



École Nationale Supérieure Louis Lumière

Section Son – Promotion 2018

Mémoire de fin d'études

PROPOSITION D'UN META-INSTRUMENT POUR LA SPATIALISATION TEMPS-RÉEL

Benjamin Garson

Directeurs internes : Thierry Coduys et Frank Gillardeaux

Directeur externe : Giani Caserotto

Rapporteur : Alan Blum

REMERCIEMENTS

Je remercie Thierry Coduys et Frank Gillardeaux pour m'avoir guidé tout au long de mon travail.

Je remercie Giani Caserotto pour son soutien et ses conseils durant toute l'élaboration du processus artistique de ce mémoire.

Je remercie également Alan Blum pour ses conseils matériels.

Pour leur aide et leur participation active à la relecture de ce mémoire, je remercie Timothée et Paul Garson.

RÉSUMÉ

Le présent mémoire est consacré à la conception d'un méta-instrument constitué d'une partie matérielle (capteurs) et d'une partie logicielle, qui permet une spatialisation du son en temps-réel pour un instrumentiste en condition de jeu improvisé. Ce méta-instrument sera utilisé *via* la guitare électrique. Le mémoire comporte les trois parties que sont l'évolution de la spatialisation dans la musique écrite, la réflexion autour de la partie matérielle du méta-instrument basée sur la captation des gestes liés au jeu de la guitare électrique, et le développement logiciel ainsi que la reproduction dans l'espace sonore des trajectoires de spatialisation.

La première partie analyse le travail de l'espace sonore dans la musique écrite occidentale. Après une précision du vocabulaire utilisé, les premiers essais de spatialisation sont présentés puis les recherches sur l'espace sonore au XXème siècle sont exposées au travers des œuvres du compositeur Karlheinz Stockhausen.

La deuxième partie considère le rôle des capteurs de mouvement dans le méta-instrument. Elle décrit d'abord le fonctionnement des capteurs les plus utilisés, puis les gestes instrumentaux de la guitare électrique. Ceci permet de procéder au choix des capteurs pour l'augmentation de la guitare.

La dernière partie de ce travail est axée sur la spatialisation, du point de vue technique, et sur les possibilités du méta-instrument de spatialisation. Les trajectoires des sons dans l'espace sont implémentées, avant d'opérer le choix du dispositif de projection. Puis un lien vers l'improvisation, et vers une perspective d'utilisation du méta-instrument pour d'autres instruments que la guitare électrique, est établi.

Mots clés : Méta-instrument, Spatialisation, Guitare augmentée, Capteurs

ABSTRACT

This thesis approaches the design of a meta-instrument consisting of a hardware part (sensors) and a software part, which allows real-time sound spatialization for an instrumentalist in improvised playing conditions. This meta-instrument will be used *via* the electric guitar. The thesis includes three parts that are the evolution of spatialization in written music, the thinking about the material part of the meta-instrument based on capturing gestures related to the play of the electric guitar, and the software development as well as the reproduction in the sound space of spatialization trajectories.

The first part analyzes the work of sound space in Western written music. After precisising the vocabulary used, the first tests of spatialization are introduced, then the researches on the sound space in the XXth century are exposed through the works of the composer Karlheinz Stockhausen.

The second part considers the role of motion sensors in the meta-instrument. First, it describes the operation of the most used sensors, then the instrumental gestures of the electric guitar. This allows to proceed to the choice of the sensors for the augmentation of the guitar.

The last part of this work focuses on spatialization, from a technical point of view, and on the possibilities of the meta-instrument of spatialization. The trajectories of the sounds in space are implemented, before making the choice of the projection device. Then a link is established to improvisation, and to a perspective of using the meta-instrument for other instruments than the electric guitar.

Keywords : Meta-instrument, Spatialization, Augmented guitar, Sensors

TABLE DES MATIERES

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Introduction	8
PARTIE 1 : La spatialisation du son dans la musique	10
1. Précisions sur les termes "espace" et "spatialisation"	10
1.1 <i>Distinctions spatiales</i>	10
1.2 <i>L'importance du lieu</i>	11
2. Les prémices de la spatialisation dans la musique écrite	12
2.1 <i>Les compositeurs vénitiens – Une première mise en espace</i>	12
2.2 <i>La spatialisation chez Berlioz – Parallèle avec une œuvre contemporaine</i>	13
3. L'essor de la spatialisation dans la musique écrite du XXème siècle	16
3.1 <i>Le développement de la spatialisation : Karlheinz Stockhausen</i>	17
3.2 <i>Kreuzspiel – Mise en espace et disposition instrumentale sur scène</i>	18
3.3 <i>Gruppen – Mise en espace et disposition instrumentale dans la salle de concert – place du public</i>	20
3.4 <i>Kontakte – spatialisation d'instruments acoustiques – spatialisation de sons électroniques – projectionniste du son</i>	23
3.5 <i>Osaka, une étape dans le traitement de la spatialisation chez Stockhausen</i>	27
3.6 <i>Cosmic Pulses – Aboutissement de la recherche de Stockhausen sur la spatialisation – Limites</i>	31

3.7 <i>Spatialisation et timbre – Un aparté sur la musique acousmatique</i>	35
3.8 <i>La spatialisation dans l'improvisation aujourd'hui</i>	37
3.9 <i>Conclusion</i>	39

PARTIE 2 : Mise en place du dispositif de capteurs et application

à la guitare	41
1. Fonctionnement et description de différents capteurs	41
1.1 <i>Généralités sur les capteurs</i>	41
1.2 <i>Capteurs piézoélectriques</i>	43
1.3 <i>Accéléromètres – Inclinomètres</i>	44
1.4 <i>Gyroscopes – Gyromètres</i>	48
1.5 <i>Potentiomètres résistifs – Capteurs de force</i>	49
2. La gestuelle de la guitare, ses possibilités et ses limites	51
2.1 <i>Introduction autour de la notion de geste instrumental</i>	51
2.2 <i>Technique instrumentale de la guitare électrique</i>	53
2.3 <i>Un aperçu de l'augmentation – L'augmentation de la guitare électrique</i>	58
2.4 <i>Quelques exemples d'augmentation de guitare électrique</i>	59
3. Choix du dispositif de capteurs et d'actionneurs	63
3.1 <i>Choix des capteurs et du mode de transmission des données</i>	63
3.2 <i>Choix d'un actionneur – Description succincte des pédales d'effet</i>	69
3.3 <i>Synthèse de la chaîne de capteurs et d'actionneurs</i>	71

PARTIE 3 : Mise en place technique du dispositif de spatialisation	73
1. Choix et description du dispositif de spatialisation	73
1.1 <i>Choix des trajectoires de spatialisation</i>	73
1.2 <i>Lien entre la spatialisation et la captation</i>	76
1.3 <i>Choix des composantes informatiques</i>	78
1.4 <i>Schéma synoptique informatique</i>	80
2. Choix et description du dispositif de projection	82
2.1 <i>Choix de la projection</i>	82
2.2 <i>Choix de la technique de reproduction</i>	83
2.3 <i>Schéma synoptique de la chaîne de projection</i>	86
3. Perspectives musicales	87
3.1 <i>Choix de l'improvisation, sa pertinence vis-à-vis du dispositif</i>	87
3.2 <i>Élargissement aux autres instruments</i>	88
Conclusion	89
Table des figures	90
Bibliographie	91
Annexes	94

INTRODUCTION

La musique est un art en constante évolution. Elle n'a cessé de se développer, au gré des velléités de création des musiciens, qui proposent constamment de nouvelles grandeurs composables. La hauteur, la durée, l'intensité et le timbre ont ainsi fait l'objet de recherches toujours plus poussées, afin de retranscrire une idée, d'exprimer un point de vue, une opinion, de faire ressentir une émotion nouvelle. Le paramètre de l'espace sonore a été exploité tardivement à l'échelle de la création musicale. Souvent, il fut délaissé au profit des autres dimensions qui transparaissent de manière plus explicite dans l'art musical. Toutefois, l'intérêt des compositeurs pour ce paramètre a augmenté, et sa place dans la création musicale a peu à peu pris de l'importance.

La composition de cet espace sonore a évolué en parallèle avec les techniques de diffusion et les éléments de compréhension vis-à-vis du phénomène physique du son. De plus certaines avancées techniques et technologiques ont contribué à une remise en question de l'espace acoustique, et ont soulevé des problématiques de création et de recréation de l'espace en tant que dimension musicale. La spatialisation découle de ces problématiques et elle est au centre des préoccupations des compositeurs d'aujourd'hui. Ainsi, les sons sont mis en espace, et cette mise en espace constitue une nouvelle approche esthétique et artistique. Ce désir de spatialisation ne cesse de croître, en parallèle de la progression des nouvelles technologies. Et les musiciens, qu'ils pratiquent une musique strictement écrite ou strictement improvisée, désirent jouer avec l'espace sonore comme ils jouent avec la hauteur, la durée... Développer des outils de spatialisation permettant d'inclure l'espace sonore dans une dynamique d'avancée esthétique devient donc un des enjeux artistiques de la musique.

Ces outils de spatialisation sont à l'heure actuelle dissociés des autres outils de production musicale : les instruments de musique. Il ne sont pas contrôlés par le musicien lui-même, et il faut deux personnes distinctes qui se répartissent la gestion des dimensions musicales. Cependant, en tant que composante fondamentale du son, l'espace pourrait être géré au même titre que les autres paramètres, quand la complexité de l'œuvre composée ne nécessite pas plusieurs exécutants. Ainsi, pour permettre aux musiciens d'utiliser l'espace sonore, il faut ramener cette dimension musicale au degré d'accessibilité dont disposent les autres dimensions. Ceci pose plusieurs questions : que signifie travailler l'espace sonore en musique ? Quels sont les tenants et les aboutissants esthétiques de ce paramètre ? Comment donner la même liberté au musicien vis-à-vis de l'espace avec son instrument ?

Étant moi-même guitariste, j'ai choisi d'aborder ces notions au travers du prisme de la proposition : un méta-instrument de spatialisation, donnant au musicien la possibilité d'un contrôle temps-réel sur une spatialisation du son. Ce méta-instrument sera réalisé à l'aide d'outils informatiques, puis éprouvé lors de concerts improvisés de guitare électrique.

Pour traiter ce sujet, il convient tout d'abord de s'intéresser à l'essence même de la mise en espace sonore dans la musique. On peut séparer l'évolution de la spatialisation dans la création musicale en plusieurs périodes, qui chacune proposent une vision singulière. Après une définition des termes employés, un état de l'art et une analyse de l'esthétique de la spatialisation seront dressés, depuis les premières réflexions sur l'espace sonore jusqu'aux pensées actuelles. En second lieu, on pourra voir comment cette spatialisation, et cette volonté en tant que musicien de contrôle de l'espace, peut être mise en œuvre, à l'aide d'outils technologiques et de moyens d'analyse gestuelle, toujours *via* l'instrument qu'est la guitare électrique. Enfin, cette spatialisation sera implémentée, afin que le son soit projeté pour redonner à la mise en espace sonore un rôle prépondérant.

PARTIE 1

LA SPATIALISATION DU SON DANS LA MUSIQUE

1 Précisions sur les termes "espace" et "spatialisation"

1.1 Distinctions spatiales

Avant d'aborder la façon dont les compositeurs ont utilisé l'espace dans leur œuvres, il semble important de préciser le sens même de ce mot « espace ». Il est important de rappeler que l'espace, musicalement parlant, ne signifie pas seulement « espace acoustique ». Comme le précise Ivanka Stoïanova¹, il faut distinguer « l'espace musical inscrit », qui fait partie intégrante de l'œuvre écrite, et « l'espace mobile de la diffusion du son dans la salle de concert ». L'espace musical inscrit est évidemment exploité depuis bien plus longtemps que l'espace de la diffusion du son. Dès les premières monodies, on assiste à des jeux de miroirs (comme par exemple une oscillation autour de la tonique dans les chants grégoriens), à des structures de phrases et de respirations. On peut aussi penser à l'espace formé par les notes du mode (dès les premières musiques) ou de la gamme (premières œuvres tonales, période musicale du classique). Avec l'apparition de la musique baroque, l'espace inscrit dans l'œuvre s'enrichit d'un espace mental, qui est celui plus spécifique de l'écriture : polyphonie, superpositions de voix, canons, fugues...

Bien entendu, l'espace de diffusion du son est aussi utilisé depuis les débuts de la musique, mais de manière moins directe. Voici ce que propose Bertrand Merlier comme définition plus globale, au sens musical du terme :

« Parler de l'espace, c'est parler de l'interaction entre les caractéristiques acoustiques d'un lieu, sa disposition géographique, la configuration choisie pour les haut-parleurs dans le lieu et l'espace déjà inscrit sur le support, ses **plans de profondeur de champ**, et les **trajets sonores**. »².

Cet espace, quand il n'est pas inscrit dans l'œuvre, peut-être aussi exploité d'un point de vue compositionnel. On peut alors parler de spatialisation, mot comportant de multiples sens, mais

¹ Stoïanova, I. *Karlheinz Stockhausen « Je suis les sons... »*, Condé-sur-Noireau, Beauchesne, coll. L'éducation musicale, 2014, page 81

² Van De Gorne, A., citée par Merlier, B., *Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques*, Paris, Delatour France, coll.

Musique/Pédagogie, 2006, page 76

désignant ici les « caractéristiques spatiales d'une œuvre, pouvant concerner aussi bien la nature des masses et des empreintes spatiales que la manière dont elles sont composées. »³ On ne parlera donc pas ici de la spatialisation au sens biologique du terme, c'est-à-dire comme « perception d'un espace ou d'un environnement spatial »⁴, qui pourrait en être une autre définition. Bien sûr, les mécanismes de spatialisation auditive chez l'être humain sont complexes et font appel à de nombreux mécanismes biologiques, acoustiques et psycho-acoustiques. La spatialisation, au sens où on l'entend dans ce mémoire, concerne le travail de l'espace sonore, et implique un questionnement sur la place de l'auditeur, tant physique que métaphorique face à une œuvre musicale. Aujourd'hui, lorsqu'on écoute de la musique, on est peu souvent dans une situation d'écoute naturelle. Comme le remarque Robin Maconie, « cependant, dans la vraie vie, les personnes et les objets ne restent pas à une unique place. »⁵ La spatialisation d'une pièce musicale fait donc œuvre de repositionnement de l'auditeur au centre de son cercle d'écoute, qui est de 360°, et de remise en position d'écoute naturelle.

1.2 L'importance du lieu

Si on commence à s'intéresser à la spatialisation du son, on se rend compte que la première étape de travail sur l'espace sonore est d'avoir conscience du lieu de la représentation musicale, et de son espace propre. En effet, la relation entre spatialisation et acoustique est caractéristique d'une certaine pensée de l'espace, selon l'époque. On peut penser aux premiers théâtres antiques, qui, par leur acoustique, permettaient une bonne propagation du son. Il en est de même pour les églises, lieux d'expérimentations sonores depuis le Moyen-Age jusqu'à nos jours. Le théâtre puis la musique ont pu profiter des avancées architecturales pour développer leur travaux sur l'espace sonore. Les premières idées de spatialisation sont donc très liées à l'acoustique du lieu. Cependant, au cours des recherches de plus en plus abouties sur l'espace sonore, cette relation s'est dégradée, pour devenir aujourd'hui difficile : lors de sonorisations ou de performances spatialisées, on tente de s'affranchir de l'espace acoustique, et on préfère un espace neutre que l'on peut modeler virtuellement pour disposer d'une plus grande marge de manœuvre.

Ainsi, cette évolution spatiale amène à se demander comment l'espace sonore a été traité dans l'histoire de la musique. C'est en analysant la manière d'écrire l'espace sonore à travers les différents courants musicaux que l'on pourra avoir une vision globale de la spatialisation en musique. On pourra alors en extraire les éléments esthétiques que l'on désire pour alimenter la

3 Van De Gorne, *ibid*, page 176

4 Van De Gorne, *ibid*, page 176

5 Maconie, R. Stockhausen's Cosmic Pulses, <http://www.jimstonebraker.com/Cosmic%20Pulses%201.pdf> (site consulté le 30 avril 2018), page 5

performance de musique spatialisée en temps réel.

2 Les prémices de la spatialisation dans la musique écrite

Le terme spatialisation peut commencer à être employé à partir de la musique de la Renaissance, dès les XVèmes et XVIèmes siècles (Cf *Annexe I* sur les périodes dans la musique classique). L'un des premiers compositeurs à avoir utilisé consciemment la disposition dans l'espace comme paramètre musical fut Andrea Gabrielli (1533 – 1585). Son neveu Giovanni Gabrielli (1556 – 1612) développa ensuite cet aspect musical, appris avec son oncle.

2.1 Les compositeurs vénitiens – Une première mise en espace

Giovanni Gabrielli, organiste à la basilique Saint-Marc à Venise à partir de 1585, entretenait une pratique de composition qualifiée de polychorale. En effet, la basilique Saint-Marc comporte deux tribunes d'orgue qui se font face, ainsi que des tribunes de chœur séparées spatialement. De cette manière, les pièces pour deux chœurs « (...) reposent sur le principe du dialogue et de l'antiphonie spatialisée. (...) La polychoralité permettait des effets de sonorités – des échos, des résonances, des réverbérations, des superpositions polyphoniques (...). »⁶. Cette première spatialisation, caractérisée par des effets de volume et de travail sur la dynamique, reste assez sommaire. Peu à peu, d'autres compositeurs – notamment ceux qui travaillaient dans cette même basilique Saint-Marc – vont progressivement remplir l'espace entre les deux chœurs, tout en gardant cette possibilité de dialogue dans l'espace. Ainsi, dans la musique baroque, Monteverdi dans ses *Vêpres de la Vierge*, dispose dans l'espace un plus grand nombre de chœurs différents, afin de pratiquer un enveloppement sonore du public plus important. Cette première spatialisation peut aussi se retrouver dans les *concerti grossi*, concertos baroques où les instruments solistes sont séparés du reste de l'orchestre.

Un peu plus tard, on trouve quelques exemples de simili-spatialisation à l'époque classique, par exemple chez Mozart, dans sa *Serenata notturna* (K. 239). Ce sont principalement des effets qui découlent de ceux de l'époque baroque et qui comportent les mêmes caractéristiques quant au déplacement du son dans l'espace : des échos, des répétitions. Pour trouver un travail de spatialisation différent de celui entamé par les compositeurs vénitiens, il faut attendre la période romantique : un des compositeurs qui a le plus travaillé sur l'espace sonore est Hector Berlioz.

⁶ Stoianova, *ibid*, page 83

2.2 *La spatialisation chez Berlioz – Parallèle avec une œuvre contemporaine*

Chez Berlioz, « l'espace est intégré à la fonction dramatique de la musique, au geste formel symphonique, nécessairement narratif, de l'œuvre. »⁷. Ainsi, la spatialisation chez Berlioz est moins un effet de dialogue et de répétition (comme chez Gabrielli, ou comme pourrait l'être l'utilisation d'un effet électronique de *delay* dans une pièce de musique électro-acoustique) qu'un travail de spatialisation timbrale, en tenant bien sûr compte de la place des instruments dans l'orchestre. Ceci reste d'ailleurs assez logique : pendant la période romantique, les compositeurs ont commencé à travailler plus spécifiquement sur l'extension de la palette de timbres. En témoignent le tuba wagnérien, l'inclusion de percussions dans l'orchestre, la division toujours plus fine des pupitres de cordes... Berlioz introduit dans l'orchestre le cor anglais et la harpe, entre autres. Et ce développement du timbre orchestral conduit à repenser la place de chaque instrument ou pupitre d'instrument, dans l'espace de la salle de concert.

Afin d'étayer ce propos, il convient de se pencher sur une des pièces de Berlioz connue pour ses effets de spatialisation : le *Requiem*, composé en 1837. Dans le deuxième mouvement, le *Dies Irae*, on a une séparation de l'orchestre (qui comporte d'ailleurs pas moins de 440 musiciens, lors de la création de la pièce le 5 décembre 1837 dans l'église Saint-Louis-Des-Invalides à Paris) assez exceptionnelle. Alain Louvier écrit :

« Avec Berlioz et son Requiem (1837), un nouveau pas est franchi. Dans le fameux Tuba Mirum⁸, en plus d'un orchestre monumental et d'une imposante masse chorale, Berlioz dispose aux quatre points cardinaux quatre groupes de cuivres. L'écriture en canon provoque une rotation artificielle en spirale de motifs de fanfare très courts. Berlioz découvre la vitesse de rotation du son, devançant de plus d'un siècle les techniques "quadriphoniques". »⁹

Ainsi, Berlioz, bien que s'inscrivant dans la continuité établie par les compositeurs le précédant, approfondit le travail sur la spatialisation acoustique, jusqu'à ébaucher les mouvements des sources spatiales que l'on peut retrouver aujourd'hui. Ne se contentant pas de plusieurs chœurs qui se répondent, il imprime au son une dimension rotative dans l'espace de la salle de représentation (ici l'église Saint-Louis). Le paramètre de l'espace prend alors tout son sens musicalement parlant : le mouvement du son dans l'espace est perçu par l'auditeur, et son écoute ne se limite plus à une écoute frontale, mais est élargie de manière multidirectionnelle.

7 Stoianova, *ibid*, page 83

8 Le Tuba Mirum correspond aux premiers mots de la troisième strophe du mouvement.

9 Louvier, A. *L'orchestre*, Paris, Combre, 1995, page 75

Cette réflexion fait émerger l'un des problèmes de la spatialisation du son, énoncé par Alain Louvier :

« [Berlioz] pose en prime un problème ardu : où doit se trouver l'auditeur ? Problème pratiquement sans solution à moins de concentrer tout le public au foyer idéal de réception du son, intersection des diagonales du carré formé par les quatre groupes de cuivres. »¹⁰

Le *Requiem* de Berlioz remet donc en question pour la première fois dans l'histoire de la musique occidentale la place de l'auditeur par rapport à l'orchestre. Pour plus d'informations, cf. Annexe 2 : extraits du *Dies Irae* du *Requiem* de Berlioz. Dans le cadre d'une musique faisant appel à la multidirectionnalité de l'écoute, chaque auditeur a une place qui lui donnera une autre perception de la musique et du mouvement du son. Cette question de la place de l'auditeur par rapport à l'orchestre sera bien sûr exploitée et développée par des compositeurs du XX^{ème} siècle, comme Iannis Xenakis par exemple.

En plus de commencer à ébaucher des mouvements plus complexes de son dans l'espace, Berlioz va aussi travailler sur le timbre orchestral, et sur une spatialisation timbrale, utilisée comme élément narratif. Toujours dans le *Requiem*, on trouve un passage où « huit trombones à l'unisson dans le grave [sont] associés à des flûtes dans l'aigu qui matérialisent les harmoniques des trombones. »¹¹ (Voir Annexe 2). Cette structuration timbrale et spatiale est qualifiée par Dufourt de « cristallisation progressive de la notion d'espace sonore »¹². En utilisant qu'une partie de l'orchestre et en associant deux zones de l'espace sonore proches mais distinctes (voir Annexe 3, la disposition des instruments dans l'orchestre), Berlioz confère à une zone de l'espace une couleur timbrale singulière, qu'il met ensuite en relation avec le reste de l'orchestre. Ceci met en exergue la notion de bloc sonore : certaines zones de l'orchestre se répondent spatialement mais aussi timbralement, contribuant à remplir l'espace acoustique qu'occupe l'orchestre entier. En outre, ce travail de spatialisation de timbre est aussi appuyé par un travail important sur la dynamique : la recherche d'extension de dynamique, chère au mouvement romantique, permet de découvrir et d'utiliser de nouveaux timbres jusqu'alors jugés peut-être trop 'grossiers' par les compositeurs de la période classique.¹³ Cette dynamique accrue permet de repenser la notion de plans sonores, tant au niveau de « l'espace musical inscrit » qu'au niveau de « l'espace mobile de la diffusion du son dans la salle de concert ».

10 Louvier, *ibid*, page 75

11 Dufourt, H. , *L'espace sonore. « Paradigme » de la musique de la seconde moitié du XX^{ème} siècle*, 1997, in *L'espace : Musique/Philosophie*, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008, page 177

12 Dufourt, *ibid*, page 177

13 En témoigne l'article d' Alfred de Vigny dans son *Journal d'un poète*, qui qualifie la musique de Berlioz de « belle et bizarre, sauvage, convulsive et douloureuse ».

Afin de mieux comprendre ces premières expérimentations avec l'espace acoustique, j'aimerais faire un parallèle entre la manière qu'ont les compositeurs jusqu'à Berlioz d'utiliser la spatialisation, et celle que peut avoir un compositeur d'aujourd'hui, et ce malgré le recours à un même type de disposition spatiale. Ainsi les mouvements de spatialisation à proprement parler pourraient être plus facilement compris et comparés. La pièce de Pascal Dusapin, *Morning In Long Island* (composée en 2010) utilise des placements dans l'espace assez simples et se prête bien à la comparaison.

A propos de la disposition des musiciens dans la salle, cette œuvre rappelle très fortement les *concerti grossi* baroques. Trois solistes (trombone, trompette et cor) sont séparés de l'orchestre. Toutefois, chez Dusapin, les solistes ne sont pas au même endroit dans la salle : un trombone est à gauche du public, une trompette derrière et un cor à droite, avec l'orchestre toujours sur scène. Cette disposition permet de faire dialoguer les solistes entre eux tout en exploitant leurs caractéristiques spatiales propres. Un tel placement rappelle le placement des cuivres dans le *Requiem* de Berlioz, malgré un rôle musical assez différent. Dès le début de *Morning In Long Island*, l'espace sonore est composé, et ce de manière assez franche : l'œuvre commence par un jeu assez court entre les trois solistes, qui se répondent harmoniquement et spatialement. Cette introduction est assez contrastante avec le reste du premier mouvement (intitulé « *Fragile* »). L'orchestre intervient assez rapidement, avec notamment le pupitre de cordes dans les aigus. Ce changement de timbre (des cuivres *ff* aux cordes *pp*) et surtout de spatialisation (déplacement du « centre spatial » du milieu du public vers la scène) a pour effet d'opérer un changement de point de vue, du grandiloquent à l'intériorité, d'un encerclement quasiment oppressant à une frontalité plus habituelle. Cet effet est également accentué par la structure du morceau, qui fait succéder l'introduction très brève des solistes à une partie longue orchestrale. On pourrait d'ailleurs rapprocher cette introduction d'une ouverture d'opéra classique, qui avait pour but de focaliser l'attention du public avant le début de l'intrigue. Ce lien semble plus évident encore compte tenu de l'intérêt de Dusapin pour l'opéra.

