de traitements sonores qui ont été par ailleurs largement étudiés au travers des applications de la bibliothèque Hoa<sup>17</sup> du CICM [17]. Leur

expressivité est documentée au travers d'une abondante littérature de Kendall [18], Vaggione [19], Sèdes [20] à Goutmann [21] formalisant les possibilités de la décorrélation microtemporelle ou bien encore la modulation spatiale en anneau. Le multi-délai vise les mêmes objectifs par le biais d'une interface et d'un fonctionnement adapté au sein du logiciel *Sound Trajectory*.

Ce traitement permet des variations drastiques des champs sonores en modelant de manière souple les morphologies de distribution du son dans l'espace. L'interface du traitement expose les paramètres essentiels du contrôle d'un espace paramétrique plus vaste. Les paramètres accessibles à l'utilisateur sont optimisés pour accéder rapidement à une palette de textures spatiales adaptées à la composition en situation multicanal avec une grande variété d'anamorphoses temporelles et spectrales possibles.

La polyphonie des voix du multi-délai permet d'obtenir des effets classiques comme les retards multiples ou les échos, la réverbération et le déphasage, ou des effets de filtrage complexes lorsque les retards sont très proches les uns des autres. Les sources peuvent être déplacées le long d'une trajectoire de référence de manière reproductible.

Le feedback, paramètre de réinjection du son retardé à l'entrée de la ligne à retard, associé à un harmonisateur, permet de créer des transpositions continues du signal. Pour un signal non transposé, le feedback est un paramètre intéressant pour générer un signal complexe proche des réflexions d'un algorithme de réverbération.

Le multi-délai combine au sein de son interface, le contrôle des lignes de retard, la transposition, la prolifération par boucle de feedback et un contrôle de la distribution spatiale polyphonique. Chaque voix de retard est contrôlée indépendamment. Les paramètres variables sont : le temps de retard, le volume, la rétroaction (volume de réinjection) et la hauteur de transposition. Un filtre appliqué à la boucle de feedback peut colorer et atténuer le signal réinjecté à chaque itération dans la bande de fréquence filtrée.

### 3.8. Vidéo

Pour les projets audiovisuels, un lecteur et un écran virtuel intégrés dans l'environnement 3d du logiciel permettent de visualiser une source vidéo au format standard ou immersif. Elle peut être synchronisée via MTC (Midi Time Control) et provenir de sources externes.

### 3.9. Moteur audio

*Sound Trajectory* gère un nombre illimité d'enceintes. Un éditeur de positionnement des haut-parleurs permet de disposer chaque enceinte dans l'espace réel de diffusion. Toutes les compensations de volume et de temps de délais sont automatiquement calculées pour

---

17 HoaLibrary : <http://hoalibrary.mshparisnord.fr/>

optimiser la réponse du système et limiter les problèmes de phases. Il est ainsi possible d'adapter le type de mixage aux configurations de diffusion sonore : sphère ambisonique, full dome, planétarium, salle de concert, théâtre, studio, auditorium, cinéma, etc. Le moteur de rendu audio possède deux bus de sorties. Le premier est conforme au dispositif défini dans l'éditeur de configuration des haut-parleurs. Le second est configurable au format ambiX du 1er au 11e ordre suivant les spécifications de l'utilisateur.

### 3.10. Workflows

Un routage précis des signaux audio et de contrôle OSC ou MIDI sont un préalable à tout projet d'écriture de la spatialisation. La figure 3 montre un workflow simple où le DAW envoie les sources à spatialiser dans *Sound Trajectory*. Le son spatialisé est envoyé dans le système de diffusion par les sorties physiques de la carte son. Le son peut retourner au DAW pour être enregistré depuis les sorties principales ou le bus ambiX.

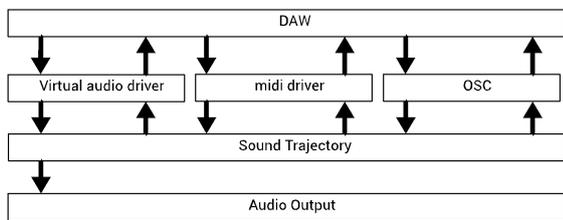


Figure 3 Workflow avec un séquenceur

### 3.11. Contrôle de moteur audio externe

Le moteur audio de *Sound Trajectory* peut être désactivé si l'utilisateur souhaite utiliser un processeur audio externe. Dans ce cas, seule l'automation des paramètres OSC est assurée par le logiciel ST. Le logiciel a été conçu dès son origine pour se situer à l'interface des solutions utilisées pour le studio, la scène et les besoins d'installations non standards. La figure 4 illustre le diagramme d'un workflow avec un séquenceur et un processeur audio externe.

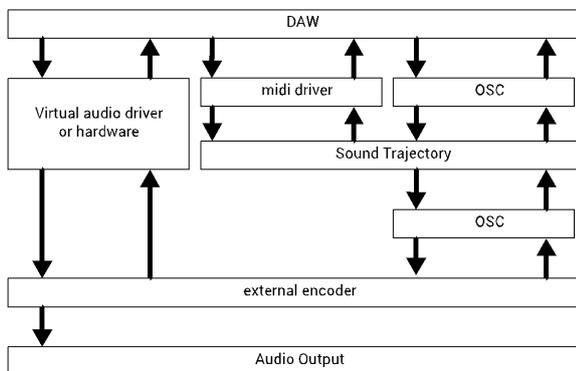


Figure 4 Workflow avec un séquenceur et un processeur audio externe

Après la présentation du logiciel, cet article expose trois cas pratiques où les héritages du passé se télescopent avec les dernières innovations en matière de mixage et de performance sur dispositif immersif virtuel ou réel.

## 4. CAS PRATIQUE N°1 : LA VIE

Sorti en février 2023, l'album *La Vie* d'Arthur H et Léonore Mercier a donné lieu à une série de concerts spatialisés à Radio France lors de l'HyperWeek Festival du 19 au 22 janvier 2023. En collaboration avec le département innovation de la Maison de la Radio et de la Musique, un nouveau dispositif utilisant le code source de *Sound Trajectory* fut réalisé pour permettre à Léonore Mercier d'interpréter en direct une partie de la spatialisation du projet musical.

