



UNIVERSITÉ
CÔTE D'AZUR

Université Côte d'Azur

Mémoire de Master 2 Arts - Musique

Projet Professionnel et de Recherche

**Création de dispositifs instrumentaux numériques
et *live electroacoustique* spatialisé**

Présenté par YANG Sheng

Sous la direction de DECROUPET Pascal

Co-tuteurs : PASCAL Michel, NAVARD Gaël

Mai 2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Pascal Decroupet, directeur de ce mémoire, dont l'accompagnement m'a permis d'élargir mes perspectives ainsi que ma culture musicale. Son enseignement m'a initié à une méthodologie analytique rigoureuse appliquée aux formes et fonctions dans le champ de la science de musique.

Je remercie Michel Pascal, mon cher mentor en composition électroacoustique. Tout au long de mon parcours, il m'a apporté un soutien constant et généreux. Son enseignement m'a permis de découvrir et de comprendre les fondements théoriques et pratiques de l'art électroacoustique, de l'informatique musicale, notamment l'esthétique de la musique concrète et la musique acousmatique instrumentale. À travers son regard exigeant et ses idées novatrices, il m'a transmis une vision globale des arts sonores, nourrissant ma réflexion sur le sens même de la composition, sa pratique, et sa portée existentielle.

Je tiens également à remercier Gaël Navard. Merci pour son cours technique, l'enthousiasme qu'il a manifesté au cours de ces années. Son innovant projet d'orchestre numérique et de musique de chambre électroacoustique, m'a permis de pratiquer des instruments numériques et de réaliser des idées musicales en improvisation.

Ma reconnaissance va aussi à Patrice Colet pour sa disponibilité constante et son précieux soutien en programmation.

Je souhaite par ailleurs remercier chaleureusement Anaïs De Gilles, Arthur Santoni, Deniz Soydam, Ece Yaman, Elise Heinisch, Frédéric Piraino, José Santoro, Luca Fondacci, Mathilde Jegonday, Yunjing Liu et Zeynep Boluk, mes chère(s) collègues et interprètes, pour leur engagement dans la création de mes pièces *Fragments chevauchants* et *SYartic(ulation)*.

Pour finir, mes sincères remerciements s'adressent à Maeva Sytnik et Noé Constant, mes professeurs de contrebasse. Merci infiniment à Elisabeth Vanthomme, qui m'a ouvert les portes de cet instrument fascinant. C'est grâce à elle que j'ai découvert un véritable bonheur musical, tout en affinant mes oreilles. Le travail sonore engagé avec la contrebasse m'a également orienté vers une réflexion sur la lutherie contemporaine et sa rencontre avec les dispositifs électroacoustiques.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une démarche de création articulée autour de l'élaboration d'instruments numériques expressifs (*SYplay*, *SYfu* et *SYartic*), de la programmation (Max/MSP, Pure Data), ainsi que du développement de dispositifs autonomes de traitement sonore (*Raspberry*, Arduino). Il explore également l'interprétation des trajectoires d'objets sonores dans le contexte du *live electroacoustique* spatialisé. *SYplay* a été conçu pour *Polysons Sonatine 0.0.6*, une pièce combinant dispositifs instrumentaux et support acousmatique, réalisée dans le cadre d'une intervention pédagogique. *Fragments chevauchants*, composition mixte pour septuor intégrant *SYfu*, a été créée dans un Acousmonium. Enfin, *SYartic(ulation)*, œuvre pour flûte augmentée, *SYartic*, et dispositif de trajectoires, a été composé et interprétée dans un dôme sonore. Cette recherche-crédation repose sur l'interaction entre gestes instrumentaux, dispositifs electroacoustiques et notations spécifiques. Elle propose aux musiciens de nouvelles perspectives d'interprétation sans altérer leur maîtrise technique, tout en contribuant à l'élargissement du répertoire de la musique contemporaine.

Mots clés :

création, instruments numériques, programmation, *live electroacoustique* spatialisé, trajectoires.

Abstract

This work presents a creative approach centered on the development of expressive digital instruments (*SYplay*, *SYfu*, and *SYartic*), programming environments (Max/MSP, Pure Data), and the design of autonomous sound processing systems (*Raspberry Pi*, Arduino). It also explores the real-time interpretation of sound object trajectories within the context of spatialized live electroacoustic performance. *SYplay* was developed for *Polysons Sonatine 0.0.6*, a piece combining instrumental devices with an acousmatic soundtrack, created as part of an educational project. *Fragments chevauchants*, a mixed composition for septet incorporating *SYfu*, was premiered in an Acousmonium setting. Finally, *SYartic(ulation)*—a work for augmented flute, *SYartic*, and a spatial trajectory system—was composed and performed within a dome array. This research-creation is grounded in the interaction between instrumental gestures, electroacoustic interfaces, and dedicated forms of notation. It offers musicians new interpretative possibilities without compromising their technical skills, while contributing to the expansion of the contemporary music repertoire.

Keywords:

creation, digital instruments, programming, spatialized live electroacoustics, sound trajectories

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	3
Abstract.....	3
I. INTRODUCTION ET CONTEXTE HISTORIQUE.....	4
II. PROBLEMATIQUE, DÉFINITION ET RÉFLEXIONS.....	8
2.1 Qu'est-ce qu'un instrument ?.....	10
Réflexion :.....	10
2.2 Qu'est-ce qu'un instrument de musique ?.....	11
Réflexion :.....	11
Réflexion :.....	12
2.3 Qu'est-ce qu'un <i>instrument</i> de musique numérique/électronique ?.....	15
Réflexion :.....	16
III. MÉTHODOLOGIE.....	16
IV. CRÉATION DE DISPOSITIFS INSTRUMENTAUX.....	17
4.1 <i>Design</i> sonore.....	17
4.2 Optimisation des contrôleurs MIDI.....	22
4.3 Programmation.....	24
4.4 Optimisation des dispositifs programmés.....	34
4.5 Intégration des dispositifs instrumentaux au dôme sonore.....	36
4.6 Mixité entre instrument numérique et support à l'Acousmonium.....	38
4.7 Un autre exemple de recherche sur l'instrument augmenté.....	39
V. AMÉLIORATION DE LA NOTATION.....	41
5.1 Source d'inspiration pour la notation mixte.....	41
5.2 Notation de trajectoires spatiales.....	42
5.3 Analyse critique de <i>SYartic(ulation)</i>	44
VI. CONCLUSION.....	46
VII. PARTITIONS	
<i>Fragments Chevauchants</i>	51
<i>SYartic(ulation)</i>	68
BIBLIOGRAPHIE.....	47
ANNEXE. Création <i>Polysons sonatine 0.0.6</i> dans le cadre du concert <i>Elektronizza 2024</i> au CRR de Nice.....	50

I. INTRODUCTION ET CONTEXTE HISTORIQUE

La musique électroacoustique est un art musical issue notamment de la musique concrète et de l'*Elektronische Musik* (musique électronique). Elle coexiste avec les divers courants tels que la musique acousmatique, la musique expérimentale et la *Computer Music*. L'électroacoustique est indissociable du développement de la radiophonie, de l'évolution des technologies analogiques et numériques, ainsi que de l'informatique musicale.

En 1943, Pierre Schaeffer a fondé le Studio d'Essai à la Radiodiffusion Française, où il donnait naissance à la musique concrète en 1948 avec les *Études de bruits*¹. En collaboration avec Pierre Henry, il a composé des œuvres majeures comme *Symphonie pour un homme seul* (1949-1950). En 1951, il a créé le Groupe de Recherche de Musique Concrète, prédécesseur du **Groupe de Recherches Musicales (GRM)**. Schaeffer a posé les bases de notions fondamentales d'une typomorphologie des sons à partir de l'écoute réduite, développées dans son *Traité des Objets Musicaux* (1966). Cet ouvrage constitue désormais une référence majeure dans le domaine des musiques électroacoustiques, inspirant les travaux de recherche à l'échelle internationale.

Dans les années 1950 aux États-Unis, Harry Olson et Herbert Belar ont développé les synthétiseurs Mark I et Mark II au sein de la firme **Radio Corporation of America (RCA)**. Ces synthétiseurs en tant qu'« instruments » comptent parmi les premiers à avoir généré des sons électroniques de manière automatisée, utilisant des oscillateurs et des modules contrôlés par des rouleaux de papier perforé, similaires à ceux des pianos mécaniques. Ce système contrôlait les paramètres tels que la hauteur, le timbre, le volume et l'enveloppe. Mark II fonctionnait également avec des filtres, du bruit, du glissando, du vibrato et de la résonance.² En 1957, Max Mathews chez *Bell Labs* a développé « *MUSIC* », le premier programme pour la génération de sons par ordinateur. Fonctionnant sur un ordinateur IBM 704, cet outil permettait de créer des formes d'onde audio numériques par synthèse directe.³

En Allemagne, *Elektronische Musik* et le studio de Cologne **Westdeutscher Rundfunk Köln (WDR)** ont émergé entre 1949 et 1950. Karlheinz Stockhausen y compose *Studie I* (1953) et *Studie II* (1954) à partir de signaux sinusoïdaux, avant de marquer l'histoire de la musique occidentale par ses explorations de la musique électronique, de l'espace sonore et du temps (*Gesang der Jünglinge*,

1 BONNEFOIS, Stéphane. *De la contrainte et de l'urgence naissent parfois des aventures extraordinaires...* Radio France, 23 juin 2016, <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/creation-on-air/pierre-schaeffer-au-temps-du-studio-d-essai-1943-1945-4796443> Consulté le 15 janvier 2025.

2 CRAB, Simon, *The 'RCA Synthesiser I & II' Harry Olson & Herbert Belar, USA, 1951.* <https://120years.net/the-rca-synthesiser-i-ii-harry-olsen-herbert-belar-usa-1952/> Consulté le 15 janvier 2025.

3 NORMAN, Jeremy. <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=3886> Consulté le 16 janvier 2025.

1956 ; *Kontakte*, 1960, *Hymnen*, 1967). Ces chefs-d'œuvre ont fondé les bases de la musique électronique savante, se distinguant radicalement de l'esthétique de la musique concrète française.

A Paris, en 1970, fort de son expérience au studio de Cologne, Pierre Boulez a fondé à la demande de George Pompidou l'**Institut de Recherche et Coordination Acoustique Musique (Ircam)**. En 1974, Luciano Berio y dirigeait la section électroacoustique et supervisait un projet de transformation sonore. En 1981, Giuseppe Di Giugno a conçu le processeur 4X qui permettait l'analyse, la synthèse et la transformation des sons en temps réel. Ce dispositif a été utilisé par Boulez dans son œuvre *Répons* (1981) ⁴.

Entre 1981 et 1983, l'industrie musicale a vu la naissance du système MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*), une norme qui facilitait la communication entre instruments électroniques de différents fabricants. Ce projet a été initié par Ikutaro Kakehashi de Roland et Dave Smith de *Sequential Circuits*, en collaboration avec des entreprises telles que Yamaha, Korg et Kawai pour développer une interface universelle. Le premier prototype fonctionnel a été présenté au **National Association of Music Merchants (NAMM)** à Californie en 1983⁵. Aujourd'hui, le protocole MIDI s'est imposé comme le standard incontournable de l'industrie musicale numérique, dominant tant la création que la production musicale contemporaines.

Dans le domaine de programmation musicale, Miller Puckette a développé **Max/MSP**⁶ puis **Pure Data**⁷ dans les années 1980 et 1990. Ces logiciels de programmation par interface graphique ont marqué un tournant dans le développement de la production interactive et des performances audiovisuelles en temps réel. Des technologies comme les capteurs de mouvement, les contrôleurs **Midi Polyphonic Expression (MPE)**⁸ et d'autres interfaces continuent d'évoluer et sont intégrées dans les pratiques de programmation musicale. L'ensemble de ces outils ouvre un vaste champ d'exploration, permettant de nouvelles formes d'improvisation et d'interprétation « instrumentale » .

Dans le domaine de la recherche et de l'expérimentation en musique électroacoustique, les **Centres Nationaux de Création Musicale (CNCM)** « œuvrent au renouvellement des formes et des langages musicaux. Ils soutiennent l'écriture et la conception d'œuvres nouvelles. Ils poursuivent également des travaux de recherche, dans un objectif d'expérimentation et de mise au point de

4 Philharmonie de Paris. <https://pad.philharmoniedeparis.fr/0158770-station-informatique-4x-ircam.aspx> Consulté le 15 janvier 2025.

5 The MIDI Association. <https://midi.org/midi-history-chapter-6-midi-begins-1981-1983> Consulté le 16 janvier 2025.

6 **Max/MSP** : un logiciel de programmation développé par Cycling '74. Il est basé sur le « *patching* » permettant de connecter les objets audiovisuels pour créer des interactions.

7 **Pure Data** : logiciel de programmation conçu par Miller Puckette à l'**IRCAM** en France, permettant de créer la musique et l'art audio visuel en temps réel.

8 **MPE** : protocole conçu pour que chaque information MIDI (hauteur, vitesse, pression...) puisse être contrôlée de manière polyphonique.

nouveaux outils et démarches de création musicale. »⁹ Selon la Ministère de la Culture, il existe actuellement huit centres actifs : Athénor - Scène nomade, Groupe de Musique Expérimentale de Marseille (GMEM), Centre de création musicale Voce, Césaré, La Muse en Circuit, Groupe de Musiques Électroacoustiques d'Albi (GMEA), Générateur de Ressources et d'Activités Musicales Exploratoires (GRAME) et Ici l'onde.

Même disparus, certains centres demeurent dignes d'intérêt : Le **Groupe de Musique Expérimentale de Bourges (GMEB)**, devenu IMEB en 1995) fut un acteur majeur de la musique électroacoustique à l'échelle internationale. Fondé en 1970 par Christian Clozier et dissous en 2011¹⁰, le G.M.E.B a conçu des systèmes originaux de diffusion en concerts et de synthèse programmable,¹¹ et a élaboré une pédagogie innovante notamment destinée aux enfants, le « Gmebogosse »¹² : des dispositifs utilisant des lecteurs-enregistreurs de cassettes comme instruments de musique, en interaction avec des sons électroniques nuancés et spatialisés en stéréo. Ces dispositifs, par leur conception innovante, offrent un double intérêt : ils servent à la fois de références modélisantes pour les études pédagogiques en musique et de prototypes stimulants pour le développement de nouveaux instruments.

Le **Centre International de Recherche Musicale (CIRM)**, ancien membre des CNCM, a été fondé en 1968 avant de s'implanter à Nice en 1978. Actif jusqu'en 2023, ce centre a initié le festival MANCA (Musiques Actuelles Nice Côte d'Azur), qui a joué un rôle essentiel dans la diffusion et la transmission des musiques contemporaines. Selon Michel Pascal¹³, la philosophie d'un usage instrumental des technologies légères, entièrement intégrées dans la pratique des musiciens, ainsi que l'intérêt pour la micro-tonalité, trouve leurs origines dans la pensée de Jean-Étienne Marie, fondateur du CIRM.

En dehors des CNCM, certains studios de recherche en électroacoustique, toujours actifs, méritent également d'être mentionnés : En 1987, le **Studio Instrumental** a été fondé au sein du CIRM par Pascal Gobin et Michel Pascal. Ce collectif s'est donné pour objectif d'explorer l'articulation entre pratique instrumentale et technologies, et de rendre la musique électroacoustique interprétable en temps réel. Leur démarche visait notamment à développer « La recherche d'un nouveau genre de

9 <https://www.culture.gouv.fr/thematiques/musique/les-organismes-de-creation-et-de-diffusion-musicales/centres-nationaux-de-creation-musicale> Consulté le 19 avril 2025.

10 https://web.archive.org/web/20140529212912/http://www.imeb.net/IMEB_v2/index.php Consulté le 19 avril 2025.

11 https://www.larousse.fr/encyclopedie/musdico/Groupe_de_musique_exp%C3%A9rimentale_de_Bourges/167998 Consulté le 19 avril 2025.

12 <https://misame.org/anthologie-gmeb-imeb/> Consulté le 19 avril 2025.

13 Michel Pascal : compositeur français de la musique électroacoustique et professeur du Conservatoire Rayonnement Régional de Nice. De 1983 à 1996, il a été en charge des studios et des technologies de traitement en temps réel au Cirm.

virtuosité “ à l’intérieur même des sons ”, afin de conférer un véritable statut instrumental aux synthétiseurs grâce aux nouveaux accès gestuels¹⁴». Cet organisme propose actuellement une plateforme de ressources qui diffuse des articles, des actualités, des événements ainsi que des informations sur les technologies, en lien avec des projets menés en collaboration avec Conservatoire de Nice, l’Université Côte d’Azur et des laboratoires de recherche.

Au Canada, le **Centre interdisciplinaire de recherche en musique, médias et technologie (CIRMMT)**, créé en 2001 à l’Université McGill, mène des travaux sur la création, l’interprétation, l’enregistrement, la transmission et la perception de la musique et du son, en intégrant également les dimensions visuelles et haptiques. Parallèlement, le **Groupe de recherche en immersion spatiale (GRIS)** a été fondé en 2008 par le compositeur et chercheur Robert Normandeau, professeur de composition électroacoustique à l’Université de Montréal. Le *GRIS* a développé des logiciels de spatialisation immersive tels que *SpatGRIS* et *ControlGRIS*, qui permettent l’interprétation en temps réel la musique Acousmatique dans des environnements multicanaux. Ces logiciels jouent un rôle essentiel dans l’intégration de la spatialisation en tant que paramètre à la fois compositionnel et performatif au sein des musiques électroacoustiques.

À l’heure actuelle, au sein du Conservatoire à Rayonnement Régional de Nice, Michel Pascal et Gaël Navard¹⁵ ont mis en place un dispositif immersif multicanal, le *Micadôme*¹⁶, piloté à l’aide des logiciels développés par le Groupe *GRIS*. *Micadôme* est utilisé à des fins pédagogiques, notamment pour l’écoute d’œuvres électroacoustiques spatialisées, ainsi qu’à des fins musicothérapeutiques dans le champ de la cognition, la médiation thérapeutique par l’art, en collaboration avec le **Laboratoire d’Anthropologie et de Psychologie Cognitives et Sociales (LAPCOS)**. Par ailleurs, Navard a fondé l’orchestre numérique *Elektonizza*, consacré à la pratique instrumentale dans le domaine de la musique électroacoustique, favorisant l’expérimentation de nouvelles formes de jeu et d’écriture musicale.