Le morceau continue en donnant aux solistes une place particulière : ils n'interviennent que ponctuellement, sans systématiquement dialoguer avec l'orchestre. Leur spatialisation permet de suggérer un autre espace-temps métaphorique, détaché de l'orchestre, qui fait penser à un rêve ou un souvenir, en sur-impression de la continuité harmonique ou mélodique du reste des instruments. Le "lyrisme" de Dusapin (comme le dira son ami chef d'orchestre Pascal Rophé) est d'autant plus mis en valeur par ces intentions de spatialisation. Le travail de l'espace dans la pièce se situe entre spatialisation et jeu acoustique, par la recherche de réverbération particulière : les premières réflexions du son dans la salle.

Dans une approche plus romantique, au sens musical du terme, on trouve aussi des jeux de timbre rappelant Berlioz, lorsque chaque soliste interagit avec son homonyme présent sur scène, comme par exemple dans le troisième mouvement. Le « grand instrument seul qu'est l'orchestre » comme aime l'appeler Dusapin, se retrouve alors dans une position de quatrième soliste. La spatialisation permet ainsi d'aborder le rôle des solistes, la couleur de l'orchestre ou même l'harmonie différemment. On peut remarquer que lors d'un concert, on se pose peu de questions sur l'espace inhérent à l'œuvre tant que celui-ci n'est pas remis en cause comme c'est le cas dans *Morning In Long Island*. L'idée de Costin Cazaban selon laquelle « La syntaxe tonale suppose, dans n'importe quel exemple classique, que la tonalité soit mise en doute. La tonalité n'existe qu'à partir du moment où elle est menacée par des fonctions centrifuges, par d'autres centres d'attraction »¹⁴ semble s'appliquer également au travail de spatialisation.

On peut donc constater que la spatialisation d'éléments musicaux, avant d'être pensée comme une dimension musicale à part entière, reste marginale. Les effets de spatialisation ne sont là que pour appuyer d'autres effets de hauteurs, timbres, rythmes... Boulez écrit : « [l'espace a été] réduit à des proportions tout à fait anecdotiques ou décoratives. (Ce n'est pas pour rien que l'on cite toujours comme ancêtres Berlioz et les Vénitiens, le plus extérieur et les plus décoratifs des compositeurs) »¹⁵. C'est à partir du XX^{ème} siècle que des compositeurs comme Varèse, Xenakis ou Stockhausen ont envisagé d'inclure la spatialisation en tant que paramètre déterminant dans leur musique.

3 L'essor de la spatialisation dans la musique écrite du XX^{ème} siècle

Le travail sur l'espace sonore au XX^{ème} siècle a débuté avec des compositeurs comme Debussy ou Ravel. D'après Makis Solomos, pour Debussy « l'espace constitue le symbole d'une ouverture vers l'infini, d'une volonté d'anti-subjectivisme et d'universalité. Il vaut essentiellement comme métaphore »¹⁶. La volonté de Debussy était donc d'étendre le champ musical en étendant les possibilités de composition. Il aurait aimé en faire une dimension musicale à part entière¹⁷. C'est

14 Cazaban, C., *Le temps de l'immanence contre l'espace de la transcendance : œuvre organique contre œuvre critique*, 1997, in *L'espace : Musique/Philosophie*, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008, page 58

15 Boulez, P. *Penser la musique aujourd'hui*, Paris, Gallimard, 1963, page 73

16 Solomos, M., *Notes sur la spatialisation de la musique et l'émergence du son*, 1998, in *Le son & l'espace*, Lyon, Aléas Grame, coll. Musique et Sciences, 1998, page 105

17 Debussy parle de « musique conçue spécialement pour le "plein air" », dans *Monsieur Croches et autres récits*

ainsi que dans son œuvre symphonique *La Mer*, on passe d'instant en instant, sans temporalité très définie, on voyage d'espace sonore en espace sonore, tel un « bout à bout de couleurs et de surfaces comme dans un tableau »¹⁸. Le rêve de Debussy d'avoir une musique faite d'espaces sonores mis bout à bout, de « substances sonores » comme il aimait à dire, va être concrétisé par certains compositeurs du XX^{ème} siècle.

3.1 Le développement de la spatialisation : Karlheinz Stockhausen

Les premières recherches sur la spatialisation du son à proprement parler, sont dans la continuité de celles entamées par les compositeurs vénitiens cinq siècles plus tôt. Il s'agit d'œuvres dont la spatialisation est acoustique, et les mouvements sont des déplacements dans l'espace de la salle de concert. Ces premières pièces ont pour but de « briser la rigidité des instruments sur la scène pour conquérir l'espace physique de la salle de concert. »¹⁹. On pourrait parler ici d'utilisation acoustique de l'espace acoustique. Ce type de spatialisation, encore dépourvu de matériel électronique, est encore utilisé aujourd'hui dans certaines pièces écrites et improvisées (nous y reviendrons plus loin). Un des compositeurs majeurs du XX^{ème} siècle à avoir beaucoup travaillé sur la spatialisation de la musique est Karlheinz Stockhausen²⁰, et il semble intéressant d'étudier chronologiquement quelques-unes de ses pièces, qui sont très innovantes en terme de spatialisation musicale.

Les pièces ainsi traitées dans cette partie seront :

- *Kreuzspiel*, 1951, pour hautbois, clarinette basse, clarinette et trio de percussionnistes, avec chef
- *Gruppen*, 1955 – 1957, pour trois orchestres respectivement de 36, 37 et 36 musiciens
- *Kontakte* (n°12 1/2), 1958 – 1960, pour électronique, piano et percussions
- *Cosmic Pulses*, 2007, pour électronique

Il convient tout d'abord de préciser que pour Stockhausen (1928 – 2007) les deux espaces musicaux (« espace musical inscrit » et « espace mobile de la diffusion du son dans la salle de concert ») « font partie d'un même raisonnement compositionnel »²¹. Ceci est très différent des premières recherches de spatialisation, où celle-ci était utilisée secondairement, en aval de la

18 Cité par Harry Halbreich, *Analyse de l'œuvre*, dans *Claude Debussy*, Paris, Fayard, 1980, page 678

19 Solomos, *ibid*, page 105

20 Dans toute cette partie, je me servais de certains éléments d'analyse musicale et de certaines figures du site : <http://stockhausenspace.blogspot.fr> (site consulté le 30 avril 2018)

21 Stoianova, *ibid*, page 81

composition. Même dans les premières pièces de Stockhausen, alors que l'idée de spatialisation n'était pas encore vraiment présente, on retrouve cette volonté d'espace "réunifié". Volonté qui s'explique par une attirance du compositeur pour le spirituel et le mystique. Stoïanova dira que « Toute sa [Stockhausen] recherche compositionnelle dans le domaine de la spatialisation repose sur la nécessité de rendre explicite lors de l'écoute la multidimensionnalité de la matière composée (...) »²². Cette aspiration à l'universalité, que l'on pourrait rapprocher de celle de Debussy, va se concrétiser dans beaucoup de ses pièces, avec notamment une fascination pour les mouvements spiralés. On a ainsi, selon Laurent Feneyrou, la « volonté d'un principe unitaire, constant, et en même temps la volonté d'un élargissement de ce principe unitaire. »²³.

3.2 Kreuzspiel – Mise en espace et disposition instrumentale sur scène

On peut par exemple parler de *Kreuzspiel* (*Cross-play*, littéralement *Jeux en croix*) pièce composée en 1951 pour hautbois, clarinette basse, clarinette et trio de percussionnistes, avec chef. C'est une de ses premières compositions publiées, et Ivanka Stoïanova affirme : « Stockhausen compose spatialement la matière sonore inscrite dans la partition et tient compte de l'emplacement des musiciens, des distances entre eux, des intensités et des registres instrumentaux ou des groupes (de sons, ou d'instruments et/ou de voix) jouant sur la dimension spatiale. »²⁴ On peut appuyer cette proposition en examinant la disposition spatiale des musiciens sur la scène, sur la *Figure 1.1*.

On remarque que chaque instrumentiste a une place très précise. Certains instrumentistes doivent être assis sur des podiums, dont le positionnement est précisé au centimètre près. Ceci indique déjà que les interactions spatiales des instrumentistes entre eux sont contrôlées. De plus, le public peut très bien voir les gestes du pianiste, celui-ci étant dos à l'auditoire. De cette manière, les mouvements pianistiques du grave vers l'aigu que comportent cette pièce s'enrichissent de plusieurs dimensions spatiales : le mouvement du pianiste (ou tout simplement sa position, les bras très écartés) fait autant partie de la pièce que l'espace métaphorique inclus entre les notes les plus aiguës et les notes les plus graves.

22. Stoïanova, *ibid*, page 81

23 Feneyrou, L., *Stockhausen et la constante recherche de l'unité*, <https://philharmoniedeparis.fr/fr/magazine/stockhausen-et-la-constante-recherche-de-lunite>, (site consulté le 29 avril 2018)

24 Stoïanova, *ibid*, page 81

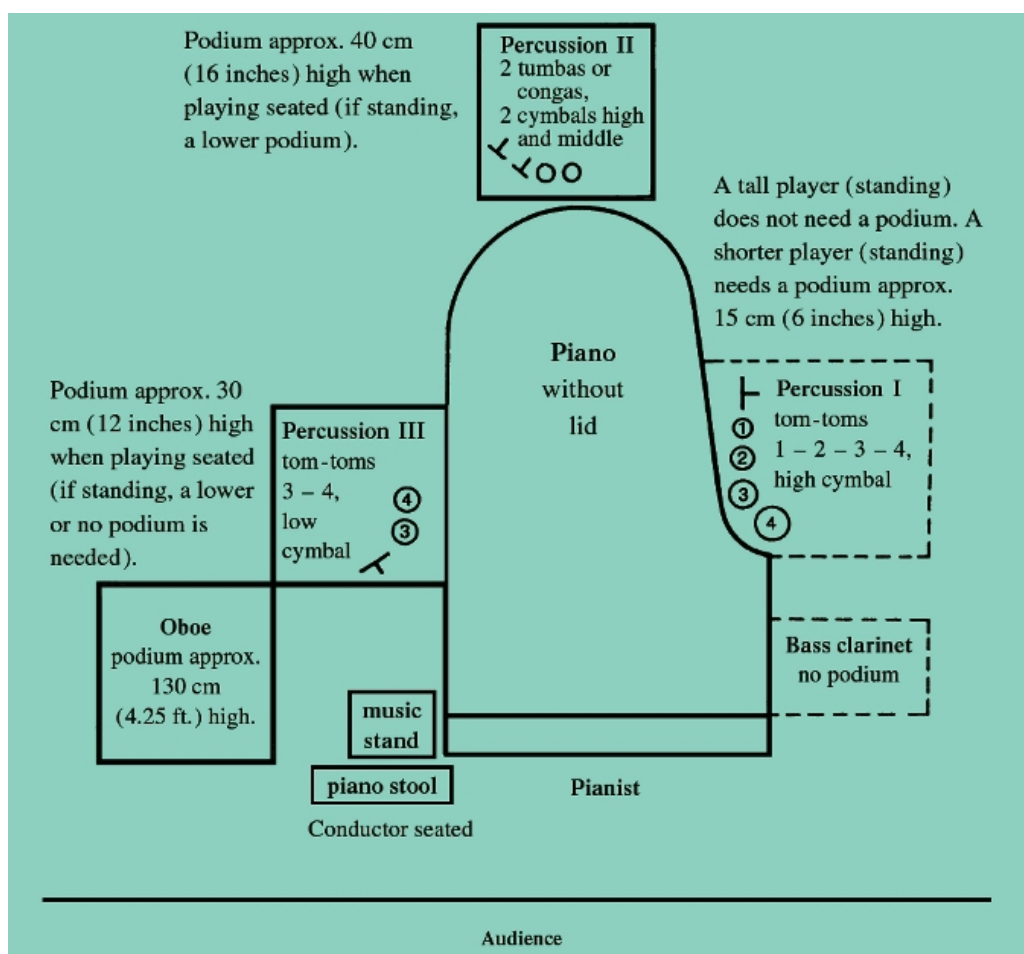


Figure 1.1 : Place des instruments sur scène dans Kreuzspiel

En outre, le piano ne dispose pas de couvercle, comme généralement dans la plupart des pièces musicales. Ceci lui octroie un timbre particulier, mais surtout sa projection sonore ne correspond plus aux standards : l'axe principal de projection est alors orienté vers le plafond et non vers le public, donnant au piano un rôle différent des autres instruments du morceau. Un effet renforcé par l'orientation des deux bois, le hautbois et la clarinette basse, qui, quant à eux, restent dans leur schéma de projection classique, face au public. Les trois percussionnistes, disposés en triangle autour du piano, se répondent et créent un mouvement spatial particulier. Toute cette disposition spatiale est accentuée par une sonorisation des instruments, à l'aide de microphones usuels et de microphones de contact envoyés dans une console de mixage et redistribués dans des haut-parleurs²⁵. Cette disposition spatiale illustre bien cette assertion de Costin Cazaban²⁶:

« Il y a donc nécessairement, à l'intérieur de n'importe quelle œuvre musicale, un vecteur temporel et un vecteur spatial dont la plus forte contradiction, la coexistence à un même niveau de développement, mutuellement et simultanément anéantissant et mutuellement et simultanément valorisant constitue la vocation de l'œuvre, son "esthéticité". » On peut dire que toute l'œuvre

²⁵ Pour plus de précisions sur la disposition spatiale de l'œuvre :

http://www.karlheinzstockhausen.org/kreuzspiel_supplement_2010_english.htm (site consulté le 30 avril 2018)

²⁶ Cazaban, *ibid*, page 55

instrumentale de Stockhausen met en avant cette affirmation, avec selon les pièces une prédominance du vecteur spatial sur le vecteur temporel.

Après avoir analysé cette première pièce qui dispose du premier niveau de travail de l'espace sonore – à savoir la disposition des instrumentistes sur la scène, qui permet un modelage de l'espace – il est intéressant de continuer à explorer la manière d'utiliser l'espace acoustique, avec la pièce *Gruppen*.

3.3 Gruppen – Mise en espace et disposition instrumentale dans la salle de concert – Place du public

Gruppen, composé pour trois orchestres, est une première avancée dans les mouvements de spatialisation dans la musique. Sa création a lieu le 24 mars 1958 à Cologne, sous la direction de Karlheinz Stockhausen pour le premier orchestre, Bruno Maderna pour le deuxième orchestre et Pierre Boulez pour le troisième orchestre. Notons que moins d'un an plus tard, Stockhausen publia son fameux article *Musik im Raum* (Musique dans l'espace), paru dans la revue *Die Reihe*, qui fait office de manifeste sur la spatialisation de la musique depuis.

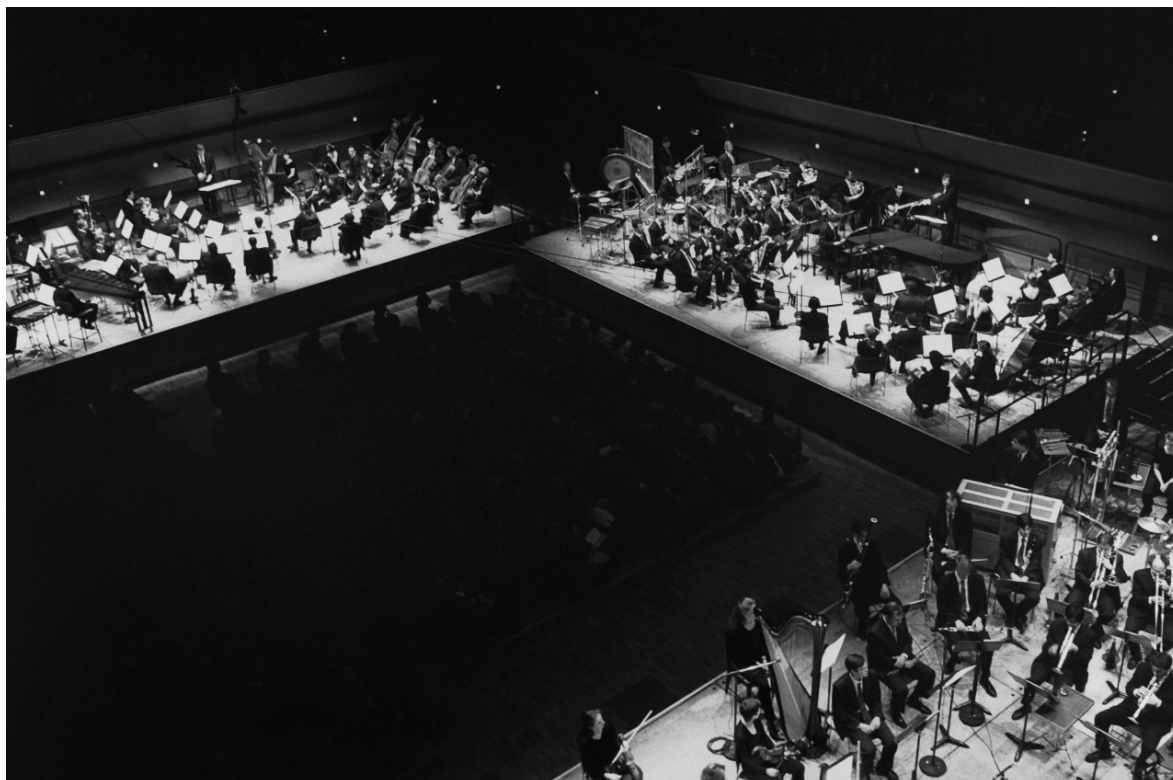


Figure 1.2 : Disposition spatiale dans *Gruppen*, Philharmonie de Paris

« Je suis convaincu que la conception de la salle de concert munie d'une scène unilatérale stéréotypée n'a plus de sens et que la musique spatiale tridimensionnelle est une nécessité » écrit Stockhausen²⁷. *Gruppen* en est l'illustration parfaite, les trois orchestres de l'œuvre étant disposés en fer à cheval autour du public, avec les musiciens dos au public et le chef d'orchestre face au public. La formation instrumentale de chaque orchestre est différente, avec l'inclusion d'instruments inhabituels en contexte orchestral, comme la guitare électrique, ou le saxophone²⁸. On pourrait décrire cette pièce comme une « superposition de couches temporelles individualisées, jouées avec différents tempi »²⁹. Chaque orchestre, composé respectivement de 36, 37 et 36 musiciens (pour un total de 109 musiciens) possède un tempo qui lui est propre, et toute la composition s'inscrit dans une pensée sérielle, autant harmonique que temporelle (choix des tempi). Ceci permet à Stockhausen d'affirmer une unité entre les différents espaces (harmonique, temporel, acoustique), et cela montre que le compositeur est très attaché à cette conception spatiale du son et de la musique plus généralement. Cette conception spatiale va de pair avec la volonté de remettre en question jusqu'à la notion même de matériau musical, ce qu'il développe dans son article *Musik im Raum* (ce qui va le pousser à travailler très tôt sur la musique électronique).

Ainsi dans *Gruppen*, la spatialisation joue un rôle très important. Elle est détaillée par Ivanka Stoïanova en ces termes :

« Toute l'évolution formelle de la pièce est fondée sur l'interaction de ces trois espaces orchestraux : ils se rencontrent, s'unifient, s'influencent mutuellement, s'interpénètrent, fusionnent sur le même tempo ou harmonie, se rassemblent ou se repoussent, s'amplifient ou s'effacent. Ils communiquent donc en s'adressant l'un à l'autre, en répondant à l'appel ou en reproduisant en écho l'événement sonore précédemment exposé par un autre groupe. »³⁰.

Par conséquent, le cœur de la pièce est dans les mouvements de spatialisation lorsque les trois orchestres dialoguent. On peut même citer directement Stockhausen, dans un exemple de spatialisation plus précis :

« Une fois que j'ai eu l'idée de former trois orchestres (...), je me suis mis à penser en termes d'alternance entre deux groupes dans les mouvements sonores : rotation en triangle, orchestre n° 1, n° 2, n° 3, n° 1, n° 2, n° 3, avec *accelerando-ritardando*, puis alternance entre deux groupes et des moments où un des groupes ne ferait qu'ajouter des sons très courts à l'alternance des deux autres. »³¹ (Un exemple sur la partition est présent en *Annexe 4*).

27 Stockhausen, K. *Texte zur Musik*, Kürten, Stockhausen-Verlag, 1977-1984

28 Voir le site http://www.karlheinzstockhausen.org/gruppen_english.htm pour plus d'informations sur la composition instrumentale des orchestres (site consulté le 30 avril 2018)

29 Stoïanova, *ibid*, page 87

30 Stoïanova, *ibid*, page 89

31 Cott, J., *Conversations avec K. Stockhausen*, Paris, Jean-Claude Lattès, 1979, page 227 – 228

Cette description de quelques mouvements nous rappelle cette obsession de Stockhausen pour l'uniformité de l'espace, et on notera que le choix des mots est crucial : Stockhausen parle bien de « rotation en triangle », et non pas en cercle, et malgré les trois orchestres, cette disposition est insuffisante pour créer la continuité réelle de la diffusion circulaire. Pour disposer d'une référence d'écoute, on peut écouter la version de Claudio Abbado avec l'orchestre philharmonique de Berlin chez *Deutsche Grammophon*, qui rend compte de cet effet musical (malgré une réduction stéréophonique).

Cette pièce remet en cause l'écoute usuelle d'un auditeur de musique classique orchestrale : cette dernière passe de quasiment frontale à multidirectionnelle. Cependant, il convient de noter que Stockhausen, avec *Gruppen*, ne cherche pas non plus à souligner le caractère individuel de chaque spectateur de l'œuvre. En effet, bien que les mouvements de spatialisation soient perçus différemment selon la place de chaque auditeur dans l'espace prévu pour le public, il souhaite obtenir pour ce dernier une expérience singulière mais homogène. En témoignent ces indications qu'il laisse, que l'on peut retrouver sur son site³².

« Je propose que le **régisseur son** emploie deux assistants, qui iront juger de la dynamique sur **toutes** les places de la salle, et qui informeront le régisseur sur la façon dont cela sonne. »³³.

D'ailleurs Stockhausen avait lui-même établi une liste de caractéristiques optimales des salles voulant se spécialiser dans les musiques contemporaines et électro-acoustiques. Cette liste comprend entre autres « un espace rond ou carré permettant des placements différents, (...) des podiums amovibles, (...) des possibilités de contrôle de la réverbération... »³⁴. La liste complète se trouve en *Annexe 5*.

La pièce se démarque donc d'autres pièces de musique contemporaine, qui questionnent outre l'écoute spatiale de l'auditeur, sa singularité, et qui jouent sur cet élément. On pourrait citer la très célèbre œuvre de Iannis Xenakis, *Terretektorh*, qui rebat les cartes de la place des instrumentistes dans la salle en incluant le public aux musiciens, et en utilisant la possibilité de certains instrumentistes de jouer tout en effectuant des mouvements physiques (par exemple, jouer de la flûte traversière tout en se déplaçant dans la salle).

A peu près à la même période, Stockhausen commença à faire des expériences sur la musique électronique. Cette dernière laisse une place plus importante à la spatialisation du son, car ses éléments, à contrario des éléments acoustiques, peuvent directement être envoyés dans le canal de diffusion souhaité, par le biais de haut-parleurs. Ainsi les expériences spatiales de Stockhausen

32 http://www.karlheinzstockhausen.org/gruppen_german.htm (site consulté le 30 avril 2018)

33 « Ich schlage vor, daß der **Klangregisseur** zwei Assistenten mitbringt, die regelmäßig auf **allen** Plätzen im Saal die Dynamik beurteilen und ihm mitteilen, wie sie dort klingt. »

34 Stoianova, *ibid*, page 112, traduction de «Musik Im Raum »

sont beaucoup plus poussées lorsque la pièce est mixte ou totalement électronique. Le développement des sources de nature électrique vont donner beaucoup plus de libertés à la spatialisation, ce qui sera le cas de la prochaine œuvre abordée.

3.4 Kontakte – Spatialisation d'instruments acoustiques – Spatialisation de sons électroniques – Projectionniste du son

« (...) La dimension spatiale devient véritablement structurante et essentielle pour la technique de composition du matériau musical, pour la structuration formelle globale de l'œuvre et pour sa diffusion spatialisée en mouvement uniquement à partir des années cinquante du XXème siècle. Ce sont le sérialisme intégral, et surtout, les musiques concrètes et électroniques qui confient au paramètre "lieu de production du son" ou plus généralement "espace" un rôle formateur important et même primordial pour la structuration de la micro- et de la macrostructure de l'œuvre. »³⁵

Cette citation d'Ivanka Stoïanova permet de faire la transition entre les pièces acoustiques et les pièces électroniques de Stockhausen. En effet, Stockhausen travaille avec des techniques de composition sérielles, aussi bien pour l'harmonie que pour le rythme ou l'espace acoustique. On les retrouve dans sa composition *Kontakte*, écrite entre 1958 et 1960.