### 4.1. Dispositif

Cette adaptation consistait à utiliser le moteur de trajectoire et l'échantillonneur de *Sound Trajectory* pour alimenter un processeur L-ISA de L-Acoustics. Le processeur recevait les voies de polyphonies de l'échantillonneur de *Sound Trajectory* avec les informations OSC de spatialisation associées, rafraîchies toutes les 8 ms en moyenne (120Hz).

La performance live consistait à repenser l'album de manière immersive, où le public est considéré comme un personnage de la narration.

L'album a été préalablement remixé au format 12.0 par Hervé Déjardin et Léonore Mercier depuis les sessions de studio originales. Toute la matière des arrangements fut réorchestrée spatialement pour être redéployée en concert sur une couronne de 12 points de diffusion assurée par un des trios d'enceintes Syva produits par L-Acoustics. L'encodage des signaux de diffusion en VBAP [22] était réalisé en temps réel par un processeur L-ISA par lequel convergeait toutes les sources sonores : micro voix, échantillonneur, bande-son multipistes. La figure 5 présente le routage audio et OSC du dispositif performatif.

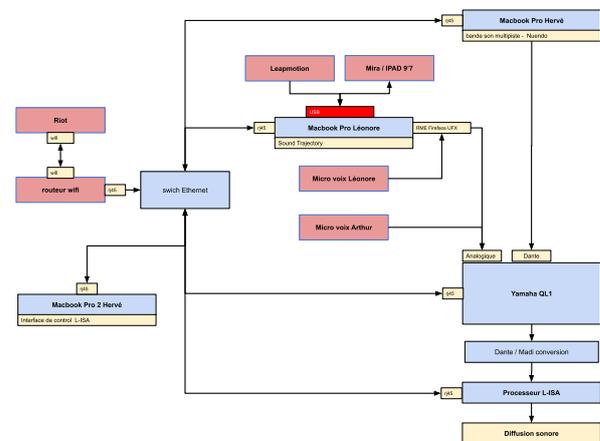


Figure 5 Routage audio et OSC du dispositif performatif

Léonore Mercier réinterprète les sons de l'album qu'elle a soustrait au mixage et spatialise la voix d'Arthur Higelin. Hervé Dujardin est à leur côté sur la scène, pour veiller à la spatialisation du mixage. La scène est placée au centre de la salle de concert. Les pistes de l'album sont lues depuis une station Nuendo<sup>18</sup>.

## 4.2. Les Capteurs

Le dispositif performatif de Léonore emploie des contrôleurs directement connectés à *Sound Trajectory*. Il s'agit de contrôles gestuels gyroscopiques et optiques permettant une grande liberté de geste.

### 4.2.1. Capteur Riot

Le *Riot*<sup>19</sup> développé par Emmanuel Fletty pour l'Ircam, fournit à haute résolution des données 3d de mouvement. Il embarque plusieurs capteurs intégrés au sein d'une même puce électronique : gyroscopes, accéléromètres, magnétomètres. Léger et sans fil, il est adapté pour s'épingler sur un costume, se glisser dans un bracelet, etc. La version de Léonore renferme le capteur dans un boîtier pour être tenu facilement en main comme une petite télécommande.

Le *Riot* est connecté en WIFI et transmet des données par protocole OSC. Les données de mouvement sont traitées directement au sein de Max avec l'aide de la bibliothèque Mubu [23].

### 4.2.2. Le Leapmotion

Le *Leapmotion*<sup>20</sup> est une caméra infrarouge stéréo détectant la position des mains en 3 dimensions dans le champ visuel de la caméra. La caméra est échantillonnée à 120 hertz avec une latence très faible, permettant un contrôle gestuel fin et précis. L'objet permettant d'utiliser le *Leapmotion* dans Max a été développé par Jules François lorsqu'il était doctorant au sein de l'équipe de l'Ircam "Interaction son musique mouvement" qui produit la bibliothèque Mubu [24].

## 4.3. Les modes de jeux de l'échantillonneur

Une interface pour Mira<sup>21</sup> sur iPad représentée en figure 6, permet de piloter le comportement de l'échantillonneur en déclenchant la lecture des sons selon 3 modes de jeux :

### 4.3.1. Échantillonneur en mode Tracks

Le premier mode « tracks » joue les sons de l'échantillonneur déclenchés depuis les pads de l'interface Mira. Les sons sont spatialisés en suivant une trajectoire définie dans l'écran de visualisation 3d de *Sound Trajectory*. La particularité de l'échantillonneur de *Sound Trajectory* est de pouvoir lire les échantillons en les spatialisant sur des trajectoires. La position du son sur

la trajectoire est automatiquement définie selon la position de la tête de lecture de l'échantillon.

### 4.3.2. Échantillonneur en mode Leap

Le deuxième est déclenché également par les pads de l'interface Mira, mais la spatialisation est assurée par la position de la paume de la main au-dessus du capteur *Leapmotion*. Cette position est retranscrite en données AED (azimut, élévation, distance) envoyées au processeur audio par message OSC.

### 4.3.3. Échantillonneur en mode Riot

Le troisième mode est déclenché et contrôlé par le mouvement du Riot. Les sons à jouer sont alors sélectionnés sur l'interface Mira, puis lorsqu'un changement brusque est détecté sur l'accéléromètre du *Riot*, le programme déclenche l'échantillon à jouer. Les boussoles et gyroscopes permettent de spatialiser en temps réel la position des échantillons dans l'espace.