14 Site internet du Studio Instrumental. <https://studio-instrumental.fr/a-propos/>

15 Gaël Navard, compositeur français de la musique électroacoustique et professeur du Conservatoire à Rayonnement Régional de Nice.

16 <https://studio-instrumental.fr/recherche/1344-2/>

II. PROBLEMATIQUE, DÉFINITION ET RÉFLEXIONS

De nos jours, les synthétiseurs, les contrôleurs MIDI et autres outils numériques connaissent une évolution rapide et diversifiée. Du côté de la performance musicale, il est primordial d'observer l'avancement de ces technologies électroniques et numériques, grâce auquel il a été possible d'établir un lien entre dispositifs instrumentaux et nouvelles possibilités d'interprétation musicale. *Live electronic music* ou *live electronics*, est issue de ce contexte. Apparu dans les années 1960, le concept de *live electronics* visait à intégrer les interfaces électroniques en tant qu'instruments de musique dans des performances en temps réel, les concepteurs de ces dispositifs étant souvent aussi leurs interprètes¹⁷. En inspirant de cette approche, il convient de proposer un terme qui souligne le « temps réel » dans l'exécution des œuvres mixtes combinant instruments numériques et acoustiques, le « *live electroacoustique* ».

Dans le domaine des musiques électroacoustiques, il est fréquent de rencontrer des difficultés à faire exprimer toutes les nuances sonores. Michel Pascal avait introduit un concept d'« Acousmatique instrumentale », qui renforce la dimension gestuelle au sein de la musique **Acousmatique**¹⁸. Selon lui, les objets sonores préenregistrés, travaillés par un montage dynamique, ainsi que leur interprétation lors de la diffusion à travers l'orchestre de haut-parleurs (**Acousmonium**¹⁹), offrent une perception gestuelle à l'écoute, donnant l'impression d'assister à l'exécution d'instruments acoustiques visibles par le spectateur. Dans ce cadre, les gestes instrumentaux compositionnels correspondent aux sons produits, ce qui favorise une meilleure expérience d'écoute de la performance acousmatique par le public.

Contrairement à la musique acousmatique, qui repose sur la diffusion de sons préenregistrés sans source visuelle identifiable, le *live electroacoustique* met en avant la dimension du temps réel. Cette approche permet de rendre visibles les gestes instrumentaux des musiciens, en les liant plus directement aux sons produits par les instruments électroniques ou numériques. Dans ce contexte, l'instrument joue un rôle indispensable. D'une part, rendre l'instrument expressif est un enjeu fondamental : il s'agit de concevoir un instrument numérique plus jouable, efficace et contrôlable, tout en conservant les qualités expressives des instruments acoustiques. D'autre part, les contraintes techniques peuvent entraver la réalisation des idées compositionnelles, notamment lorsqu'il faut gérer simultanément plusieurs dispositifs : un ou plusieurs instruments, un traitement en temps réel

17 MONTAGUE, Stephen, *Live Electronics - Introduction*. Contemporary Music Review 6 (1), 1991, p.85.

18 **Acousmatique** : genre musical de l'art électroacoustique, consistant en la production d'œuvres diffusées par un orchestre d'haut-parleurs.

19 **Acousmonium** : « "orchestre de haut-parleurs" destiné à la projection et à la spatialisation du son, conçu par François Bayle (INA-GRM) et réalisé par Jean-Claude Lallemand en 1974. » Merlier, Bertrand. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*. Delatour France, 2006, p. 18.

du son acoustique capté par microphone, ainsi qu'une spatialisation et diffusion des sources sonores électroacoustiques via un ou deux contrôleurs. C'est précisément ce qui caractérise le *live electroacoustique*. Ce type de performance peut exiger une importante capacité de traitement, mettant à l'épreuve la puissance de l'ordinateur principal. Par exemple, les latences entre le jeu instrumental, le traitement du son et la diffusion spatialisée peuvent devenir problématiques. Il convient de prendre en compte plusieurs paramètres : le budget alloué au matériel physique et aux logiciels, le temps nécessaire à la programmation des traitements sonores, ainsi que la portabilité d'un dispositif instrumental permettant une installation autonome, de type *plug & play*. Comme pour un instrument classique, le musicien doit pouvoir arriver en concert avec son instrument, l'accorder, et jouer immédiatement.

Du point de vue du compositeur, la question de la notation soulève fréquemment des problématiques liées à la lisibilité et à la transmissibilité de l'œuvre. Il s'agit de rendre la partition compréhensible pour l'interprète, afin qu'il puisse en proposer une exécution fidèle et cohérente. Parallèlement, du côté de l'auditeur, se pose la question de la perception : sera-t-il en mesure d'entendre l'œuvre telle que le compositeur l'a imaginée ? Cette interrogation devient particulièrement cruciale lorsqu'il est question de figures d'espace²⁰ — comme les trajectoires de sources sonores ou l'espace intérieur composé — dans le cadre d'une diffusion en salle spatialisée, telle que dans un Acousmonium ou sous un *dôme* sonore immersif. Francis Dhomont a douté dans son article *Les limites de l'espace (Espace du son III pp.95-96)*:

[...] pour la projection d'une œuvre, je m'efforce de construire des images spatiales très franches, très « lisibles », sachant que leur réception peut varier beaucoup d'une personne à l'autre et aussi selon la situation d'écoute [...] les combinaisons de trajectoires et de mouvements, permises par la souplesse des logiciels de mixage, si séduisantes sur la partition, restent souvent inaudibles lors de la projection.

20 « Tracé graphique qui va permettre de fabriquer un déplacement spatial, soit à l'aide de dispositifs manuels (VCA, table de diffusion, *joystick*...), soit à l'aide d'un logiciel. » Merlier, Bertrand. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*. Delatour France, 2006, p. 87.

2.1 Qu'est-ce qu'un instrument ?

- Définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL)

Objet fabriqué en vue d'une utilisation particulière pour faire ou créer quelque chose, pour exécuter ou favoriser une opération (dans une technique, un art, une science)²¹.

Réflexion :

Selon le CNRTL, l'objet qui est considéré comme un instrument de musique, doit à première vue pouvoir effectuer une opération sonore. La description révèle le fonctionnement fondamental d'un instrument. Pourtant cela ne suffit pas à définir un instrument de musique. Un instrument de musique doit être capable de produire un son musical, qui se différencie d'un simple bruit. Par exemple pour un frottement de pieds au sol, le sol et les pieds sont-ils un instrument ? Le glissement d'un bâton de craie sur un tableau noir forme-t-il un instrument ? Verser du vin rouge dans un verre de la forme Bourgogne, produit un joli son de coulée d'eau. Cela suffit-il à conclure que le verre ou le vin rouge sont un instrument de musique ?

2.2 Qu'est-ce qu'un instrument de musique ?

- Définition du site internet de dictionnaire Larousse²²

(latin *instrumentum*, de *instruere*, outiller)

1. Objet fabriqué servant à un travail, à une opération : Instrument aratoire. Instrument de mesure, de travail. Synonymes : appareil - engin - *outil*

2. Instrument (de musique)

tout objet, brut ou fabriqué, capable de produire des sons utilisés à des fins musicales.

- Définition du site internet de dictionnaire Le Robert²³

1. Objet fabriqué servant à exécuter qqch., à faire une opération. [appareil](#), [machine](#), [outil](#).

2. Instrument de musique, [...], destiné à produire des sons musicaux. Instruments à cordes, à vent.

Réflexion :

Selon les définitions fournies par deux dictionnaires, un instrument de musique peut être considéré comme un *outil* dont la finalité est la production de musique. Un instrument classique tel que le piano constitue un exemple pertinent. Le geste visuel du pianiste permet de comprendre aisément

21 *Instrument* dans CNRTL, <https://www.cnrtl.fr/definition/instrument> Consulté le 18 juin 2024,

22 <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/instrument/43459> Consulté le 18 juin 2024.

23 <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/instrument> Consulté le 18 juin 2024.

quels sons musicaux sont produits par l'exécution des touches du clavier. D'autre part, un tourne-disque équipé de haut-parleurs ou une chaîne HiFi peuvent reproduire le son de toute la Neuvième Symphonie de Beethoven, ce que le piano ne serait pas capable de faire. Pourtant, le tourne-disque n'est pas pour autant considéré comme un instrument de musique.

En revanche, avec le même *outil*, il est possible de pratiquer le « turntablisme » c'est-à-dire le *scratching* sur le tourne-disque, en modifiant par des gestes le mouvement de lecture du vinyle, le faisant reculer ou avancer au ralenti, voire en accéléré, etc. Ces manipulations altèrent la hauteur et le rythme de fragments de sons pour créer de nouveaux objets sonores et produire une musique différente de celle enregistrée sur le disque. Dans ce contexte, le tourne-disque semble bien devenir un *outil* de production musicale, voire un instrument de musique.

- Autres Définitions

1. « Tout objet pouvant produire un son contrôlé par un musicien, qu'il soit conçu, modifié ou écarté de son usage, peut être considéré comme un instrument de musique. La voix ou les mains, même si elles ne sont pas des objets, sont considérées comme des instruments de musique dès lors qu'elles participent à une œuvre musicale. »²⁴

2. « Les instruments virtuels, autrement appelés softsynths ou virtual instruments, permettent de jouer de la musique sur ordinateur, en produisant des sons électroniques ou en cherchant à recréer le son d'instruments réels. »²⁵

Réflexion :

Suite aux définitions précédentes, le corps humain pourrait être considéré comme un instrument de musique lorsqu'il est utilisé pour produire de la musique. Dans le cas de « Light Music²⁶ » par exemple, l'interprète déclenche les sons diffusés par les haut-parleurs, en détectant les mouvements de ses mains. Ses gestes chorégraphiques sont captés en temps réel et simultanément projetés à l'écran. Au cours de l'interprétation, pour le spectateur, il semble évident qu'un chef d'orchestre fait jouer de la musique.

Par apport aux réflexions du début, les mains de l'interprète elles-mêmes, le détecteur de mouvement gestuels, l'ordinateur qui gère les traitements du son et des lumières, les haut-parleurs, le projecteur, l'écran, ... **Forment-ils un seul instrument ou bien des parties distinctes d'un instrumentarium ?**

24 « Pavillon (Instrument) » dans *Dictionnaires et Encyclopédies sur 'Academic'*
<https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1308843> Consulté le 18 juin 2024.

25 Artiste Audio, <https://artisteaudio.fr/instrument-virtuel/> Consulté le 18 juin 2024.

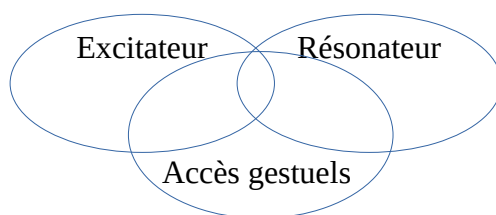
26 Thierry de Mey, *Light Music* (2004) : pièce musicale pour un chef solo, projections et dispositif interactif.

- Quelques points essentiels pour différencier un simple outil d'un instrument de musique

Selon Pierre Schaeffer²⁷

« Tout dispositif qui permet d'obtenir une collection variée d'objets sonores – ou des objets sonores variés – tout en maintenant à l'esprit la permanence d'une cause, est un instrument de musique, au sens traditionnel d'une expérience commune à toutes les civilisations. »

Selon Michel Pascal, pour qu'un dispositif producteur de son devienne un véritable instrument de musique, qu'il soit acoustique ou numérique, il doit offrir l'intersection de trois parties en interactions constantes :



Un excitateur est un terme employé en physique acoustique. Le rôle d'un excitateur est de générer des vibrations sur un instrument afin de produire des sons musicaux. Il peut prendre la forme d'un marteau déclenché par une touche du clavier au piano, d'un archet pour une contrebasse, etc. Les résonateurs, tels que la caisse de résonance du piano ou le corps de la contrebasse, amplifient non seulement le niveau sonore, mais répartissent également l'énergie dans différentes zones du spectre.

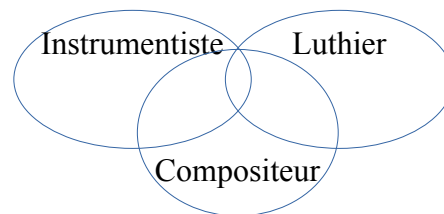
Dans le domaine de l'instrument numérique, il est courant d'observer que les oscillateurs d'un synthétiseur multifonctionnel géré par ordinateur agissent comme la partie excitatrice. Cette dernière est commandée par des capteurs qui lui transmettent des informations via le protocole MIDI. La partie résonatrice comprend le système d'amplification analogique ou numérique qui projette le son à travers des enceintes acoustiques, ainsi que tous les traitements du signal en temps réel effectués sur les générateurs de son.

Pour construire un « bon » instrument de musique, malgré l'importance de l'excitateur et le résonateur, de bons accès gestuels peuvent être décisifs. Un geste précis sur un instrument à cordes, qu'il s'agisse d'un mouvement tiré-poussé de l'archet en staccato ou legato, ou de la mise en place d'une sourdine sur le chevalet, permet par exemple d'obtenir une plus grande variété de nuances et de timbres. Ces éléments contribuent à la perception de l'identité et de l'expressivité de l'instruments. En art interactif, l'accès gestuel peut être assuré par un détecteur de mouvement tel

²⁷ **Pierre Schaeffer** (1910-1995): compositeur, ingénieur et théoricien français, reconnu comme le fondateur de la musique concrète.

qu'une *Kinect*²⁸ sur une console de jeux, ou tout autre dispositif qui permet de déclencher et de modifier divers signaux audiovisuels.

Afin d'optimiser l'expérience d'utilisation instrumentale, comment doit-il procéder pour créer un instrument numérique de musique qui allie qualité des sons et expressivité ? Cela soulève la question des rôles respectifs du **compositeur**, de l'**instrumentiste** et du **luthier**. Dans le domaine électroacoustique, les rôles du compositeur, du luthier et de l'instrumentiste tendent à se recouvrir l'un et l'autre, et à développer une activité d'importance comparable. La relation qui existe entre eux est une relation hautement compacte dont une intersection des trois parties est indispensable.



Supposons qu'un compositeur ait des idées innovantes concernant un instrument. Il demande à un instrumentiste, ou à lui-même, d'expérimenter les possibilités acoustiques de cet instrument. A la recherche des sons il découvre les limites de l'instrument, quels qu'en soient la tessiture ou les harmoniques. Afin d'en améliorer les capacités, il a besoin de l'aide d'un luthier avec qui le compositeur et l'instrumentiste devront finalement collaborer.

Dans le domaine de la musique électroacoustique, le compositeur endosse souvent également le rôle d'instrumentiste. Par exemple, il lui revient de tester la sensibilité d'un clavier MIDI, de configurer un potentiomètre ou encore de programmer un patcher. Bien que les outils numériques ou analogiques offrent une palette sonore élargie, le compositeur peut se heurter à des difficultés plus nombreuses que dans le contexte de la musique acoustique. Lorsqu'une pièce nécessite une programmation, qu'il s'agisse d'un traitement en temps réel ou de la conception sonore en studio, la concrétisation des effets sonores imaginés peut imposer au compositeur de prendre en charge lui-même certains aspects techniques. Il agit par nécessité économique ou par souci d'efficacité, à la manière d'un réalisateur en informatique musicale (RIM). En vue de l'élaboration d'un instrument sur mesure pour pouvoir exprimer correctement des intentions musicales, se pose la question suivante : **un compositeur/instrumentiste est-il en mesure d'assumer lui-même le rôle de luthier ?**

28 **Kinect** : périphérique conçu pour les consoles de jeu, permettant la détection des mouvements.

En 1666, à Crémone, lorsque Antonio Stradivari entreprit la fabrication de son premier violon. Une anecdote rapporte qu'il jouait parfois de son instrument jusqu'à une heure avancée de la nuit, sans perturber les voisins, tant le son produit était réputé pour sa beauté et sa pureté. Bien qu'aucune source ne confirme qu'il ait mené une carrière d'instrumentiste parallèlement à son activité de luthier, il semble évident que Stradivari possédait une connaissance approfondie de la pratique instrumentale, en particulier des instruments à cordes. Il est probable qu'il ait longuement expérimenté lui-même les interactions entre le geste, l'excitateur, et le résonateur, afin d'affiner la conception acoustique et ergonomique de ses instruments.

Un autre exemple permet d'illustrer ce propos. Dans les années 1950, François et Bernard Baschet ont créé une musique d'avant-garde grâce à leurs expérimentations sur une lutherie atypique. Ils ont utilisé des tiges métalliques et des plaques de métal courbées pour construire une série d'instruments musicaux. Cet instrumentarium, nommé « Les Structures Sonores », a été joué par eux-mêmes dans le duo Lasry-Baschet²⁹. Ces deux frères ont également travaillé avec des cinéastes, des chorégraphes et des artistes plasticiens pour créer des performances multimédia. Grâce à leur esthétique remarquable, à la lisibilité de leurs accès gestuels et à leurs sons inhabituels, « Les Structures Sonores » inspirent de nombreux artistes interdisciplinaires, des musiciens et des amateurs d'art plastique à travers le monde.

La nécessité d'agir comme un luthier amène le compositeur à se poser plusieurs questions particulières comme par exemple:

- Quels moyens permettent de concevoir un instrument prospectif alliant expressivité et outils numériques ?
- Les accès gestuels rendront-ils compréhensibles les jeux sur les sons produits ?
- Comment garantir que l'expérience auditive du public soit en adéquation avec nos intentions en tant que compositeur ?

Avant de répondre à ces questions, il serait utile de réviser quelques termes dans le domaine numérique.

²⁹ Lasry-Baschet : un duo de deux frères Baschet qui a produit plusieurs albums dans les années 1960-1970 (*Les Nouvelles Structures Sonores*).