La pièce existe sous trois versions différentes : la première est pour électronique seule (n°12), la deuxième pour électronique, piano et percussions (n°12 1/2) et la troisième est un théâtre musical, re-nommé Originale (n°12 2/3) qui utilise tous les éléments de la deuxième version de *Kontakte*. J'ai choisi de parler de la deuxième version, car elle permet de mettre en relation des éléments acoustiques et électroniques autour du travail de la spatialisation. Voici la disposition scénique et le matériel nécessaire pour cette pièce :

Aufbau der Instrumente mit 12 statt 10 Mikrofonen (vgl. Seite IX) /
Set-up of the instruments with 12 instead of 10 microphones (see page IX)

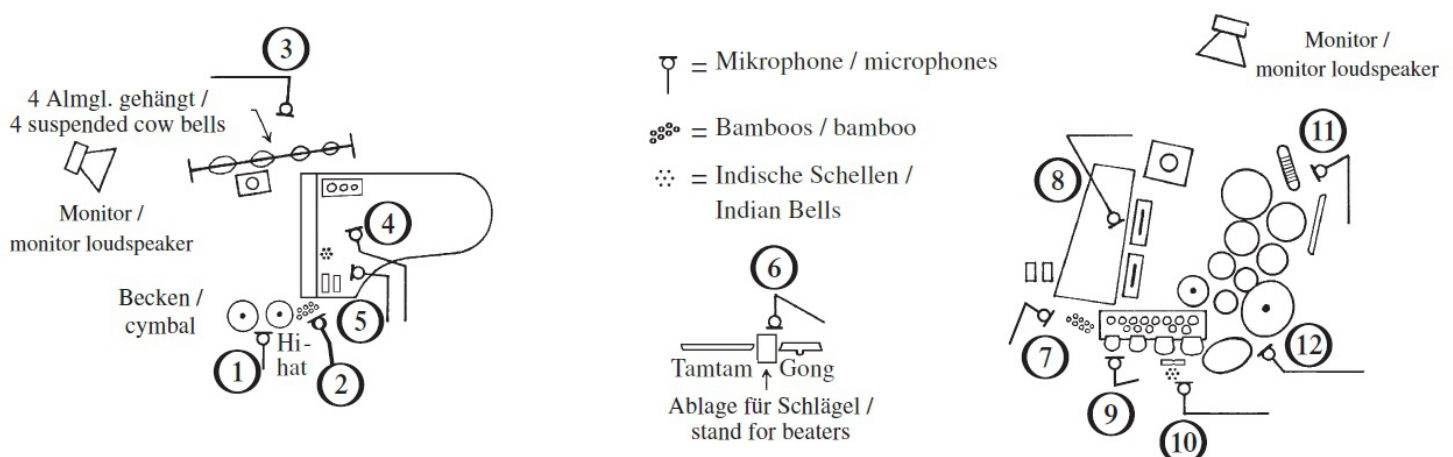


Figure 1.3 : Disposition scénique pour *Kontakte*

Le tout est diffusé en quadriphonie sur quatre haut-parleurs, souvent disposés au sommets d'un carré entourant le public.

Cette pièce, dans la lignée de la célèbre *Gesang der Jünglinge* (composé en 1956 par Stockhausen) qui est une pièce pour électronique seule, est très intéressante du point de vue spatial, pour comprendre les méthodes de spatialisation et son intention musicale. Dans la version n°12 1/2, la dichotomie entre les instruments acoustiques, qui restent fixes dans l'espace sonore, et les sons électroniques, confère à l'œuvre une couleur très particulière. Le titre *Kontakte*, montre encore une fois l'attrait de Stockhausen pour le travail sur l'espace sonore et renvoie à trois types de contacts³⁶ :

- le contact entre les familles de sons : la différence entre les sons électroniques et les sons acoustiques, entre les différents types de matériau donnant différents types de sons (metal, bois, peau),
- le contact entre les formes spatiales créées par la projection du son dans la salle,
- le contact entre les *moments*, concept propre à Stockhausen, correspondant à des séquences juxtaposées temporellement et spatialement, de forme et de contenu distincts, autonomes et qui ont chacun des caractéristiques musicales singulières.

Cette séparation des trois types de contacts est intéressante car elle montre à quel point la question de l'espace est importante pour Stockhausen : espace de timbres, espace acoustique, espace temporel sont regroupés et développés de la même façon, grâce aux outils de techniques du sérialisme qui permettent une mise en parallèle et un traitement équivalent des espaces. Cependant, l'espace acoustique revêt en plus un caractère moins mathématique et plus dramatique dans sa construction.

Afin de comprendre les mouvements de l'espace que contient cette pièce, il faut se demander comment ils ont été créés. On va notamment parler du mouvement de spatialisation le plus connu bien qu'il soit naturel, à savoir la rotation. Celui présent dans *Kontakte*, a été obtenu de manière assez rudimentaire mais néanmoins intéressante.

36 <http://stockhausenspace.blogspot.fr/2015/11/kontakte-planning-design.html> (site consulté le 30 avril 2018)



Figure 1.4 : Stockhausen, table rotative et microphones

Afin d'obtenir une rotation du son sur les quatre canaux de diffusion, Stockhausen a construit une table rotative, surmontée d'un haut-parleur, enfermé dans un baffle conique. La particularité d'un baffle de ce type est sa directivité assez marquée, qui permet, dans le cadre du dispositif, d'avoir un effet de rotation plus prononcé. Ce système se trouve au centre d'un dispositif microphonique qui contient quatre microphones, orientés vers la table rotative. Chaque signal provenant des microphones, après traitement, pouvait ensuite être envoyé dans un canal de diffusion, ce qui retranscrivait naturellement le mouvement de rotation effectué par la table.

Cette méthode permet à Stockhausen d'obtenir enfin un véritable mouvement de rotation circulaire, créé mécaniquement ; c'est la puissance de l'électronique face à l'acoustique, et c'est ce qui permet au compositeur de se rapprocher de son idéal d'unité, ici spatiale. Dans *Gruppen*, la rotation du son qui était effectuée entre les trois orchestres n'était qu'utopique. Et bien que la diffusion quadraphonique soit encore très loin de pouvoir permettre une continuité d'espace convaincante, elle n'en reste pas moins une solution plus proche des souhaits du compositeur. En fait, toute l'attitude compositionnelle de Stockhausen est symptomatique de la recherche musicale occidentale, enclenchée lors de la période romantique et développée au XX^{ème} siècle : la volonté d'une « extension des échelles de grandeur qui peuvent être composées »³⁷. Et chez Stockhausen,

37 Vaggione, H. , L'espace composable. Sur quelques catégories opératoires dans la musique électroacoustique, 1997, in L'espace : Musique/Philosophie, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008, page 159

cette extension est concomitante d'une volonté de resserrer les liens entre les différentes grandeurs, bien que ceux-ci soient de toute manière présent de nature, comme le précise Horacio Vaggione : « Il est cependant évident qu'une détermination compositionnelle de l'espace physique -par exemple- relève également d'autres espaces, opératoires, métaphoriques ou perceptifs, qui sont de fait en état d'interaction dans l'œuvre musicale. »³⁸ Ainsi, quand Stockhausen écrit des œuvres où le son est spatialisé, son écriture de l'espace interne de la pièce en est modifiée.

La spatialisation du son dans *Kontakte* ne consiste bien sûr pas uniquement en un mouvement de rotation. Les objets sonores comportent aussi des degrés de "rapprochement", avec des sons électroniques qui peuvent être très proches et d'autres très lointains, grâce à l'utilisation de certains effets de réverbération. Ceci est aussi à distinguer du volume même de ces objets, qui varie de très faible à très fort (*ppp* – *fff*). Stockhausen disait dans une interview, à propos de sa pièce : « Tandis que dans la musique électronique, six mouvements-formes spatiaux de différentes vitesses et directions se contactent mutuellement dans un changement perpétuel (rotation, mouvement en boucle, alternance, sources séparées immobiles – chacune des sources –, sources connectées immobiles – toutes sur la même –, points isolés spatialement), les instrumentistes représentent les sources sonores spatiales immobiles. »³⁹. Le panel de mouvements spatiaux est donc plutôt simple, comparé à la complexité harmonique (sérielisme) et temporelle (*moments*).

Concernant le volume, il est intéressant d'étudier la relation entre les instruments acoustiques et les sons électroniques. Bien que le piano et la percussion soient repris par un système microphonique pour être envoyés dans la façade (comme dans la *Figure 1.3*), leur empreinte sonore spatiale provient de la scène (diffusion frontale par rapport au spectateur). Le système de sonorisation permet d'ailleurs d'intégrer plus facilement les deux instruments acoustiques aux sons électroniques, et de faire entendre des sons inhabituels au public. En effet, même si les hauts-parleurs possèdent une dynamique absolue plus faible que celle du percussionniste, Ivanka Stoïanova exprime avec justesse que : « (...), des sons très faibles, joués *p* – *ppp* et pratiquement inaudibles sans amplifications, deviennent audibles grâce à la projection-interprétation qui peut parfaitement doser l'intensité en fonction de la prestation instrumentale concrète et de la spécificité acoustique de la salle. »⁴⁰. Cette citation met en relief l'utilité de la sonorisation dans un cadre de musique contemporaine, et de plus elle ouvre le champ à l'émergence d'un nouveau type de musicien-interprète : le projectionniste du son. La table de mixage est son outil d'interprétation de l'espace. Dans les premières compositions de Stockhausen, c'est souvent le compositeur lui-même qui était son propre projectionniste. Pourtant, l'espace sonore, en tant que dimension propre dans la

38 Vaggione, *ibid*, page 153

39 « Whereas in the electronic music, six spatial movement-forms of different speeds and directions contact each other in ever changing ways (rotation, looping movement, alternation, fixed separate sources – each one different –, fixed connected sources – every one the same –, isolated space points), the instrumentalists represent immobile sound sources in space. »

40 Stoïanova, *ibid*, page 87

musique, a le même besoin que les autres dimensions (hauteur, intensité, timbre, durée) d'être interprété par des musiciens, des interprètes, et non des techniciens. Ainsi pour *Kontakte*, le projectionniste doit connaître par cœur le morceau, et, d'après Stockhausen, « avoir répété au moins 8 x 3 heures avec le duo d'instrumentistes (piano et percussions) et toute la technique. »⁴¹.

Les expérimentations spatiales de *Kontakte*, où l'espace physique est utilisé comme matière, marquent le début pour Stockhausen d'une recherche technologique qui a pour but de répondre à des besoins musicaux. Cette volonté d'unité, cette obsession des mouvements circulaires et spiralés (la fin de *Kontakte* consiste en une longue spirale qui disparaît dans le silence...) vont le pousser à chercher un système de diffusion du son lui permettant d'obtenir un quadrillage précis de l'espace pour ses expérimentations. Il aura l'occasion d'obtenir un tel dispositif, grâce à l'Exposition Universelle de 1970 à Osaka.

3.5 *Osaka, une étape dans le traitement de la spatialisation chez Stockhausen*



Figure 1.5 : Intérieur de l'auditorium de l'Exposition Universelle d'Osaka, 1970

41 Stockhausen, K. *Texte zur Musik*, « Kontakte », Kürten, Stockhausen-Verlag, 1984 – 1991, vol 7, page 59

En 1970, l'Exposition Universelle eut lieu, pour la première fois sur le sol japonais, à Osaka, réunissant 77 pays différents. Elle dura environ 6 mois et attira plus de 60 millions de personnes. A cette occasion, le pavillon allemand accueillit une collaboration entre Karlheinz Stockhausen et l'architecte Fritz Bornemann (entre autres), qui consistait en un gigantesque auditorium sphérique de 28 mètres de diamètre environ. Ce n'est d'ailleurs pas la première fois que Stockhausen concevait une salle faite pour des compositions qui utilisent l'espace sonore. « L'expérimentation spatiale de Stockhausen met systématiquement en question l'espace de la salle de concert. »⁴², comme on a pu le voir avec *Gruppen*, *Kontakte*, ou d'autres de ses compositions comme *Carré* (pièce pour quatre orchestres et quatre chœurs). Pour le compositeur, toute réflexion sur la spatialisation d'une œuvre, c'est-à-dire les mouvements du sons composés dans l'espace, ne peut être dissociée d'une réflexion sur le lieu de la performance et son acoustique. C'est pour cela qu'avant Osaka, Stockhausen avait déjà conçu des auditoriums avec acoustique variable, adaptés aux musiques électro-acoustiques ou mixtes. « Ce que je voudrais, c'est une maison avec plusieurs auditoriums, chacun ayant une acoustique différente. »⁴³ disait-il. L'Exposition Universelle lui donna la possibilité d'imaginer une salle totalement faite pour recevoir des musiques dont la dimension spatiale du son était composée. L'auditorium d'Osaka s'inscrit ainsi dans la lignée des bâtiments imaginés par des compositeurs à des fins de travail de l'espace sonore, comme le pavillon Philips conçu par Xenakis.

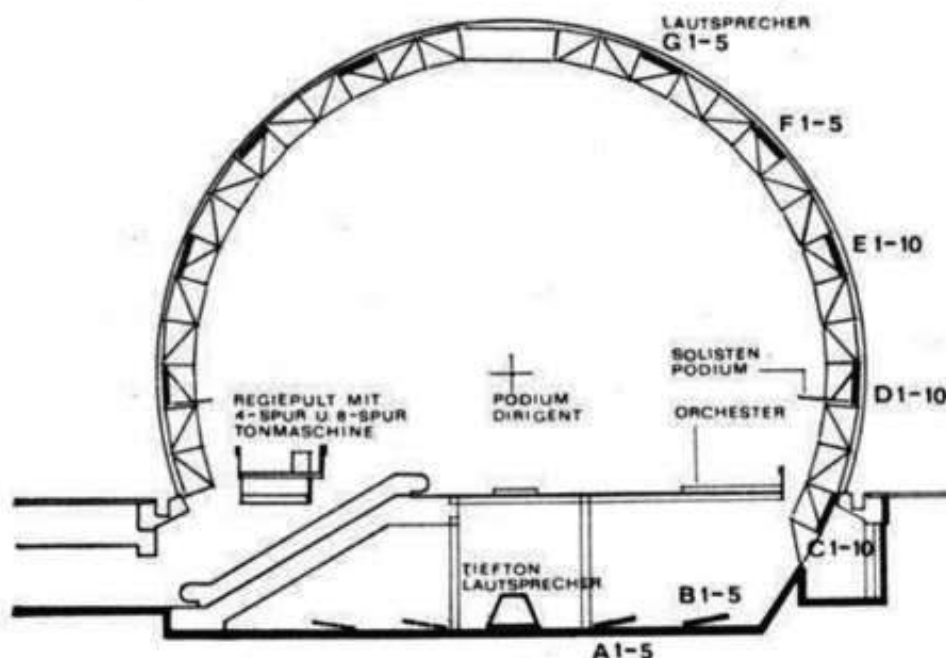


Figure 1.6 : Vue de côté de l'auditorium d'Osaka

L'auditorium contenait 50 hauts-parleurs, répartis sur 7 cercles horizontaux (l'idée de départ était d'avoir 10 cercles). Le public, qui pouvait être constitué d'un maximum de 500 personnes, était

42 Stoianova, *ibid*, page 114

43 Cott, *ibid*, page 247

assis sur une plate-forme perméable au son, initialement prévue au centre de la sphère (voir *Figure 1.5*). On avait ainsi 4 couronnes de hauts-parleurs au-dessus de la plate-forme et 3 couronnes en dessous. Cette disposition permettait une écoute multidirectionnelle des spectateurs.

On peut voir sur la *Figure 1.6* que la régie de mixage se situait à gauche, près de l'entrée de l'auditorium. Chaque lettre correspond à une rangée de hauts-parleurs (*Lautsprecher*) et à côté de la lettre est indiqué le nombre de haut-parleurs dans la rangée. On retrouve un *Subwoofer* en dessous de la plate-forme centrale. L'auditorium contient aussi des podiums, sur lesquels se tenaient, quand la pièce musicale le nécessitait, un orchestre avec un chef, des solistes.

Stockhausen avait imaginé des « moulins rotatifs », qui auraient permis des mouvements de spatialisation précis dans l'auditorium (mouvements pré-programmés et réutilisés en condition de concert). Cependant, la technologie n'étant finalement pas assez avancée, seul un cercle de rotation variable, contrôlable en temps réel, fut mis en place.

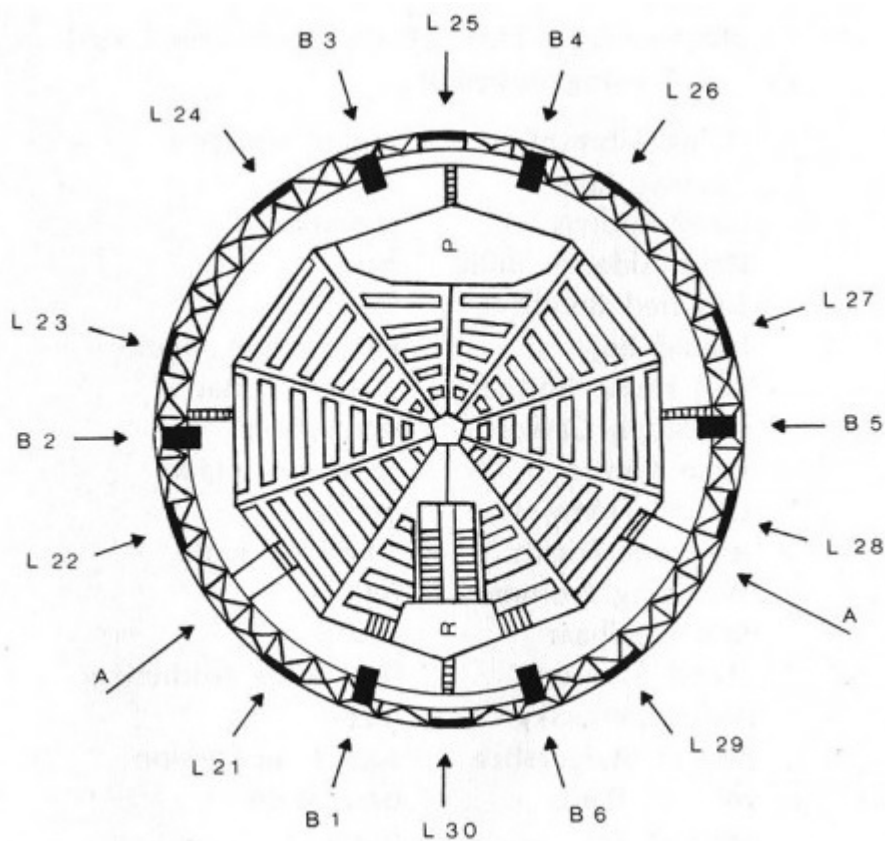


Figure 1.7 : Vue de dessus de l'auditorium d'Osaka

- A : Sorties
- L : Haut-parleurs
- B : Balcons pour les solistes
- P : Podium des musiciens
- R : Régie de mixage. Derrière la régie se trouvait l'escalier d'entrée du public.

L'auditorium sphérique était le lieu de représentation d'œuvres de Stockhausen plus de cinq heures par jour pendant toute la durée de l'Exposition. Par exemple, l'œuvre *Spiral*, composée en 1968, fut jouée plus de 1300 fois. De nombreux ensembles instrumentaux prestigieux furent invités, et Stockhausen put interpréter ses plus grandes pièces dans cette salle : *Gruppen*, *Zyklus*, *Carré*, *Kontakte*, *Hymnen*... Stockhausen a aussi créé des œuvres spécialement pour l'auditorium, comme *Expo*. La puissance d'une telle salle de concert est d'avoir décuplé les possibilités de mouvement dans l'espace. Jusqu'à Osaka, l'espace sonore composable se limitait à deux dimensions, suivant un plan parallèle au sol. A cette occasion, les compositeurs ont développé des pièces qui jouent avec les trois dimensions de l'espace physique : c'est un nouveau pas pour l'extension de l'échelle des grandeurs composables. Il a fallu attendre de nombreuses années avant d'avoir pu remettre en place un système de spatialisation en trois dimensions de cette ampleur, sans les outils de calcul algorithmiques plus poussés d'aujourd'hui. Un tel lieu a en tout cas permis la vulgarisation de la musique contemporaine, étant donné le très grand nombre de personnes qui ont assisté aux prestations (plus d'un million).

Certes, une telle installation comportait des défauts. Le plus important était de nature acoustique : la plate-forme sur laquelle était disposé le public n'était pas totalement bien placée par rapport à la sphère. Elle était située trois mètres en-dessous de l'équateur, et malgré cela, les sons venant du dessous étaient trop absorbés, et les haut-parleurs du dessous trop près du sol, ce qui pour la spatialisation faussait les trajectoires des sons. Cependant, malgré ces imperfections techniques, Stockhausen parle d'une « situation tout à fait nouvelle de l'expérience musicale vécue. »⁴⁴. Il qualifie de « voyage musical cosmique »⁴⁵ sa musique : les mouvements du son dans l'espace servent à rappeler métaphoriquement les mouvements des astres. On retrouve ce caractère dramatique dans la spatialisation propre à Stockhausen, qui paraît en opposition avec le reste des dimensions musicales, mais qui, pour lui, fait partie du même « espace intérieur ». La musique s'enrichit de nouvelles perspectives mais n'en reste pas moins unie dans la composition. C'est une « véritable mutation du matériau »⁴⁶ musical, l'entité fondamentale sonore « n'est pas limitée à sa seule dimension auditive, mais elle s'est élargie à des intérêts cognitifs et expressifs relevant d'une esthétique « ouverte », ce qui ne signifie pas du tout qu'elle soit désorganisée. »⁴⁷. La spatialisation révèle donc d'autres sensations qui n'auraient pas émergé dans le cas d'une musique où l'espace sonore ne serait pas utilisé.

44 Stockhausen, K. Texte zur Musik, « Osaka-Projekt », Kürten, Stockhausen-Verlag, 1963-1970, vol 3., pages 154 - 155

45 Voir note précédente

46 Article d'Olivier Lussac sur <http://www.artperformance.org/article-19127353.html> (site consulté le 30 avril 2018)

47 Voir note précédente

Stockhausen va alors continuer à travailler avec l'espace sonore, tout en développant sa palette de sons électroniques, et ce, jusqu'à l'une de ses dernières œuvres, *Cosmic Pulses*, qui est son morceau le plus complexe en terme de spatialisation.

3.6 *Cosmic Pulses – Aboutissement de la recherche de Stockhausen sur la spatialisation – Limites*

En effet, *Cosmic Pulses*, morceau appartenant au cycle d'œuvres inachevé *Klang* (représentant les 24 heures de la journée, dont *Cosmic Pulses* en est la 13ème), est articulé autour du nombre 24. Ce nombre se retrouve dans les paramètres sonores de l'œuvre (hauteur, durée, intensité, timbre, espace sonore), qui fut la dernière de sa vie à n'être que purement électronique. Ceci permet de mettre tous ces paramètres sur un même pied d'égalité, en terme de composition. Ainsi on peut retrouver le nombre 24 qui est :

- le nombre de couches de sons électroniques – ***intensité, timbre***
- le nombre de boucles mélodiques – ***durée, intensité, timbre***
- le nombre de registres harmoniques (couvrant en tout sept octaves) – ***hauteur***
- le nombre de tempi (la valeur la plus élevée de tempo étant d'ailleurs 240 bpm) – ***durée***
- le nombre de minutes avant que les boucles ne commencent à disparaître – ***durée***
- Le nombre de vitesses de trajectoires de spatialisation (entre 1 trajectoire pendant 16 secondes jusqu'à 16 trajectoires pendant 1 seconde) – ***espace sonore***

Par ailleurs, les diviseurs de 24 sont aussi utilisés. Chaque tempo est subdivisé en 8 pulsations et tons différents. Par exemple, pour le tempo de 240 bpm, qui correspond à 240 battements pour une minute, on aura 240 x 8 soit 1920 pulsations et tons différents par minute. Le nombre 8 se réfère aussi au système de diffusion octophonique, soit 8 haut-parleurs disposés autour du public. Les 24 boucles mélodiques commencent l'une après l'autre, de la plus grave à la plus aigüe et de la plus lente à la plus rapide, et finissent dans le même ordre. Ainsi la pièce se densifie peu à peu, puis les couches superposées de sons se taisent l'une après l'autre. Le journaliste Nick Collins, qui assista à la première exécution de l'œuvre, parle « d'être pris dans un maelström. »⁴⁸. C'est l'aboutissement pour Stockhausen de sa pensée de l'unité, avec toujours cette récurrence du mystique et du rapport aux éléments. Robin Maconie, compositeur et ancien élève de Stockhausen décrit ainsi la pièce :

« *Cosmic Pulses* est clairement le chapitre final d'une séquence d'études tout au long de la vie de Stockhausen, motivé par des idées de division jusqu'à l'atome et de reformation de timbres,

⁴⁸ Collins, N. *Karlheinz Stockhausen: Cosmic Pulses*, MIT Computer Music Journal, Vol. 32, No. 1, page 90

de sons en mouvements dans l'espace, et de plongée à l'intérieur des composants et dans des lois universelles gouvernant les cycles des phénomènes naturels, des galaxies dans le cosmos jusqu'aux particules nucléaires. »⁴⁹. Par la recherche et le travail sur l'espace sonore, Stockhausen concilie les opposés et relie l'infiniment grand à l'infiniment petit. Pour mieux comprendre l'agencement temporel de la pièce, voir l'*Annexe 6*, qui contient les partitions graphiques de *Cosmic Pulses*.

Concernant la spatialisation, chaque boucle mélodique possède son mouvement spatial défini, qui voyage entre les 8 haut-parleurs. Les haut-parleurs sont disposés autour du public, tous à la même hauteur, formant un octogone de côtés tous égaux. Cette disposition, assez classique, permet d'obtenir un espace sonore homogène à l'intérieur des haut-parleurs, ce qui permet de rendre les trajectoires des sons plus précises. Cependant, à la différence des pièces précédentes comme *Kontakte*, où la composition mettait en scène des objets sonores qui tournaient uniformément (table rotative), dans *Cosmic Pulses*, chaque boucle mélodique possède sa trajectoire particulière. Stockhausen a pour cela écrit 241 trajectoires différentes qu'il représente graphiquement dans le livret de la pièce (*Figure 1.8*). Sur cette représentation est indiquée le numéro de la boucle temporelle, avec 8 à 12 trajectoires attribuées. Chaque trajectoire dure un certain temps qui est indiqué au-dessus de chaque graphique. Le temps que met le son électronique à parcourir chaque trajectoire n'est pas corrélé avec le temps de la boucle mélodique lui-même.