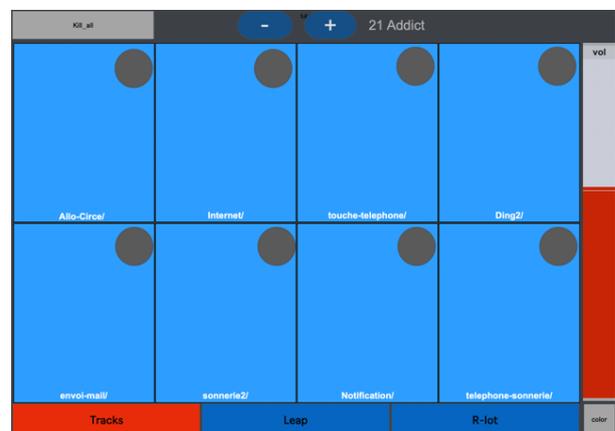


Figure 6 Interface de sélection des échantillons et modes de déclenchements

## 4.4. Dispositif de diffusion

Le format 12.0 est apprécié par Hervé Déjardin pour sa capacité à reproduire entre chaque enceinte un multiple de la distance angulaire idéale pour une paire d'enceintes stéréo, si bien que les images fantômes en sont amoindries, à défaut de ne pas posséder de canaux d'élévation.

Malgré les multiples entrées permises par le processeur L-ISA, la configuration de la performance ne permettait d'allouer que 6 objets L-ISA à l'échantillonneur de *Sound Trajectory*. Les capacités polyphoniques de cet échantillonneur ont néanmoins permis de jouer dans l'espace une multitude de sons de manière dynamique. La seule limite était de restreindre la polyphonie de l'échantillonneur à 6 voix simultanées. Les signaux audios étaient acheminés en analogique depuis une carte son RME Fireface vers une console

<sup>18</sup> <https://www.steinberg.net/nuendo/>

<sup>19</sup> RIOT par Emmanuel Fletty : <https://ismm.ircam.fr/riot/>

<sup>20</sup> Leapmotion : <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

<sup>21</sup> Mira : <https://cycling74.com/products/mira>

Yamaha QL1. Les signaux OSC de spatialisation étaient quant à eux interprétés par le processeur L-ISA. La configuration était ainsi la plus simple possible au regard des exigences techniques.

#### 4.5. Contraintes & logiques

Si la production est expérimentale et que les premières représentations exigent la présence de développeurs, ingénieurs ou RIM, il est impératif que ceux-ci disposent, sur le plateau scénique, d'une plage de temps incompressible et respectée, dans un calme relatif et sans sollicitation extérieure.

Même si les systèmes sont parfaitement fonctionnels, ils peuvent s'avérer complexes à être initialisés pour la scène. Dans notre cas, les tâches étaient simples, mais imposaient aux personnes en charge de pouvoir être bien concentrées. Moi-même et Emmanuel Fletty, le concepteur des *Riot*, avions à calibrer les différents capteurs vis-à-vis de l'orientation de la scène avec le dispositif de diffusion sonore. Les programmes utilisant les capteurs nécessitent un point de référence pour différencier le devant du derrière, le côté droit du gauche, le haut du bas. Le *Leapmotion* se base sur ce que ses caméras capturent, un offset azimutal suffit à caler le dispositif. Les *Riots* quant à eux se réfèrent au magnétisme terrestre et il leur faut donc compenser leurs réponses selon l'orientation magnétique de la scène. Face à un problème mineur de conversion de valeur (-360. 360 à 0. et 1.) exigé par le processeur L-ISA, nous avons dû attendre la pause déjeuner de toute l'équipe pour résoudre en cinq minutes au calme, nos problèmes de quadrant polaire, inversant la linéarité des coordonnées suivant les axes polaires nord/sud.

#### 4.6. Intérêt visuel

Le public apprécie généralement le rapport synesthésique d'une gestuelle bien visible contrôlant la spatialisation sonore. Le lien de causalité offre une lecture évidente des intentions d'interprétation spatiale de l'artiste. Les capteurs WIFI lui permettent de se déplacer sur scène sans être attachée à un écran. Le *Leapmotion* autorise des mouvements lents et doux extrêmement précis. Alors que l'essentiel de la musique était fixé sur les bandes, Léonore pouvait exploiter les systèmes de diffusion dans un rapport d'interprétation en adaptant son jeu de manière organique, c'est-à-dire avec la réponse acoustique de la salle, la réception du public et la réaction de son partenaire. Ce même dispositif avait été préalablement utilisé en 2016 pour le spectacle *Le cauchemar merveilleux* de Léonore Mercier et Arthur H.

Bien que le Thérémine ait plus d'un siècle d'existence, les modes de jeux électroniques dans l'éther suscitent toujours l'intérêt et la curiosité du public, étonné par l'efficacité des gestes.

## 5. CAS PRATIQUE N°2 : CYBERNEPHONE X

Le *Gmebaphone* est le premier instrument dédié à l'interprétation/diffusion en concert des musiques électroacoustiques. Conçu par Christian Clozier, l'instrument fut inauguré le 13 juin 1973 pour les concerts du festival Synthèse à Bourges. François Bayle présent au concert inaugural présentera huit mois plus tard l'Acousmonium [25, 26 & 27].

Ma collaboration avec Christian Clozier vise à réaliser une nouvelle version open source du *Cybernéphone* utilisable sur dispositif réel et en réalité virtuelle. Il permettra de reproduire les concepts du projet initial avec ses traitements sonores et ses logiques matricielles de distribution des canaux de diffusion.

Natasha Barret avec le Virtualmonium tout comme Christine Webster et al. ont chacun démontré leur intérêt pour virtualiser un dispositif de haut-parleurs, à la fois pour l'étude de l'interprétation en concert, la recherche et la création de nouvelles œuvres également au sein d'environnement virtuel [28 & 29]. Dans la même démarche, la virtualisation du *Cybernéphone* permettra de remettre à l'étude les particularités de ce dispositif précurseur, avec notamment les filtrages opérés sur les groupes de haut-parleurs ainsi que les interfaces de commandes tactiles et visuelles dédiées à l'interprétation.