2.3 Qu'est-ce qu'un *instrument* de musique numérique/électronique ?

- Extrait du site internet du dictionnaire Larousse

numérique (Informatique et télécommunications)

...Se dit de la représentation d'informations ou de grandeurs physiques au moyen de caractères, tels que des chiffres, ou au moyen de signaux à valeurs discrètes... Se dit des systèmes, dispositifs ou procédés employant ce mode de représentation discrète, par opposition à [analogique](#).

électronique

...Se dit d'un instrument de musique utilisant la génération d'oscillations électriques pour créer des sons par l'intermédiaire de haut-parleurs.

instrument électrique et électronique

...les instruments électriques (guitares, violons), [qui] sonnent par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs amplificateurs ... les [ondes Martenot](#), le piano et les claviers électroniques ... le synthétiseur...un clavier de commande et un générateur de sons. Ces instruments reproduisent les sonorités d'instruments [acoustiques](#) par synthèse ou par échantillonnage de sons préenregistrés (orgue, piano), possèdent leur propre timbre (ondes Martenot) ou bien offrent au musicien la possibilité de modifier ou de créer ses propres sons (synthétiseur).

Réflexion :

Selon la définition précédente, la qualité d'un instrument numérique dépend de sa capacité à contrôler des signaux à valeurs discrètes. En ce qui concerne l'interaction des trois composantes d'un dispositif de production sonore, pour l'instrumentiste, l'adéquation entre l'intention, la sensation gestuelle et la perception du contrôle du résultat obtenu en temps réel, seront le gage d'une meilleure qualité de l'instrument. Afin de répondre aux questions soulevées, l'objectif principal a été fixé de concevoir un *instrumentarium* numérique, capable de reproduire avec précision des sons nuancés, de manière expressive et contrôlable. C'est dans cette perspective que la création des dispositifs instrumentaux a été entreprise. Une fois l'*instrumentarium* numérique établi, l'attention se portera sur son déploiement en situation d'interprétation live électroacoustique, dans des contextes de spatialisation tels que l'Acousmonium ou le dôme sonore, afin d'explorer les potentialités expressives et immersives offertes par ces dispositifs.

III. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie adoptée dans ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche-crédation articulant étroitement la conception de dispositifs instrumentaux expressifs, leur mise en œuvre dans des contextes de composition et d'interprétation, ainsi qu'une réflexion théorique sur les enjeux esthétiques et techniques qu'ils soulèvent. Le processus de création s'est initialement structuré autour du développement progressif d'instruments numériques — *SYplay*, *SYfu* et *SYartic* — conçus à partir de l'intégration de contrôleurs MIDI et HID³⁰ (Gametrak), de microcontrôleurs (Arduino) et microprocesseurs (*Raspberry Pi*), et des outils de programmation dédiés au traitement du signal en temps réel (Max/MSP, Pure Data). Ces instruments ont été élaborés selon une logique de prototypage itératif, fondée sur l'adéquation entre les gestes instrumentaux, les intentions d'expressivité et les environnements de diffusion sonore, tels que l'Acousmonium ou le *dôme*.

Les dispositifs ont ensuite été expérimentés dans le cadre de plusieurs créations, interprétées par des musiciens lors d'évaluations ou d'interventions pédagogiques réalisées durant le cursus de master. Ces mises en situation ont permis de confronter les instruments à la réalité du plateau, d'ajuster leur ergonomie et leur expressivité, et d'interroger les modalités de leur appropriation par les interprètes. Cette démarche pratique a été accompagnée par une réflexion critique et une mise en perspective théorique, nourrie par l'analyse des compositions mixtes, l'étude des contraintes rencontrées en situation de concert (notation, geste, spatialisation), ainsi que par la consultation de références issues des champs de la lutherie numérique, de l'analyse de l'art électroacoustique, de la recherche sur la spatialisation et de la terminologie musicale. Elle s'est également enrichie d'une observation attentive des pratiques développées au sein d'institutions tels que le GRIS, le GMEB ou encore le projet *Elektronizza*.

Cette approche méthodologique vise ainsi à envisager les dispositifs numériques non seulement comme des outils de production sonore, mais comme des vecteurs d'interaction entre le corps, la machine et l'espace, au service d'une pensée musicale ancrée dans une pratique artistique et scientifique.

30 **HID** : *Human Interface Device* en anglais, norme définie pour les périphériques d'entrée utilisés avec les ordinateurs ou les consoles de jeu, tels que les claviers, souris, manettes (*joystick*) ou autres dispositifs de contrôle.

IV. CRÉATION DE DISPOSITIFS INSTRUMENTAUX

La préparation à la création des instruments numériques commence par une définition précise des besoins en matière de sons ainsi que leur collecte systématique. Il est impératif de réfléchir aux types de sons requis et aux méthodes de collecte efficaces et économiques. Dans le but d'obtenir une variété de sons acoustiques, susceptibles de s'adapter à divers modes de jeu, il est envisagé d'enregistrer des instruments acoustiques et de capter des objets sonores dans divers environnements.

4.1 Design sonore

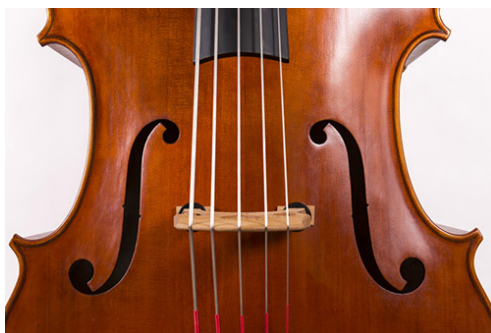


Figure 1. Contrebasse à 5 cordes

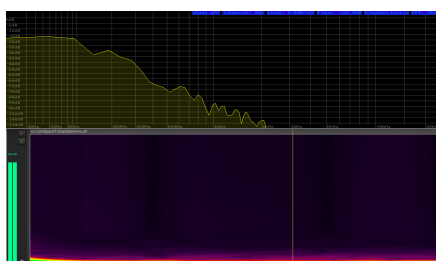


roentgen-bass.com

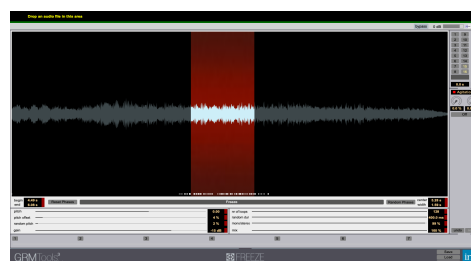
Le spectre sonore de la contrebasse (Figure 1) se distingue par des basses fréquences riches en harmoniques. Pour une contrebasse standard à quatre cordes, la tessiture s'étend généralement sur cinq octaves, et même jusqu'à six octaves pour une contrebasse à cinq cordes. Sa tessiture est vaste, avec une note la plus grave, le *si* (31 Hz), produisant un registre sombre et profond. La note la plus aiguë peut atteindre une fréquence de 988 Hz (*si* 5), créant un son aigu légèrement piquant.



MOTU MW Equalizer



REAPER Frequency Spectrum Analyzer



GRM TOOLS FREEZE

Figure 2. Outils numériques de traitement du son

Les sons de contrebasse ont été enregistrés à l'archet avec un iPhone 7, en couvrant chaque corde à vide ainsi que les différentes combinaisons de double-cordes possibles. Les enregistrements ont ensuite fait l'objet d'une analyse et d'un filtrage à l'aide de divers outils de traitement du son³¹

³¹ Le traitement du son par des moyens numériques s'appuie sur un ensemble d'outils logiciels et matériels permettant d'analyser, de modifier, de synthétiser ou d'organiser le matériau sonore. Ces outils sont couramment utilisés dans

(Figure 2). Les résultats ont été classés en six groupes selon leur registre : sub, grave, grave-medium, medium, aigu et suraigu. En utilisant GRM TOOLS³² FREEZE (Figure 2, à droite), les textures et les harmoniques ont été modifiées afin de produire une palette de sons gelés, lisses ou granulaires, ce qui a permis de créer des espaces sonores distincts.

Au moment d'une intervention pédagogique menée au Collège Rostand à Nice, une classe de sixième composée de douze élèves débutants en musique a été sélectionnés pour composer une courte pièce électroacoustique. Les élèves ont été répartis en trois groupes afin d'enregistrer des sons dans différentes zones de l'établissement : la cour, la salle de classe et le couloir. Deux iPhones 7 ont été mis à leur disposition. Dans la cour, plusieurs types de sons ont été privilégiés : le crépitement des gouttes de pluie sur un parapluie, les basses fréquences d'une musique émise par une voiture passant à toute vitesse, les pas des élèves accompagnés de leurs éclats de voix et des instructions du professeur, ainsi que le claquement des portes des casiers et les rythmes tapés sur les tables en pierre, entre autres. Dans la salle de classe, les élèves ont été invités à rechercher des sons qui les intéressent tels que le grincement aigu du store métallique lors de sa descente, le claquement des touches du clavier d'ordinateur, le glissement d'une baguette de batterie contre le mur, ainsi que le bruit des pages tournées d'un livre, parmi d'autres découvertes sonores. Dans le couloir, les enregistrements ont capturé divers bruits comme celui de la serrure anti-panique, les cliquetis des radiateurs en fonte, ainsi que la sonnerie distinctive de l'établissement.

Lors de la composition de la pièce SYartic(ulation), l'imitation de l'articulation propre au jeu *Jet whistle*³³ de la flûte a nécessité l'échantillonnage d'un sifflement provenant d'une source sonore autre que celle de l'instrument lui-même. Cela permet d'étendre la tessiture de l'instrument numérique et d'enrichir son timbre par une texture plus complexe. Un enregistrement du chant de *Sturnus vulgaris* (étourneau sansonnet) (l'oiseau appartient à l'artiste américaine Sarah Tidwell) a été utilisé comme matière sonore. La richesse et la puissance du mode de vocalisation de son étourneau offrent un modèle d'échantillonnage pertinent, transformable et interprétable pour l'instrument numérique.

Les effets sonores des arts martiaux incluant des onomatopées et des impacts gestuels ont été largement exploités dans les films hongkongais de *kongfu* des années quatre-vingt. Bien que souvent considérés comme clichés, ces effets sonores possèdent une richesse caractéristique, tels que les sons des vents vivifiants, des bambous qui claquent, des spirales de boomerang, des

la composition électroacoustique, le design sonore, la production musicale, et la recherche en acoustique.

32 **GRM TOOLS** : un logiciel développé par le Groupe de Recherches Musicales (GRM) de l'INA (Institut National de l'Audiovisuel) en France.

33 *Jet whistle* : technique de flûte consistant à boucher l'embouchure et à souffler avec puissance.

combats d'épées, etc. Afin de respecter les droits des auteurs et de prévenir toute infraction juridique, les sons ont été échantillonnés de manière scrupuleuse. Par exemple, la transposition de la hauteur et l'étirement d'un cri, la coupure d'une attaque et sa substitution par une autre résonance, la fusion et l'inversion de deux sons gestuels, etc. Après avoir procédé aux montages et nettoyages des sons sélectionnés, ceux-ci ont été soumis à des processus de filtrage et de compression afin d'obtenir un meilleur contrôle de leurs dynamiques et de la qualité de leurs masses. Une fois cette phase de préparation terminée, le *design* sonore a été élaboré dans *Kontakt*³⁴ en plusieurs étapes :

- *Mapping* : assignation des sons par registre aux zones du clavier virtuel

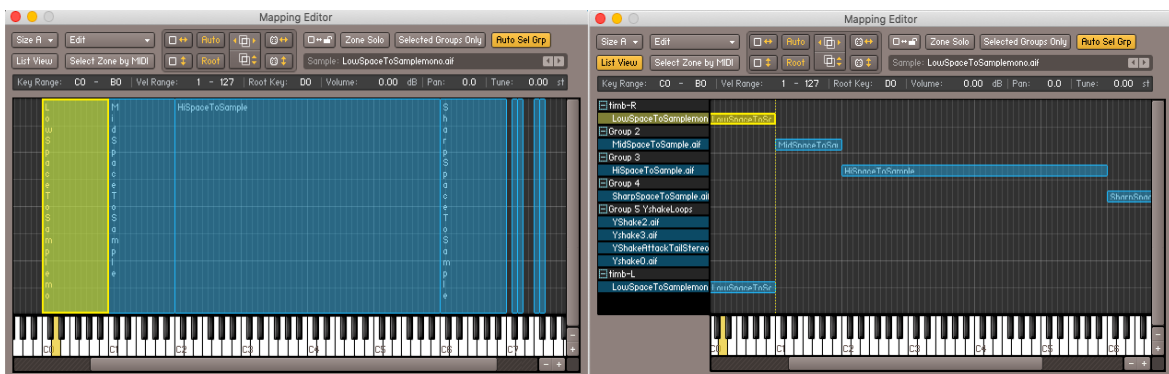


Figure 3. Zone du clavier virtuel dans *Kontakt* (à gauche) et groupes paramétriques associés (à droite)

Un fichier audio peut être assigné à une note de départ sur un clavier virtuel. Selon les besoins, cette note peut être associée à une « zone » regroupant une ou plusieurs touches (Figure 3, à gauche) d'un clavier ou d'un contrôleur MIDI. Lorsqu'un même son est réparti sur plusieurs touches, le comportement varie selon le type de matériau sonore. Dans le cas d'un son de masse tonique³⁵, à l'image d'un piano acoustique, les touches situées à droite de la note de départ produisent des hauteurs plus aiguës, tandis que celles situées à gauche génèrent des hauteurs plus graves. Ce fonctionnement repose sur le principe fondamental de variation fréquentielle dans les sons acoustiques : plus la fréquence est élevée, plus le son est perçu comme aigu. Dans le cas d'un son de masse complexe³⁶, un déplacement vers la droite correspond à une augmentation de la vitesse de vibration des composantes fréquentielles, tandis qu'un déplacement vers la gauche entraîne un ralentissement de cette vitesse.

34 **Kontakt** : logiciel d'échantillonnage paramétrique conçu par la marque Native Instrument.

35 **Son de masse tonique** : son à hauteur bien définie, notion formulée par Pierre Schaeffer.

36 **Son de masse complexe** : son à hauteur non définie, notion formulée par Pierre Schaeffer.

Kontakt permet également d'associer plusieurs fichiers audio à une seule touche, grâce à un système de « groupes » (Figure 3, à droite). Il est ainsi possible de déclencher différents échantillons à partir d'une seule note, selon les valeurs de vélocité définies. Par exemple, un premier son peut être activé avec une faible vélocité (*pp*), et un second avec une vélocité plus élevée (*ff*). Il est essentiel que ces groupes soient paramétrés de manière indépendante. Ce principe est mis en œuvre dans la conception de l'instrument numérique *SYfu*, où deux impacts distincts sont assignés à une seule touche du clavier MIDI, chacun étant déclenché en fonction du niveau de pression exercé. Ce type de configuration permet d'enrichir l'expressivité de l'instrument et de rendre son jeu plus nuancé.

- **AHDSR**³⁷: Réglage de l'enveloppe selon les registres et la nature des sons ;
 - Exemple du son lisse (*tenuto*):



Figure 4. *Tenuto*

- Exemple du son d'impact (*martellato*):



Figure 5. *martellato*

Pour obtenir un son lisse *tenuto*, le temps d'attaque a été réglé à 7,6ms, de l'extinction (*Decay*) à 1.1kms. Dans le cas du son d'impact, le temps d'attaque plus court est préférable. Cela permet d'avoir une sensation rapprochée à un instrument à corde classique, du mode de jeu à l'archet, en jouant par exemple une noire *tenuto* (Figure 4), une noire *martellato* (Figure 5), etc. Attention au fait que ces courbes d'enveloppe sont construites pour rendre la sensation gestuelle efficace. Elles ne correspondent pas forcément aux enveloppes dynamiques des objets sonores eux-mêmes.

- Bouclage³⁸ des impacts: sélection des zones, paramètre des boucles de différents modes

37 **AHDSR** : Attack, Hold, Decay, Sustain et Release, les cinq paramètres de ce type de générateur d'enveloppe.

38 **Bouclage** : « looping » en anglais, une technique qui consiste à lire en boucle une section d'un fichier audio de manière continue.

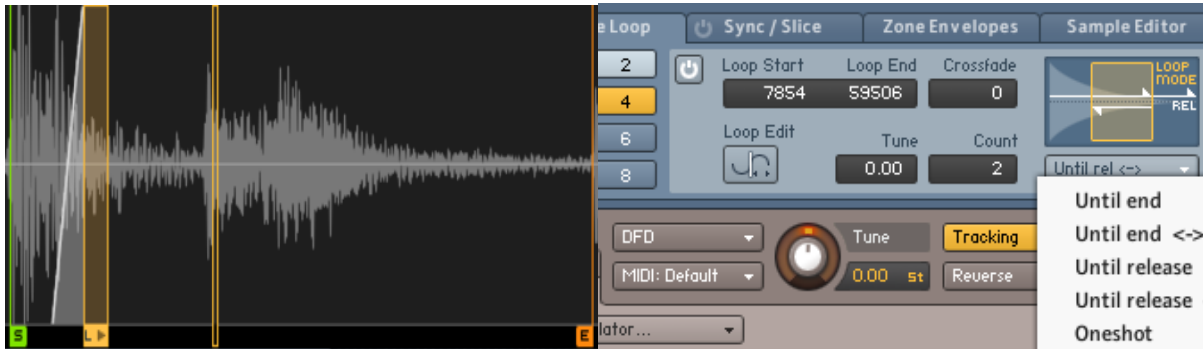


Figure 6. Zones de bouclage sélectionnées (à gauche) et mode de bouclages appliqués (à droite)

La longueur de l'échantillon à boucler est définie par les curseurs **S** (*Start*) et **E** (*End*) (Figure 6, à gauche). *Kontakt* permet de créer jusqu'à huit zones ou boucles distinctes au sein d'un même échantillon audio. Les différents modes de bouclage (*LOOP MODE*) ainsi que le nombre de répétitions de la boucle (*Count*) (Figure 6, à droite) répondent à des exigences spécifiques liées aux modes de jeu instrumental. Par exemple, le mode *Until end* ↔ (en prograde-rétrograde) exécute une lecture alternée en avant et en arrière, jusqu'à ce que la lecture atteigne la fin naturelle de l'échantillon. En revanche, le mode *Until release* maintient le bouclage tant que la touche du clavier est enfoncée, et interrompt la boucle dès que la touche est relâchée, sans attendre la fin du fichier audio. Il est essentiel d'expérimenter ces modes et de les adapter à l'interprétation de l'instrument numérique, en fonction du geste instrumental et du mode de jeu souhaité.