Afin de réaliser techniquement cette spatialisation, Stockhausen fait appel au Studio Expérimental des Arts Acoustiques (*Experimentalstudio für akustische Kunst*) basé à Freiburg. Ce sont deux ingénieurs du son, Joachim Haas et Gregorio Karman, qui vont être chargés de mettre au point un système permettant de spatialiser des objets sonores. Ce système, appelé OKTEG pour *Oktophonic Effects Generator*, permet une spatialisation orientée-objet sur 8 canaux de diffusion. Il est important de remarquer que ce dispositif, dans la lignée de celui construit pour l'œuvre *Sirius*, enclenche un nouveau pas dans l'art de la spatialisation. En effet, contrairement à *Kontakte*, tout le principe de *Cosmic Pulses* repose sur la nécessité de spatialiser chaque boucle mélodique avec sa trajectoire propre. Ainsi, la table de mixage n'est plus un *instrument* de spatialisation en tant que tel : elle devient un moyen technique de diffusion, d'homogénéisation du son dans l'espace, et c'est l'OKTEG (consistant en fait en un *patch* Max/MSP) qui devient *l'instrument* à proprement parler.

49 « *Cosmic Pulses* is clearly the final chapter of a sequence of studies throughout Stockhausen's life motivated by atom-splitting ideas of breaking down and reforming timbres, of moving sounds in space, and of delving into the inner components and universal laws governing the cycles of natural phenomena from galaxies in the cosmos to nuclear particles. » cité dans *Stockhausen's Cosmic Pulses*, page 13

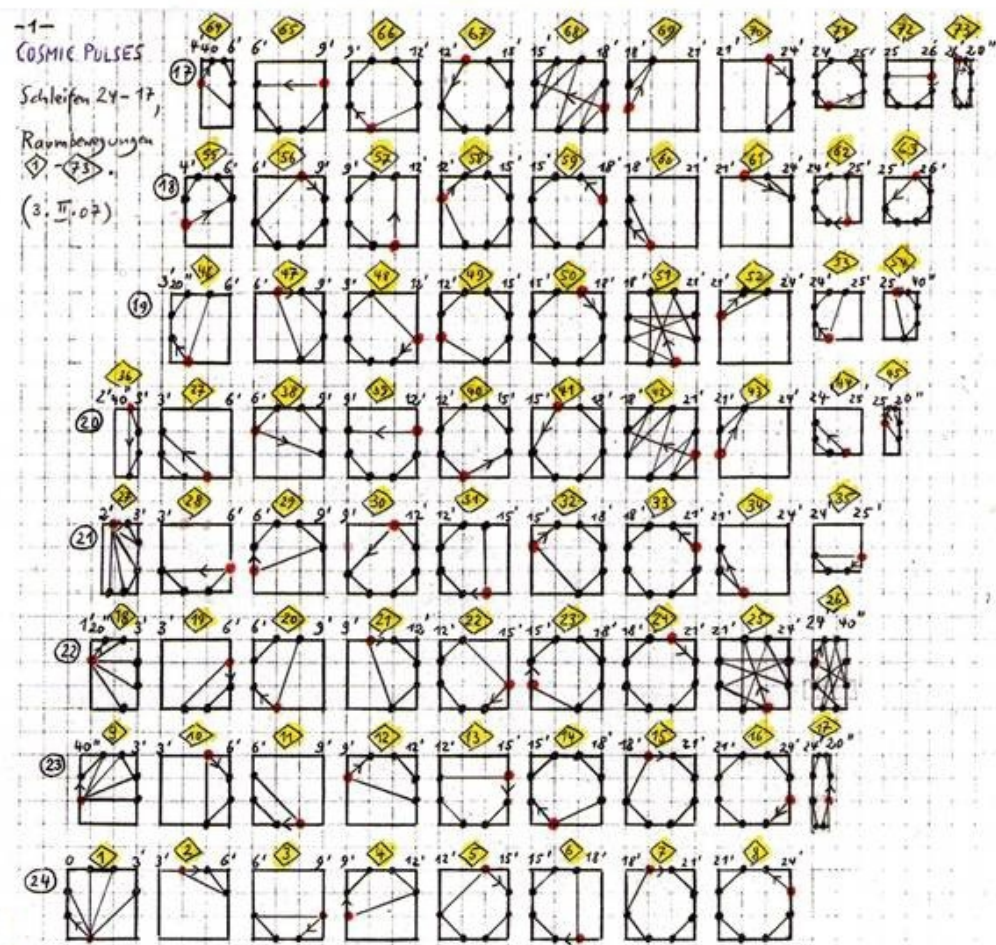


Figure 1.8 : Extrait des différentes trajectoires spatiales dans Cosmic Pulses

Cette nouvelle technique de spatialisation est celle qui est encore utilisée aujourd'hui, et qui permet un contrôle total de l'espace sonore, note après note, objet sonore après objet sonore. Les évolutions actuelles ont aussi permis une représentation plus fidèle des trajectoires de spatialisation dans l'espace acoustique du lieu. Dans le système de *Cosmic Pulses*, c'est une spatialisation en amplitude qui est effectuée, alors qu'aujourd'hui des techniques de matricage plus poussées sont utilisées (comme par exemple l'ambisonie). En *Annexe 7* figure le schéma fonctionnel du dispositif établi pour *Cosmic Pulses*.

Cette aspect technique de la spatialisation ne peut pas être dissocié de l'aspect musical dans le morceau. Ce dernier est d'une telle complexité, qu'il est pratiquement impossible d'écouter toutes les couches musicales. Stockhausen lui-même disait que « S'il est possible de tout écouter, je ne le sais pas encore – cela dépend de l'expérience que l'on a d'écouter sur huit canaux. »⁵⁰. Cette citation montre que la pièce ouvre la voie à une nouvelle forme d'écoute de la part du public : il ne s'agit plus de tout entendre, de comprendre comment tous les éléments s'articulent, mais de proposer une autre écoute. Ainsi, *Cosmic Pulses* dévoile le désir du compositeur de faire vivre au public une

50 « If it is possible to hear everything, I do not yet know – it depends on how often one can experience an eight-channel performance. » in « *Cosmic Pulses Elektronische Musik* (2007) », texte de la pochette du CD 91, p.5.

expérience différente de l'écoute musicale habituelle. « La musique ne devient pas seulement un lieu d'expression de l'espace du son, mais elle est la mise en scène de ce désir du compositeur d'accéder à des territoires dont certains sont physico-sensoriels, mais dont la plupart sont mentaux. »⁵¹. La spatialisation de l'œuvre permet donc aussi de sortir de ce confort d'écoute de la musique sans travail de l'espace, confort lui-même accentué encore depuis le développement de l'enregistrement et la banalisation de la monophonie puis stéréophonie. D'ailleurs, étant donné la complexité de l'œuvre, qui dépasse les limites de ce que l'on conçoit comme musique, il est moins étonnant de voir que Stockhausen lui-même, lors du séminaire suivant la création de l'œuvre, remette en question l'appartenance de la pièce à l'art musical :

« Mr. Stockhausen admis que la pièce pourrait ne pas être vue comme de la musique, comme "juste du son", et qu'il pourrait être préférable de "le prendre seulement comme un phénomène naturel et pas une composition. »⁵².

En outre, cette spatialisation très complexe peut être mise en opposition avec le matériau musical même. Car, bien que les paramètres comme la hauteur ou la durée soient aussi complexes dans l'œuvre, le son de départ en lui-même est décrit par Collins comme « un son de piano électrique plutôt de mauvaise qualité »⁵³ (cette sonorité particulière provoqua d'ailleurs un accueil mitigé de la pièce par le public lors de la création de l'œuvre). On peut donc opposer *Cosmic Pulses* aux précédentes compositions électroniques ou mixtes du compositeur, qui possèdent des sons très travaillés. Cependant cela permet de mettre en lumière une autre particularité de l'œuvre : « Le matériau tonal relativement brut et son manque de variété et manque de finition comparé à *Kontakte* ou *Kathinkas Gesang* peuvent être des indicateurs d'une véritable hâte, mais l'absence d'une esthétique distrayante a pour effet de centraliser l'attention sur des enjeux techniques éminents. »⁵⁴.

C'est par ailleurs par cette esthétique sobre et par cette rigueur de composition presque mathématique, que Stockhausen réussit à éviter un des écueils soulevés par Pierre Boulez concernant le travail de l'espace sonore, et ce malgré une spatialisation primordiale et complexe :

51 Armengaud, J-P. , Du temps brisé à l'espace unifié, avec un détour allégorique par l'interprétation pianistique, 1997, in L'espace : Musique/Philosophie, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008, page 69

52 « Mr. Stockhausen admitted that the work might be viewed as "not music, just sound", and that it might be best to "just take it as a natural phenomena and not think of composition. » cité dans Collins, *ibid*, page 90

53 Collins, *ibid*, page 90

54 « The relatively crude tonal material and its lack of variety and lack of finish compared to *Kontakte* or *Kathinkas Gesang* could be indicators of genuine haste, but the absence of distracting aesthetic qualities has the effect of focusing attention on outstanding technical issues. » cité dans Stockhausen's Cosmic Pulses, <http://www.jimstonebraker.com/Cosmic%20Pulses%201.pdf> (site consulté le 30 avril 2018), page 13

« Car Boulez prévoit génialement le risque que comporte la dominance de la spatialisation en musique : le statisme, la banalisation ou la suppression du discours, l'anarchie sans règles de la couleur et de la matière. »⁵⁵.

Cosmic Pulses est donc une œuvre montrant l'aboutissement de la pensée de Stockhausen sur l'espace musical. La spatialisation est utilisée comme facteur d'unité artistique, au même titre que les autres paramètres du son. D'autres compositeurs possèdent une esthétique différente, et utilisent au contraire l'espace sonore comme le moyen d'accentuer des oppositions présentes dans le discours musical. Les compositeurs de musique acousmatique par exemple, ne cherchent pas une homogénéité d'espace comme Stockhausen, mais plutôt une hétérogénéité, appuyée aussi par une recherche sur le timbre au travers du prisme de la diffusion.

3.7 Spatialisation et timbre – Un aparté sur la musique acousmatique

Le terme acousmatique a été introduit par le compositeur Francis Bayle. Élève d'Olivier Messiaen et de Pierre Schaeffer, c'est un pionnier dans le courant musical de la musique concrète. Il utilise le mot acousmatique provenant du verbe grec *Akousma*, qui signifie entendre, et donne naissance à une nouvelle branche musicale. Selon lui, le mot acousmatique est aujourd'hui utilisé « parmi les communautés de compositeurs pour désigner quasi naturellement ce qui distingue entre toutes les techniques musicales actuelles celles-là mêmes qui relèvent proprement du support sonore, d'esthétiques aussi variées soient-elles ».⁵⁶ Une autre citation de François Bayle précise encore le propos quant au terme de musique acousmatique. Pour lui, cette notion « qualifie le travail de composition sur le son en atelier (le studio) en vue de sa projection ultérieure en concert d'un genre nouveau »⁵⁷. Cette pensée nouvelle a été développée par le compositeur, qui écrit une pièce fondatrice : *L'Expérience Acoustique*.

Cette pièce repose sur un élément phare de la musique acousmatique : l'acousmonium. Selon Bertrand Merlier, c'est un « Type particulier "d'orchestre de haut-parleurs" destiné à la **projection** et à la **spatialisation** du son »⁵⁸.

55 Armengaud, J-P. , *Du temps brisé à l'espace unifié, avec un détour allégorique par l'interprétation pianistique*, *ibid*, page 1

56 Bayle, F. *Musique acousmatique, propositions ... positions*, Paris, Buchet/Chastel, 1993, page 18

57 Bayle, *ibid*, page 19

58 Merlier, *ibid*, page 18



Figure 1.9 : Acousmonium du GRM en 1974

Les acousmoniums en tant que dispositif de projection et de spatialisation du son mettent en lumière plusieurs points de réflexion autour de la pensée de l'espace sonore. Tout d'abord, ils redonnent au lieu de la performance une rôle central. Le nombre élevé de haut-parleurs, leur timbre radicalement différent, leur position sur scène, ne peuvent être dissociés de l'œuvre musicale, ce qui rend chaque concert acousmatique unique et différent même si une œuvre identique est présentée. Chaque haut-parleur est mis en scène de la même manière que le serait un musicien. Les acousmoniums remettent aussi en question le placement des sources sonores dans l'espace de diffusion. Bayle s'inscrit en ce sens dans la grande lignée des compositeurs qui ont modelé et transformé l'orchestre, pour que cette formation puisse retranscrire au mieux leurs idées musicales. Il parle plus précisément d'« orchestration de l'image acoustique »⁵⁹, et fournit une liste de haut-parleurs, de leur fonction et de leur placement, afin de disposer d'un acousmonium modulable et polyvalent.⁶⁰ Cette recherche s'inscrit dans une double réflexion autour du haut-parleur : il y a travail sur le timbre propre de chaque haut-parleur, mais aussi travail sur la résultante acoustique de ce timbre (comme le ferait d'ailleurs un musicien qui adapte son jeu au lieu dans lequel il se trouve).

Bien que les acousmoniums soient des dispositifs qui nécessitent une installation importante, et que l'aspect visuel d'un orchestre de haut-parleurs est impressionnant, il ne faut pas oublier que ceci répond à un besoin strictement musical, comme le rappelle Horacio Vaggione :

« (...), la raison d'être des dispositifs de diffusion électroacoustique n'est pas à chercher dans le fait de l'absence d'un côté visuel qu'il faudrait pallier à tout prix par la multiplication

59 Merlier, *ibid*, pages 44

60 Merlier, *ibid*, pages 44 – 45

spectaculaire des hauts-parleurs : il s'agit bien d'une nécessité structurelle de disposer d'un moyen de recréer l'espace composé de l'œuvre. »⁶¹

Cette volonté de recréation de l'espace composé de l'œuvre à l'aide de dispositifs acoustiques ou électroacoustiques se retrouve aussi dans des œuvres improvisées ou semi-improvisées.

3.8 La spatialisation dans l'improvisation aujourd'hui

La spatialisation dans la musique improvisée est encore assez peu représentée. Seuls quelques ensembles jouent parfois avec l'espace sonore, soit de manière purement acoustique, soit dans le domaine de la musique électronique en live. Un des ensembles à pratiquer une spatialisation acoustique est celui du *Spat' Sonore*. Il s'agit d'un collectif d'une dizaine de musiciens parisiens, dirigé actuellement par Nicolas Chedmail, et qui s'intéresse à une spatialisation « primitive ». Les musiciens, par l'intermédiaire du collectif *Lutherie urbaine*, conçoivent et fabriquent eux-même leur propre dispositif de spatialisation, en utilisant différents pavillons de formes et de matières variées. Afin de donner un bref aperçu de leur musique, voici le descriptif du collectif présent sur le site internet <http://www.spatsonore.fr/> :

Des plantes grimpantes en tubes de cuivre coiffées de pavillons-corolles, forment un igloo sonore dans lequel vient s'installer l'auditeur.

Alors six machinistes se postent aux cerveaux à pistons de leur spat'. La structure se cabre et vacille, suspendue aux cintres.

Ils soufflent, grattent et frappent des polyrythmies spatialisées, des ombres de motets au fond d'une piscine, des drones d'appeaux à sanglier, des masses d'air visqueux, des jungles dans les souterrains, des silences-océans colorés d'îles exubérantes.

Le *Spat' Sonore* pourrait s'apparenter à un acousmonium acoustique, où chaque pavillon représente un haut-parleur, avec son timbre propre, et où chaque musicien utilise plusieurs pavillons. Le nombre minimum de pavillons par musiciens est de trois, jusqu'à six ou sept (voir *Figure 1.9*). Il y a aussi une volonté d'intégration d'instruments électriques comme la guitare électrique ou le violon électrique dans l'ensemble du dispositif. Ainsi, un mégaphone cloîtré dans du plâtre fait office d'amplificateur pour chaque instrument, puis le son est redirigé dans des pavillons à l'aide de pistons. Par exemple, la guitariste dispose de trois pavillons, un à sa gauche, un au-dessus

61 Vaggione, *ibid*, page 158

de sa tête et un à sa droite, et par souci d'ergonomie, elle a relié une pédale de batterie aux pistons gauche et droite. De cette manière, le son sort par défaut du pavillon du milieu, et chaque pédale contrôle l'envoi exclusif dans l'un des deux autres pavillons.

Le placement des musiciens n'est pas anodin : chaque musicien fait face à son homonyme. Les musiciens forment un cercle autour du public, pavillons dirigés vers l'intérieur. Les deux cors se font face, les deux percussionnistes aussi, et la guitare fait face au violon. De cette façon, on a une répartition du son circulairement homogène, et les instruments aux caractéristiques semblables peuvent se répondre, faisant entendre au public un effet de vague sonore. Les multiples pavillons permettent des déplacements du son dans l'espace, par un musicien seul et entre les musiciens. La spatialisation comporte ainsi des mouvements rotatifs, des échanges sous forme de vagues ou de trilles, des bourdons localisés, des polyphonies décomposées... De plus, les musiciens ne sont pas tenus à une position statique. Selon le morceau, ils peuvent se déplacer en chantant, ou en utilisant d'autres instruments plus mobiles que leur instruments spatialisés, ce qui permet aussi de faire entendre d'autres types de mouvements du son dans l'espace, tels des effets de proche/lointain. Le lieu de la performance joue donc un rôle très important, car il n'est pas seulement exploité par le dispositif mais aussi par les musiciens en déplacement. Il est ainsi crucial de disposer d'un lieu qui puisse favoriser l'écoute entre les musiciens.



Figure 1.10 : Photographie d'une configuration du Spat' Sonore

La spatialisation étant au cœur du dispositif acoustique, elle prend une place déterminante dans la composition et dans l'improvisation musicale. Une pièce de Karl Naegelen, *Maelström*, dédiée au *Spat' Sonore*, propose une représentation métaphorique de ce phénomène naturel dans une première partie de la pièce, avant d'explorer le champ de la polyphonie spatialisée (choral). On peut

d'ailleurs mettre en lumière un des aspects soulevés par la spatialisation : dès qu'une source devient statique, on s'habitue en tant qu'auditeur très vite à son absence de mouvement. Si bien que dès qu'elle se remet à bouger, cela provoque souvent un effet de surprise. Lors d'un concert de l'ensemble, je me suis moi-même surpris à regarder dans la direction du son lorsqu'il était mis en mouvement. Ceci souligne qu'une prédominance de la vue sur l'ouïe est à envisager, lorsque les musiques mettent en jeu plus intentionnellement des paramètres spatiaux, comme l'affirme Makis Solomos : « L'hégémonie de la vue, décisive aujourd'hui, découle de l'évolution même de la musique écrite »⁶². Ainsi lors d'une performance de musique spatialisée, il est important de penser autant au son spatialisé qu'aux gestes qui vont être reliés intuitivement à ce son.

Une autre pièce en collaboration avec la chanteuse Rie Nakajima, beaucoup plus rythmique, donne au public l'impression d'appartenir au groupe musical, entouré de musiciens ayant chacun un rôle bien défini. La musique est vécue comme un paysage sonore, où chaque élément est bien identifié grâce à son timbre et son placement dans la salle de concert. Ce paysage sonore est construit sur les trois dimensions de l'espace physique, car les pavillons ne sont pas tous installés à la même hauteur, certains allant jusqu'à être suspendus au dessus du public. Il est différent pour chaque personne, différence due à la proximité de certains pavillons plus directifs ou tout simplement moins forts que les autres.

3.9 Conclusion

Cet état de l'art de la spatialisation montre que la prise de conscience de l'espace sonore par les musiciens a abouti à une nouvelle manière de composer, réunissant l'écriture spatiale et l'écriture des autres dimensions musicales. On a pu observer une évolution des moyens de traiter l'espace, allant d'une utilisation acoustique à une virtualisation totale des sources sonores. Cette virtualisation est possible grâce au développement des techniques de projection des sons et grâce à une accessibilité matérielle de plus en plus importante (intégration de l'encodage, évolutions des moteurs de traitement audio...) : la spatialisation connaît une démocratisation. La virtualisation laisse aujourd'hui une liberté quasi-totale en terme de spatialisation.

En ce sens, l'espace a finalement réussi à s'imposer, après six siècles de recherche menées par les musiciens, comme un paramètre majeur du son dans la musique écrite occidentale. L'évolution de cette nécessité de composition du son dans l'espace ne fait que suivre celle des autres dimensions musicales : pour l'harmonie par exemple, on a évolué de modalité à tonalité, polytonalité, sérialisme... Il est donc important de continuer à soutenir cette avancée sonore, et de l'étendre aux musiques plus improvisées, qui ouvrent un vaste champ des possibles quant à la

62 Solomos, *ibid*, page 111

création d'une nouvelle esthétique de l'espace sonore.

Ce travail de l'espace a aussi souligné que cette appropriation de l'espace sonore était fortement liée à une découverte de l'espace physique. Les techniques de recréation de l'espace sonore muent celui-ci en espace composable, d'une précision toujours croissante. Et l'espace physique du musicien ne demande qu'à être exploité pour créer des connexions entre espaces de nature différente. Ainsi, les nouvelles technologies de captation du mouvement constituent un terrain d'expérimentations idéal pour l'exploitation de la spatialisation. Dans le cadre de ce travail, ce lien entre mouvement physique du musicien dans son espace de jeu et mouvement physique du son dans l'espace de projection va être développé, pour aboutir à une performance de spatialisation en temps réel *via* le jeu d'un instrument, la guitare électrique.

PARTIE 2

MISE EN PLACE DU DISPOSITIF DE CAPTEURS ET APPLICATION À LA GUITARE

La captation, au sens physique du terme, est un phénomène qui transforme une grandeur physique en une autre grandeur physique, mesurable et manipulable. On peut par exemple penser à la transformation entre un mouvement dans l'espace et un signal électrique. Un capteur est le dispositif matériel permettant d'opérer cette transformation. Contrairement au transducteur, qui opère la transformation physique, le capteur comporte un montage électronique chargé d'adapter le signal. En ce sens, un capteur contient donc forcément un transducteur alors que l'inverse n'est pas valable. Afin de récupérer des informations physiques utiles, il est nécessaire d'adjoindre à un capteur une interface de "traduction" des données brutes de celui-ci et de stockage. Cette partie a donc pour but de présenter les différents types de capteurs existants, notamment ceux qui sont susceptibles d'être utilisés dans le cadre de la captation de mouvements. Je choisis de ce fait de ne pas présenter les capteurs de température, de débit, de niveau, de pression atmosphérique.

1 Fonctionnement et description de différents capteurs

1.1 Généralités sur les capteurs

Les capteurs peuvent être classés en deux familles distinctes : les capteurs actifs et les capteurs passifs. Les capteurs actifs sont basés sur un effet physique qui permet de convertir l'énergie de la grandeur à mesurer (énergie thermique, énergie mécanique...) en énergie électrique. C'est par exemple le cas des capteurs piézoélectriques, des capteurs de température, de certains accéléromètres. Les capteurs passifs sont quant à eux basés sur une relation entre la mesurande (la grandeur à mesurer) et l'impédance électrique. L'impédance du capteur peut varier, soit suite à une variation de la taille du capteur, comme pour les capteurs de position et les potentiomètres, soit suite

à une déformation en raison d'une force appliquée, comme pour les accéléromètres, les gyromètres et gyroscopes et les capteurs de pression.

Une fois que le capteur a assuré son rôle de transformer une énergie en énergie électrique (le plus souvent), il est encore nécessaire de mettre en forme le signal provenant du capteur, car celui-ci n'est pas directement exploitable. En effet, de nombreuses perturbations, qu'elles soient de type mécaniques ou électromagnétiques, vont fausser les informations brutes données par le capteur, à moins de traiter et de supprimer ces parasites en amont. On utilise par exemple souvent des filtres analogiques pour débruiter le signal. Ce circuit de mise en forme est bien souvent intégré au capteur lui-même, ce qui permet au signal d'être plus exploitable. Il est aussi nécessaire d'effectuer une calibration des valeurs récupérées. On peut ensuite avoir une carte d'acquisition qui va transformer le signal analogique en signal numérique, pour ensuite le rediriger vers un ordinateur afin de traiter les données.

Les capteurs possèdent plusieurs caractéristiques qui leur sont propres. Ces caractéristiques vont nous servir à définir les attributs physiques des capteurs. De plus elles nous donneront les principales sources d'erreur lors de la captation. Voici la liste des caractéristiques et des principales erreurs liées à celles-ci :

- Étendue de mesure : valeurs extrêmes fournies par le capteur
- Plage d'utilisation : valeurs utilisables en condition
- Étalonnage : réglage de la valeur-étalon (*erreur d'offset: dérive linéaire des valeurs obtenues par rapport aux valeurs attendues*)
- Résolution : nombre de valeurs possibles fournies par le capteur
- Précision : marge d'erreur du capteur
- Domaine de linéarité : si le capteur permet une relation linéaire entre la mesurande et la mesure, domaine de valeurs dans lequel la relation de linéarité s'applique (*erreur de linéarité : la relation entre les valeurs d'entrée et de sortie n'est pas linéaire*)
- Sensibilité : variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée
- Temps de réponse : temps de réaction du capteur lorsqu'il y a modification de la mesurande
- Hystérésis : différence de réaction du capteur lorsque la mesurande augmente et lorsqu'elle diminue (*erreur d'hystérésis*)
- Répétitivité : Aptitude du capteur à pouvoir donner les mêmes valeurs de sorties lorsque le même stimulus en entrée est appliqué

Ces caractéristiques sont fournies par le constructeur du capteur. Elles sont bien sûr reliées à des grandeurs mathématiques (bande passante par exemple). Lors d'une captation, il faut aussi prendre en compte un réglage de gain, en concordance avec une bonne quantification, afin de récupérer des valeurs en sortie de capteur qui soient utilisables et bien calibrées. On peut maintenant procéder à une liste non exhaustive de quelques capteurs analogiques souvent utilisés dans les domaines artistiques, et plus spécialement en musique. Voici les capteurs qui seront détaillés :

- Les capteurs piézoélectriques
- Les accéléromètres et les inclinomètres
- Les gyroscopes et les gyromètres
- Les potentiomètres résistifs et les capteurs de force

Il existe bien sûr de nombreux autres capteurs très utilisés en musique ou en danse, pour capter un mouvement ou un geste, comme les capteurs de flexion, les capteurs optiques... Cependant les capteurs cités constituent la base à connaître pour entreprendre une bonne captation et disposer d'assez d'outils techniques et de possibilités.