### 5.1. Présentation du Gmebaphone

Les concepts musicaux qui définissent l'instrument dès ses débuts proposaient une approche de mise en relief musical et sonore par un contrôle des timbres, du temps et de l'espace. Les modalités d'interprétation permettaient d'exprimer dans la salle de concert, les potentialités expressives d'œuvres électroacoustiques distribuées sur des réseaux de haut-parleurs discrétisés. En 36 ans d'activité, les versions successives du processeur audio et de son pupitre de commande ont évolué de circuits analogiques à un système entièrement numérique. Rebaptisé *Cybernéphone* à la fin des années 90, ce dernier tirait parti de la toute récente couche MSP de Max [30].

C'est un instrument constitué d'un ensemble hiérarchisé de systèmes, accès et opérateurs, doté de mémoires, séquenceurs d'automatisation, de règles et modes de jeux combinatoires fondant une rhétorique expressive de l'interprétation électroacoustique.

Depuis 1973, le dispositif connaîtra 9 développements techniques et théoriques importants au fil de 7 versions instrumentales réalisées. Certaines consoles sont visibles à la BNF et au musée de la Musique de la Philharmonie de Paris.

### 5.2. Fondamentaux organologiques :

Le principe initial de l'instrument est de diviser les timbres des voix stéréophoniques en 6 registres de fréquences, répartis en bande d'octaves, de l'extrême grave à l'extrême aigu. Ces bandes de fréquence sont ensuite distribuées aux haut-parleurs adéquats répartis et

orientés dans l'espace du concert. Selon son concepteur, le projet consistait en quelque sorte à dé-mixer les polyphonies sonores réalisées en studio.

Le *Cybernéphone* repose sur la superposition de plusieurs réseaux de haut-parleurs illustrés en figure 7, les uns filtrés par bande de fréquences, les autres pleine bande utilisés comme référence conventionnelle.

### 5.2.1. Les V

Les réseaux dénommés « V » sont filtrés. Ils opèrent une mise en perspective déterminée par le timbre des éléments sonores. La distribution spatiale et spectrale répartit les voix d'un signal stéréo sur 6 registres fréquentiels : d'extrêmes graves aux suraigus.

Le signal stéréo en entrée se subdivise en une multitude de « points virtuels » qui créent de la densité et de la présence. Cette répartition permet des couplages stéréophoniques artificiels entre chaque haut-parleur et espace de timbre. Elle permet également de créer des diagonales entre les haut-parleurs de spectre voisin. À cela s'ajoutait l'illusion psychoacoustique de distance propre aux graves et de proximité propre aux aigus.

### 5.2.2. Les références

Les réseaux « références » sont des couples large bande, diffusant l'intégralité du spectre sans filtrage, mais dotés de possibilités de réverbération, de délai et de transposition. Ces couples de haut-parleurs non traités permettent d'édifier une mise en espace conventionnelle, à partir d'une pièce stéréo, multipiste ou des musiques mixtes avec instrumentiste. En complément aux réseaux de haut-parleurs filtrés, les haut-parleurs pleine bande étaient disposés en position octophonique permettant des plans classiques mettant en valeur par opposition les effets de relief et profondeur générés par les V.

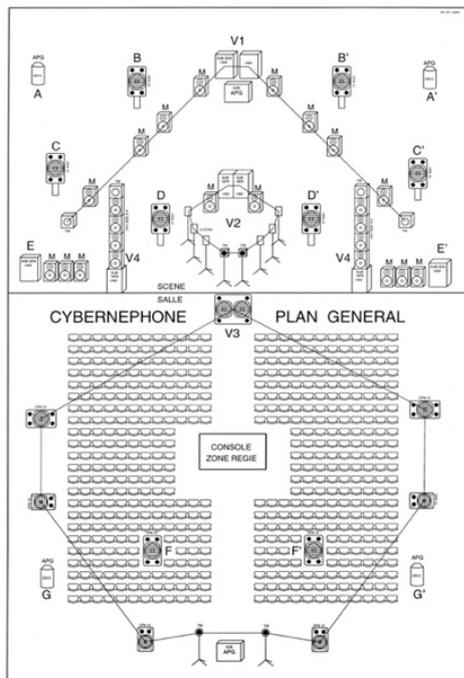


Figure 7 Dispositifs scéniques du *Cybernéphone* en 1999

## 5.3. Virtualisation

Ces travaux visent à réactiver des stratégies de spatialisation efficaces qui répondent encore aux problématiques esthétiques de la spatialisation pour les nouveaux supports de diffusion immersifs.

Les solutions de virtualisation offrent une alternative aux problématiques d'accès au dispositif de spatialisation sonore qu'il soit en studio ou sur scène. L'accès à ce type de dispositif n'est bien souvent possible que très peu de temps avant le concert pour une courte répétition ne permettant pas d'appréhender sereinement les capacités expressives des dispositifs de diffusion. Ces simulations sont donc utiles pour renforcer la pratique de l'interprétation électroacoustique et contribuer dans une plus large mesure aux connaissances pratiques que l'on retrouvera au-delà de son cadre initial (cinéma, théâtre, installation).

## 5.4. Techniques

La majorité des traitements et fonctionnalités de matricage nécessaire pour reproduire un *Cybernéphone* préexiste dans *Sound Trajectory*. Recréer cet instrument sous forme virtuelle consiste à dessiner de nouvelles interfaces fonctionnelles et ergonomiques respectant les concepts originaux du dispositif. D'autre part la navigation à 6 degrés de liberté (6dof) couplée à la modélisation de la radiation spectrale des enceintes offrira une navigation dans l'espace de la salle de concert virtualisé [31]. La sortie audio pourra être rendue vers tout type de dispositif de l'écoute binaurale au Dôme ambisonique en passant par des dispositifs non conventionnels. De plus le logiciel inclut des sorties au format standardisé : stéréo, 5.1, 7.1.4 et octophonique, permettant l'usage du logiciel non seulement comme un outil d'interprétation, mais également comme outil de mixage multi-sortie.

## 5.5. Perspectives

Ce projet est envisagé dans le cadre de concerts réels et dans des ateliers pédagogiques de la Cité de la Musique qui présente dans sa collection la console de diffusion de la deuxième version du *Gmebaphone* (1975).