4.2 Optimisation des contrôleurs MIDI³⁹

- MIDI contrôle avec *Touche*⁴⁰

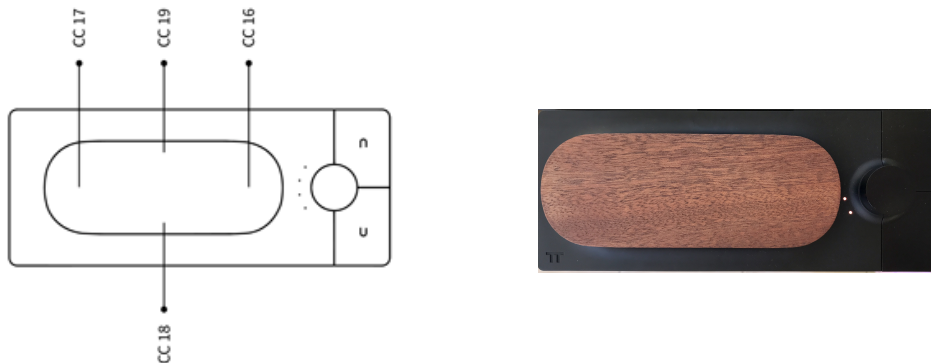


Figure 7. Expressive E Touché SE www.expressivee.com/3-touche-se

39 **MIDI** : Musical Instrument Digital Interface en anglais, un protocole de communication pour le contrôle des instruments de musiques numériques et des logiciels musicaux.

40 **Expressive Touché SE** : un contrôleur MIDI développé par la société française Expressive E. Il utilise des capteurs de pression sensibles permettant des mouvements fluides et précis, pour contrôler de différents paramètres : filtres, réverbérations, etc.

Par défaut, le *Touché* (Figure 7) est configuré pour offrir des mouvements de bas (CC⁴¹16) en haut (CC17), et de gauche (CC18) à droite (CC19). Après de nombreux essais gestuels, il a été constaté que positionner le *Touché* à l'horizontale permettait une expérience de contrôle plus efficace. Dans ce cas, les mouvements de CC17 à CC16 deviennent l'axe des X et les mouvements de CC18 à CC19 représentent l'axe des Y.



Figure 8. Filtrage contrôlé par *Touché*

La pression exercée sur l'axe des X a été assignée au filtrage, une passe-bande qui couvre une plage d'onde de 155 Hz à 6.9 kHz, correspondant à un mouvement de gauche à droite. L'axe des Y contrôle l'amplitude du gain : à partir du centre vers le bas du *Touché*, le CC18 module le gain des basses fréquences (*LF Gain*) de 0 à 19.8 dB. Du centre vers le haut, le CC19 agit sur le gain des fréquences medium-aiguë (*HMF Gain*) dans la même plage de valeur (0 à 19.8 dB) (Figure 8). Ce type de contrôle est directement lié au geste interprétatif, ajoutant une modulation expressive du timbre à l'instrument numérique. Le filtre passe-haut ainsi configuré permet d'obtenir un son plus brillant dans les aigus et plus sombre ou rond dans les médiums et les graves, ce qui s'avère particulièrement pertinent pour façonner la résonance d'un impact de type grosse caisse.



Figure 9. audionewsroom.net Les différents types de matière de plateau du *Touché*

Le plateau du *Touché* (*Touch-plate*) est démontable et interchangeable (Figure 9 à gauche). À l'origine en plastique, il a été remplacé par une version en bois en raison de sa surface veinée et légèrement plus souple, ce qui offre une meilleure stabilité d'utilisation, particulièrement bénéfique pour les personnes ayant les mains moites. Ce changement permet de prévenir le risque de détachement du plateau lors de mouvements gestuels amples.

41 CC : *Control Change* en anglais, un type de message MIDI permet d'agir sur des aspects continus du son, tels que la modulation, le volume, les filtres ou autre paramètre assigné dans un contrôleur MIDI.

- MIDI contrôle avec *QuNexus*

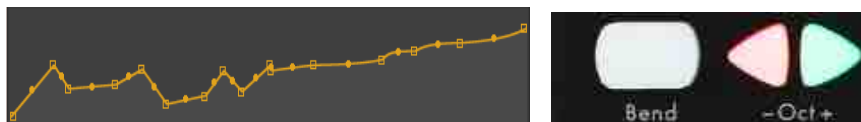


Figure 10. Courbe du *pitch bend* (à gauche) et boutons de contrôle sur **QuNexus** (à droite)

Le clavier **McMillen QuNexus** est équipé de touches MPE. Il a été utilisé pour déclencher des notes de C0 à B6 sur le clavier virtuel dans *Kontakt*. Les boutons « -OCT+ » (Figure 10, à droite) permet d’alterner ces différents groupes de sons. Selon la durée de pression (vitesse) exercée sur les touches, des sons à l’attaque brutale ou tenus sont générés. De plus, la sonorité de chaque son dépend de l’intensité de la pression appliquée. Chaque touche du clavier est également subdivisée en deux couches de notes distinctes. En jouant des nuances du *pianissimo* au *mezzoforte* sur une touche, la première couche sera activée, produisant un son neutre dans son état d’échantillonnage original. En revanche, en jouant du *mf* au *ff*, la deuxième couche pourra être activée, enrichissant le son avec un timbre filtré plus lumineux ou une réverbération prolongée. Le bouton *Bend* est configuré pour modifier la hauteur des notes (*pitch* en anglais), l’abaissant vers la gauche et l’augmentant vers la droite. En passant par diverses fonctions de transfert, il devient possible de faire glisser progressivement les sons, selon les intentions vers le sub-grave ou le sur-aiguë. *Kontakt* permet de personnaliser manuellement l’itinéraire du *pitch*. La figure 10 illustre une ligne brisée ascendante, différente d’une ligne droite, ce qui apporte davantage de caractère à la progression dynamique des hauteurs d’un son. Une remarque concernant la fonctionnalité du bouton *bend* : lorsque de larges courbes sont effectuées de gauche à droite, un vibrato serré peut se produire, modifiant le timbre d’un son tenu. Ce geste imite le *vibrato* sur un instrument à cordes : plus le mouvement est ample, plus le *vibrato* est accentué. Il est également possible de passer rapidement d’un *vibrato* à un autre, qu’il soit accéléré ou ralenti, ce qui enrichit considérablement l’expressivité du timbre.

4.3 Programmation

- Utilisation du **ROLI Lightpad Block**⁴² via Max/MSP

Le **ROLI BLOCK Lightpad** est un contrôleur MIDI adapté à la reproduction des sons d’impact grâce à sa capacité de capteur MPE. Sa surface tactile en silicone offre une sensibilité suffisamment expressive pour une utilisation gestuelle. Pour personnaliser l’instrument numérique selon les techniques de jeu spécifiques, l’outil de programmation utilisé était Max/MSP version 8.

⁴² **ROLI Lightpad Block** : un dispositif MPE (MIDI Polyphonic Expression) fabriqué par la société anglaise ROLI. Il fait partie de la gamme de blocs ROLI, qui peut se jouer indépendamment ou se connecter à d’autres blocs.

- Choix et adaptation des objets contrôlant le *Lightpad* à partir de Max/MSP:

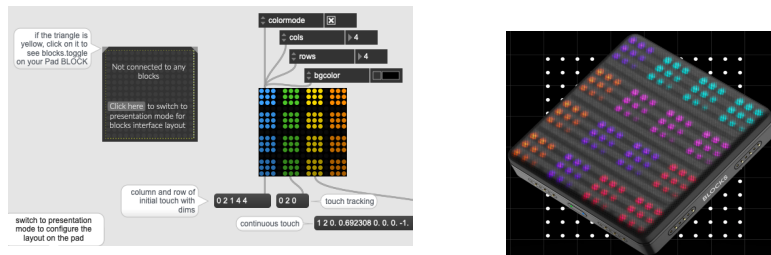


Figure 11. Les objets « blocks.pad » et « blocks.grid » (à gauche) et *Lightpad* (à droite)

Les deux objets, « blocks.pad » et « blocks.grid » (Figure 11), permettent de recevoir des données d'entrée provenant de la surface tactile du *Lightpad*. Il s'agit des différents paramètres de contrôle : tels que le type d'affichage, les coordonnées des zones de jeu, le réglage des pressions appliquées, les mouvements sur la surface (en XY), etc.

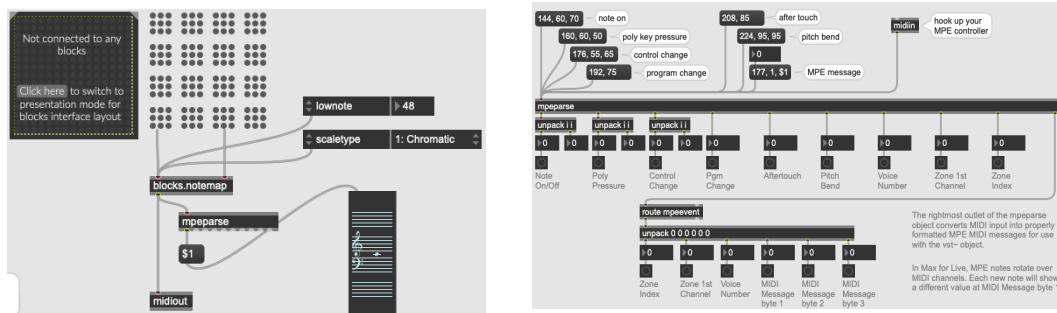


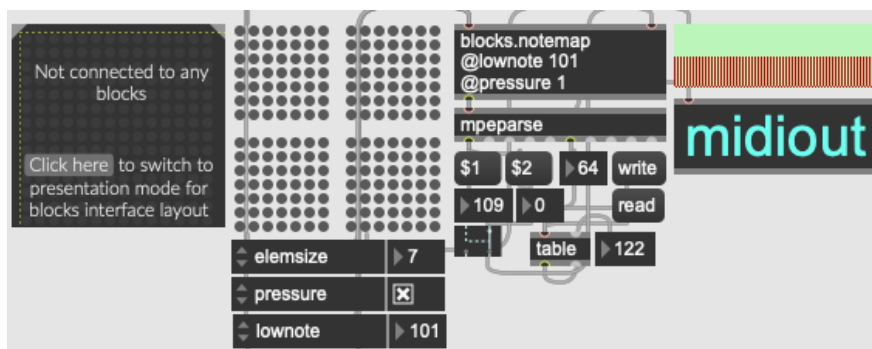
Figure 12. Les objets « blocks.notemap » (à gauche) et « mpeparse » (à droite)

L'objet « blocks.notemap » (Figure 12, à gauche) permet de transmettre les données gestuelles reçus du « blocks.grid ». L'objet « mpeparse » (Figure 12, à droite) peut traduire individuellement ces données MPE en MIDI standard afin de les connecter à un logiciel externe tel que *Kontakt*. Par défaut, un doigt appuyé et relevé sur le *Lightpad*, détermine la vélocité d'un *note-on* et *note-off* correspondants⁴³. Le mouvement de l'axe des X après la pression initiale peut être assigné à la modulation du *Pitch bend*⁴⁴. Afin d'optimiser un éventuel contrôle de déplacement sonore via *Lightpad*, le *pitch bend* a été assigné dans *Kontakt* au contrôle du panoramique des sons d'impact articulés, qui permet de projeter leur trajectoire dans l'espace de manière fluide et expressive.

- Assemblage des objets dans Max/MSP pour le contrôle de *Kontakt* via le *Lightpad*

43 **Note-on, note-off** : type de message MIDI qui indique le début et la fin de l'enfoncement d'une note.

44 **Pitch bend** : type de message MIDI permettant de modifier de manière continue la hauteur (*pitch* en anglais) d'une note jouée. Il simule le glissement ou la flexion de la hauteur, à la manière d'un *bend* sur une guitare ou d'un glissando sur un instrument à vent ou à cordes.



Fugure 13. Assemblage des objets dans Max/MSP

Le *Lightpad* a été divisé en quatre zones carrées, chacune dédiée à l'exécution d'un son d'impact articulé. Chaque carré peut déclencher un objet sonore avec une intensité variable (f ou p), en fonction de la pression exercée par le toucher. Les sons sont joués en boucles variées, soit intégralement soit partiellement en fonction de la durée de la note jouée. Lorsqu'un carré du *Lightpad* est maintenu enfoncé sans relâchement, un glissement du doigt en diagonale ou à l'horizontale permet de dessiner une trajectoire spatiale par le biais du panoramique. Pour des raisons d'efficacité et afin de simplifier la technique instrumentale pour les musiciens, l'« *aftertouch*⁴⁵ » du *Lightpad* n'a pas été pris en compte dans la programmation. Cette fonction permettra éventuellement d'ajouter une couche de contrôle supplémentaire, telle que le « *morphing spectral*⁴⁶», dans une future amélioration de la programmation.

- **Pure Data**

Lors de l'intervention au Collège Rostand, une problématique s'est posée : comment faciliter la démonstration des instruments numériques ainsi que les répétitions dans un contexte de sonorisation contraint. Afin d'optimiser l'efficacité de la diffusion sonore, un système nommé **Pré**, développé par le CIRM, a été expérimenté. Il s'agit d'un micro-ordinateur fonctionnant sous *Linux*, permettant l'exécution autonome de patches créés avec *Pure Data*. Une programmation spécifique a ainsi été mise en place pour les claviers MIDI, y compris le *QuNexus*, afin d'adapter l'interface aux exigences de la performance sur site.

La création ***Polysons Sonatine 0.0.6***, développée autour du système *Pré* et des dispositifs instrumentaux, a été réalisée avec la participation des collégiens. Il s'agit d'une pièce mixte,

45 **Aftertouch** : message MIDI généré après qu'une touche ait été enfoncée, lorsque le musicien maintient la pression sur cette touche. Le *Lightpad* est équipé de l'*Aftertouch* polyphonique, un type de contrôle individuel qui permet de gérer de manière indépendante la pression exercée sur chaque note jouée.

46 **Morphing spectral**: technique de traitement audio qui consiste à transformer progressivement le spectre fréquentiel d'un son en un autre.

combinant une musique acousmatique fixée sur support et une performance scénique dans laquelle les élèves, en tant qu'interprètes, jouent les dispositifs instrumentaux sur scène (voir Annexe).

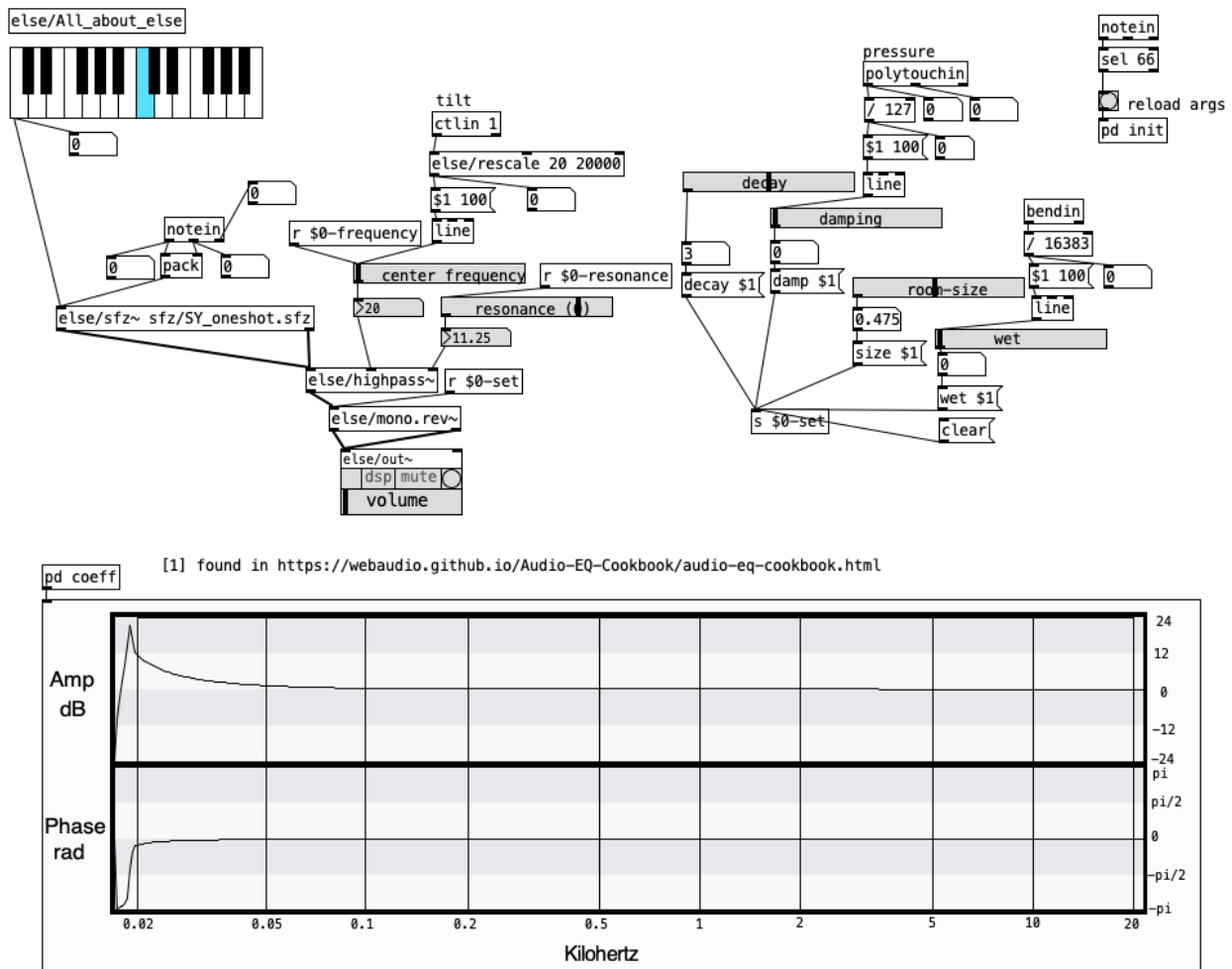


Figure 14. Programmation dans *Pure Data*

La librairie principale dans ce patch (Figure 14) est « else ». L'« else » consiste à générer les modules de signaux audios et à connecter les autres objets d'effets sonores. Par exemple, l'« else/sfz~ » est un synthétiseur d'échantillonnage qui permet de lister et de programmer des sources sonores sur un un clavier MIDI. Comme dans *Kontakt*, les sons sont configurés et modifiables par les différents gestes sur les touches du *QuNexus*. Le patch intègre l'objet « rev~ », qui gère une réverbération paramétrique incluant, par exemple, la taille de la chambre acoustique (affectant la densité et la durée de la réverbération), le délai initial, ainsi que le « damping ». Ce paramètre correspond à la réduction progressive des hautes fréquences dans le temps, qui stimule l'absorption naturelle du son par les matériaux d'une pièce. Un taux de *damping* élevé produit un son plus mat et plus court, tandis qu'un taux faible permet une réverbération plus prolongée.