1.2 Capteurs piézoélectriques

Les capteurs piézoélectriques sont basés sur l'effet piézoélectrique. Cet effet permet à certains cristaux, ainsi que certaines céramiques⁶³, de transformer une énergie mécanique en énergie électrique. En effet, certains cristaux peuvent se déformer sous l'action de forces extérieures, et cette déformation va donner naissance à une tension électrique.

Cette propension à pouvoir se déformer est due à la structure cristalline du matériau. En appliquant une force au cristal, on opère un réarrangement des molécules chargées positivement ou négativement, ce qui crée une tension électrique.⁶⁴ On peut remarquer que cet effet piézoélectrique est réversible. Les applications artistiques des capteurs piézoélectriques sont nombreuses : microphones de contact (guitare électrique par exemple), capteurs de pression pour interfaces tactiles, capteur de chocs, de vibrations... L'effet piézoélectrique est aussi important dans d'autres types de capteurs, également utilisés pour des performances artistiques actuelles : les accéléromètres et les gyromètres.

63 Voir https://zumbuhllab.unibas.ch/fileadmin/user_upload/zumbuhllab-unibas-ch/Presentations_Group_Meeting/Older_Semesters/100730_petar_Piezo.pdf, site consulté le (30 avril 2018), page 15, pour une liste des matériaux piézoélectriques

64 Pour plus de précisions, voir Ledoux, A. *Theory of Piezoelectric Material And Their Applications in Civil Engineering*, MIT, MIT Press, 2011, page 8 à 10

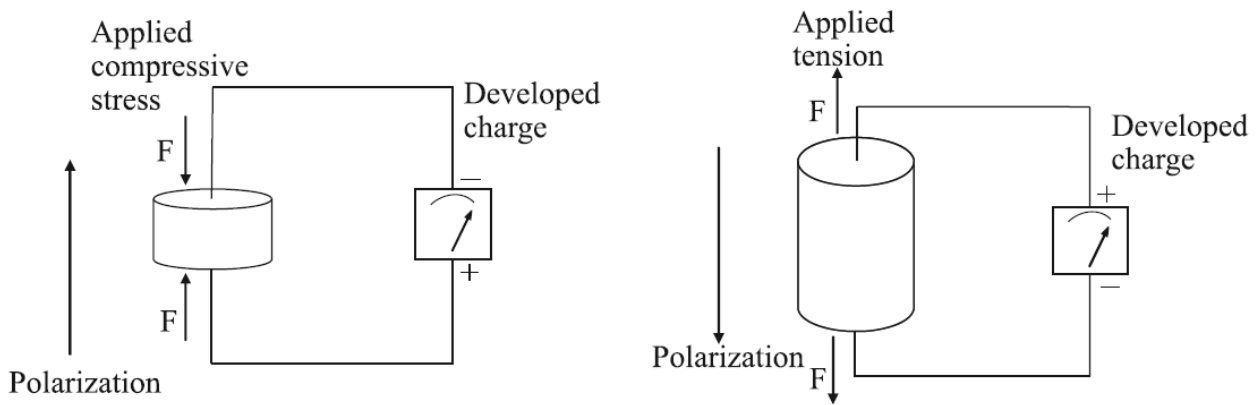


Figure 2.1: L'effet piézoélectrique, cas de la compression et de l'étirement du matériau

1.3 Accéléromètres – Inclinomètres

Les accéléromètres sont des capteurs permettant la mesure de l'accélération. Cette accélération est mesurable, selon une direction : il n'y a qu'un seul degré de liberté. Néanmoins, dans la plupart des capteurs du marché, il y a combinaison en un capteur de 1 à 3 accéléromètres, ce qui permet de récupérer des données sur 1 à 3 axes. Les accéléromètres les plus communs font partie de la catégorie des MEMS, qui signifie *MicroElectroMechanical System*, et qui désigne un système composé d'une partie mécanique alimentée électriquement, avec un élément de taille micrométrique, en vue de former un capteur ou un actionneur. Les accéléromètres ont trois principales utilisations :

- Mesure de l'accélération dans un mouvement
- Mesure de chocs ou de vibrations
- Mesure de l'inclinaison par rapport à l'axe vertical.

Ainsi, accéléromètres et inclinomètres sont en fait un même capteur. La chose qui les différencie est le réglage du gain du capteur. En effet, le capteur est soumis d'office à une force présente en permanence : l'accélération de la gravité. Cette accélération est négligeable dans le cas d'un mouvement rapide, ce qui donne accès aux deux possibilités suivantes. Si le gain est faible, le capteur ne sera que très peu sensible à l'accélération de la pesanteur, donc il fonctionnera en accéléromètre. En revanche, plus le gain de captation augmente, plus le capteur devient sensible à l'accélération de la pesanteur, et réagit en inclinomètre.

L'accéléromètre étant très utilisé, il existe plusieurs types de méthodes de mesure, et plusieurs technologies permettant de réaliser l'une ou l'autre. Le capteur procède à une mesure indirecte de l'accélération, qui dérive de la vitesse :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Avec a l'accélération (en m.s^{-2}) et v la vitesse (en m.s^{-1}).

On utilise la deuxième loi de Newton qui relie l'accélération à la somme des forces s'appliquant sur la structure :

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Avec F (en Newton) la somme des forces s'appliquant sur la structure, m la masse (en kg) et a l'accélération (en m.s^{-2}).

Ainsi la mesure correspond concrètement à une mesure de déplacement, ou de force, qui va ensuite donner l'accélération. En effet, un accéléromètre est souvent constitué d'une masse sismique ou inertielle, à l'intérieur d'un bâti. Cette masse sismique est reliée au bâti par un matériau souple, comme un ressort, une lame, un cristal piézoélectrique... La partie sismique a une masse très faible par rapport à celle du bâti, ce qui rend ses mouvements très sensibles à l'accélération de la structure complète. Les mouvements sont ensuite mesurables, et sont transformés en énergie électrique. La méthode de mesure va déterminer le type de l'accéléromètre : non-asservi ou asservi.

Dans les accéléromètres non asservis, la masse sismique est libre : on mesure la force exercée sur la partie mécanique reliant la masse sismique au bâti. Dans les accéléromètres asservis, par contre, on applique une force de rappel, souvent électromagnétique, sur la masse sismique, de façon à ce qu'elle reste toujours à la même position. C'est ensuite en mesurant cette force de rappel que l'on obtient l'accélération. Les accéléromètres les plus utilisés sont les accéléromètres non asservis, car ils sont moins chers, et moins encombrants. Cependant, ils sont moins précis et sont moins résistants dans des conditions extrêmes (température, hygrométrie). Dans le cadre d'une utilisation à but artistique, les accéléromètres non asservis suffisent amplement. Les deux types les plus communs sont les suivants :

- **Accéléromètre capacitif** : on mesure le déplacement de la masse sismique en mesurant une variation de capacité. La masse sismique interne au système est en effet reliée à la lame d'un condensateur comme dans le schéma suivant :

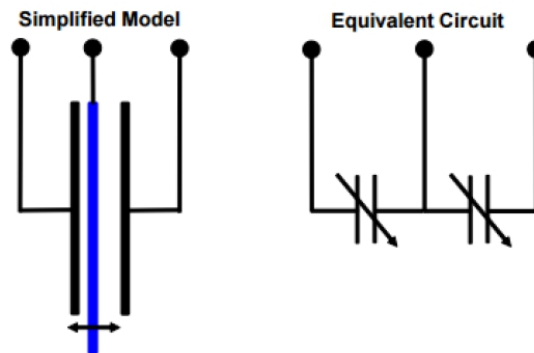


Figure 2.2 : Modèle simplifié d'un accéléromètre capacitif

La lame du condensateur subit donc des mouvements en même temps que la masse sismique. Ceci fait varier la capacité du condensateur, et envoie ainsi une information électrique. Plus précisément, « Les éléments sensibles étant montés de manière différentielle, toute accélération appliquée augmente la capacité d'un élément tandis que diminue celle de l'autre et produit ainsi, un débit de courant inégal à travers les capteurs. »⁶⁵ Le circuit équivalent correspond donc à deux condensateurs à capacités variables. Cette configuration permet d'obtenir les caractéristiques suivantes : « une grande sensibilité du capteur, une bande passante limitée mais continue, une technologie robuste, une facilité de conditionnement et une faible sensibilité aux parasites. »⁶⁶

- **Accéléromètre piézoélectrique**: le déplacement de la masse sismique agit sur la partie mécanique reliée à la structure du capteur, et cette partie mécanique est en fait un cristal piézoélectrique, transformant l'énergie mécanique qu'il reçoit en énergie électrique, comme dans le cas du capteur piézoélectrique.

65 <http://www.polymesure.com/fr/mpg2-803522---Les-accelerometres-capacitifs---Servo-accelerometres.html>, (site consulté le 30 avril 2018)

66 http://www.alliantech.com/pdf/coin_des_experts/generalite_sur_accelerometrie1.pdf, (site consulté le 30 avril 2018), page 8

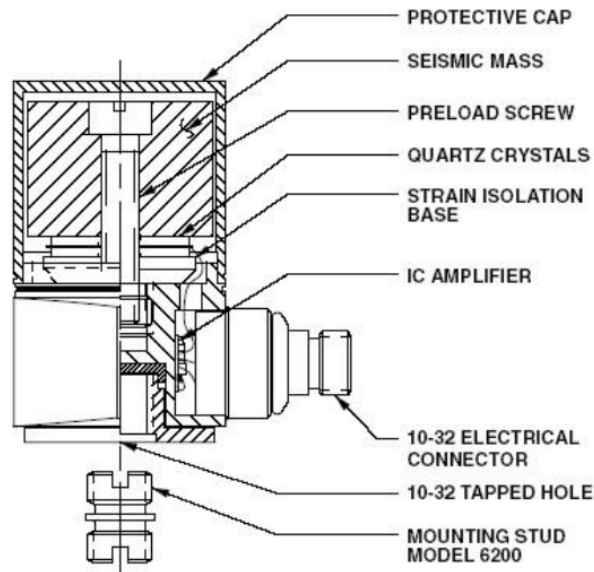


Figure 2.3: Schéma d'un accéléromètre piézoélectrique

Le schéma de la *Figure 2.3* représente un des modèles d'accélérateur piézoélectrique. Les cristaux de quartz se déforment suite au stimulus mécanique de la masse sismique et renvoient un signal électrique, amplifié par un amplificateur monté sur un circuit intégré (IC), et récupérable ensuite par un connecteur en sortie. Il convient cependant de préciser que les accéléromètres piézoélectriques ne sont sensibles qu'à des phénomènes discontinus, tels des chocs ou des vibrations.⁶⁷ Par rapport aux accéléromètres capacitifs, les accéléromètres piézoélectriques possèdent « une grande bande passante mais non continue, une technologie robuste et une grande plage de températures disponibles. »⁶⁸. On trouve aussi des capteurs avec différentes impédances de sortie. Ceux qui possèdent une sortie haute impédance sont plutôt utilisés dans des conditions industrielles. Néanmoins, les plus souvent rencontrés sont ceux disposant d'une faible impédance de sortie, délivrant ainsi un courant jusqu'à +/- 5Volts⁶⁹.

Il existe d'autres types d'accéléromètres, à technologie piézorésistive, à effet hall, à jauge de contrainte mais ils ne sont pas utilisés par le grand public car trop coûteux, et trop performants pour l'utilisation souhaitée.

67 Doscher, J., *Accelerometer Design and Applications*, (Analog Devices), Company brochure, Norwood, Massachusetts, 2005 page 20

68 http://www.alliantech.com/pdf/coin_des_experts/generalite_sur_accelerometrie1.pdf, (site consulté le 30 avril 2018), page 6

69 Voir <https://www.omega.fr/prodinfo/accelerometre.html>, (site consulté le 30 avril 2018)

1.4 Gyroscopes - Gyromètres

Les gyroscopes et les gyromètres fonctionnent sur le même principe, mais ne fournissent pas la même information. Les gyroscopes donnent la position angulaire, tandis que les gyromètres donnent la vitesse angulaire, et ainsi, un gyroscope peut fonctionner en gyromètre et non l'inverse. Ils sont néanmoins tous les deux très utilisés, autant dans les domaines industriels (navigation, centrale inertielle) que dans les domaines artistiques (récupération de la vitesse rotative). Voici comment Jérôme Maisonnet décrit le fonctionnement d'un gyroscope :

« Le fonctionnement du gyroscope est basé sur une propriété de fixité totale ou partielle dans le repère absolu des phénomènes physiques qu'il exploite. Ceux-ci sont essentiellement de nature mécanique ou optique. »⁷⁰.

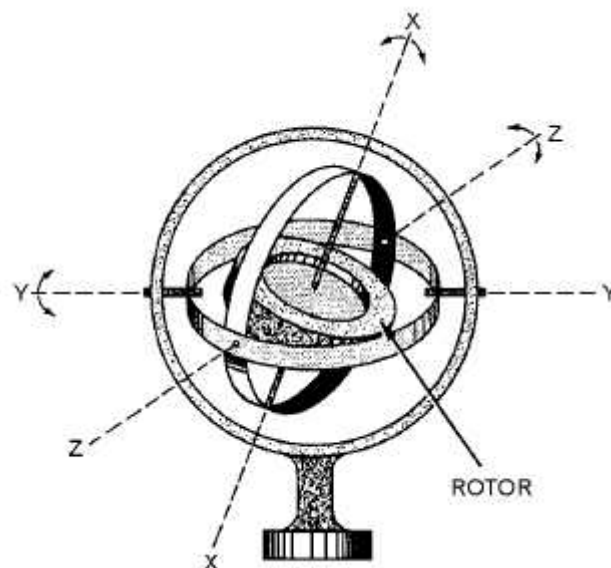


Figure 2.4: Schéma d'un gyroscope

On peut par exemple penser à un gyroscope comme à une toupie, qui ne tombe pas tant qu'elle tourne. De cette manière, on dispose d'un objet invariant, que l'on va pouvoir comparer à la structure en rotation pour mesurer cette rotation. On utilise la même loi mathématique que pour les accéléromètres, mais appliquée à un corps en rotation :

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} = I\vec{\alpha}$$

Avec τ le moment sur le gyroscope (en $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}.\text{rad}$), L le moment cinétique sur le gyroscope (en $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-1}.\text{rad}$), I le moment d'inertie (en kg.m^2), ω la vitesse angulaire (en $\text{s}^{-1}.\text{rad}^{-1}$) et α l'accélération angulaire (en $\text{rad}.\text{s}^{-2}$).

⁷⁰ Maisonnet, J. *Optimisation et réalisation d'un micro-gyromètre deux axes à poutres vibrantes en silicium*. Université de Franche-Comté, 2009, page 12

Plusieurs technologies existent, mais la plus commune dans le domaine de la captation du geste est celle utilisant la force de Coriolis, où le gyroscope/gyromètre est un MEMS, comme les accéléromètres. Sans entrer dans des détails trop calculatoires, il faut savoir que cette force « agit perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu en rotation »⁷¹. Elle permet donc, couplée à un matériau piézoélectrique, de donner le sens et la vitesse de la rotation, toujours par l'intermédiaire de la deuxième loi de Newton.

1.5 Potentiomètres résistifs – Capteurs de force

On peut regrouper ces deux types de capteurs dans une même partie, car ils fonctionnent sur le même principe physique : un changement de valeur de résistance R d'un matériau, qui implique un changement proportionnel de la tension de sortie du signal électrique. Les potentiomètres résistifs peuvent être linéaires ou rotatifs, et permettent de transformer le déplacement d'un objet en énergie électrique. Les capteurs de forces, plus souvent abrégés en *FSR* pour *Force Sensitive Resistor*, permettent quant à eux de convertir une force exercée sur le capteur en énergie électrique.

Les potentiomètres résistifs sont couramment utilisés dans des applications musicales : *faders*, réglage du tone et du volume sur une guitare électrique... Notamment, les potentiomètres linéaires souples, aussi appelés *Ribbon*, sont particulièrement appréciés du fait de leur simplicité de conception et de leur aspect pratique. Un de leurs seuls inconvénients consiste en une usure mécanique inévitable, due à la méthode de captation.



Figure 2.5: Photographie d'un potentiomètre linéaire souple

⁷¹ <https://etud.insa-toulouse.fr/~bouvot/Cours/5AE/BE%20Capteurs/5ESE%20-%20Gyroscope%20-%20Bouvot%20Ferte.pdf>, (site consulté le 30 avril 2018), page 4

Le fonctionnement des *Ribbon* est simple : il s'agit de superposer deux couches de matériaux différents, l'une, résistive, au-dessus de l'autre, conductive. La couche conductive est le plus souvent en résine, et possède une certaine valeur de résistance. Lorsque l'on fait pression avec un doigt sur le capteur, les deux couches entrent en contact, et on impose ainsi une nouvelle valeur de résistance au dispositif. Selon l'endroit où l'on appuie, cette valeur sera donc plus ou moins grande, suivant le chemin parcouru par le signal électrique. Les caractéristiques principales à prendre en compte dans le choix d'un de ces capteurs sont donc la résolution, et l'étendue de la mesure.

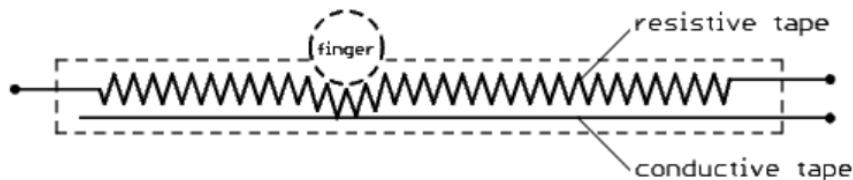


Figure 2.6: Schéma d'un *Ribbon*

Les *Ribbon* vendus dans le commerce sont souvent conçus pour permettre d'appuyer à deux endroits à la fois, produisant un moyennage de la valeur de sortie.

Les *FSR* reposent sur le même principe physique que les potentiomètres. Une surface conductive envoie une valeur de résistance de sortie infinie, et lorsqu'une pression est exercée sur cette surface, la valeur de la résistance décroît de manière non linéaire⁷². Ce capteur nécessite donc un traitement du signal approprié avant de pouvoir être utilisé correctement.

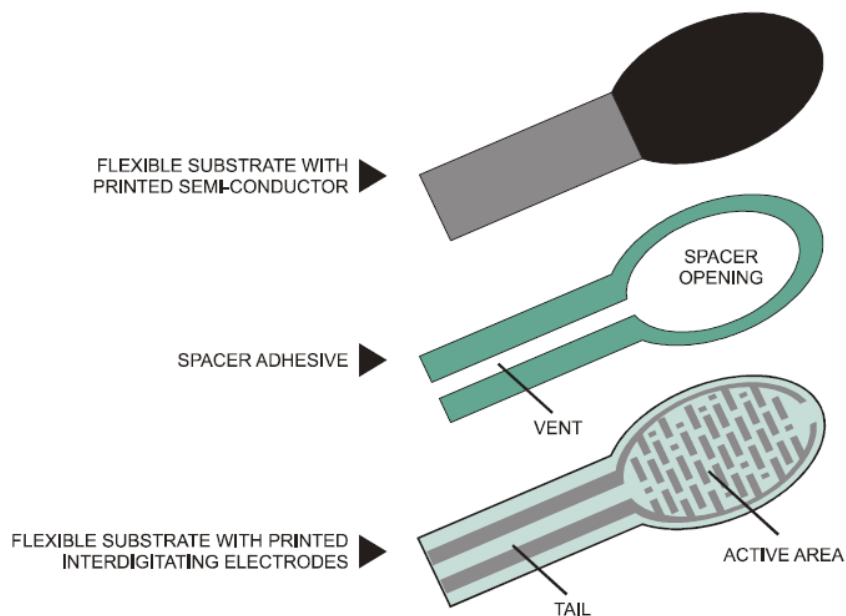


Figure 2.7: Composition d'un capteur *FSR*

⁷² Les courbes reliant la résistance à la force exercée sont disponibles sur le document [FSR, Integration Guide and Evaluation Parts Catalog](#), publié par Interlink Electronics, page 5

La plupart des *FSR* possèdent un gain réglable qui permet aux utilisateurs d'optimiser la sensibilité du capteur selon leurs besoins. Ils sont constitués de trois couches de matériaux : deux couches de polymères – l'une des deux conductive – séparées par une couche plastique de séparation. Quand les couches inférieures et supérieures entrent en contact, la partie inférieure se déforme. La partie supérieure, constituée d'électrodes conductrices, permet de rendre la partie inférieure plus conductive, car le courant passe alors par les électrodes, qui possèdent une résistance moindre. Ces deux phénomènes provoquent ainsi une baisse de la résistance du matériau selon le niveau de pression exercée : plus la surface de pression est grande, plus la résistance va décroître. Certains *FSR* renvoient aussi une donnée de position du point d'appui sur le capteur, mais de manière moins précise que les *Ribbon*.

Ainsi, tous ces différents types de capteurs nous permettent d'obtenir des informations physiques, que l'on peut ensuite utiliser à des fins artistiques. Ces données sont récupérées *via* une interface de captation, alimentée électriquement, à laquelle sont reliés tous les capteurs. Cette interface, qui peut être filaire ou sans-fil, permet de faire le lien entre les informations fournies par les capteurs et un système informatique. Ce dernier donnera à l'utilisateur un accès aux données et il pourra alors les assigner à un paramètre contrôlable. Cette opération se nomme le *mapping*. Dans le cadre de mon travail, les données fournies par les capteurs vont provenir de mouvements de l'instrumentiste. Ces données vont ainsi contrôler des trajectoires spatiales du son, afin de permettre, lorsque le dispositif est installé, de spatialiser le son direct venant de l'instrument. En ce qui me concerne, l'instrument qui fera l'objet de tests du dispositif sera la guitare électrique, que je pratique depuis de nombreuses années. J'étudierai donc l'intégration du dispositif dans la pratique de l'instrument, à travers les positions, gestes, et déplacements possibles lors de la pratique de la guitare électrique.

2 La gestuelle de la guitare, ses possibilités et ses limites

2.1 Introduction autour de la notion de geste instrumental

Cette partie a pour but de présenter quelques définitions sur la notion de geste instrumental. De nombreux chercheurs se sont penchés sur la question, et il s'agit ici d'exposer succinctement cette notion afin de contextualiser la recherche effectuée dans ce mémoire sur le travail de spatialisation temps-réel.

Dans sa thèse autour de la guitare électrique, « Une approche de l'instrument augmenté : la guitare électrique »⁷³, le guitariste Otso Lähdeoja définit le geste instrumental de la manière suivante :

« Le geste instrumental relie l'homme au son par la manipulation d'un objet-instrument. »⁷⁴.

Ainsi Lähdeoja relie directement le paramètre sonore à celui du geste. Selon lui, il n'y a donc pas de geste instrumental, dans le domaine de la musique, s'il n'y a pas de son. On peut donc en déduire que la liaison est très forte entre le geste effectué, *l'action*, et le son entendu, *la perception*, et que cette liaison est une des bases de la relation qui existe entre l'instrument et l'instrumentiste. Claude Cadoz va plus loin en affirmant que le geste instrumental comporte trois facettes. Il le qualifie de geste « sémiotique, ergotique et épistémique »⁷⁵ :

- **Sémiotique**, parce qu'il s'adresse à l'ouïe. En effet le geste instrumental n'a finalement pour but que l'émission du son par l'instrumentiste afin de faire passer une émotion musicale.
- **Ergotique**, parce qu'il est en interaction directe avec l'environnement qui l'entoure : l'action de la main sur une corde, sur un clavier, sur un potentiomètre. Une modification physique de l'environnement s'opère.
- **Épistémique**, parce qu'il nécessite plusieurs aspects perceptifs du musicien (toucher, ouïe, vue) pour être exécuté. Le geste ne peut être effectué correctement que si le musicien en est conscient et qu'il a pratiqué le geste en lui-même auparavant.

Ce geste instrumental est donc le résultat de trois gestes aux caractéristiques différentes regroupés en un seul. Cadoz va établir une classification des gestes instrumentaux, ainsi qu'une décomposition de ces gestes en éléments de base, afin de pouvoir plus simplement comprendre chacun d'eux. Mais ce qui nous intéresse ici, ce n'est pas seulement le geste instrumental, déjà utilisé par l'instrumentiste pour faire partager sa musique, et ce, quelle que soit la complexité de ce geste. Ce sont en fait les gestes et mouvements qui découlent de ce geste instrumental initial. Ce sont ces mouvements qui vont pouvoir être utilisés ensuite pour contrôler un paramètre que le musicien, initialement, ne contrôle pas avec ses gestes instrumentaux. Et à ce propos, la classification d'Alexander Refsum-Jensenius établie dans sa thèse « Action-sound – developing methods and tools to study music-related body movement »⁷⁶, paraît très appropriée, et permet de distinguer quatre types de mouvements relatifs à une performance musicale.

73 Lähdeoja, O. Une approche de l'instrument augmenté : la guitare électrique, Bibliothèque numérique Paris 8, 2010, <http://octaviana.fr/document/155983601> (site consulté le 30 avril 2018)

74 Lähdeoja, *ibid*, page 92

75 Cadoz, C. Le geste canal de communication homme-machine. la communication "instrumentale", Technique et Science Informatique, Hermès Lavoisier, 1994. pages 31 – 61,

76 Refsum-Jensenius, A. Action-sound – Developing methods and tools to study music-related body movement, Thèse de doctorat, département musicologie, 2007, pages 46 – 47

- Actions de production du son (*Sound-producing actions*) : elles sont responsables de la production physique du son,
- Mouvements auxiliaires (*Ancillary movements*) : ils supportent les actions de productions du son, mais n'ont pas pour but immédiat la production de ce dernier,
- Actions/Mouvements accompagnateurs (*Sound-accompanying movements/actions*) : ils accompagnent les autres mouvements, sans avoir de lien avec le son
- Mouvements communicatifs (*Communicative movements*) : ils servent à la communication avec les autres musiciens ou avec le public.