La réalisation de ce dispositif sera finalisée au troisième trimestre 2023. Il sera utilisé dans le cadre de concerts et d'ateliers d'interprétation et de découverte de la musique électroacoustique sous une forme logicielle. Il accompagnera la documentation du code source de *Sound Trajectory* et sera distribué gratuitement sous forme logicielle.

Les singularités du *Cybernéphone* pourront ainsi être comparées au projet de virtualisation des acousmoniums existants. Ces efforts de reproduction se complètent pour offrir une approche élargie de la mise en espace des plans sonores ainsi qu'une meilleure compréhension des processus créatifs que ces solutions ont offert à la diffusion de la musique électroacoustique.

## 6. CAS PRATIQUE N°3 : SOLO POUR PIANO, SYNTHÈSE ET DISPOSITIF IMMERSIF

J'utilise *Sound Trajectory* sur scène pour spatialiser mes instruments et leurs traitements sonores. Ma performance s'articule autour d'un piano Yamaha CP70B, celui-ci est muni de micros piezo sous chaque corde, qui permettent d'amplifier l'instrument aussi simplement qu'une guitare électrique. Le piano est accompagné par deux synthétiseurs polyphoniques analogiques MIDI. La figure 8 présente la disposition des instruments.

Les différents modules de *Sound Trajectory* s'articulent de manière organique avec mon instrumentation électronique. De nombreux processus génératifs et automatiques sont ainsi couplés avec les fonctionnalités de ST pour assurer un mixage semi-supervisé lors d'interprétations et d'improvisations sur différents claviers et interfaces gestuelles (Contrôleur MIDI, capteur vidéo *Leapmotion*). Les traitements sonores sont spatialisés individuellement comme sources sonores à part entière.

Au sein du même environnement (Max), les processus de feedback adaptés à la spatialisation, par contrôle paramétrique ou signal audio, permettent de sublimer l'étendue des propriétés sonores des traitements. (granulation, échantillonneurs, gel, SuperVP scrub [32], multi-délais, time lag accumulator<sup>22</sup>, reverse, harmoniser, modulation, distorsion, délais, réverbération.)

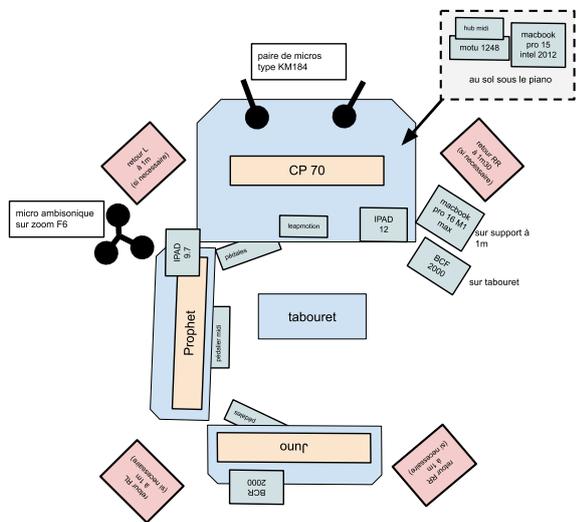


Figure 8 Dispositif instrumental

### 6.1. Matriçage

La réelle difficulté d'un mixage objet réside dans la capacité à gérer une multitude de sources sonores en mouvement. Lorsque celles-ci sont placées à des positions fixes, on tire tout de même partie des capacités

des moteurs de rendu audio 3d en employant des approches traditionnelles de panoramisation et de distribution multicanal. C'est ainsi qu'il est plus commode et rapide d'utiliser des bus multipistes plus ou moins standardisés qui permettront de poser dans l'espace virtuel d'un mixage objet, un espace préconçu (au format stéréo, quadri, 5.1 7.1, octophonique, 7.1.4.) Ces espaces préconçus pourront être re-interprétés en les redisant dans l'espace. Bien que limités, ils offrent des possibilités d'édérations simples dans les DAW professionnelles comme Pro-Tools et Nuendo.

### 6.2. Les sources statiques

La figure 9 expose les affectations communes de canaux entre les logiciels Max, Live et Nuendo alimentant *Sound Trajectory* avec des bus octophoniques. La définition spatiale est faible, mais le recours à ce format permet de lire facilement, depuis différents environnements, du matériel sonore possédant un espace interne pré-spatialisé. Suivant la capacité des logiciels, d'autres formats peuvent être acheminés directement à *Sound Trajectory* comme un mix complet en 7.1.4. Du côté de ST, tous les outils sont disponibles pour réinterpréter ces formats de manière à pouvoir les adapter à tout autre format de diffusion. Même si ces standards ne sont pas optimaux, ils ont le grand avantage d'être disponibles dans les studios dolby Atmos avec les outils d'édition adéquats.

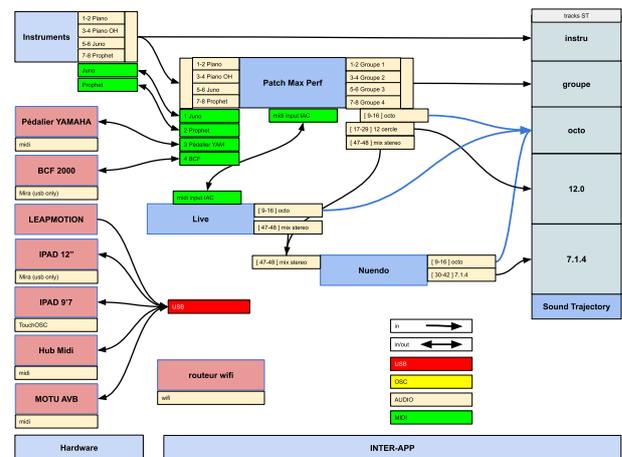


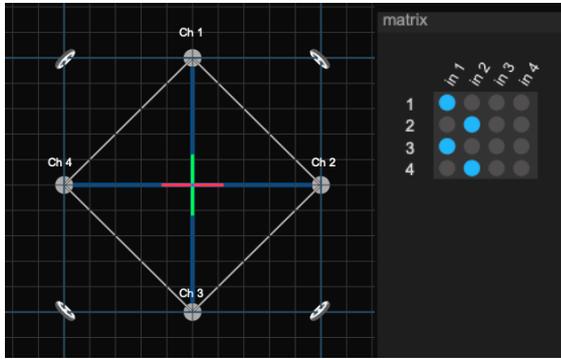
Figure 9 Routages des canaux audio, MIDI et OSC