- **RNBO** pour *Raspberry Pi 4*

A la fin de 2024, Max/MSP a ajouté un nouvel objet **RNBO**, qui est une bibliothèque et une chaîne d'outils capables d'exporter des patches de type Max sous forme de code portable, et de compiler directement ce code pour des cibles telles qu'un VST (*Virtual Studio Technology*), ou un *Raspberry Pi* (un nano-ordinateur sans écran, de la taille de 85mm x 56mm). L'intégration de RNBO avec le Raspberry Pi, permet de modéliser un dispositif à faible coût pour faciliter la création musicale. A propos de l'exploitation du potentiel dans le cadre d'un projet de portage technique, Gael Navard a proposé une collaboration à la programmation de patches RNBO sur ce nouveau dispositif.

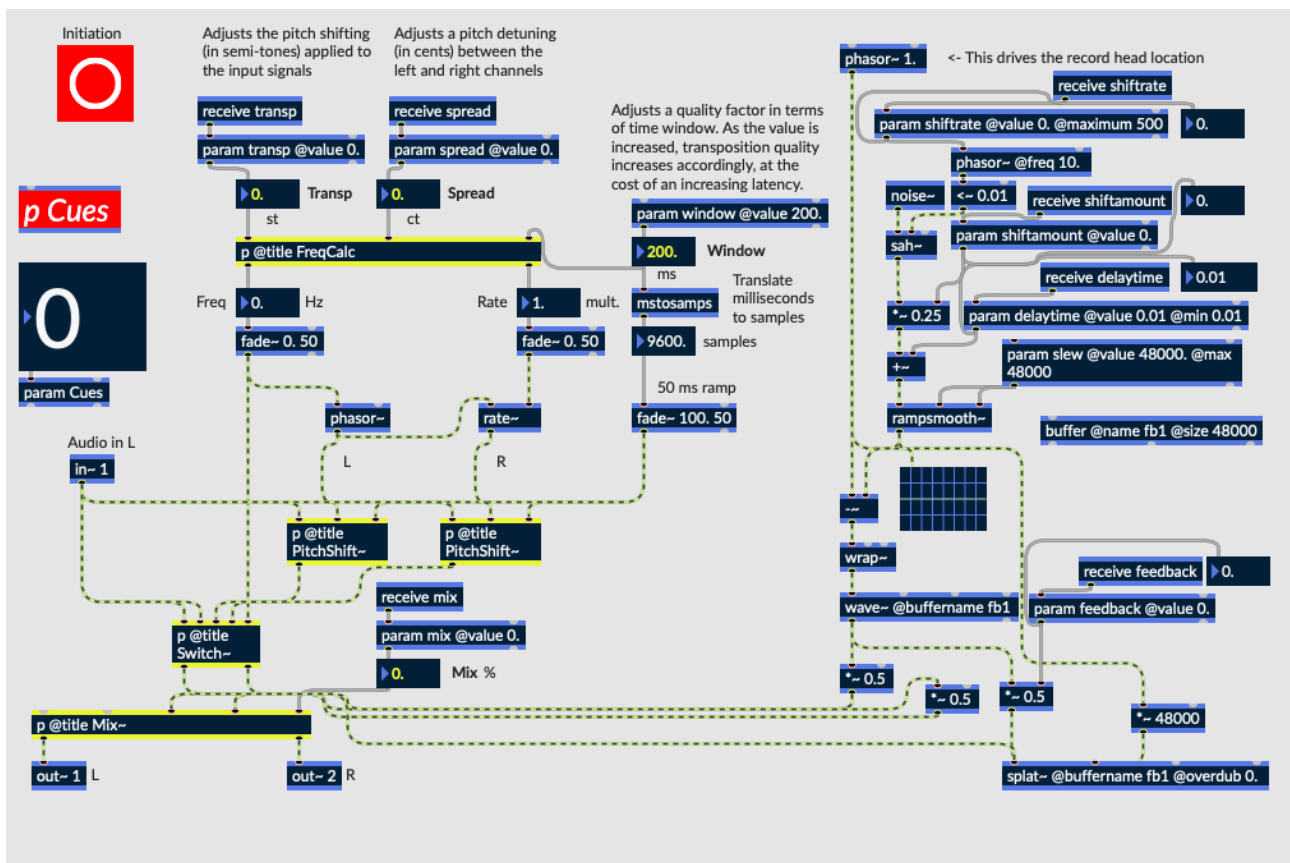


Figure 15. Patch RNBO principal pour le traitement sonore de la flûte

Bien que RNBO et Max/MSP partagent un langage de programmation commun, certains objets manquent pour permettre une transition fluide entre les deux environnements. Cette difficulté implique la nécessité d'identifier des objets RNBO de substitution, en évitant de s'engager dans des considérations de programmation trop complexes. Dans le cadre de la création de la pièce mixte *Syartic(ulation)*, le traitement en temps réel du son d'une flûte capté par microphone a nécessité la mise en place d'un dispositif autonome, qui fonctionne sur *Raspberry Pi* équipé de la carte *Pisound* (carte d'extension audio offrant une restitution sonore haute fidélité et une faible latence). Un patch

RNBO (Figure 15) a ainsi été programmé dans Max/MSP afin de répondre à ces exigences techniques.

Ce patch RNBO intègre plusieurs modules de traitement en temps réel, chacun joue un rôle spécifique dans la transformation du son de la flûte. Le module de « *feedback* » génère une rétroaction du signal traité, produisant un effet de résonance et de prolongement spectral. Le délai permet la répétition du signal avec un certain temps de latence, stimulant des effets d'écho. L'harmoniseur applique une ou plusieurs transpositions harmoniques au signal original, modifiant le timbre de la flûte et lui conférant une couleur proche de celle d'une flûte ethnique en bambou. Le « *pitchshifter* » (transpositeur de hauteur) modifie la fréquence fondamentale du signal sans en altérer la durée. Sur le plan perceptif, il peut évoquer l'effet *Doppler*, dans lequel la hauteur d'un son semble varier en fonction du mouvement relatif entre la source sonore et l'auditeur (hausse de la fréquence à l'approche, diminution à l'éloignement).



Figure 16. Préréglages d'effets pour le traitement en temps réel du son capté de la flûte

Une fois que les effets sont prêts, il est souhaitable de mettre en place un système de déclenchement des préréglages, par exemple via des messages MIDI (*note-on* et *note-off*) des interrupteurs. Un inconvénient réside dans le fait que RNBO, étant basé sur l'objet « *gen~* », ne permet pas l'envoi direct de listes de messages, contrairement aux fonctionnalités de gestion de listes disponibles dans Max/MSP. Il est obligé de spécifier manuellement chaque envoi par l'objet « *send* » associé à une boîte de nombre paramétrique. La figure 16 illustre 18 préréglages de traitement sonore, chacun

défini par un ensemble de paramètres et de valeurs numériques spécifiques, prêts à être transmis sous forme de messages de commande.

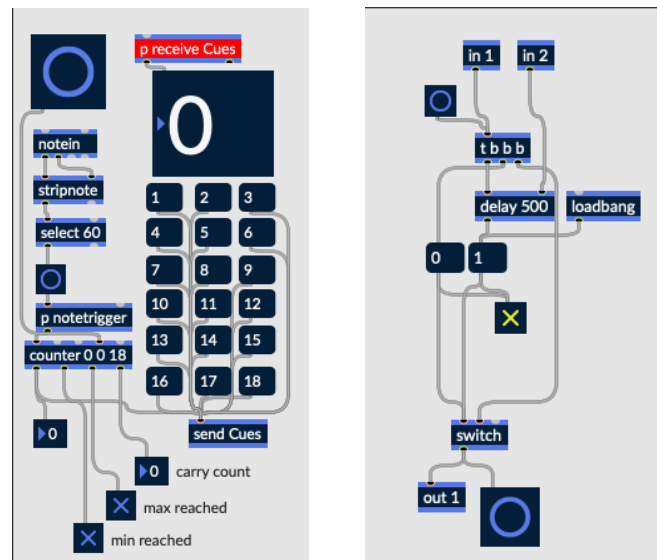


Figure 17. Patch de commande des préréglages (à gauche) et sous-patch pour éviter les sauts involontaires (à droite)

Les messages de commande sont générés et transmis sous forme de « note » MIDI vers le patch de contrôle, conçu comme une télécommande (Figure 17, à gauche) comportant 18 "boutons", chacun correspondant à un préréglage contenant un ensemble de valeurs de paramètres d'effets. En parallèle, un contrôle en temps réel de ces paramètres tels que le niveau de l'intensité du *pitchshift* ou le *feedback* doit être prévu, à l'aide de contrôleurs MIDI (CC) ou de messages **OSC**⁴⁷. Ce contrôle dynamique permet d'adapter les traitements sonores en fonction du jeu instrumental de la flûtiste et des intentions de l'écriture musicale, assurant une cohérence expressive entre le geste interprétatif et la transformation du signal. Dans la création de *SYartic(ulation)*, ce patch RNBO a été contrôlé par deux pédales : l'une de type interrupteur, utilisée pour l'envoi de commandes (notes MIDI), et l'autre de type expression, permettant un contrôle linéaire du dosage des effets de traitement sonore. Il convient de noter que le musicien peut de manière inconsciente appuyer deux fois successivement sur la pédale de commande. Afin d'éviter ce geste involontaire « *double click* » qui peut entraîner le saut d'un préréglage, il est indispensable d'intégrer un sous-patch de protection (Figure 17, à droite). Cela insère par exemple un retard de 500 millisecondes avant d'autoriser un nouveau déclenchement. Si deux activations successives ont lieu dans cet intervalle, seule la première sera prise en compte et la seconde ignorée. Par conséquent, les deux appuis seront traités comme une seule commande.

⁴⁷ OSC : *Open Sound Control* en anglais, un protocole de communication entre un contrôleur externe (comme un smartphone, une tablette ou un autre ordinateur) et le patch de traitement sonore.

- Un autre exemple lié à la programmation : le projet de portage programmé dans Max/MSP de *Liens*, une œuvre mixte de Michel Pascal

Liens se propose de célébrer l'union de l'air et de la machine, du sans âge et du très récent. [...] Liés par l'écriture, l'instrument et le processeur numérique suivent des pistes communes qui sinuent, glissent, vibrent et s'entrelacent. Espaces fictifs où le trombone se déplie, s'enfle, se tord, se dédouble, découvre d'étranges extensions hybrides, de nouvelles résonances instrumentales, comme une mémoire enfouie du métal, de l'eau, de cordes tendues, de pierres très anciennes au son très actuel.⁴⁸

Liens est une œuvre mixte pour trombone et électronique composée par Michel Pascal au sein du Studio Instrumental, créée par Barrie Webb (tromboniste anglais), à la commande du Studio Es de Milan dans le cadre de la création *Teatro all Scala 1992*. Le portage de *Liens* avec des outils modernes montre comment les technologies actuelles permettent de revisiter des dispositifs emblématiques tels que l'Eventide H3000-SE, tout en ouvrant de nouvelles perspectives d'interprétation.

Selon Michel Pascal, le compositeur, cette composition avait pour objectif de permettre une interprétation instrumentale intégrant un dispositif léger de traitements numériques en temps réel. À l'aide d'un « *footswitch* » (pédale d'interrupteur) et un « *foot-control* » (pédale de contrôle d'effets), relié à un ordinateur portable, l'instrumentiste pouvait travailler la partition et répéter de manière autonome.

Dans *Liens*, le traitement électronique s'appuie sur l'Eventide H3000-SE Ultra-Harmonizer, un processeur d'effets numériques emblématique des années 1980. Reconnu pour ses capacités d'harmonisation, délai stéréo précis, filtres, réverbérations, effets de modulation avancés, vocodeur, modélisateur de cordes, phaser et échantillonneur, ce dispositif offrait également l'avantage d'un contrôle complet de l'ensemble des paramètres via MIDI en temps réel, sans introduire de clics numériques dans le signal.

Cinq effets principaux de l'Eventide ont été exploités dans la pièce : « *Layered Shift* » permet de superposer plusieurs couches d'harmonisation pour enrichir la texture sonore. « *Diatonic Shift* » offre une harmonisation précise en respectant les intervalles diatoniques d'une tonalité donnée. « *Ultra-Tap* » permet de créer des effets de délai complexes avec de multiples « *taps* » pour des rythmiques et des ambiances riches. « *Multi Shift* » applique plusieurs décalages de hauteur simultanés. « *Reverse Shift* » produit des effets de lecture inversée.

Bien que les dispositifs tels que l'Eventide H3000-SE soient parfaitement adaptés pour interpréter en temps réel des pièces mixte (instrumentale et électronique), il est incontournable d'explorer de

48 Le texte original de Michel Pascal dans la présentation du *LIENS, pour trombone et électronique*. 1992.

nouvelles approches via la programmation, qui s'avère souvent plus flexible et efficace. En tant qu'environnement de programmation graphique, Max/MSP constitue un outil virtuel idéal pour simuler les algorithmes de ces dispositifs physiques.

Par exemple, pour simuler l'effet « *Layered Shift* », l'approche proposée consiste à manipuler simultanément plusieurs versions d'un son de trombone en entrée, en modifiant la hauteur et en introduisant des décalages temporels subtils entre ces versions. L'objectif est de recréer l'effet de superposition de sons transposés à l'aide des objets « *gizmo~* », « *tapin~* » et « *tapout~* », « *transratio* », etc.

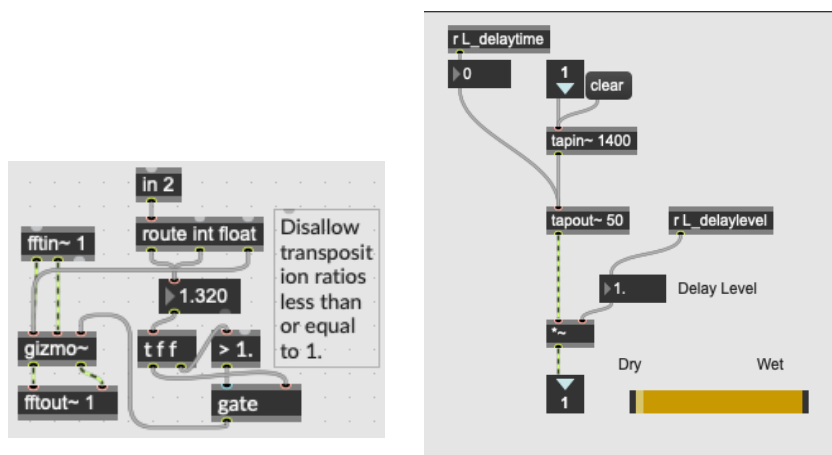


Figure 18. Les objets « *gizmo~* » (à gauche), « *tapin~* » et « *tapout~* » (à droite)

Le « *gizmo~* » (Figure 18, à gauche) implémente un transpositeur de hauteur dans le domaine fréquentiel. Il fonctionne en analysant les bandes de fréquence d'un signal transformé via une FFT⁴⁹. Il identifie ensuite les pics du spectre, correspondant aux fréquences dominantes du son, et les déplace le long de l'axe des fréquences pour effectuer la transposition sonore. »⁵⁰ Plusieurs « *gizmo~* » superposés permettent d'appliquer un décalage des hauteurs différentes au signal d'entrée.

Le « *gizmo~* » peut être réglé par un ratio de transposition. Lorsque le ratio est fixé à 1, cela signifie qu'il n'y a pas de transposition. Un ratio supérieur à 1 correspond à une transposition ascendante, tandis qu'un ratio inférieur à 1 correspond à une transposition descendante. Dans mon diagramme dessus à gauche, le ratio est réglé à 1,320 (soit 480 cents⁵¹, ce qui correspond à un réglage indiqué dans l'Eventide, environ 4,8 demi-tons⁵²). Seule une augmentation de la hauteur a été autorisée, conformément à la consigne technique spécifiée dans *Liens*.

49 **FFT** : « *Fast Fourier Transform* en anglais », décompose le signal audio en ses composantes fréquentielles, représentées sous forme de bandes de fréquence discrètes.

50 Ce texte est une traduction issue du manuel en anglais de Max/MSP.

51 $c=1200 \cdot \log_2(r)$. c : le nombre de cents. r : le transposition ratio.

52 $n=12 \cdot \log_2(r)$. n : le nombre de demi-tons. r : le ratio de transposition.