Cette classification va nous permettre de repérer les mouvements dans le jeu de guitare, et de les utiliser à des fins de spatialisation sonore. Certains de ces mouvements, utilisés non-intentionnellement par les musiciens (comme par exemple battre du pied au rythme de la musique) vont pouvoir être reliés à une action sonore, et ainsi, vont être "transformés" en geste instrumentaux. Pour identifier ces mouvements, il est important de connaître d'abord les gestes instrumentaux propres à la guitare électrique, et de voir si on peut aussi les utiliser et les détourner de leur but initial.

2.2 Technique instrumentale de la guitare électrique

La guitare électrique, instrument hybride dont la fabrication fait intervenir à proportions égales des connaissances en lutherie et en électronique, possède de nombreux modes de jeu basés sur cette dualité. L'instrument peut se jouer assis, mais se joue le plus souvent debout, à l'aide d'une courroie qui maintient l'instrument contre l'instrumentiste. Cette position de jeu induit des contraintes qu'il faudra prendre en compte, notamment celle de porter l'instrument. Le barycentre du guitariste est donc fixé : la guitare reste tout le temps à la même distance du guitariste. Afin de mieux comprendre la constitution d'une guitare électrique, et de connaître le vocabulaire lié à l'instrument, voir la *Figure 2.8*⁷⁷. Il est ici intéressant de dresser la liste des gestes et modes de jeu de la guitare, en privilégiant les zones de jeu utilisables en vue d'une modification éventuelle de l'instrument.

⁷⁷ Le modèle de guitare détaillé est proche de celui utilisé lors de la partie pratique de ce travail.

Cette liste a déjà été établie par le guitariste Otso Lähdeoja, dans sa thèse citée plus haut « Une approche de l'instrument augmenté : la guitare électrique »⁷⁸.



Figure 2.8: Éléments constitutifs de la guitare électrique

Voici donc la liste des techniques instrumentales basiques de la guitare électrique (pour un guitariste droitier, tenant le manche dans sa main gauche, cas le plus courant) :

« - La main gauche travaille sur le manche. Son répertoire de gestes comprend :

- Appuyer, combinaisons des quatre doigts sur la matrice créée par les cordes et les « cases » de demi-tons
- Effleurer, sons harmoniques
- Vibrato vertical et horizontal
- Légato (*hammer-on* et *pull-off*)
- Glissé

- La main droite pince les cordes avec les doigts ou avec un médiateur. Elle peut également intervenir sur le corps de la guitare ou sur la touche :

- Pincer une ou plusieurs cordes
- Frapper (cordes ou caisse)
- Appuis véloces sur la touche, "*tapping*"
- Pincer en bloquant la corde (harmoniques main droite)
- Actionner la barre de vibrato »⁷⁹

⁷⁸ Lähdeoja, *ibid*, pages 149 – 150

⁷⁹ Lähdeoja, *ibid*, page 149

Ce répertoire de jeu est en fait assez limité, il convient d'y d'apporter quelques précisions. Tout d'abord, concernant la main gauche, il faut mentionner que celle-ci n'est évidemment pas restreinte au manche de la guitare. La position habituelle, le pouce derrière le manche et les quatre doigts sur les cordes, peut être modifiée, en utilisant par exemple le pouce comme cinquième possibilité de combinaison sur la touche. On peut citer notamment la pièce de Helmut Lachenmann *Salut für Caudwell*, où les deux guitaristes jouent avec leur bras gauche au-dessus du manche, pouvant étouffer les cordes à tout moment. On peut aussi jouer avec l'accordage de la guitare : le geste d'accorder, qui s'effectue en tournant dans un sens ou dans l'autre les boutons contrôlant les mécaniques, devient un geste de jeu, et plus seulement de préparation. On trouve un exemple de ce mode de jeu dans *Leaves* de Michael Pisaro, ou encore dans le plus connu *Tellur*, de Tristan Murail⁸⁰. La main droite est alors libre de jouer sur les cordes ou même sur le manche. Les deux mains sont bien sûr indépendantes dans leurs mouvements.

En outre, on peut très bien utiliser la main gauche en percussion sur le corps de la guitare, de la même façon que la main droite. Sur ce point, la guitare électrique se distingue de la guitare classique. La guitare classique (ou tout autre type de guitare acoustique), de part la présence d'une caisse de résonance, permet un emploi de la percussion plus sonore que la guitare électrique. Sur la guitare électrique, une percussion va être répercutée sur les micros captant la vibration des cordes, alors que sur une guitare acoustique elle fait aussi directement référence à un instrument à percussion. Cette possibilité percussive, peu employée en guitare électrique, pourrait être exploitée dans le cadre d'une captation de vibrations ou de chocs à l'aide d'un micro piézoélectrique par exemple. D'ailleurs, on peut examiner brièvement la cartographie sonore de la guitare classique pour pouvoir s'en inspirer quant au placement et au rendu sonore d'une captation des percussions (Voir la *Figure 2.9*).

La cartographie ci-dessous, très complète, montre la variation de timbre par rapport à l'endroit où la guitare est frappée. Elle ne dépend pas du matériau percutant, ce qui donnerait encore une autre échelle de timbres. On peut voir que les zones les plus sombres timbralement sont les zones au centre de la caisse de résonance, puis les zones aux alentours. Plus on va vers le manche de la guitare et plus la percussion devient aiguë, claire. Ce constat sera utile lors du choix et du placement des capteurs sur l'instrument.

80 Voir Josel, S. et Tsao, M. *The Techniques of guitar playing*, Kassel, Bärenreiter, 2014, pages 26 – 27

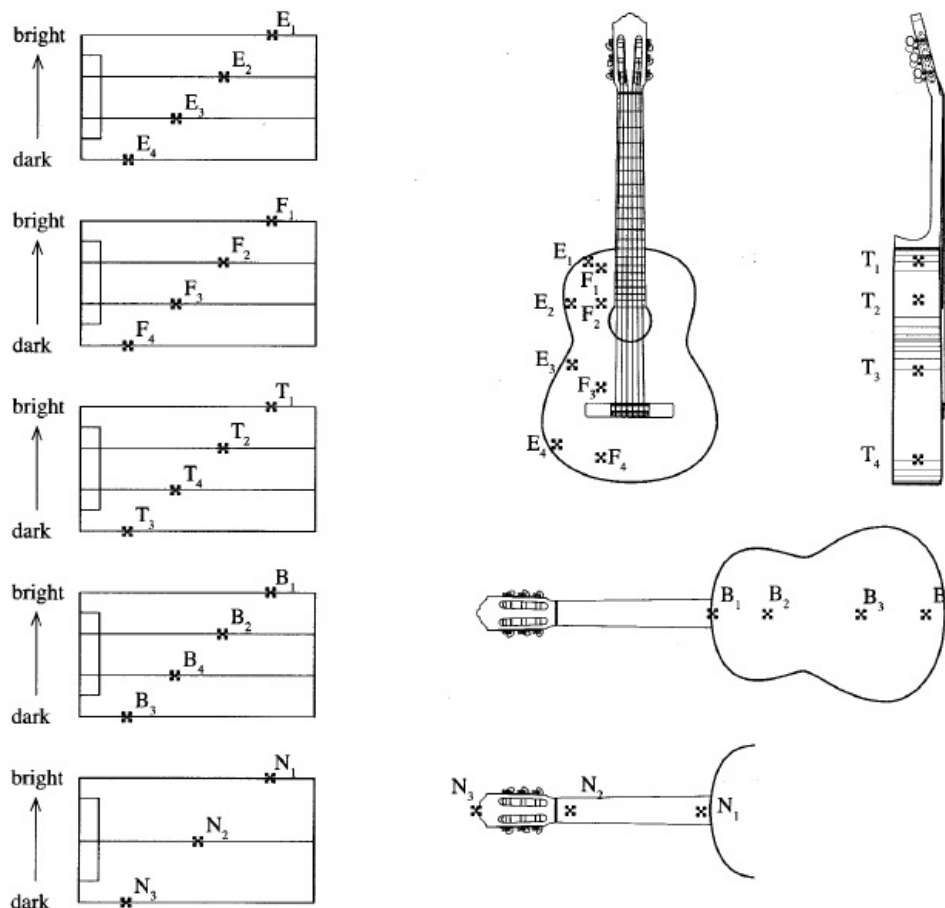


Figure 2.9: Carte percussive d'une guitare classique.
Les lettres montrent la gradation timbrale qui correspond aux positions sur la guitare.

Concernant la main droite du guitariste, la liste proposée par Lähdeoja est assez complète. On pourrait rajouter la possibilité d'étouffer les cordes avec la paume de la main droite, pour effectuer des *pizzicati*, d'intensité variable. On peut varier entre une note à peine étouffée et un bruit dont la hauteur est indiscernable. D'autres types de *pizzicati* mettent aussi en jeu des combinaisons de plusieurs actions (*pizz* Bartok, où la corde est tirée de telle manière à ce qu'elle vienne percuter le manche de la guitare). Il arrive aussi que l'on ne joue pas seulement avec les doigts ou un médiateur (aussi appelé plectre), mais qu'on utilise d'autres objets pour déclencher le son, comme un archet de violon, ou, plus spécifiquement pour la guitare électrique, un *E-Bow*, qui permet de produire un son continu sans baisse d'intensité. Enfin, la barre de vibrato, mentionnée en *e*) de la liste concernant les actions de la main droite, n'existe pas sur toutes les guitares électriques.

Pour que cette description des techniques instrumentales soit complète, il faut mentionner que l'instrument peut aussi être préparé, c'est-à-dire modifié à l'aide d'objets pour altérer et en déformer le timbre. Trombones, aiguilles, cuillères, pinces à linge, cordes de guitare, sont fréquemment utilisés pour obtenir des timbres inhabituels. En *Annexe 8* figure un petit catalogue de différents objets utiles dans la préparation d'une guitare. Dans la recherche de la préparation de la

guitare électrique, le multi-instrumentiste Fred Frith est réputé pour son utilisation à des fins musicales d'objets incongrus (riz, billes).

Les modes de jeu et techniques abordés jusqu'à présent sont tous de nature acoustique. Mais la guitare électrique et son fonctionnement ont fait naître d'autres actions dans le jeu du guitariste électrique. Otso Lähdeoja les a aussi répertoriés :

«

- Accès gestuels de la main et gestes associés :
 - Potentiomètre « à tour » ; tourner
 - Commutateur on/off ou à plusieurs positions ; sélectionner, trémolo de commutateur
 - Captation de la force d'attaque sur les cordes, par le suivi de l'enveloppe d'amplitude du signal ; variation de l'amplitude d'attaque sur les cordes

- Accès gestuels du pied et gestes associés :
 - Pédale d'expression (potentiomètre-pédale) ; variations de la position de la pédale à diverses vitesses, variations rythmiques
 - Pédale commutatrice ; appuyer »⁸¹

Ces actions, utilisées par la majorité des guitaristes électriques, sont entrées dans l'inconscient collectif. Les actions sont bien assimilées, et on peut donc les réutiliser dans le cadre de ce travail. Notamment, les accès possibles du pied sont très utiles dans le jeu guitaristique : les deux mains sont au contact de l'instrument, et sont donc moins mobiles. C'est pour cela que les commutateurs au pied sont très répandus en guitare.

Maintenant que l'on connaît les principaux gestes et techniques de jeu de la guitare électrique, on peut s'intéresser aux gestes que l'on pourrait rajouter dans le panel de jeu du guitariste, sans pour autant empêcher des gestes déjà inscrits dans le langage musical. Cette étape d'ajout de possibilités sonores va passer par un travail technologique, qui sera l'augmentation de l'instrument de musique.

81 Lähdeoja, *ibid*, page 150

2.3 *Un aperçu de l'augmentation – L'augmentation de la guitare électrique*

La définition la plus utilisée du concept d'augmentation d'un instrument de musique a été énoncée par les chercheurs Eduardo Miranda et Marcelo Wanderley, dans leur ouvrage *New digital musical instruments : control and interaction beyond the keyboard*. Elle nous permet d'introduire efficacement le concept d'instrument augmenté pour la suite de notre travail :

« Les instruments augmentés, aussi appelés instruments étendus, ou hybrides, ou hyper-instruments, sont des instruments de musique acoustiques (parfois électriques) étendus par l'addition de plusieurs capteurs, permettant au musicien de contrôler des paramètres sonores ou musicaux supplémentaires. L'instrument original garde ses propriétés initiales au sens où il continue à produire le même son qu'il produirait normalement, mais avec en plus de nouvelles propriétés qui peuvent augmenter drastiquement ses fonctionnalités. »⁸²

Cette définition fait ressortir le caractère particulier de la guitare électrique : c'est déjà un instrument augmenté en soi. Le son de la guitare est capté par des microphones, transformé par des effets et des outils de traitement du signal, puis amplifié, ce qui change ses propriétés et augmente ses possibilités. Le guitariste ne réagit pas de la même façon s'il est amplifié ou s'il ne l'est pas. Ainsi, comme le souligne Otso Lähdeoja, « L'augmentation est envisagée comme un processus qui introduit de nouvelles relations au sein de l'environnement instrumental, et par conséquent des nouvelles connexions entre geste et son. »⁸³ Les gestes effectués par l'instrumentiste entretiennent donc un rapport fondamental avec le son. Lähdeoja va même jusqu'à parler de « transduction »⁸⁴ pour désigner le rapport entre mouvements du corps et son. Les instruments sont donc augmentés dans le respect du rapport initial geste-son, et dans le but d'y adjoindre de nouvelles possibilités. Cette pensée, qui remet le geste au centre de la musique, est en fait assez récente. Auparavant, ce geste n'était pas considéré comme inhérent à l'œuvre musicale, mais simplement comme un médiateur obligatoire entre la pensée musicale et son exécution physique. Le concept d'augmentation ré-attribue donc sa place essentielle au geste, et ceci se traduit dans les choix et dans les méthodes d'augmentation. Ces méthodes sont par ailleurs déjà un acte artistique, au sens où « la "captation du mouvement" (...) est désormais utilisée pour dénoter un langage du mouvement médialisé, c'est-à-dire une conceptualisation du corps en termes de descripteurs de mouvements et de fonctions computationnelles. »⁸⁵

82 « Augmented instruments, also referred to as extended or hybrid instruments or hyperinstruments, are acoustic (sometimes electric) musical instruments extended by the addition of several sensors, providing performers the ability to control extra sound or musical parameters. The original instrument maintains all its default features in the sense that it continues to make the same sounds it would normally make, but with the addition of extra features that may tremendously increase its functionality. » cité dans Miranda, E. et Wanderley, M., *New digital musical instruments : control and interaction beyond the keyboard*, Middleton, A-R Editions, 2006, page 21

83 Lähdeoja, *ibid*, page 91

84 Lähdeoja, *ibid*, page 89

85 Giomi, A. *La pensée sonore du corps : pour une approche écologique à la médiation technologique, au mouvement et à l'interaction*

Dans notre projet augmentation d'instruments visant à la spatialisation en temps-réel, il ne faut donc pas perdre à l'esprit cette association geste-son et s'en servir pour choisir intelligemment les capteurs, leur emplacement et leur fonction. Il convient donc de s'inspirer de travaux déjà effectués et de détailler quelques exemples d'augmentation de guitare électrique, afin de pouvoir réunir les connaissances techniques et artistiques nécessaires au bon fonctionnement du projet.

2.4 Quelques exemples d'augmentation de guitare électrique

Pour commencer cette description, je choisis de m'intéresser à la guitare électrique augmentée du guitariste Hans Tammen pour son projet s'intitulant *Endangered Guitar*.



Figure 2.10: Hans Tammen, *Endangered Guitar*

Cette guitare hybride, modulaire et interactive, a été développée par Tammen, influencé dans sa musique par le courant d'improvisateurs anglais de musique *Free* des années 80 mené par Derek Bailey. La guitare, posée sur une table, est reliée à un ordinateur par une interface audio-numérique, de deux manières : l'une par la sortie habituelle, monophonique, et l'autre par un capteur MIDI qui renvoie les informations de hauteur et de vitesse (ou parfois un capteur piézoélectrique). La guitare est aussi préparée avec un panel d'outils très développé. Un *patch* du logiciel *Max/MSP* modifie le son de la guitare en temps réel. Le musicien a une très grande liberté de contrôle du logiciel, due à une interface ergonomique et une grande possibilité de modifications du son. La plupart de ces traitements effectués sur le son sont basés sur des algorithmes d'analyse du signal : analyse de hauteur, de durée. De plus, une partie du logiciel est consacrée à la spatialisation du son, qui n'est cependant pas improvisée comme le reste des paramètres du son. Concernant le système de diffusion du son, le musicien choisit d'utiliser un système 5.1, constitué de quatre enceintes entourant le public, d'une enceinte et d'un *subwoofer* le plus souvent au milieu, comme précisé en *Figure 2.11* :

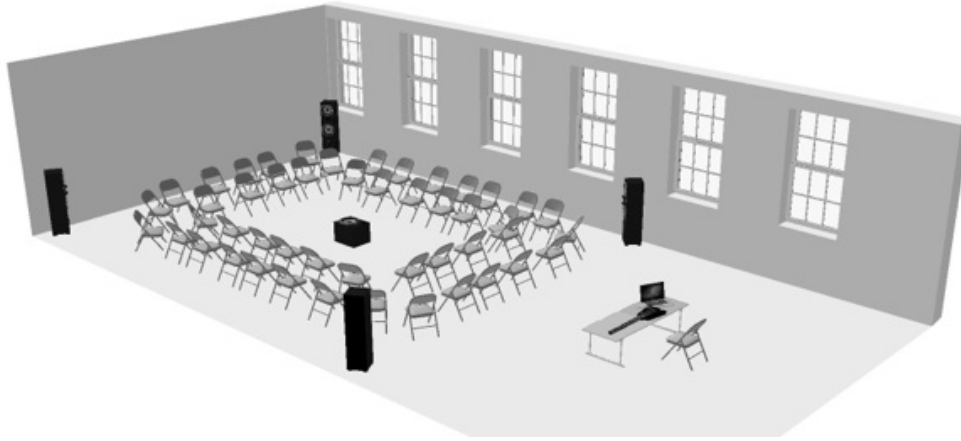


Figure 2.11 : Configuration spatiale pour Endangered Guitar

La façon que le guitariste a d'utiliser cette disposition spatiale est assez simple. Il écrit :

« L'œuvre multicanale *Endangered Guitar* consiste généralement en deux voix indépendantes tirées simultanément de l'instrument hybride et interactif guitare/logiciel. Créés et modifiés en temps réel à partir des manipulations de la guitare, les sons sont séparés en une voix seule localisée quelque part dans la salle, et en un motif micropolyphonique/polyrythmique réparti sur les haut-parleurs entourant le public. »⁸⁶

La place de la voix seule est déterminée par l'acoustique du lieu et les envies du guitariste : son improvisation va différer selon la place du haut-parleur dans la salle de concert. Cette spatialisation ainsi utilisée permet donc d'appuyer le rôle musical de chaque élément (mélodique et harmonico-rythmique).

En soi, l'augmentation que Hans Tammen a mis en place sur sa guitare électrique est assez sommaire. Il installe peu de capteurs sur sa guitare. Cela lui arrive de parfois utiliser un Iphone en tant que *slide*, et de récupérer les données du téléphone, afin d'utiliser l'accéléromètre et le gyroscope embarqués, en lien avec la musique. Il utilise aussi des contrôleurs externes pour gérer manuellement les paramètres de son *patch*. Cependant, la prouesse de son geste tient à cette modularité quasiment sans limites qu'il obtient avec *Max/MSP*. De plus, dans le cadre de la pensée d'une musique improvisée, Tammen va jusqu'à inclure dans son *patch* des éléments qui se déclenchent tout seuls de manière imprévisible. Cela lui permet de rajouter une « source d'incertitude »⁸⁷, qui rendent selon lui ses improvisations plus imprévisibles. De la pensée du guitariste, on peut donc retenir entre autres cette recherche sur l'utilisation de l'espace sonore, du traitement du signal et du hasard dans ses compositions. Une autre pensée d'augmentation instrumentale consiste à proposer plus de possibilités gestuelles à l'instrumentiste, et de manière

86 « Multichannel Endangered Guitar Works generally consist of two independent voices simultaneously drawn from the hybrid interactive guitar/software instrument. In realtime created and processed from guitar manipulations, sounds are distributed to a single voice located somewhere in the room, and to a micropolyphonic/polyrhythmic pattern on the speakers surrounding the audience. » cité dans <http://tammen.org/multichannel-endangered-guitar-works/>, (site consulté le 30 avril 2018)

87 <http://tammen.org/musical-instruments-in-the-21st-century-endangered-guitar/> (site consulté le 30 avril 2018)

plus proche des "canons" de la guitare électrique. C'est ce que propose Otso Lähdeoja, toujours dans sa thèse sur l'augmentation de la guitare.

Otso Lähdeoja a élaboré une guitare augmentée basée sur la captation de plusieurs mouvements et gestes guitaristiques. Voici le schéma qu'il a établi concernant l'environnement instrumental de sa guitare :

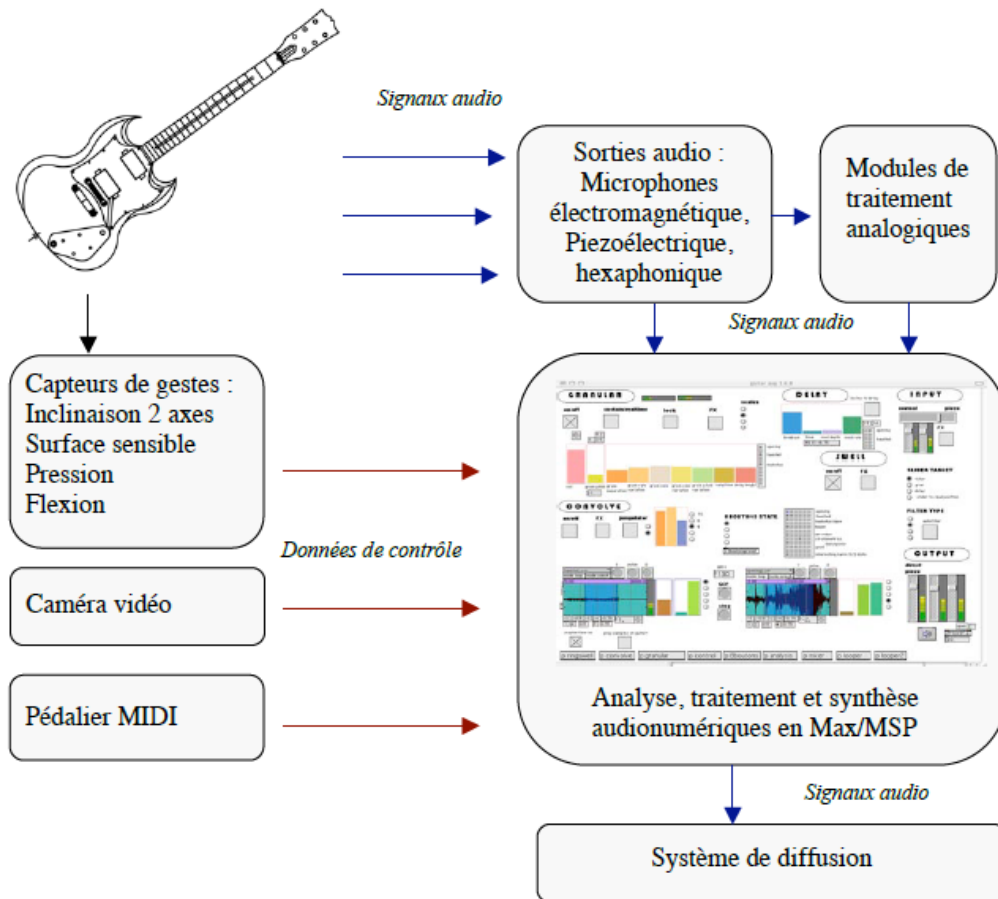


Figure 2.12 : Environnement instrumental de la guitare augmentée d'Otso Lähdeoja

Cette configuration très complexe fait intervenir beaucoup de capteurs de différents types. Il utilise des capteurs de mouvement, disposés sur l'instrument ou dans la pièce, plusieurs microphones, des actionneurs, ainsi qu'un patch *Max/MSP* d'analyse et de traitement du signal. Ceci lui permet d'avoir accès à de nombreux paramètres supplémentaires dans le travail du timbre de sa guitare. Chaque capteur est assigné à une modification du son (synthèse granulaire, modification de hauteur et de durée de note, contrôle d'effets temporels) et il peut, à l'aide d'un actionneur, choisir quand activer ou non la récupération des sons captés. Son environnement musical est donc très modulable, et permet de découpler les possibilités timbrales de la guitare électrique. On peut cependant objecter que cette augmentation guitaristique se focalise sur les paramètres habituels du son (hauteur, durée, intensité, timbre) sans traiter l'espace sonore. Il ne paraît pas incohérent d'utiliser certains de ces capteurs pour contrôler la spatialisation, mais la pensée de l'auteur était

focalisée sur cette recherche du développement du timbre. Dans le dernier exemple de guitare augmentée, il y a aussi cette recherche de nouveaux timbres, avec une autre panoplie de capteurs.