### 6.3. Les Sources dynamiques

De manière générale, toutes les autres sources sont susceptibles d'être animées dans l'espace. S'il ne s'agit pas de déplacement azimutal ou d'élévation, cela pourra être la multiplication d'une même source sonore à des points différents, ce qui lui donnera de la présence, accentuera la sensation de largeur ou au contraire aplatira tout relief selon les proportions utilisées. Pour cela chaque piste de *Sound Trajectory* peut être configurée

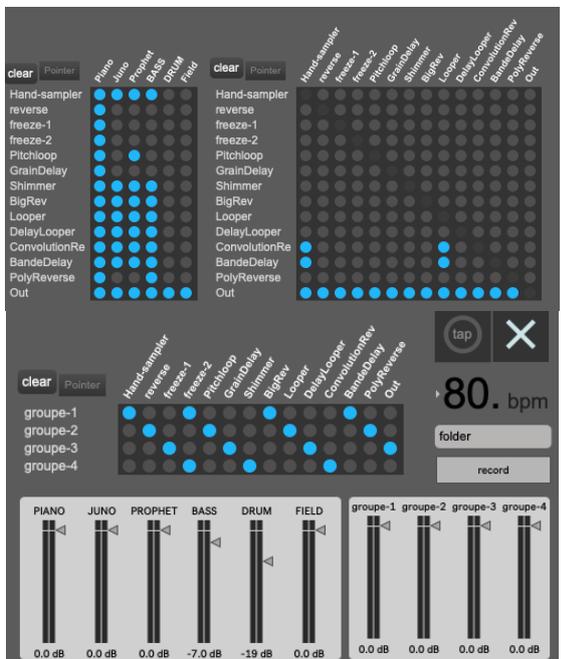
<sup>22</sup> Time lag accumulator : <https://musicstudios.calarts.edu/max-msp/time-lag-accumulator/>

d'une à seize sources sonores. Des doublons de pistes peuvent être créés et activés suivant la conduite du projet. La figure 10 montre un exemple typique d'entrée stéréo étendue au format quadripophonique, ainsi la sensation de présence de la source réelle sera bien plus prononcée, car démultipliée sur deux canaux supplémentaires. En inversant les canaux avant et arrière, le croisement des voix éclate très simplement une stéréo dans l'espace.



**Figure 10** Extrapolation quadripophonique d'une piste à partir d'un signal stéréo

Dans cette logique je groupe mes différents effets afin de limiter le nombre de sources sonores réelles à spatialiser. La figure 11 illustre les matrices d'affectations des différents groupes d'effets. La matrice à droite détermine les affectations directes, la matrice du milieu, les interconnexions internes au patch et la matrice du bas gère les envois vers les groupes auxiliaires. Différents réseaux d'effets peuvent ainsi être associés librement à différents groupes d'effets.



**Figure 11** Matrices d'affectations des effets audio du patch Max

Dans une œuvre en direct, les dynamiques spatiales opérées par l'interprète ou le performeur font face à

plusieurs obstacles : complexité technique et temps de préparation entre autres. Il y a une tendance naturelle à user de stéréotypes par facilité : rotation systématique des sources autour du public, déplacement aléatoire extravagant ou répétition des figures spatiales n'en sont que quelques exemples. Ils enrichissent le lexique expressif de la spatialisation sonore mais les gestes d'interprétation liés à la spatialisation peuvent néanmoins être variés sans avoir recours à une virtuosité sophistiquée. La figure 12 présente par exemple des effets activés manuellement de manière momentanée, ils participent à étendre l'instrumentarium avec des typologies sonores dédiées à la spatialisation sonore.

Dès 1971, John Chowning considère comme primordial de chercher un optimum de la composition à adapter aux possibilités du concert [33]. Si bien que pour optimiser ces possibilités, il s'agit de définir un cadre spatial virtuel dans lequel les mouvements pourront être répartis de manière homogène tout en contrastant les points d'écoute.

Pour cette performance mixte, la mise en œuvre du processus de spatialisation le plus simple consiste à animer le *listener*, qui est le centre de référence virtuel du mixage. *Sound Trajectory* permet de contrôler son *listener* avec 6 degrés de liberté. C'est un outil d'expression redoutable capable de créer quelques vertiges acoustiques avec très peu de moyens. Tout le public en profite, car c'est la scène sonore complète qui est alors modulée avec la seule modification de l'emplacement du *listener*. Il faut pour cela que le processeur audio synthétise l'effet doppler avec une réverbération dynamique, modèle de John Chowning qui est resté une référence pour simuler efficacement l'illusion psychoacoustique de la cinétique sonore.



**Figure 12** interface mira permettant d'activer à la volée des effets momentanés

#### 6.4. Effet Stéréo

Une majorité de traitements sont bicanaux, le traitement est analogue aux effets spatiaux permis par la stéréo, à la différence que les deux sources seront distribuées librement dans un espace en trois dimensions (XYZ). Ainsi un simple effet délai en ping-pong,

délayant le même signal sur deux canaux avec deux temps de délai différents, créera l'illusion d'un déplacement du son le long d'un vecteur, lui-même déplaçable dans un espace tridimensionnel. Avec d'autres types d'effets, il est envisageable de créer des plans sonores élaborés qui pourront se mouvoir dans l'espace.