Les objets « tapin~ » et « tapout~ » (Figure 18, à droite) sont utilisés pour gérer les copies du signal audio avec des décalages temporels. Le « tapin~ » enregistre le signal d'entrée sur une durée donnée (par exemple, 1400 ms), tandis que les objets « tapout~ » permettent de lire ces versions enregistrées après des décalages temporels spécifiques (par exemple, 50 ms). Ce processus de « routage temporel » permet de superposer différentes versions du signal audio à des instants légèrement décalés, créant ainsi un effet d'échelles non tempérées avec parfois profondeur et de texture. Les copies du signal sont ensuite transposées à l'aide de « gizmo~ », ce qui renforce l'effet de superposition harmonique.

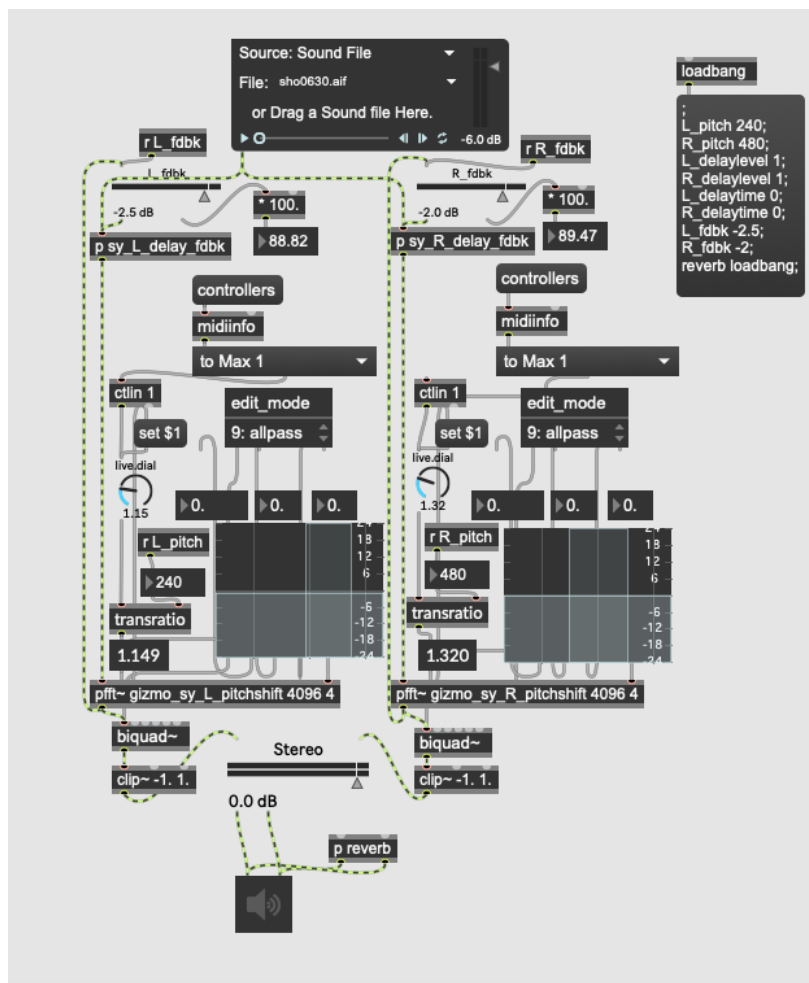


Figure 19. Patch de simulation « Layered Shift » d'Eventide

Le patch intégral (Figure 19) constitue un prototype de simulation de l'algorithme « Layered Shift ». Une liste de données est prête à être configurée pour les moments de « Cue » (moments de repères ou de déclenchement dans un morceau ou une performance), pouvant être assignés et contrôlés par une pédale interrupteur. Des potentiomètres rotatifs MIDI, des pédales de contrôles ou d'autres interfaces MPE peuvent également être pour paramétrer différents éléments, tels que le ratio de transposition, les filtres, la réverbération, le délai, etc. Cette option de contrôle en temps

réel renforce l'expressivité du musicien, agissant comme une extension instrumentale qui enrichit l'interprétation.

4.4 Optimisation des dispositifs programmés

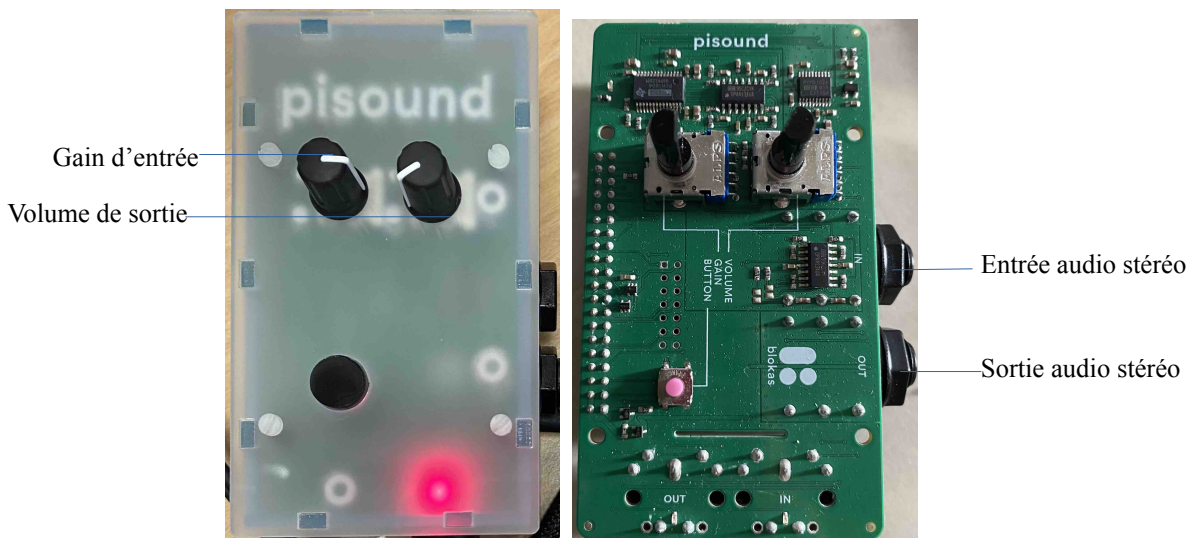


Figure 20. Pisound (connecté à *Raspberry Pi*)

L'objectif de l'utilisation du *Raspberry Pi* associé à *Pisound* (Figure 20) est de concevoir un dispositif autonome, pouvant fonctionner soit comme un instrument numérique contrôlé en MIDI permettant de jouer des fichiers audio de manière expressive, soit comme une extension de traitement sonore en temps réel. Ce dernier cas permet par exemple de transformer la flûte en un instrument augmenté⁵³, élargissant ainsi les possibilités de jeu de l'instrument acoustique.

NB : Broche Analogique 0 se connecte au curseur central du potentiomètre rotatif

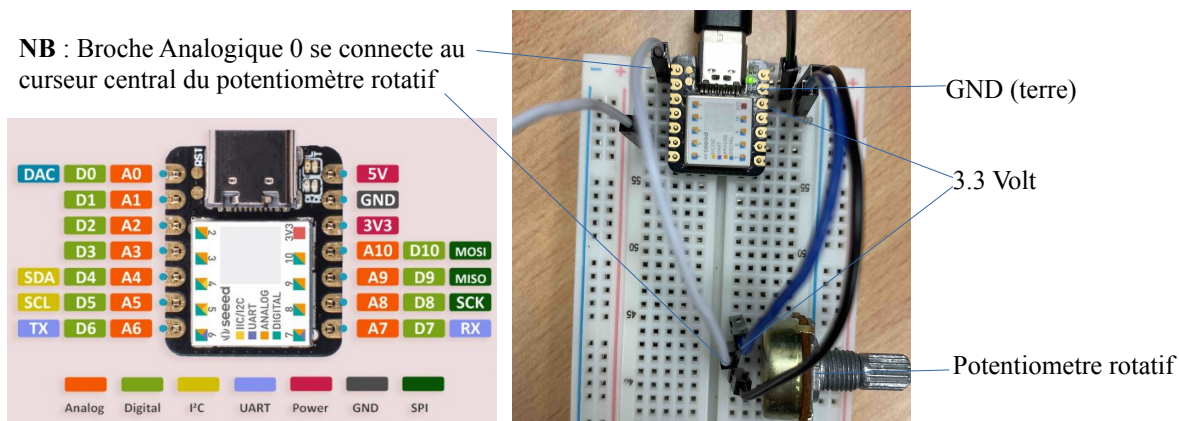


Figure 21. Câblage *Seeeduino XIAO SAMD21*

53 **Instruments augmentés** : « [...] des instruments acoustiques auxquels sont intégrés des capteurs, afin de transmettre en temps réel des paramètres gestuels...» <https://www.ircam.fr/projects/pages/instruments-augmentes>
Consulté le 20 juin 2024.

Dans une optique d'économie, de compacité et de portabilité, le recours à un microcontrôleur compact tel que le *Seeeduno XIAO SAMD21* (Figure 21), représente une alternative plus cohérente que l'utilisation d'un contrôleur MIDI conventionnel équipé d'entrées pour pédales analogiques, souvent plus onéreux ou encombrant. Le SAMD21 constitue une solution légère, économique et efficace pour la conception d'un dispositif autonome. Grâce à une programmation relativement simple utilisant la bibliothèque « *Control Surface* » pour **Arduino**⁵⁴, ce microcontrôleur peut être configuré comme une interface MIDI USB « *class-compliant* »⁵⁵, capable de recevoir des données analogiques issues de pédales d'expression (via potentiomètre) ou de pédales interrupteurs. Ces données sont ensuite converties en messages MIDI et transmises au *Raspberry Pi*, pour un traitement sonore à l'aide d'environnements comme Pure Data ou de patches RNBO exportés depuis Max/MSP. Sa taille réduite et ses capacités de communication en font une plateforme adaptée à l'intégration dans un boîtier personnalisé destiné à accueillir ces deux types de contrôleurs. La figure 21 illustre un câblage réalisé sur un circuit imprimé. Il est recommandé d'effectuer un test préalable à l'aide de pinces crocodile, entre reliant le microcontrôleur SAMD21 à un potentiomètre rotatif simulant une pédale d'effet générant des messages MIDI CC.



Figure 22, Boîtier et le système de pédalier (à droite)



Figure 23, Position du système de pédalier (à gauche) au sein de l'ensemble des dispositifs instrumentaux

54 **Arduino** : plateforme open-source de prototypage électronique basée sur des microcontrôleurs programmables.

55 **Class-compliant** : standard de communication. Un appareil class-compliant est reconnu automatiquement par les systèmes d'exploitation compatibles tels que MacOS et Windows. Il fonctionne immédiatement une fois connecté.

La figure 22 présente le résultat de ce travail de conception, comprenant une connectique USB-C, un boîtier intégrant le microcontrôleur SAMD21, une entrée destinée à une pédale de contrôle d'effets permettant de doser le niveau de traitement sonore (pédale longue), ainsi qu'une entrée pour une pédale interrupteur commandant les préréglages des traitements sonores (pédale courte). Ce prototype inclut également le système complet de pédalier avec ces deux types de pédales. Par ailleurs, la figure 23 illustre la position du système de pédalier au sein de l'ensemble des dispositifs instrumentaux. L'instrumentarium comprend ainsi trois postes : un poste autonome de flûte augmentée (à gauche) et un poste d'un instrument numérique contrôlé par ordinateur, le *SYartic* (à droite), composé d'un clavier QuNexus et d'un contrôleur Touché. Les trajectoires des deux sources sonores ont été diffusées par un dispositif de type *joystick*, le *Gamettrak* (au centre), équipé de deux manettes, permettant un contrôle gestuel de la spatialisation.

4.5 Intégration des dispositifs instrumentaux au dôme sonore

Un dôme sonore est une structure hémisphérique équipée de haut-parleurs de même nature technique, permettant une projection spatiale du son et offrant une expérience d'écoute immersive à l'auditeur. Ce dispositif s'avère particulièrement adapté à l'interprétation de la musique acousmatique, dans la mesure où sa capacité de spatialisation tridimensionnelle renforce la perception des espaces sonores. Une question se pose: si le dôme ne servait pas uniquement à projeter le son, mais devenait également un « instrument » de trajectoire, à l'instar d'un instrument acoustique ou numérique ? Un instrument dont l'interprétation serait perceptible visuellement, permettant à l'auditeur de suivre les orientations des trajectoires dans l'espace créé. Dans ce cas, l'interprétation de trajectoire devrait-elle être considérée également comme un instrument de musique, tout comme un instrument acoustique ou numérique ? La personne en charge de la diffusion ne serait-elle pas seulement un RIM (réalisateur en informatique musicale), mais également un musicien pleinement impliqué dans l'interprétation de l'œuvre ? C'est dans cette perspective qu'est née l'idée de composer une pièce en *live électroacoustique* spatialisée : le cas de la création de *SYartic(ulation)*.

Cette création a été réalisée dans le cadre de l'examen de fin de cursus du Master Arts parcours Musique, en collaboration avec le Conservatoire à Rayonnement Régional de Nice. Elle a été présentée dans le « Micadôme⁵⁶ », un dôme sonore constitué de 32 haut-parleurs de caractéristiques

56 **Micadôme** : un dôme sonore du projet *Musique Immersive Côte d'Azur*, créé par Michel Pascal et Gael Navard au sein du Conservatoire de Nice. <https://studio-instrumental.fr/recherche/1344-2/>
<https://studio-instrumental.fr/technologie/micadome/> Consulté le 26 mai 2025.

techniques homogènes. Ce système est piloté par le logiciel de spatialisation « SpatGris⁵⁷ », développé par le Groupe GRIS au sein de la Faculté de musique de l'Université de Montréal.

L'interprétation des trajectoires à l'aide du dispositif *Gamettrak* a été réalisée en mode *dôme*, ce qui signifie que les deux sources sonores évoluent uniquement à la surface de l'hémisphère sonore, sans traverser l'intérieur du dôme. Ce mode présente l'avantage de permettre à l'auditeur de percevoir des trajectoires claires et lisibles, notamment en ce qui concerne les orientations dans l'espace. Les archétypes énergétiques (Annette Vande Gorne, 2002), envisagés comme figures d'espaces⁵⁸ — telles que la spirale, orientée dans le sens horaire ou antihoraire — ont servi de référence pour dessiner précisément les trajectoires des objets sonores, renforçant ainsi leur perception géométrique. La forme en spirale s'avère également compatible avec le traitement de type *pitch shifting* appliqué à la flûte, accentuant l'effet Doppler. Cet effet a été exploré notamment lors de l'exécution gestuelle au *Gamettrak* pendant l'interprétation (voir à ce sujet la notice et notation de *SYartic(ulation)*).

$$\text{Latence totale (en secondes)} = \frac{\text{Taille du buffer}}{\text{Fréquence d'échantillonnage}}$$

D'un point de vue technique, une contrainte majeure a été rencontrée lors de l'interprétation : les deux sources sonores présentaient déjà une certaine latence — d'une part en raison du traitement en temps réel de la flûte augmentée, et d'autre part, en raison de la latence inhérente à la sortie audio du dispositif *SYartic*. L'interprétation des trajectoires par le *Gamettrak* a entraîné une accumulation de ces latences, rendant le décalage perceptible.

Afin de réduire cette latence, une solution a consisté à abaisser la taille du buffer à 128 échantillons, malgré la recommandation du logiciel SpatGRIS de conserver une taille de 256 pour assurer une meilleure stabilité. Cependant, cette réduction du buffer a engendré une conséquence notable : dès lors que les trois systèmes (flûte augmentée, *SYartic*, et *Gamettrak*) fonctionnaient simultanément, un léger *buzz*⁵⁹ sonore apparaissait, probablement en raison de la surcharge du processeur audio et de la diminution de la marge de sécurité du traitement en temps réel.

Il est également possible que l'interface audio **MOTU UltraLite**, utilisée pour l'entrée directe des deux sources audio, ait contribué à la présence de parasites, en raison de la nature de ses entrées ligne. Étant donné que les deux sources fonctionnent en sortie asymétrique, il aurait été préférable de symétriser les signaux avant leur entrée dans l'interface, notamment par l'utilisation de boîtiers

57 <https://gris.musique.umontreal.ca/fr/#download-1> Consulté le 26 mai 2025.

58 MERLIER, Bertrand. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*. Delatour France, 2006. pp.87-89

59 **Buzz** : des clics et bourdonnements dus à une surcharge du processeur audio.

DI⁶⁰ passifs ou actifs. Toutefois, une telle solution impliquerait l'ajout d'un module supplémentaire au dispositif, ce qui contredirait la conception initiale de l'instrumentarium, pensée pour rester compact et facilement transportable.

Malgré cette imperfection technique, les retours d'écoute ont indiqué qu'elle n'avait pas compromis de manière significative la qualité de l'expérience immersive. Ce défaut a été dissimulé par la densité des textures sonores et par certains traitements tels que l'effet « robotique », a généralement été perçu comme une composante intégrée de l'esthétique sonore de la pièce.

4.6 Mixité entre instrument numérique et support à l'Acousmonium

Une de mes compositions mixtes, *YSpace In G Minor*, a été conçue comme une traversée imaginaire de différents espaces planétaires, où les repères auditifs et les perceptions sensorielles sont profondément altérés. Le temps y est étiré, tantôt ralenti, tantôt accéléré, et les extrêmes fréquentiels — graves et aigus — s'explorent aux limites des seuils d'audibilité. Trois espaces principaux sont présentés dans le support sonore de la pièce :

Les fréquences sub-grave représentent l'espace du noyau terrestre. Par le biais d'un instrument numérique, il est possible d'explorer différentes hauteurs et épaisseurs de la masse des basses fréquences, suggérant ainsi des mouvements souterrains tels que l'activité magmatique ou le diastrophisme. Les fréquences medium décrivent l'atmosphère. En y introduisant une composante aiguë et en atténuant les sub-graves, la masse semble s'alléger, créant une métaphore sonore de la raréfaction de l'air et de la diminution de la gravité. Le dosage subtil de mix au doigt et à l'oreille permet d'évoquer des sensations de flottement ou de suspension. Les fréquences aiguës intermittentes dessinent un arrière-plan stellaire aux allures extraterrestres. Grâce aux modes de jeu, des textures sonores gelées glissent au ciel, tandis que des impacts se déplacent transversalement, créant un paysage sonore⁶¹ surréaliste dans lequel des créatures anonymes se faufilent à travers l'espace.