Il s'agit de la guitare augmentée par Adrian Freed, appelée *Duotouch Augmented Guitar*. La guitare se présente comme ceci :



Figure 2.13 : *DuoTouch Augmented Guitar* d'Adrian Freed

Cette guitare, de taille réduite, a été augmentée en utilisant des *FSR*, des *Ribbon* et des capteurs piézoélectriques. Cela permet d'obtenir de nombreuses possibilités de modification du son, par la position de certains doigts sur la guitare. Le microphone de la guitare permet aussi une récupération corde par corde du son, afin de permettre un traitement du signal différent pour chaque corde. Adrian Freed a permis le développement de ce genre de microphones, lors de ses recherches avec le *Guitar Innovation Group* à Berkeley. Cette augmentation présente l'avantage par rapport aux deux autres de bien exploiter l'espace fourni par le corps de la guitare électrique, souvent peu utilisé. De plus, les éclisses (voir *Figure 2.8*) sont tout du long munies d'un capteur, sûrement un *Ribbon*.

Ces quelques exemples de guitares augmentées donnent de nombreuses pistes quant à la captation de données sur l'instrument qu'est la guitare électrique. On va donc pouvoir procéder au choix des capteurs et des actionneurs dans le cadre de notre travail, tout en ayant à l'esprit que leur finalité est le contrôle de la spatialisation du son en temps-réel.

3 Choix du dispositif de capteurs et d'actionneurs

3.1 Choix des capteurs et du mode de transmission des données

Pour commencer, on va bien sûr récupérer le signal électrique venant de la sortie de la guitare elle-même. Les microphones électrodynamiques (deux microphones double bobinage dans le cas de la *Gibson Les Paul* utilisée) récupèrent et transforment la vibration des cordes en signal électrique, puis ce signal est redirigé vers un boîtier de DI à l'aide d'un câble jack asymétrique de diamètre 6.35 mm. Cette DI peut alors adapter l'impédance du signal, pour pouvoir rediriger celui-ci vers une console de mixage puis une carte son (ou directement une carte son). Certaines cartes son proposent aussi des adaptations d'impédance, ce qui rendrait la DI inutile. Ceci permet de numériser le signal analogique venant de la guitare électrique pour pouvoir le re-travailler à l'aide d'un ordinateur.

Ensuite, au vu des possibilités d'augmentation engagés dans la partie précédente, il me semble important de considérer l'espace libre sur le corps de la guitare. Cet espace peut être utilisé par l'intermédiaire de capteurs comme les capteurs de force, les potentiomètres linéaires souples et les capteurs piézoélectriques. Il serait donc intéressant de voir comment l'investir, tout en conservant les modes de jeu originels guitaristiques. Cette exploitation de l'espace est bien sûr propre à chaque instrumentiste, et je compte donc proposer un système de captation basé sur mes possibilités techniques personnelles.

En analysant la *DuoTouch Guitar*, on peut voir que Freed a disposé un capteur de pression sur le pouce, du côté du *switch* 3 positions (*Figure 2.8*), et un capteur de position du côté des contrôles de volume et de tonalité. Cependant, cette configuration ne me paraît pas complètement logique. En effet, étant moi-même guitariste habitué à jouer autant aux doigts qu'avec un plectre, il me semble plus judicieux d'inverser ces deux capteurs dans leur positionnement. Le pouce peut se déplacer sur toute la surface parallèle au manche côté *switch*. En tant que musicien pratiquant l'improvisation jazz, j'ai aussi remarqué une tendance qu'avaient plusieurs guitaristes à poser l'auriculaire sur le corps de la guitare lors du jeu au plectre, afin de disposer d'un point de stabilité pour la main droite. Bien que n'utilisant pas forcément cette technique, je l'ai expérimentée, et elle paraît assez logique : la main droite dispose de plus de stabilité, et cette attache au corps de

l'instrument permet quand même des déplacements de la main pour jouer avec différences nuances de timbre, alors qu'un pouce qui serait fixé n'a pas cette latitude de jeu. Ainsi le couple de mouvements *déplacement du pouce/appui de l'auriculaire* est simple à mettre en place instrumentalement alors que le couple *appui du pouce/déplacement de l'auriculaire* l'est beaucoup moins. Ainsi, cela donne une première idée du positionnement de capteurs sur le corps de la guitare, détaillé dans la figure suivante (Figure 2.14) :



Figure 2.14 : Placement des capteurs sur une *Gibson Les Paul*

- 1) Zone d'appui occasionnelle de la paume de la main droite
- 2) Zone de déplacement du pouce
- 3) Zone de placement de l'auriculaire
- 4) Zone de percussions sur le corps de la guitare

Le pouce se déplace continuellement en zone 2, et l'auriculaire est placé en zone 3. Il est donc logique de prévoir un *Ribbon* en zone 2 et un *FSR* en zone 3. Les zones 1 et 4 sont des zones de déplacement plus ponctuelles. La zone 1 est rarement utilisée : en appuyant avec la paume de la main droite tout en imprimant le mouvement contraire à la main gauche, on obtient une faible diminution de la hauteur de l'instrument, jusqu'à ce que le mouvement soit relâché. Cela permet aux guitaristes ne possédant pas de *vibrato* d'obtenir un mouvement de moindre amplitude mais similaire. Ce mouvement, assez reconnaissable, peut être utilisé dans le cadre de la captation, en

installant un *FSR* dans la zone 1 par exemple. La zone 4 est la zone de percussions sur le corps de l'instrument par excellence. En y plaçant un ou plusieurs capteurs piézoélectriques, on peut capter les sons percussifs effectués sur le corps de la guitare.

Après avoir tiré parti du corps de la guitare électrique, on peut s'intéresser à son manche. Cette zone est moins modulable, car c'est la zone de jeu proprement dite du guitariste : par l'appui sur les cordes, entre les frettes, on détermine la hauteur des notes. Cependant, la tête de la guitare semble être un endroit stratégique pour la récupération de données physiques. Elle possède la plus grande amplitude de mouvements de la guitare, et ce sans grand effort d'adaptation de la part du guitariste.



Figure 2.15 : Mouvements du guitariste, inclinaison vers le sol et rotation sur soi-même

On peut observer des mouvements de rotation de l'instrumentiste sur lui-même, ou des mouvements d'inclinaison de la guitare vers le sol. La rotation peut être effectuée avec un angle d'environ 150° . La translation vers le sol a quant à elle une marge de manœuvre d'un peu moins d'un mètre. Ces valeurs dépendent bien sûr d'autres contraintes que les possibilités de déplacement corporel du musicien, comme par exemple la présence d'une partition ou non.

Ces mouvements peuvent donc être captés par un accéléromètre deux axes, dont l'un des deux est réglé en inclinomètre.

On peut aussi s'intéresser aux mouvements d'autres parties du corps de l'instrumentiste, comme le poignet droit ou la tête. La tête est totalement libre de bouger sur un plan en deux

dimensions parallèle au sol. Cependant, vouloir capter et utiliser des mouvements venant de la tête, est très contraignant pour l'instrumentiste, et demande un temps d'adaptation et de travail long, sans compter le travail musculaire à faire au niveau du cou pour éviter les douleurs. Les mouvements du poignet par contre, sont naturellement présents chez le guitariste, et le poignet possède une large panoplie de vitesses de déplacement, allant de quasiment immobile à très rapide. On peut donc penser à un gyromètre un ou deux axes placé sur le poignet pour capter le vitesse de rotation de celui-ci.

Pour finir, il serait judicieux d'exploiter aussi les mouvements de déplacements dans l'espace de jeu du musicien (mouvements de translation). Pour un guitariste électrique qui joue debout, il est assez simple de jouer tout en avançant ou reculant sur scène. Lähdeoja utilise une caméra accrochée au plafond, qui cible de manière fluide les mouvements de l'instrumentiste, mais de manière plus simple, on pourrait penser à un quadrillage au sol, discontinu ou continu, qui renvoie la position de l'instrumentiste. Un quadrillage suffisant serait constitué de 9 dalles de détection : Nord-Est, Nord, Nord-Ouest, Est, Centre, Ouest, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest.

Voici un tableau qui résume le mouvement effectué, sa classification selon Refsum-Jenselius (partie 2.2.2), et le type de capteur associé.

Mouvement	Type de mouvement	Capteur
Inclinaison du manche vers le sol	Mouvement accompagnateur	Accéléromètre/Inclinomètre 2D
Rotation du musicien sur lui-même	Mouvement communicatif	Accéléromètre/Inclinomètre 2D
Appui avec la paume de la main droite	Action de production du son	<i>FSR zone 1</i>
Déplacement avec la pousse	Mouvement auxiliaire	<i>Ribbon zone 2</i>
Appui avec l'auriculaire	Mouvement auxiliaire	<i>FSR zone 3</i>
Percussions avec le pouce	Action de production du son	Capteur piézoélectrique zone 4
Déplacement dans l'espace de jeu	Mouvement communicatif	Tapis 9 dalles

Figure 2.16 : tableau récapitulatif mouvement/captation

Le choix de ces capteurs est en soi déjà un acte de création. Ce choix d'attribuer tel capteur à tel mouvement n'est pas unique : il est pluriel par essence, et peut être différent pour chaque musicien.

Les capteurs et les interfaces de captation utilisés proviennent de la boutique spécialisée Interface-Z. Il s'agit des capteurs cités dans le tableau précédent.

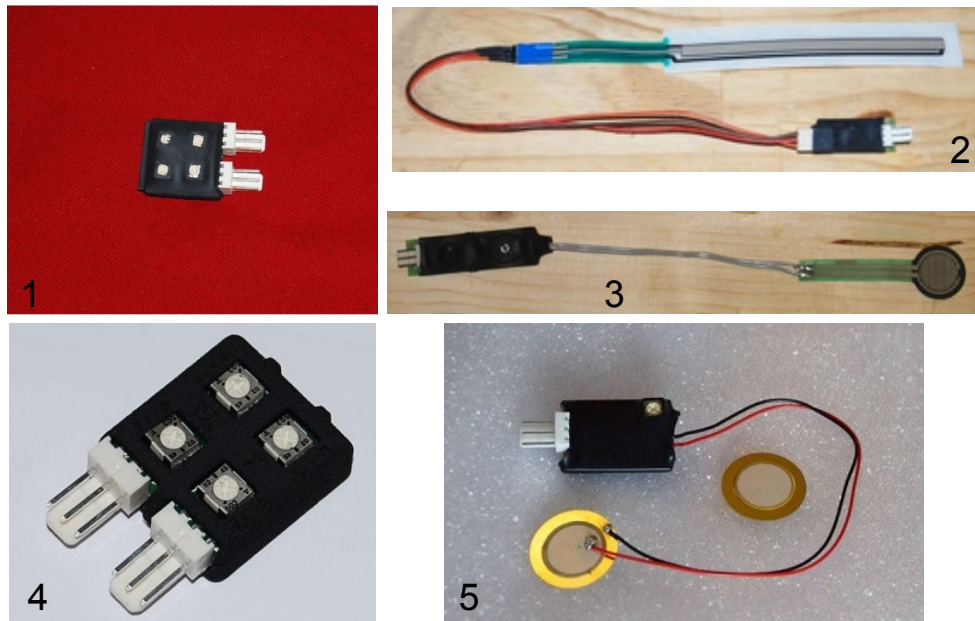


Figure 2.17 : Capteurs utilisés (Interface-Z)
 1) Accéléromètre 2D
 2) Potentiomètre linéaire souple (*Ribbon*)
 3) Capteur de force (*FSR*)
 4) Gyromètre 2D
 5) Capteur piézoélectrique

Comme on peut le voir sur la *Figure 2.17*, certains capteurs possèdent une voire deux vis de réglage :

- L'accéléromètre et le gyromètre disposent de deux réglages : celui du réglage de la valeur-étalon (réglage du zéro) et celui de la sensibilité. C'est de cette manière que l'accéléromètre peut être aussi utilisé en inclinomètre.
- Le *FSR* et le capteur piézoélectrique disposent du réglage de la sensibilité.
- Le *Ribbon* ne possède pas de réglage particulier.

Tous les capteurs sont reliés à une interface de captation par une connectique propriétaire (connectique ne fonctionnant qu'avec les produits Interface-Z) trois points à détrompeur : un pour la masse, un pour l'alimentation 5 Volt, un pour le signal analogique à transmettre. Les capteurs consomment tous moins de 15 mA. L'interface de captation permet de convertir le signal analogique directement en signal MIDI (Musical Instrument Digital Interface), et d'envoyer ces données vers un ordinateur. L'avantage du MIDI est qu'il est très utilisé pour le transfert de signaux musicaux : c'est un signal numérique qui transmet des messages de commande. Dans notre cas, l'interface récupère le signal analogique venant des capteurs et la transforme en valeur codée sur plusieurs bits. Ainsi, on récupère avec l'ordinateur une valeur déjà normée. Le traitement du signal à mettre en place pour récupérer une valeur utilisable n'est donc pas très complexe : un lissage des données (filtre passe-bas) ainsi qu'un échelonnage suffisent. Je renvoie pour ces traitements au mémoire de

fin d'études de Jimmy Beaufiles, qui a déjà mis en place les outils de traitement pour les mêmes capteurs (Accéléromètres, FSR) d'Interface-Z.⁸⁸

L'interface choisie est la Mini-HF. Elle a l'avantage de comporter 8 voies d'entrée analogiques, et d'utiliser une connexion sans fil afin de transmettre les données d'un émetteur vers un récepteur. Elle peut envoyer les données venant des capteurs 200 fois par seconde. Ceci garantit une réponse du système de captation en temps-réel assez convaincante.

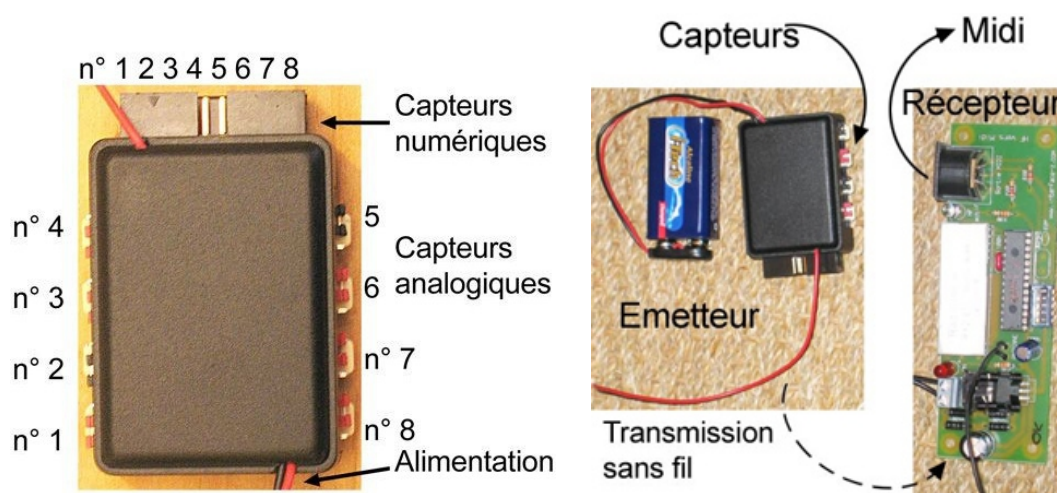


Figure 2.18 : Mini-HF, émetteur et récepteur (Interface-Z)

L'interface possède deux résolutions de sortie possibles : soit 127 pas différents (7 bits) soit 2048 pas (12 bits). On va choisir la résolution selon la performance et la vitesse de transmission requise. La transmission sans fil permet une grande mobilité pour le musicien, cependant elle possède un désavantage : l'émetteur doit être alimenté par un pile 9V, et ce dernier ne permet que 8 à 10h d'autonomie.

Le quadrillage au sol est réalisé de manière assez simple : on superpose trois couches de matériau, une couche de mousse perforée entre deux couches de papier aluminisé (assemblage de papier kraft et d'aluminium). Quand on marche sur la dalle, les deux couches de papier aluminisé se touchent, créant ainsi un contact. A l'aide d'une nappe de fils fournie par Interface-Z, on récupère l'information de contact, que l'on peut alors envoyer à une carte d'acquisition. Cette deuxième interface d'acquisition est une carte à 4 entrées analogiques et 8 numériques, dont le débit est réglable entre 5 et 1500 mesures par seconde.

⁸⁸ Beaufiles, J. *Esthétique et approche de l'instrument augmenté dans la percussion*, Mémoire de fin d'études de l'ENS Louis Lumière, 2012, pages 93 – 94

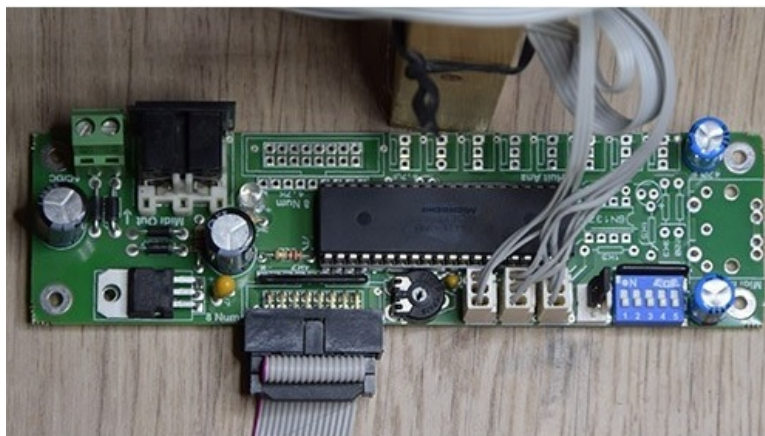


Figure 2.19 : Carte 4 entrées analogiques 8 numériques
(Interface-Z)

Ainsi, pour un tapis de 9 dalles, il faudra utiliser les 8 entrées numériques avec la nappe fournie, ainsi qu'une entrée analogique par l'intermédiaire d'un interrupteur filaire pour la dalle supplémentaire (il s'agit juste d'un circuit basique indiquant s'il y a contact entre deux fils ou non). L'intérêt des entrées numériques est de fournir directement à l'ordinateur une information de On/Off, ce qui facilite le traitement ensuite.

Les deux interfaces de captation (Mini-HF et Carte 4 Ana 8 Num) renvoient donc en sortie un signal MIDI. Afin de le récupérer par un ordinateur, on utilise une interface MidiSport 2x4 de la marque M-Audio, qui permet de récupérer deux signaux MIDI pour les transmettre à l'ordinateur par connectique classique USB.

Ceci constitue l'ensemble du matériel de captation. Mais ce n'est pas le seul matériel : on dispose aussi de pédales d'effets qui permettent des timbres variés, et d'un système d'actionneur donnant encore plus de malléabilité au système.

3.2 Choix d'un actionneur – Description succincte des pédales d'effet

Le choix de l'actionneur a été déterminé par plusieurs critères, notamment son niveau de malléabilité, sa prise en main et son prix. Il fallait un actionneur qui puisse donner beaucoup de possibilités de contrôle, sans que son prix ou sa maniabilité en soient affectés. J'ai donc choisi d'opter pour un standard, un pédalier MIDI Behringer (FCB 1010), disposant de dix commutateurs *on/off*, de deux pédales d'expression et de banques navigables. Le pédalier envoie des informations MIDI lorsqu'on actionne l'un des commutateurs ou l'une des pédales d'expression. Comme les deux ports d'entrée MIDI de la MiniSport 2x4 sont déjà utilisés, il faut un convertisseur supplémentaire

pour récupérer le signal MIDI dans l'ordinateur.



Figure 2.20 : Pédalier MIDI Behringer FCB 1010

Les pédales d'effet ont pour fonction d'étendre la palette de timbres de la guitare électrique. Voici un récapitulatif des effets que j'ai choisi d'utiliser :

Pédale d'effet	Description	Type de signal
<i>Hardwire Tube Overdrive</i>	Saturation légère (<i>Crunch</i>)	Analogique
<i>Zen drive</i> (Faite-main)	Saturation moyenne (<i>Distorsion</i>)	Analogique
<i>Big Muff</i> (Faite-main)	Saturation forte (<i>Fuzz</i>)	Analogique
<i>Artec VPL-1</i>	Volume (pédale active)	Analogique
<i>Morley George Lynch Dragon Wah</i>	Wah-Wah	Analogique
<i>Fairfield Circuitry Meet Maude</i>	Delay	Analogique
<i>Electro Harmonix Holy Grail Plus</i>	Réverbération	Conversion AN-NA ⁸⁹
<i>Electro Harmonix Freeze</i>	<i>Sustain</i> (permet de prolonger un son joué)	Conversion AN-NA
<i>Boss OC-3</i>	Octaveur	Conversion AN-NA
<i>Boss RC-3</i>	Boucleur (<i>Looper</i>)	Conversion AN-NA

Figure 2.21 : Récapitulatif des pédales d'effet

89 Conversion analogique – numérique puis numérique – analogique à l'intérieur même de la pédale d'effet

3.3 Synthèse de la chaîne de capteurs et d'actionneurs

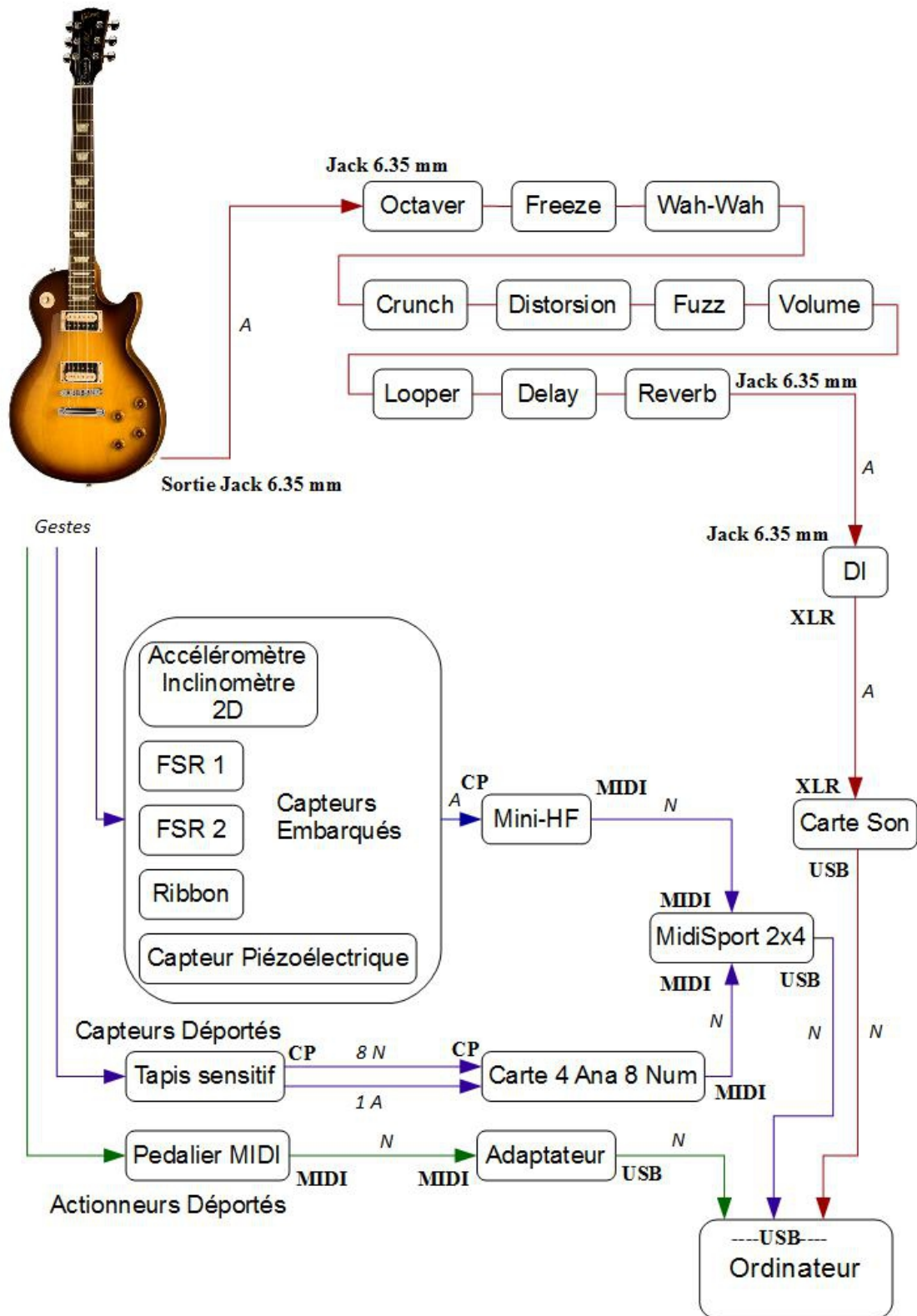


Figure 2.22 : Synthèse de la chaîne de capteurs et d'actionneurs

Voici quelques précisions sur la *Figure 2.22* :

En Gras : type de connectique de sortie ou d'entrée avec :

- **MIDI** : connectique MIDI In / MIDI Out
- **CP** : Connectique Propriétaire

En Italique : type du signal transporté avec :

- *A* : Analogique
- *N* : Numérique

Maintenant qu'une synthèse du processus de captation et d'action a été présentée, on peut passer à la suite du travail qui consiste à concevoir la partie logicielle contrôlant la spatialisation du son, ainsi que le système de diffusion, et à tester le dispositif.