### 6.5. Effets multicanaux.

Les bus multicanaux sont utilisés pour des processus tirant directement parti de configurations immersives octophoniques à minima, parfois divisées en deux quadraphonies, l'une pour le bas et l'autre pour la hauteur. La synthèse granulaire tire particulièrement bien profit de ces configurations sans avoir à envoyer au processeur de nombreuses informations de position, car tout le processing audio est rendu dans le format défini. Des effets polyphoniques en tirent également parti, Polyreverse et Multirandom. Le premier lit à l'envers un buffer en enregistrement circulaire continu, en superposant des extraits de manière aléatoire, mais dans un registre défini (vitesse, longueur et éventuelle synchronisation à un tempo). Chaque voix de polyphonie créée est automatiquement répartie sur les canaux disponibles. Le Multirandom quand à lui, déclenche un panoramique aléatoire à la suite d'une attaque activant l'effet. Ce traitement est particulièrement efficace sur les sons de percussions.

### 6.6. Groupes auxiliaires

Les groupes auxiliaires peuvent reprendre les signaux de tous les traitements en les répartissant sur quatre groupes distincts. Les groupes sont stéréo et permettent de simplifier le nombre de sources à réellement gérer dynamiquement en live.

### 6.7. Mixage automatique

Les groupes sont ensuite transmis à *Sound Trajectory* par le biais de connexions inter-applications. Ils seront mixés de manière automatique, c'est-à-dire qu'une méthode semi-supervisée pour chaque groupe est utilisée pour coordonner leurs mouvements dans l'espace. La figure 13 présente le réseau d'interactions possibles au sein du logiciel dont les fonctions sont regroupées sur la page de ST appelée *interactive mapping*. Ces dernières s'articulent en deux classes distinctes et complémentaires, les *actions* et les *events*. Les modules génèrent un signal de contrôle à partir de l'analyse d'une entrée audio, MIDI ou OSC. Les modules *events* proposent une variété de séquences d'automation cyclique ou aléatoire.

La palette d'interaction permet d'agir sur tous les paramètres ayant une incidence sur le placement dans l'espace des sources sonores. Les sorties de contrôle en dehors du logiciel sont envisageables au-delà du domaine sonore à destination d'environnements, MIDI, OSC, DMX et Artnet. Il est ainsi possible d'envoyer des informations de contrôle d'éclairage, de synchro vidéo, et

tous les paramètres courants du logiciel : position des sources, du *listener* ou de groupes de sources, etc...

Le nombre de modules activables est illimité. Plusieurs *events* peuvent être contrôlés par une seule *action*. Imaginons une trajectoire basique sous forme de cercle, un même slider contrôlé depuis une interface peut modifier le diamètre du cercle, sa rotation et son élévation. D'un seul geste, la source se déplacera comme si elle était sur une spirale, mouvement par ailleurs adéquat pour percevoir plus clairement l'élévation du son dans un dispositif de diffusion sonore en 3d.

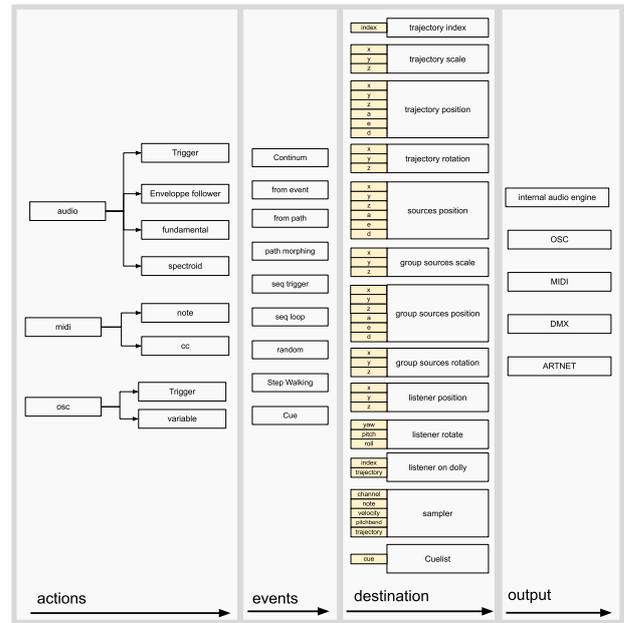


Figure 13 mapping et réseaux d'interactions

De manière plus basique des séquenceurs peuvent faire moduler la position des sources sur les trajectoires à des vitesses variables. De manière plus élaborée, la vitesse de lecture des séquenceurs peut être modulée par une action, elle-même contrôlée par exemple par la brillance d'un signal audio.

Certains modules d'événements aléatoires par « random walk » peuvent créer l'illusion de mouvements browniens plus ou moins naturels.

Tout un échafaudage d'articulations et d'interactions est ainsi possible à la manière de la synthèse modulaire.

## 7. CONCLUSION

Avec les cas présentés, l'auteur espère avoir mis en lumière quelques caractéristiques propres à l'outil *Sound Trajectory*. Par son aspect semi-modulaire, ce logiciel propose une solution simple d'utilisation, adaptée aux créateurs sonores cherchant à explorer les possibilités d'une écriture interactive de la spatialisation sonore.

Les workflows et modes opératoires de production sont toujours relativement complexes à mettre en œuvre et à maintenir dans le temps. Les perspectives de développement, de documentation et de libération des sources de *Sound Trajectory* visent à assurer une pérennité des concepts et logiques du programme. Le

programme d'origine étant développé en Max, toutes les sources sont disponibles sous forme d'abstractions pouvant être utilisées indépendamment de la structure d'origine du logiciel [34].

Les contraintes inhérentes au développement du standalone pourront être levées avec une utilisation libre au sein de l'environnement Max. Ainsi l'articulation des abstractions et modules du logiciel d'origine permettra la conception de dispositifs originaux et plus facilement adaptables aux besoins spécifiques des projet artistiques.

Un portage sur le modèle des Beap Tools facilitera le prototypage rapide de processus de synthèse et traitements dédiés à la spatialisation sonore.

La réalisation d'abstractions de haut niveau avec une interface ludique profite à une sensibilisation sensorielle à l'écriture et l'interprétation du son dans l'espace.

Ultérieurement, un portage partiel sur Pure Data, permettra une intégration des fonctionnalités au sein de projets intégrant la lib.pd ou utilisant des ordinateurs légers de type Raspberry pour la réalisation de dispositifs singuliers open source.