Les sons produits par l'instrument numérique dans cette pièce sont conçus en stéréo. Ce format ne pose pas de difficulté particulière en écoute binaurale, notamment au casque. En revanche, dans le contexte d'une performance en *live*, un ajustement précis du dispositif de diffusion sur le plateau s'avère nécessaire afin de garantir un contrôle efficace des trajectoires panoramiques par l'instrumentiste. Ce réglage dépend à la fois des dimensions de la salle et de la position de

60 **Boîtier DI** : dispositif permettant de convertir un signal asymétrique (souvent sujet aux interférences et à la perte de qualité sur de longues distances) en signal symétrique, mieux adapté aux entrées professionnelles d'une interface audio ou d'une console.

61 Paysage sonore : *soundscape* en anglais, un terme développé par le musicologue canadien R. Murray Schafer.

l'interprète dans l'espace scénique, des paramètres déterminants pour assurer une perception claire de la spatialisation en situation de concert. lors de l'interprétation de la pièce aux Journées nationales de la musique électroacoustique (JNME), dans un auditorium aux caractéristiques très différentes de celui du conservatoire de Nice, la sensation d'immersivité s'est révélée atténuée. La spatialisation conçue en stéréo perdait en précision, et la trajectoire devenait moins perceptible. Par ailleurs, une erreur de mixage survenue pendant la représentation a entraîné une confusion entre les éléments issus du support fixe et ceux joués en direct. De nouvelles questions ont émergé : Devrait-on remixer le support en multi-pistes pour augmenter la perception de l'immersivité pour la salle ? Conserver une stéréo sur le plateau pour que l'instrument joue des trajectoires claires, localisées autour du point d'émission de l'instrumentiste ? Organiser un mixage spécifique de retours pour le musicien, afin que celui-ci perçoive plus clairement la séparation entre ce qu'il joue et ce qui provient du support, tout en conservant une bonne sensation d'immersivité personnelle ?

4.7 Un autre exemple de recherche sur l'instrument augmenté

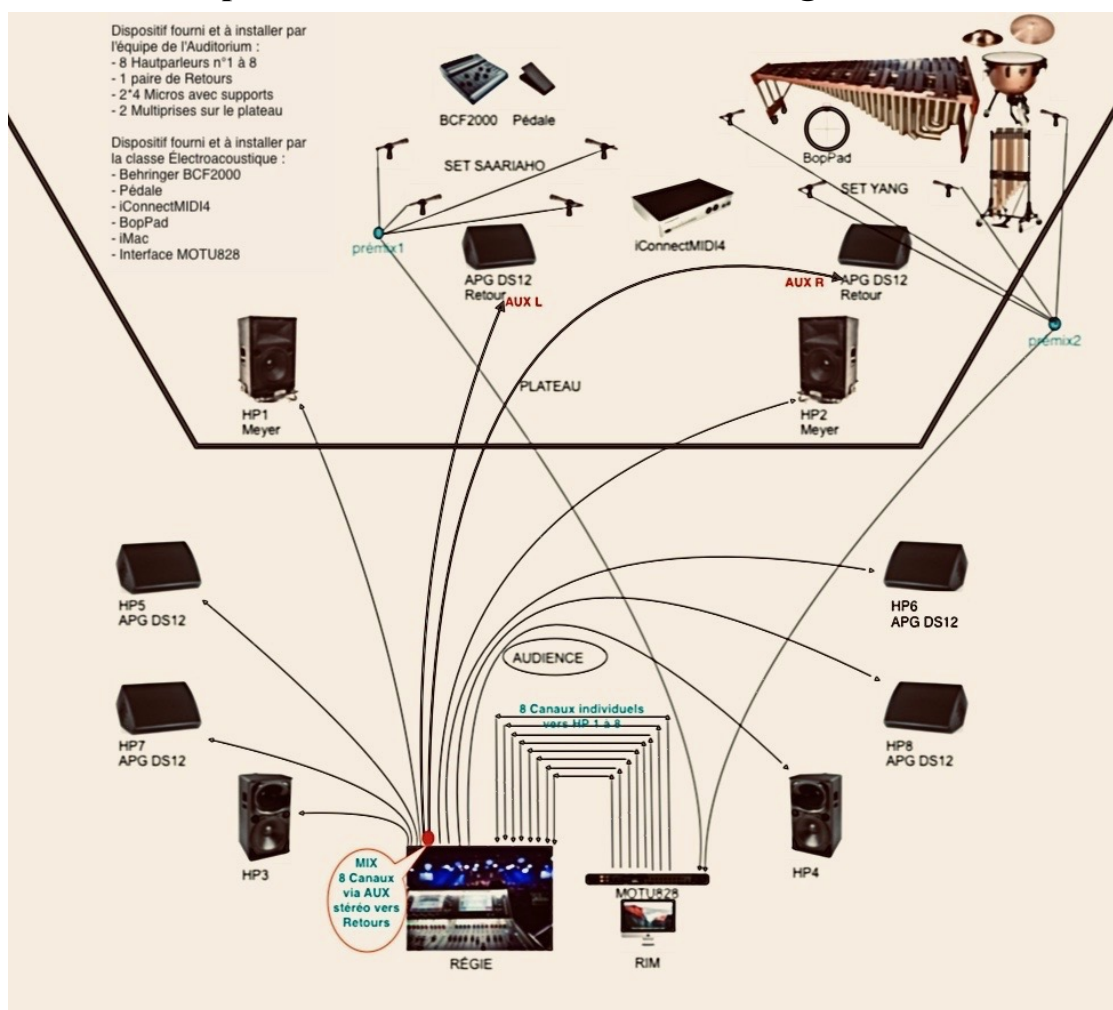


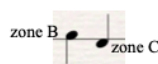
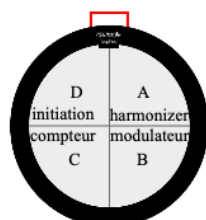
Figure 24. Dispositif dans l'Acousmonium pour le Marimba augmenté

Le travail autour de l'instrument augmenté vise à articuler un instrument acoustique avec des dispositifs électroacoustiques. Cette fusion permet d'étendre les fonctionnalités et les capacités d'expression de l'instrument acoustique. Elle ouvre de nouvelles possibilités d'interprétation pour les instrumentistes, sans altérer la maîtrise de leur technique instrumentale. Cela représente également un élargissement du répertoire pour les musiciens issus de la tradition classique.

À titre d'exemple, une pièce mixte intitulée *Cycle des quartes* a été composée dans le cadre d'une commande pédagogique. Écrite pour un set de percussions solo, cette pièce repose sur la captation des sons acoustiques à l'aide de microphones, avec un traitement sonore en temps réel. Le percussionniste joue principalement du marimba, avec le **BopPad**⁶² il déclenche des préréglages d'effets qui modifient les sons instrumentaux et traités en temps réel dans un patch Max/MSP. Le spectateur peut ainsi suivre les gestes du percussionniste, entendre les sons de l'instrumentarium et comprendre les transformations sonores qui en résultent. Dans cette pièce, le dispositif numérique ne se limite pas à un simple contrôleur MIDI ; il est conçu comme un véritable instrument, destiné à

INSTRUMENTS

- 1 Timbale grave
- 1 Cymbale chinoise
- 1 Crotales
- 1 Cloche tubulaire en Do
- 1 Marimba 5 octaves
- 1 BopPad dont les zones A,B,C,D sont indiquées suivantes



VST Plugin : GRM PitchAccum Stereo (preset 5,6,10)

Les mesures dont la durée est indiquée en secondes sont sans tempo.

Les quinze "Cues" sont indiqués dans l'ordre. Ils servent aux déclenchements des traitements électroniques en temps réel.

A la fin de cette pièce, 30 secondes d'improvisation aux BopPad zone B et Marimba, sont laissées à la libre interprétation du percussionniste.

Figure 25. Marimba augmenté

transformer les sons produits par le musicien. L'ensemble de percussions y est ainsi envisagé comme un générateur de matières sonores, que le traitement numérique vient enrichir et prolonger. Parallèlement, comme illustré dans la figure 24, les haut-parleurs disposés autour du set de percussion jouent un rôle similaire à celui d'un orchestre, dans l'esprit de la musique acousmatique. L'ensemble du dispositif peut ainsi être considéré, à la manière classique, comme une sonate pour marimba augmenté (Figure 25).

62 **Keith McMillen BopPad** : un contrôleur MIDI (Notes et CC) de percussion dont la surface est divisé en 4 zones programmables, sensibles au toucher et à la pression.

V. AMÉLIORATION DE LA NOTATION

5.1 Source d'inspiration pour la notation mixte

Figure 26. Extrait de la partition de *Figures de Rhétorique* de Robert Normandeau

Pour une interprétation des pièces mixtes, il est important de fournir une partition au musicien soliste, qui intègre à la fois le jeu instrumental sur scène et les sons joués sur le support (Acousmonium). La relation entre la « bande » et l'instrument est parfois complémentaire. Par exemple, dans la pièce [Figures de Rhétorique](#) (Figure X) de Robert Normandeau⁶³, la partie piano a une écriture semi classique avec un texte précisant les techniques. Au-dessus de cela, la « bande » indique simplement des durées chronométriques (01'40'') et la forme d'onde des pistes gauche et droite. Les gloses interlinéaires tel que « Pléonasmе » « Oxymore » déterminent les relations à réaliser entre piano et sons fixés.

Figure 27. Extrait de la partition de *Mimetismo* de Stéphane Roy

Dans la pièce [Mimetismo](#) (Figure 27) de Stéphane Roy⁶⁴, la « bande » joue un rôle aussi important que la partie de guitare⁶⁵. Les icônes représentent les différents types d'objets sonores, les notes s'intègrent au graphique en suivant la morphologie des objets sonores.

63 Robert Normandeau : compositeur canadien, professeur à l'Université de Montréal.

64 Stéphane Roy : compositeur et musicologue canadien.

65 « La guitare abandonne son rôle traditionnel de soliste...la similitude des timbres amalgame la sonorité de l'instrument et celle de la bande » texte originel de *Mimetismo*.

5.2 Notation de trajectoires spatiales

CRITÈRES de perception musicale	Qualification (2-3) Évaluation (4-9) des	1	2	3	ESPECES (site et calibre des dimensions du champ musical)				8	9
		TYPES	CLASSES	GENRES	HAUTEUR		INTENSITÉ		DURÉE	
		rappel typo-morphologique	morphologie musicale	caractérogic musicale	SITE TESSITURE	CALIBRE ÉCART	SITE POIDS	CALIBRE RELIEF	des variations d'émergence	
1	MASSE	TONIQUE type N COMPLEXE X VARIABLE Y QUELCONQUE W,K,T	1. SON PUR 2. TONIQUE 3. GROUPE TONIQUE 4. CANNELE 5. GROUPE NODAL 6. NOEUD 7. FRANGE	TENTURES caractéristiques de masse	REGISTRES surgrave -1 très grave 0 grave 1 couleur mezzo g. 2 diapason mezzo a. 3 aigu 4 très aigu 5 sur-aigu 6 7 oct. X 12 = 84 deg. harmonique	POIDS D'UNE MASSE HOMO- GÈNE	PROFIL de la texture de masse	(seuil de reconnaissance des masses pour les sons brefs)		
2	DYNAMIQUE	homogène H nulle: itératif Z faibletrame N, X, T forménote N, X, N', X' impulsion N', X' cyclique Zk réitérée E accumulée A	CHOCs √ Anamorph:1 profil:2 deserc:3 delta >>> creux >>> mordant ^ Anamorph:2 plat ⊔	ATTAKES (timbre dynam.) 1. abrupte ∇ 2. raide ▽ 3. molle pscudo ⊔ 4. plate imordant ^ 5. douce 6. appui 7. nulle ⊔	7 oct. X 12 = 84 deg. harmonique	POIDS D'UNE MASSE PROFI- LÉE en fonction de son module	MODULE DU PROFIL faible moyen fort	VARIATION DU PROFIL lent modéré vif	SONS BREFS SONS MESURÉS SONS LONGS	
3	TIMBRE HARMONIQUE	soit : TIMBRE GLOBAL soit : masses timbre des secondaires masses M1 th1 M2 th2 M3 th3 ...	«lié aux masses» NUL 1-7 TONIQUE 2 COMPLEXE 6 CONTINU 3-4 CANNELE 4-5	CARACTÈRE DU CORPS SONORE creux-plein rond-pointu cuivré-mat] etc.	COULEUR	AMPLEUR étroit ample	RICHESSE dens. ? vol. ? 1 2 3 4	variation : d'ampleur, de couleur, de richesse n° 1 à 9	(seuil de reconnaissance des timbres pour les sons brefs)	

Tableau récapitulatif du solfège des objets musicaux.

Figure 28. Tableau récapitulatif du Solfège des Objets Sonores, P.Schaeffer, T.O.M, 1966

Dans le cadre d'une recherche sur les possibilités de notation des instruments numériques, une source d'inspiration a été trouvée dans le *Tableau récapitulatif du Solfège des Objets Sonores*⁶⁶ (Figure 28) notamment dans la section *DYNAMIQUE*. Ce référentiel a été retenu comme base pour l'élaboration d'un système de notation adapté. Par association de certains symboles issus de ce tableau, il devient possible de décrire les gestes instrumentaux correspondant aux modes de jeu des sons d'impact. Par exemple, un appui fort et prolongé sur le *Lightpad* peut déclencher un objet sonore abrupt et mordant, caractérisé par une dynamique initialement accumulée, suivie d'un *decrecendo* progressif. Selon les gestes exécutés par l'interprète, le son peut se déplacer selon divers modes de trajectoire panoramique en stéréophonie : du centre vers la droite, du centre vers la droite puis retour au centre, ou encore selon un schéma plus complexe — centre-droite-gauche-centre, voire centre-droite-gauche-droite-centre, etc. Ces procédés de spatialisation peuvent être représentés graphiquement de la manière suivante (Figure 29):

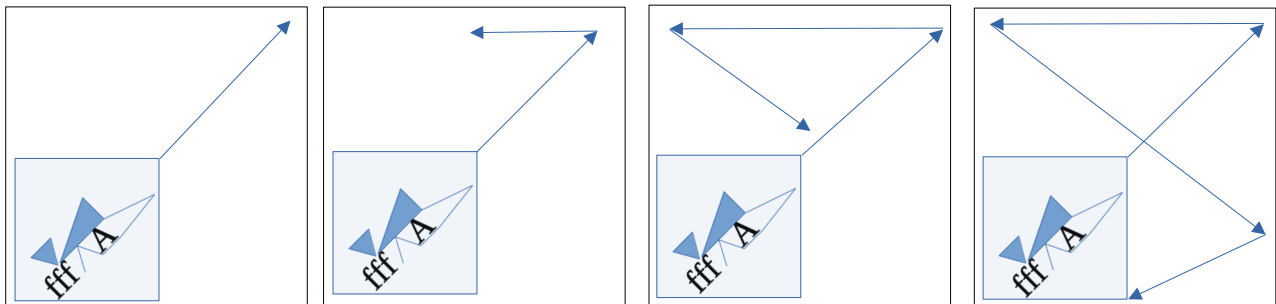


Figure 29. Notation de trajectoires pour *LightPad*

66 Pierre Schaeffer, *Traité des Objets Musicaux : essai interdisciplines*. Paris : édition du Seuil, 1966, pp. 584-587.

- **NB** : le *Lightpad*, représenté par le grand carré transparent, constitue la surface de contrôle, sur laquelle le petit carré coloré indique la position du déclenchement. Les flèches figurent l'orientation du geste, correspondant aux trajectoires des objets sonores.

Lors de la création d'une pièce acoustique avec *live electronic*, *YSpace In G Minor*, le support consiste en une capture des bandes sonores à diffuser, annotée de marqueurs synchronisés avec le curseur de lecture, afin de coordonner l'exécution en temps réel par l'instrumentiste sur scène. Les rôles respectifs de l'interprète instrumental et du diffuseur ne sont toutefois pas nettement différenciés. Étant donné que l'œuvre requiert l'intervention de deux interprètes, serait-il pertinent de dissocier clairement ces deux parties, via des fonctions de conducteur dans les partitions de musique classique ?

Dans cette perspective, la question se pose de l'organisation des objets sonores : convient-il de les répartir selon leur typologie sonore ou en fonction de leur ordre d'apparition dans la structure temporelle de l'œuvre? Le séquenceur contient de nombreux fichiers audio, ce qui peut potentiellement perturber la lisibilité pour un musicien en phase de répétition. Dès lors, serait-il judicieux d'intégrer du texte, ou un système graphique intuitif afin de faciliter l'interprétation et la mémorisation de la structure de la pièce ?

Une question se pose également : comment élaborer une partition efficace indiquant notamment les différents modes de jeu, tant pour un instrument acoustique que pour un dispositif numérique, pour une transmission optimale d'une pièce à un autre interprète ? En situation d'interprétation spatialisée, comme dans un acousmonium ou dans un dôme sonore, comment noter la trajectoire des sources sonores de manière à ce qu'elle soit aussi claire pour la personne en charge de la diffusion derrière les haut-parleurs que pour l'auditeur assis face à la scène ?

Dans la pièce *SYartic(ulation)*, le quatrième mouvement requiert différentes attaques, accentuées soit sur les temps forts soit sur les temps faibles. Grâce au réglage de la vélocité, au bouton *pitchbend* du *QuNexus*, assigné par une table manuscrite dans *Kontakt* permettant la manière de modulation des hauteurs, ainsi qu'au paramètre du *E Touché*, utilisé pour le contrôle d'un filtre passe bas et passe haut, une grande variété d'attaques peut être obtenue. Ces variations s'expriment non seulement dans les dynamiques, mais également dans les micro changements de timbre à l'instant de l'impact. Dans ce contexte, la partie de clavier permet une interprétation très expressive, caractérisée par une diversité d'impacts nettement différenciés. Concernant la notation, il a été préférable de fusionner le contrôle du Touché (représenté sur l'axe vertical) et celui du *pitchbend* (sur l'axe horizontal). Ces deux gestes sont notés sur une portée à trois lignes : de bas en haut pour

indiquer la position du Touché (bas, milieu, haut) et de gauche à droite pour le mouvement du *pitchbend*, avec une indication supplémentaire pour le *vibrato* produit par un geste de pression oscillante, comme cela a été précisé dans le chapitre précédent. Lorsque ces deux paramètres sont joués par la main gauche, conformément à l'usage traditionnel qui place la portée de la main gauche sous celle de la main droite, la lecture de la partition reste fluide et cohérente pour l'interprète.