L'ouverture publique des sources du logiciel *Sound Trajectory* sous forme de package pour max sera annoncée en juin 2023. Les projets discutés dans cet article seront proposés en démonstrations pour accompagner la publication des sources.

## 8. RÉFÉRENCES

1. Davis, K. « Motive and Spatialization in Thomas Tallis' Spem in Alium », South Central Graduate Music Consortium (SCGMC), University of Virginia, Charlottesville, VA, 2016
2. Barrett, N. « Spatial music composition », in 3d Audio (1st ed.). Routledge., p175 <https://doi.org/10.4324/9780429491214>
3. Quiroz, D. « Gestural control for 3d audio », in 3d Audio (1st ed.). Routledge. p64 <https://doi.org/10.4324/9780429491214>
4. Normandeau, R. « Timbre Spatialization: The medium is the space » Organized Sound, 14(3), 2009, p. 277-285 doi:10.1017/S1355771809990094
5. Pottier, L. « Dynamical spatialization of sound. HoloPhon : a graphic and algorithmic editor for Sigma1 », Proc. of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx), Barcelona, Spain, 1998
6. Normandeau, R. et al. « Spat-GRIS/ServerGRIS, Creative tools for 2D and 3d sound spatialization », Proceedings of the 2018 international computer music conference. Daegu, Korea : The International Computer Music Association, 2018, p. 291-297.
7. Loret, E. « Le Synesthesium », Art Press Novembre 2015
8. Mercier, M. et al. « Synthèse d'interactions multimodales parcimonieuses pour l'écriture de l'oeuvre Iquisme et l'analyse de ses percepts » JIM 2015, Montréal, Canada. hal-03104605
9. Jacquemin, G. et al. « Partitions retroactives avec Iannix » JIM 2014, Bourges, France. hal-03104631
10. Carpentier, T. et al « Twenty Years of Ircam Spat: Looking Back, Looking Forward » in Proc. of the 41st International Computer Music Conference, Denton, TX, USA, Sept. 2015, pp. 270 – 277.
11. Carpentier, T. « Tosca : An OSC Communication Plugin for Object-Oriented Spatialization Authoring », Proc. of the 41st International Computer Music Conference (ICMC), pp. 368 – 371, Denton, TX, USA, Sept.2015.
12. Schacher, J. and Kocher K « Ambisonics Spatialization Tools for Max/MSP » In Proceedings of the International Computer Music Conference. New Orleans, LA, June 2006.
13. Wright, M. et Freed, A. « Open Sound Control: A New Protocol for Communicating with Sound Synthesizers » Proceedings of the International Computer Music Conference 1997, Thessaloniki, Hellas, pp. 101-104.
14. Carpentier, T. « Panoramix: 3d mixing and post-production workstation » in Proc. 42nd International Computer Music Conference (ICMC), Utrecht, Netherlands, Sept 2016
15. Harker, A. and Tremblay, P. « The HISSTools Impulse Response Toolbox: Convolution for the Masses » ICMC 2012
16. Lossius, T. et al. , « Dbap distance-based amplitude panning » in Proc. of the International Computer Music Conference (ICMC), Montreal, 2009.
17. Sèdes, A., Guillot, P., Paris, E., « The HOA library, review and prospects », Proceedings ICMC/SMC, Athènes, Grèce, 2014
18. Kendall, G. S. « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », Computer MusicJournal, MIT Press, USA, 1995.
19. Vaggione, H. « Décorrélation microtemporelle, morphologies et figurations spatiales », Actes des Journées d'Informatique Musicale, Marseille, France, 2002.
20. Sèdes, A. « Approche musicale de la décorrélation microtemporelle dans la bibliothèque HOA », JIM 2015, Montréal, Canada.

21. Goutmann, P. « Traitement spatial du son par décorrélation des signaux en ambisonie d'ordre élevé » Journées d'Informatique Musicale 2021, AFIM, Jul 2021, Visioconférences, France. hal-03313616
22. Pulkki, V. « Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning » Journal of the Audio Engineering Society, vol. 45, no. 6, pp. 456 – 466, June 1997.
23. Schnell, S. et al. « MuBu & Friends – Assembling Tools for Content Based Real-Time Interactive Audio Processing in Max/MSP » In International Computer Music Conference (ICMC). Montreal, August 2009.
24. Françoise, J. « Motion-Sound Mapping by Demonstration » Thèse de doctorat, UPM 2015. English. p148 et 204, NNT : tel-01161965
25. Clozier, C. « Gmebaphone, Prédicat » ed Misame, p27, 2022, <https://misame.org/anthologie-gmebimeb/>
26. Clozier, C. « Sur le Gmebaphone/Cybernéphone » ed Misame, <https://misame.org/anthologie-gmebimeb/>
27. Clozier, C. « The Gmebaphone Concept and the Cybernéphone Instrument », Computer Music Journal, vol. 25, no 4, 2001, p. 81-90.
28. Barrett, N. and Jensenius A. « The 'Virtualmonium': an instrument for classical sound diffusion over a virtual loudspeaker orchestra » Brisbane, Australia, 1 juin 2016.
29. Webster, C. and al. « Vers un acousmonium en immersion VR en ambisonie 3d et binaural » Journées d'informatique musicale, Oct 2020, Strasbourg, France. hal-02977660
30. Puckette, M. « Combining Event and Signal Processing in the MAX Graphical Programming Environment » Computer Music Journal. (1991a).
31. Barrett, N, « Composition and the 'Live Electroacoustic': sound, time, control and ensemble » <https://www.natashabarrett.org/live.html>
32. Roebel, A. « New approach to transient processing in the phase vocoder » 6th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx). London, p. 344-349, 2003
33. Chowning, J. « The Simulation of Sound Moving Sources » Journal of the Acoustical Society of America 1971 : 2-6
34. Mercier, M. « code source de Sound Trajectory » dépôt Github : <https://github.com/maxence-mercier/Sound-Trajectory>