5.3 Analyse critique de *SYartic(ulation)*

La pièce *SYartic(ulation)* explore l'articulation entre pratiques instrumentales traditionnelles et technologies numériques embarquées. Elle met en œuvre un ensemble de stratégies compositionnelles et performatives intégrant le geste, l'espace et le son, tout en soulevant plusieurs enjeux liés aux dimensions spatiale, perceptive et technique du dispositif.

Parmi les limites identifiées, l'imprécision des figures spatiales constitue un point notable. Les caractéristiques des mouvements sonores – notamment leur vitesse et leur allure (linéaire, accélérée, décélérée, ou variable) – ne font l'objet d'aucune spécification systématique. Cette absence de définition peut affecter la précision de l'interprétation et compliquer l'identification des gestes spatiaux. Par ailleurs, la variation des dimensions perceptives de l'espace reste peu développée. Les traitements sonores susceptibles d'altérer la perception de la taille ou de la profondeur spatiale (élargissement, rétrécissement, modulation de distance) sont présents, mais ne sont pas utilisés de manière à constituer un paramètre structurant du discours musical.

Le recours exclusif au dispositif *Micadôme* introduit une contrainte technique importante. Cette dépendance limite les possibilités de diffusion et complique la transposition de l'œuvre dans d'autres contextes techniques ou acoustiques. Une autre difficulté concerne la logique de lecture : la partition est conçue selon la perspective des interprètes, ce qui provoque un renversement du point de vue gestuel pour le public. Ce décalage entre écriture et perception peut nuire à la lisibilité des trajectoires et introduire une ambiguïté dans leur interprétation. Par ailleurs, l'absence de contrôle global du niveau sonore constitue un point de fragilité en contexte de performance : aucune solution n'est prévue pour ajuster rapidement le volume en fonction de l'acoustique du lieu ou de la sensibilité du public, ce qui peut engendrer une gêne auditive.

Sur le plan technique, la pièce repose sur un dispositif autonome basé sur RNBO déployé sur *Raspberry Pi*, permettant un traitement sonore en temps réel sans recours à un ordinateur de scène. Ce choix favorise une certaine portabilité du système. Sur le plan compositionnel, l'organisation des trajectoires sonores repose sur une logique contrapuntique, les déplacements dans l'espace étant

conçus comme des éléments structurants de la forme. Des figures spiralées sont notamment utilisées comme modèles de déploiement spatial.

La gestion des trajectoires par l'interprète est intégrée à l'exécution instrumentale, conférant à la spatialisation une fonction expressive. Dans un contexte de musique de chambre (formation en trio ou quatuor), l'interprète contrôle les déplacements d'objets sonores en temps réel. La partition fonctionnelle facilite cette intégration, en distinguant les trajectoires continues (liées) des trajectoires discrètes (détachées), ce qui permet une lecture et une exécution plus claires des gestes spatiaux.

Plusieurs axes de développement peuvent être envisagés pour prolonger ce travail. Une version acousmatique, en formats binaural ou multiphonique, élargirait les conditions de diffusion, notamment hors du *Micadôme*. Le remplacement du moteur *Kontakt* par une solution entièrement intégrée dans le système RNBO-*Raspberry Pi* renforcerait l'autonomie technique de l'œuvre. L'extension du dispositif à un plus grand nombre de sources spatiales permettrait d'augmenter la densité du matériau musical et d'explorer des formes plus complexes de trajectoires, ouvrant la voie à de nouvelles stratégies d'écriture spatiale.

SYartic(ulation) est une pièce « sonale », dans laquelle le *sound design* de la flûte augmentée s'est d'abord construit à partir de la matière sonore, selon une approche où « le timbre occupe la place centrale au sein d'un réseau multiparamétrique »⁶⁷(Decroupet, 2024). Cette pièce s'inscrit également dans une démarche qui considère l'interprétation des trajectoires des sources sonores comme un paramètre dominant, en intégrant les technologies embarquées au sein des interprétations électroacoustiques. L'interaction entre le geste, l'espace et le son constitue l'un des axes centraux du projet. Malgré certaines limites techniques, la pièce propose un cadre expérimental propice à l'élaboration de nouvelles formes d'écriture musicale, où la spatialisation s'insère dans une logique instrumentale élargie. Ce type d'approche ouvre des perspectives à approfondir, tant sur le plan compositionnel que dans le développement de dispositifs performatifs flexibles et adaptables.

67 DECROUPET, Pascal, « Écouter les musiques sonales sous un angle fonctionnel : Quatre esquisses analytiques pour une théorie des musiques savantes contemporaines fondées sur le son. » *GMTH Proceedings*, vol. 11, 2024. <https://doi.org/10.31751/p.v.11> p.113.

VI. CONCLUSION

L'histoire de la musique électroacoustique témoigne d'un dialogue permanent entre avancées technologiques et exploration artistique. Des premières expérimentations de Pierre Schaeffer aux outils numériques contemporains tels que *Pure Data* ou RNBO, cette discipline s'est continuellement engagée dans un processus d'élargissement des moyens d'expression sonore, repoussant les limites de la création musicale.

Un instrument de musique, c'est un « outil » essentiel, pour tous les musiciens de toutes les civilisations qui désirent manifester leurs sentiments musicaux. Un instrument (de musique) numérique, c'est un « outil » avancé, qui permet de plus, de reproduire tout type de son, y compris les « bruits » issue de la vie quotidienne et de notre imaginaire:

Traversons ensemble une grande capitale moderne, les oreilles plus attentives que les yeux, et nous varierons les plaisirs de notre sensibilité en distinguant les glouglous d'eau, d'air et de gaz dans des tuyaux métalliques, les borborygmes et les râles des moteurs qui respirent avec une animalité indiscutable, la palpitation des soupapes, le va-et-vient des pistons, les cris stridents des scies mécaniques, les bonds sonores des tramways sur les rails, le claquement des fouets, le clapotement des drapeaux. Nous nous amuserons à orchestrer idéalement les portes à coulisses des magasins, le brouhaha des foules, les tintamarres différents des gares, des forges, des filatures, des imprimeries, des usines électriques et des chemins de fer souterrains...⁶⁸

La création de dispositifs instrumentaux apparaît aujourd'hui comme une nécessité au sein des pratiques contemporaines. Ce travail d'invention s'inscrit dans une logique d'enrichissement de l'expressivité musicale: il vise à diversifier les modes de jeu, à affiner l'interprétation des trajectoires sonores dans le cadre du *live électroacoustique*, à imaginer de nouvelles formes de notation, qu'elles soient textuelles, graphiques ou symboliques.

L'instrument numérique devient ainsi un vecteur de démocratisation et de transversalité. Il permet à un large éventail d'utilisateurs — enfants débutants, amateurs éclairés, musiciens professionnels, pédagogues, chercheurs, artistes visuels ou luthiers contemporains — de s'appropriier les langages de la musique électroacoustique et des arts sonores. Chacun peut, à travers lui, élaborer un lexique personnel, développer une pratique originale, et forger un rapport singulier au son.

En conclusion, cette recherche-crédation s'inscrit dans une continuité historique. En reliant les instruments traditionnels aux technologies numériques, elle renforce le « lien » entre passé et futur, un espace où musiciens et machines collaborent dans un dialogue sans cesse renouvelé.

68 RUSSOLO, Luigi, *L'Art des bruits, Manifeste futuriste, 1913*. Édition ALLIA, 2009, pp. 17-18.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHER, Phil. *Intervention and Appropriation : Studies in the Aesthetics of the Homemade in Real-Time Electroacoustic Composition*. Ph. D. Thesis, ARiADA, University of East Anglia, UK, 2004.
- ARTAUD, Pierre-Yves. *Flûte au présent : Traité des techniques contemporaines sur les flûtes traversières à l'usage des compositeurs et des flûtistes*. Édition Gérard Billaudot, 1995.
- CHION, Michel. *Guide des objets sonores : Pierre Schaeffer et la recherche musicale*. Paris : Buchet/Chastel, 1983.
- CHION Michel. *La musique électroacoustique*. Ouvrage de technique musicale publié avec le concours de Norbert DUFOURCQ et Marcelle BENOIT. Broché, 1982.
- CAPLIN, William. *Classical Form*. New York : Oxford University Press, 1998.
- CLOZIER, Christian. *Le Gmebogosse 4M : livret pédagogique*. Instrument électroacoustique. Technique expérimentale de pédagogie sonore définie par CLOZIER Christian et ajustée par l'équipe musicale du G.M.E.B. Éditions Gmeb. 1989. <https://misame.org/anthologie-gmeb-imeb/>
- COLLINS, Nick, D'ESCRIVAN, Julio, eds. *The Cambridge Companion to Electronic Music*. Cambridge University Press, 2007. doi: 10.1017/CCOL9780521868617.
- COUPRIE, Pierre. *La musique électroacoustique : analyse morphologique et représentation analytique*. Musique, musicologie et arts de la scène. Paris-Sorbonne, 2003.
- COUPRIE, Pierre. *L'analyse musicale et la représentation analytique de la musique acousmatique : outils, méthodes, technologies*. Musique, musicologie et arts de la scène. Université Paris-Sorbonne, 2015.
- DECROUPET, Pascal, « Écouter les musiques sonales sous un angle fonctionnel : Quatre esquisses analytiques pour une théorie des musiques savantes contemporaines fondées sur le son. » GMTH Proceedings, vol. 11, 2024. <https://doi.org/10.31751/p.v.11>
- DECROUPET, Pascal. *Karlheinz Stockhausen Gruppen*, Édition Contrechamps, 2023.
- DECROUPET, Pascal, UNGEHEUER Elena, KOHL, Jerome. *Perspectives of New Music* 36, no. 1 (Winter 1998): 97-142.

- GALLET, Bastien. « Techniques électroniques et art musical : son, geste, écriture / Electronic Techniques in Music: Sound, Gesture and Writing. », *Volume ! La revue des musiques populaires*, no 10-1, pp. 17–28, 2013. <https://doi.org/10.4000/volume.2493>
- GIOT, Rudi, VANDE GORNE, Annette, BERQUIN, Ludovic. « Outils de spatialisation temps-réel, tactiles multipoints, destinés à la composition de musiques électroacoustiques », *Journées d'Informatique Musicale*, mai 2011, Saint-Étienne, France. HAL, <https://hal.science/hal-03104759>
- Gorbach, T., & Vande Gorne, A. (2022). Thomas Gorbach interviews Annette Vande Gorne. In E. Tomás Calderón, T. Gorbach, H. Tellioglu, & M. Kaltenbrunner (Eds.), *Embodied Gestures* (pp. 99–106). TU Wien Academic Press. https://doi.org/10.34727/2022/isbn.978-3-85448-047-1_9
- HARLEY, Maria. « Musique, espace et spatialisation : entretien de Iannis Xenakis avec Maria Harley. », *Circuit*, vol. 5, no 2, 1994, pp. 9–20. <https://doi.org/10.7202/902104ar>
- HILL W. Henry, HILL Arthur F. , HILL Alfred E. . *Antonio Stradivari: His Life and Work (1644-1737)*. Londres: Macmillan and Co., 1902.
- LAVERGNE, Grégoire. *Thèse de doctorat en musicologie et anthropologie sociale*. Sous la direction de Marc CHEMILLIER et Caroline TRAUBE. École des hautes études en sciences sociales (EHESS), en cotutelle avec l'Université de Montréal. Soutenue à Paris, le 5 juillet 2017.
- LE BOUTEILLER, Madeleine. *Instruments numériques et performances musicales : enjeux ontologiques et esthétiques*. Musique, musicologie et arts de la scène. Université de Strasbourg, 2020. Français. [NNT : 2020STRAC002](https://nnt.2020STRAC002).
- LEDOUX, David, NORMANDEAU, Robert, BÉLANGER, Olivier, LENGELÉ, Christophe. « Vers une approche immersive de la composition musicale par le développement d'outils de spatialisation sonore : ControlGRIS et ServerGRIS. » *Journées d'Informatique Musicale*, LaBRI, Bayonne, France. hal-03111498.
- MERLIER, Bertrand. *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*. Delatour France, 2006.
- MERCIER, Maxence. « Sound Trajectory en pratique live. » *Journées d'Informatique Musicales*, MSH Paris Nord, Saint-Denis, France, 2023. hal-04950064.
- MESSIAEN, Olivier. *Quatre Études de rythme*, 2e partie. Paris : Edition Durand. 1949-1950.
- MION, Philippe, NATTIEZ Jean-Jacques, THOMAS Jean-Christophe. *L'Envers d'une œuvre : de Natura Sonorum de Bernard Parmegiani*. Éditions Buchet.Chastel, 1994.

- MOORE, David Robert. *Real-time sound spatialization, software design and implementation*. Thèse de doctorat, University of Sheffield. 2005.
- MONTAGUE, Stephen. *Live electronics — Introduction*, *Contemporary Music Review*, Volume 6, 1991, p. 85–88. doi: 10.1080/07494469100640081.
- PASCAL, Michel, VINOT, Frédéric, DERVEAUX, Karen. « De la composition d’espaces à l’espace comme composition, analyse et médiation thérapeutique de l’œuvre de Jean-Marc Duchenne Les Paradoxes d’une sphère tronquée », *Recherches en musique : Actes des Rencontres nationales sur les recherches en musique*, Collegium Musicæ de l’Alliance Sorbonne Université, Collection MusiqueS & Interdisciplinarité, 2023, pp. 435–441, hal-04226044 .
- PYSIEWICZ, Andrzej, WEINZIERL, Stefan. « Instruments for Spatial Sound Control in Real Time Music Performances. A Review. », BOVERMANN et al. (dir.), *Musical Instruments in the 21st Century*, Springer Singapore, 2016, pp. 273–296. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2951-6_18.
- RUSSOLO, Luigi. *L'Art des bruits, Manifeste futuriste, 1913*. Édition ALLIA, 2009, p. 17-18.
- SCHAEFFER, Pierre. *Traité des objets musicaux : essai interdisciplines*. Paris : Éditions du Seuil, 1966.
- SKÖLD, Mattias. *Sound Notation: The Visual Representation of Sound for Composition and Analysis*. Thèse de doctorat, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2023. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-327291>.
- SOLOMOS, Makis. « L’espace-son. », *L’espace : Musique-Philosophie*, sous la direction de Jean-Marc CHOUVEL et Makis SOLOMOS, Paris, L’Harmattan, 1998, p. 211-224.
- TACHE, Olivier. *Conception d’un instrumentarium pour la création musicale à l’aide des modèles physiques cordis-anima*. Modélisation et simulation. Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- VANDE GORNE, Annette. *L’espace du son II*. Sous la direction de Francis DHOMONT. MUSIQUES ET RECHERCHES, 3, Place de Ransbeck, B-1380 Ohain. Éditions Musiques et Recherches, 1991. Réédition numérique, 2008.
- VANDE GORNE, Annette. *L’espace du son III*. Publié avec l’aide de la Communauté française de Belgique. MUSIQUES ET RECHERCHES, 3, Place de Ransbeck, B-1380 Ohain. Éditions Musiques et Recherches. Edition numérique. 2010.
- XENAKIS, Iannis. *Metastaseis*. BOOSEY & HAWKES Music Publishers Ltd, B & H 19635. 1967.

ANNEXE – Création *Polysons Sonatine 0.0.6* dans le cadre du concert *Elektronizza 2024* au CRR de Nice

POLYSONS SONATINE 0.0.6 (création 2024)

Les averses ont arrosé le boulevard de la Madeleine plusieurs jours d'affilée. Au crépuscule, la cour du Collège Rostand était imprégnée d'humidité et les voitures faisaient moins de bruit devant le portail de l'école que par temps clair. "Ne vous mettez pas à courir", a prévenu Elise d'un ton sérieux, entremêlé des excitations inévitables des élèves, ce qui a quelque peu dissipé l'atmosphère sombre. Ainsi, guidés par leur professeur, les enfants ont commencé à enregistrer de manière méthodique des objets sonores avec un téléphone : dans la salle de classe, dans le couloir, sur la cour... Les sons proches et lointains, grands et petits, ont été capturés, jusqu'à ce que la sonnerie familière retentisse, marquant la fin de cette Sonatine. (Texte rédigé par Sheng YANG)

Œuvre originale composée par Sheng Yang avec les élèves dans le cadre d'une intervention pédagogique de 12 séances au collège Jean Rostand à Nice. Dans ce projet, les collégiens, inscrits dans une "Option Orchestre 6e" (O.O.6), ont été tour à tour ingénieurs du son, compositeurs et interprètes aux côtés de leurs professeurs d'instruments (étudiants au conservatoire et à l'université) qui se prêtent à l'expérience.

Direction et coordination pédagogique : Élise Heinisch

Composition : Sheng Yang et les collégiens

Réalisation en informatique musicale et coordination technique : Sheng Yang, Patrice Collet

iPhone : Omayya Baya Chatti, Soujoud El Mokdad

Hexapad : Alain Davtian, Rayhana Graiet, Tasnim Rabouch, Ahmed Sabeur

Gametrak : Kristofer Chaintron, Elena Audin, Diane Barone, Lalie Fonteray, Aurore Gheorghiu

Hebert, Yassin Oubrahym

Minilab : Anaïs De Gilles, Grégoire Galumyan, Mathilde Jegonday

QuNexus : Jonathan Silve

XKey : Eléonore Marseau

Ce projet s'inscrit dans un dispositif de Cordées de la Réussite réalisé avec la section musicologie de l'Université Côte d'Azur.