PARTIE 3

MISE EN PLACE TECHNIQUE DU DISPOSITIF DE SPATIALISATION

1 Choix et description du dispositif de spatialisation

1.1 Choix des trajectoires de spatialisation

On peut maintenant procéder au choix des trajectoires de spatialisation qu'il semble intéressant d'implémenter pour le méta-instrument de spatialisation. Afin de procéder à ce choix, on va s'appuyer sur certains des mouvements de spatialisation imaginés par Stockhausen (notamment dans *Cosmic Pulses*) et sur une liste établie par Annette Vande Gorne⁹⁰. Cette dernière consiste en une formalisation assez complète d'effets et de mouvements de spatialisation possibles pour la mise en espace d'œuvres stéréophoniques. Bien que ce guide soit intentionnellement pensé pour un mixage par source (contrôle du volume de chaque haut-parleur à l'aide d'une console de spatialisation), il est intéressant d'extrapoler celui-ci à un mixage orienté-objet (outil de matriçage informatique permettant de placer directement l'objet-son à l'endroit voulu dans l'espace sonore), et de regrouper les éléments par "catégories" de spatialisation, dans une optique de travail de deux dimensions de l'espace, sur un plan parallèle au sol. La liste qui suit sera donc librement adaptée de celle directement présente dans l'article de Vande Gorne, *L'interprétation spatiale : Figures d'espace*.⁹¹

- **Placement** : effet de placement d'un son dans l'espace, sans mouvement.
 - Relai: un son résonne dans l'espace sonore et il est remplacé progressivement par un autre son lui succédant, à un autre endroit de l'espace
 - Accentuation : deux sons distincts spatialement coexistent, l'amplitude de l'un augmente

90 Vande Gorne, A. *L'espace comme cinquième paramètre musical*, in Pottier, E. *La spatialisation des musiques électroacoustiques*, Publication de l'université de Saint-Etienne, CIEREC, Travaux 157, *Musique et Musicologie*, 2012, pages 65 – 69

91 Van De Gorne, *ibid*, pages 65 – 69

tandis que celle de l'autre ne varie pas

- Insertion/Rupture : un son est tenu dans l'espace, un autre apparaît et disparaît, distinct spatialement du premier
- Apparition/Disparition : deux sons distincts spatialement résonnent l'un après l'autre, sans superposition entre eux
- **Mouvement linéaire** : déplacement d'un son dans l'espace, en ligne droite.
 - Alternance : un son effectue des allers-retours entre deux endroits distincts spatialement, à des vitesses très rapides (scintillement), rapides (oscillation), moyennes (balancement) ou lentes (vague)
 - Rebond : un son traverse l'espace en ligne droite, en effectuant une figure géométrique (carré ou autre polygone) ou de manière aléatoire et/ou désordonnée
 - Démasquage : deux sons résonnent au même endroit de l'espace sonore, l'un des deux change de position tandis que l'autre reste statique
- **Mouvement rotatif** : déplacement d'un son dans l'espace, de manière circulaire.
 - Rotation : un son traverse l'espace en effectuant un cercle
 - Spirale 2D : un son traverse l'espace en effectuant un cercle, avec une vitesse de déplacement qui augmente ou diminue au fur et à mesure
- **Élargissement/Rétrécissement** :
 - Explosion : un son passe d'une réverbération courte et focalisée à une réverbération longue et diffuse
 - Accumulation : des sons tenus, distincts spatialement, apparaissent les uns après les autres
 - Élimination : des sons tenus, distincts spatialement, disparaissent les uns après les autres
 - Envahissement : des sons tenus apparaissent en ayant une direction de propagation
- **Autres mouvements** :
 - Trajectoire indéfinie : un son se déplace sans trajectoire définie

Afin de faciliter la compréhension des trajectoires de spatialisation, celles-ci sont représentées sous forme graphique dans la *Figure 3.1*. Chaque point représente un son dans l'espace de diffusion. Les sons sont mobiles dans un espace physique de deux dimensions, parallèle au sol. Les trajectoires sont donc représentées en vue de dessus.

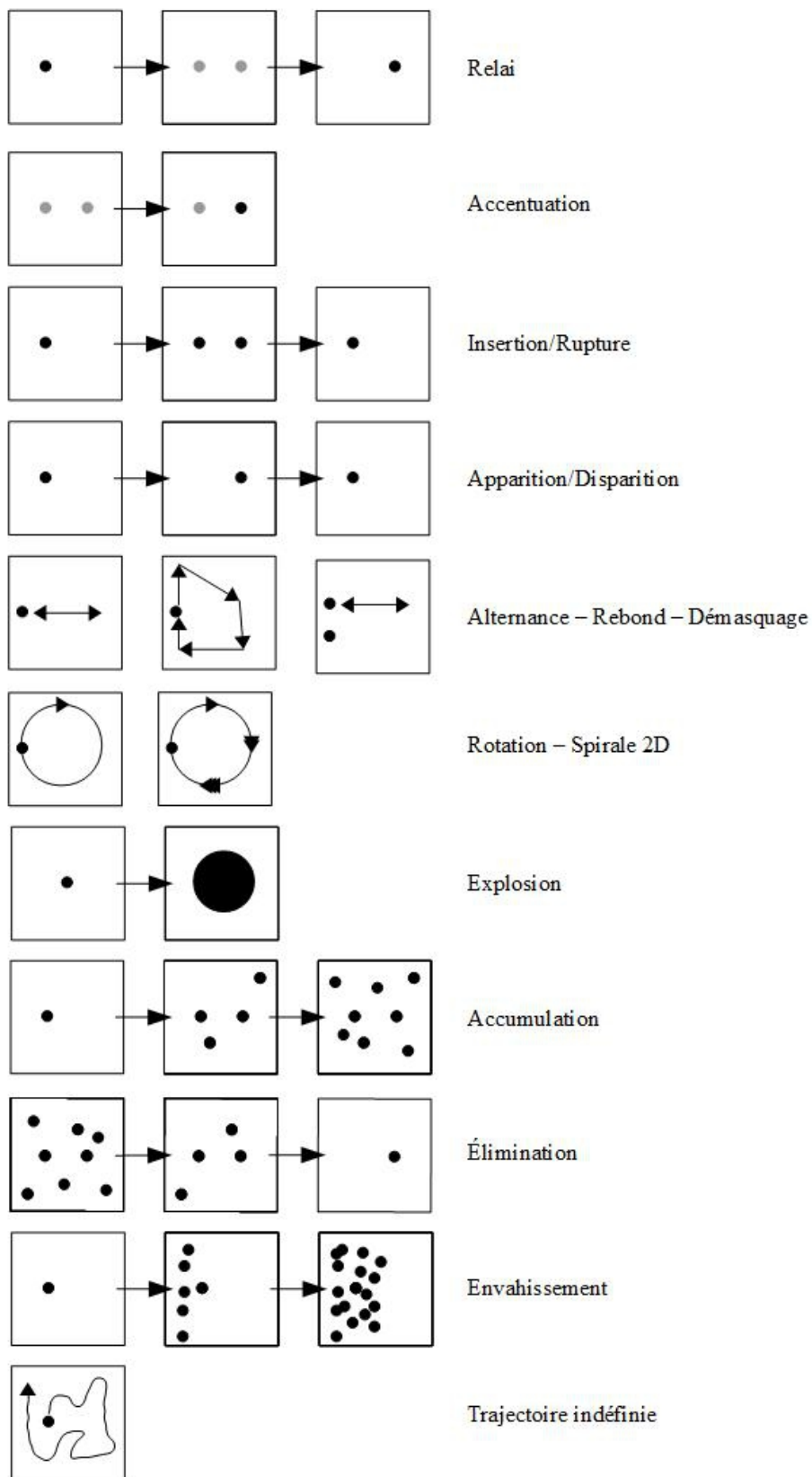


Figure 3.1 : Schéma récapitulatif des trajectoires de spatialisation

Les trajectoires et les mouvements de spatialisation cités dans la liste précédente font souvent intervenir plusieurs sons qui existent simultanément. Or, dans le cas de notre mémoire, et de notre performance, nous n'avons accès qu'à un seul signal provenant directement du jeu de guitare : celui capté par les microphones électromagnétiques. Ce fait amène à deux conclusions. Pour n'être pas cantonné à une musique avec une seule source spatiale, il faudra utiliser des sons pré-enregistrés (bourdons, sons synthétiques), que l'on contrôlera, de la même façon que le son direct de la guitare, grâce aux interfaces de captation. Ou alors il faudra prévoir des effets, incorporés dans le *patch* logiciel, permettant de soutenir et de faire vivre un son alors qu'il n'est plus joué par le musicien.

Ces effets sont le *delay*, la réverbération et le *looper*. Ils sont déjà présents dans la boucle d'effets habituelle (*Figure 2.22*), mais ceux-ci ne pourront qu'être liés au son direct, vu l'impossibilité de dupliquer le signal de sortie venant de chaque effet pour avoir plusieurs signaux d'entrée, pour des raisons matérielles évidentes. Cependant, si dans le *patch* de spatialisation se trouve un de ces traitements, il sera assez facile de séparer informatiquement le signal *dry* (n'étant pas affecté par l'effet) et le signal *wet* (passant à travers l'effet). De cette manière, on pourra contrôler la spatialisation de la sortie même de cet effet, tout en étant libre de spatialiser le son direct d'une autre manière. On peut bien sûr avoir plusieurs occurrences de *delay* et de réverbération, de longueur variable, pour augmenter le nombre de sources sonores contrôlables. Concernant le *looper*, c'est un peu différent. Pour être complètement autonome dans la séparation des sons, il nous faut avoir une sortie différente pour chaque boucle temporelle. Les *delays*, réverbérations et *looper* ayant déjà été programmés de nombreuses fois pour tous types de logiciels informatiques, il suffit de récupérer le signal de la guitare une fois sans l'effet, et une fois avec, pour pouvoir obtenir plusieurs sources sonores.

1.2 Lien entre la spatialisation et la captation

Le choix des trajectoires a donc été effectué. De plus, des capteurs ont été placés de façon à pouvoir récupérer des informations physiques pertinentes sur le jeu de guitare. On peut donc procéder à la corrélation des différentes données récupérées, pour contrôler la spatialisation des sources sonores. Cette corrélation n'est évidemment pas fixée : c'est une étape personnelle qui implique les goûts de chaque musicien. D'ailleurs la liste envisagée n'est qu'une proposition parmi d'autres, et elle est amenée à évoluer au fil des tests et des performances. Dans ma démarche personnelle, je privilégie une approche qui se veut la plus cohérente possible, entre les mouvements effectués en jouant de la guitare électrique et les mouvements du son dans l'espace. L'aspect visuel doit être à mon sens coordonné à l'aspect auditif : chaque son entendu par le public se doit d'avoir

un antécédent visuel, même minime.

Ainsi, une proposition de liste de corrélations pourrait être combinée à la complexité des mouvements physiques par rapport aux mouvements spatiaux. Si on prend comme exemple le mouvement de rotation, on s'aperçoit qu'il est compliqué de relier ce mouvement directement à une donnée physique brute : cela m'obligerait en tant que guitariste en situation de jeu à pratiquer une rotation continue d'une façon ou d'une autre, ce qui ne me paraît pas réalisable sans bloquer de nombreux modes de jeu et sans rendre inutilisables certaines données de captation. Par contre, il ne paraît pas aberrant de relier à un mouvement non pas la rotation elle-même, mais sa vitesse, on son déclenchement, ou encore le diamètre du cercle parcouru par le son. Voici donc une première liste de corrélations possibles⁹² :

- Tapis 9 dalles : Position d'une source sonore (statique). Par un matriçage de type géographique, on associe chaque zone du tapis à une position similaire dans l'espace planaire de projection. Quand on passe d'une position à l'autre, une interpolation est effectuée, ce qui permet à la source de se déplacer continûment entre les deux points de l'espace.
- Accéléromètre : Variation de la position d'une source sonore (dynamique).
- Inclinomètre : Variation de la position d'une source sonore (dynamique).
- FSR zone 1 : Variation du volume d'une source sonore (dynamique). On peut exploiter le FSR pour faire augmenter ou bien diminuer le volume, en partant d'un volume initial
- Ribbon zone 2 : Variation de la vitesse de rotation d'une source sonore (statique). On pourrait changer le sens de la rotation grâce au pédalier MIDI.
- FSR zone 3 : Variation du rayon de rotation d'une source sonore (dynamique).
- Capteur piézoélectrique zone 4 : Déclenchement/Arrêt de rotation d'une source sonore (statique)
- Gyromètre : Variation de la vitesse de rotation ou variation de la position d'une source sonore (dynamique)
- Actionneurs du pédalier MIDI : Déclenchement/Arrêt de trajectoires diverses (rotations, spirales 2D, rebonds, scintillements, trajectoires aléatoires...) (statique)
- Pédales d'expression du pédalier MIDI : Variation du rayon de rotation d'une source sonore (statique), du volume d'une source, etc...

Chaque source sonore peut être le son direct, le son de sortie des *delay*, des réverbérations, des boucles du *looper*. On dispose donc d'une infinité de possibilités de corrélations (à partir de

92 Voir la *Figure 2.14* pour les placements des capteurs sur la guitare

l'analyse des gestes et postures du guitariste) dont on peut avoir besoin en cours de performance. Il serait donc judicieux de prévoir différents liens entre les capteurs et les mouvements de spatialisation, que l'on pourrait choisir par simple appui sur un des actionneurs.

1.3 Choix des composantes informatiques

On peut maintenant choisir les composantes informatiques (logiciel hôte, logiciel de création de trajectoires, logiciels annexes) de notre projet. Tout d'abord, le choix du logiciel hôte se porte assez naturellement sur *Max/MSP*, au vu des exemples vus au cours du présent mémoire (*Cosmic Pulses*, guitares augmentées). Ce logiciel est un environnement de programmation optimisé pour les performances artistiques électroniques. C'est un standard qui est utilisé par de nombreux plasticiens et musiciens, car il est facile à prendre en main (programmation visuelle de haut niveau) et offre beaucoup de possibilités d'analyse et de traitement du signal. Il permet aussi de gérer facilement des données de contrôle comme le MIDI.

Concernant le logiciel qui permet de mettre en œuvre informatiquement les trajectoires de spatialisation, il s'agit d'un *patch* Max/MSP qui est directement en lien avec la méthode de diffusion. Ceci permet une grande facilité de mise en œuvre, car il n'y a pas d'adaptation à faire entre le *patch* de matriçage algorithmique (qui permet un mixage orienté-objet) et celui de trajectoires dans l'espace. Le *patch* sera donc présenté en même temps que la méthode de diffusion, en partie 3.2.2.

Pour finir, il reste à choisir les autres composants informatiques en lien avec ce travail, mais sans lien direct avec la spatialisation. Je parle ici des *patch* permettant un travail sur le timbre de la guitare, de manière informatisée, de la même façon que le font les pédales d'effets présentées auparavant. L'un des points importants qu'il reste à traiter est celui de l'amplification de la guitare électrique. En effet, lors de concerts de guitare électrique, on utilise habituellement un amplificateur sur scène (les marques les plus connues sont *Fender*, *Marshall*, *Vox*...). Cependant, dans notre cas, ceci aurait fait apparaître de nombreux problèmes matériels. Pour la spatialisation, notamment, cela aurait mené à la dépendance d'une source complètement statique sur scène, ce qui induirait des problèmes de *larsen*, de cablages... Le fait de ne pas avoir d'amplificateur physique nous affranchit du son qui pourrait s'apparenter au son direct de l'instrument. Ainsi, j'ai choisi ici d'utiliser une simulation numérique d'amplificateur, disponible directement dans un sous-programme de *Max/MSP*. Cette simulation reproduit le grain et le timbre des amplificateurs *hardware* présents dans le commerce. Pour une plus grande transparence du dispositif, j'ai utilisé la modélisation

d'amplificateur proposée par *Lepou*, proposée en accès libre sur le site du programmeur.⁹³



Figure 3.2 : Simulation d'amplificateur *ENGL Powerball* (*Lepou*)

On peut donc à présent établir un schéma synoptique de notre méta-instrument de spatialisation temps-réel.

93 Voir le site http://www.grebz.fr/simulator_freeamp_poulin.php

1.4 Schéma synoptique informatique

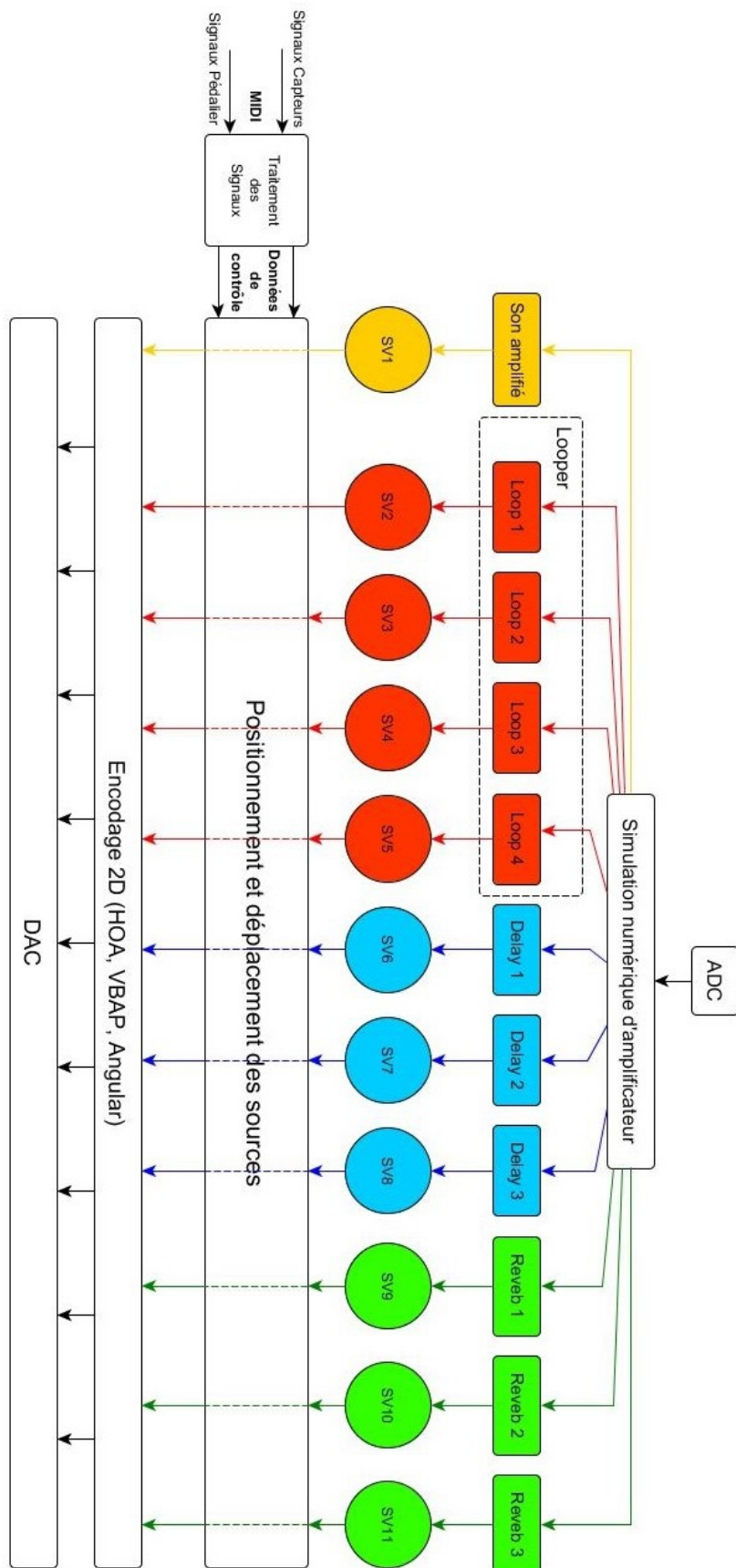


Figure 3.3 : Schéma synoptique informatique

Sur la *Figure 3.3* :

ADC : *Analog to Digital Converter* (Convertisseur analogique-numérique)

DAC : *Digital to Analog Converter* (Convertisseur numérique-analogique)

SV : Source virtuelle

J'ai choisi de n'utiliser pour l'instant que dix sources virtuelles dans mon méta-instrument de spatialisation.

2 Choix et description du dispositif de projection

2.1 Choix de la projection

La dernière étape de mise en espace d'un son est la projection. Ici, cela consiste à choisir le dispositif matériel qui permet une bonne retranscription des mouvements du son dans l'espace, avec des problématiques de transportabilité, d'ergonomie et d'installation matérielle. En effet, il ne s'agit pas ici de lister tous les moyens de projection du son, mais plutôt d'aller au plus efficace en s'interrogeant sur le système le plus à même à répondre à nos besoins musicaux.

Ce questionnement nous mène à considérer le nombre de haut-parleurs du dispositif, leur place dans la salle de représentation et par rapport au public. La performance effectuée a pour but de plonger le public dans une vision de la musique dans laquelle l'espace sonore et son travail sont centraux. Ainsi, il me semble important de privilégier une écoute précise des trajectoires pour le public, et non pas pour le musicien. La disposition la plus logique est donc d'entourer le public de haut-parleurs, tous dirigés vers l'intérieur. De cette façon, l'immersion de l'œuvre musicale n'en sera que plus forte. Le musicien, cependant, n'aura qu'un retour lointain des trajectoires qu'il est en train d'effectuer. Le but n'étant pas non plus de mettre le guitariste au centre du public, ce qui impliquerait d'autres problématiques sur la place du musicien dans l'espace de représentation. Cependant, comme dans toute forme de performance artistique, le *feedback* auditif, bien que nécessaire dans une moindre mesure, peut être réduit avec l'expérience de la pratique. Un musicien qui connaît très bien son son aura probablement moins besoin d'un retour sonore précis qu'un musicien moins expérimenté.

Pour obtenir une spatialisation assez convaincante, on peut déjà penser à une projection avec quatre ou huit haut-parleurs. Les projections à quatre haut-parleurs existent déjà, comme nous avons pu le voir dans la première partie du présent mémoire, chez Stockhausen, dans sa pièce *Kontakte*. Ce système de quatre haut-parleurs s'apparente en fait à une double stéréophonie. Il consiste en fait en un système stéréophonique, auquel vient s'ajouter un autre système stéréophonique similaire pour former une symétrie spatiale. Ce système a l'avantage de ne nécessiter que très peu de matériel, et d'être techniquement abordable. Cependant, c'est le système de projection le moins précis. Il ne permet pas une reconstitution fidèle du champ acoustique en deux dimensions, car le nombre de points de diffusion est trop faible. L'emploi de cette technique de diffusion a été due à des problèmes d'ordre technique, selon Enda Bates :

« La décision d'adopter un format de diffusion à quatre canaux, comme la quadraphonie, a été certainement induite par les difficultés à stocker plus de quatre canaux sur des supports analogiques, et par le coût important à cette époque d'un système comportant un grand nombre d'amplificateurs et de haut-parleurs. »⁹⁴

Concernant notre projet de spatialisation en deux dimensions, la quadraphonie ne semble pas appropriée, car elle ne permet pas la reconstitution d'un espace sonore assez précis. Il est plus judicieux de se tourner vers une projection à l'aide de huit sources sonores disposées autour du public, toutes à même distance du sol (pour former un plan parallèle à ce dernier).

2.2 *Choix de la technique de reproduction*

Si on choisit d'utiliser huit sources sonores autour de l'audience, on doit choisir un algorithme de reproduction d'environnement sonore qui puisse intégrer tous les points de diffusion. Les algorithmes les plus communs qui permettent une reconstitution du champ sonore, dans le cas où les haut-parleurs sont en cercle, sont le *VBAP* et l'ambisonie.

Le *VBAP* pour *Vector Base Amplitude Panning* est une méthode qui permet de placer des sources virtuelles dans un espace de deux ou trois dimensions. Elle fonctionne par groupes de trois enceintes : en disposant ces trois enceintes pour former un triangle perpendiculaire au sol, et en étendant les techniques de *panning* en amplitude à des fonctions vectorielles, on arrive à donner l'impression d'une source virtuelle se trouvant dans le triangle formé par ces haut-parleurs. Cette configuration est assez pratique, car elle ne dépend pas du nombre d'enceintes, et on peut obtenir des résultats corrects avec peu de haut-parleurs. Le créateur de cette méthode, Ville Pulkki, détaille celle-ci dans un article intitulé *Generic panning tools for Max/MSP*.⁹⁵ Les encodeurs et décodeurs *VBAP* sont libres de droit et rapidement accessibles.

L'ambisonie « décompose un champ sonore en une somme pondérée de fonctions spatiales élémentaires appelées harmoniques, circulaires en deux dimensions, sphériques en trois dimensions. »⁹⁶ Cette technique permet donc de reconstituer un espace sonore de deux ou de trois dimensions, à l'aide d'outils informatiques. Il existe plusieurs *ordres* d'ambisonie, et plus l'ordre est élevé, plus la restitution du champ acoustique est fidèle. On appelle *HOA (High Order Ambisonics)* les techniques d'ambisonie d'ordre 2, 3, etc... Ce procédé, apparu dans les années 70, est

94 « The decision to adopt a four-channel format, such as Quadraphonics, was almost certainly influenced by the difficulties in storing more than four channels on analogue media and the prohibitive cost at that time of large numbers of amplifiers and loudspeakers. », cité dans Bates, E. *The Composition and Performance of Spatial Music*, thèse de doctorat de l'Université de Dublin, 2009, page 36

95 Pulkki, V. *Generic panning tools for Max/MSP*, <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512255324/article4.pdf> (site consulté le 30 avril 2018)

96 Bonardi, A. et Guillot, P. *Concevoir des traitements sonores ambisoniques en 2D et en 3D – l'exemple de pianotronics 2*, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Bonardi_A_et_al.pdf, (site consulté le 30 avril 2018)

aujourd'hui plutôt accessible : de nombreux logiciels, dont certains sont libres de droit et *open source*, proposent un encodage/décodage de *HOA* au moins jusqu'à l'ordre 4. En outre la reconstruction de l'espace sonore est assez fidèle, et ce même à des ordres moyennement élevés (ordre 3 ou 4), ce qui rend la technique utilisable dans le cadre de notre performance de spatialisation. Pour cette méthode de reproduction du champ sonore, plusieurs travaux ont déjà été effectués au sein de l'Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière. Je renvoie donc, pour plus de précisions techniques, au mémoire de fin d'études de Clément Cercles, *Caractérisation objective et subjective d'une chaîne de traitement HOA*.

Dans le cadre de la partie pratique du présent mémoire, j'ai choisi d'utiliser un système *HOA* d'ordre 3 pour reconstruire l'espace sonore en 2D. Plusieurs aspects ont motivé ce choix, notamment :

- la fidélité de reproduction du champ sonore, assez précise pour une bonne représentation des trajectoires de spatialisation,
- l'utilisation des ressources logicielles à disposition (Mac Book Pro),
- la présence de *patches Max/MSP* de décodage et de codage ambisonique accessibles et gratuits,
- la possibilité avec une certaine librairie ambisonique (*HOA MSH Paris Nord*) d'utiliser un moteur de création de trajectoires dédié,
- la facilité de prise en main du système.

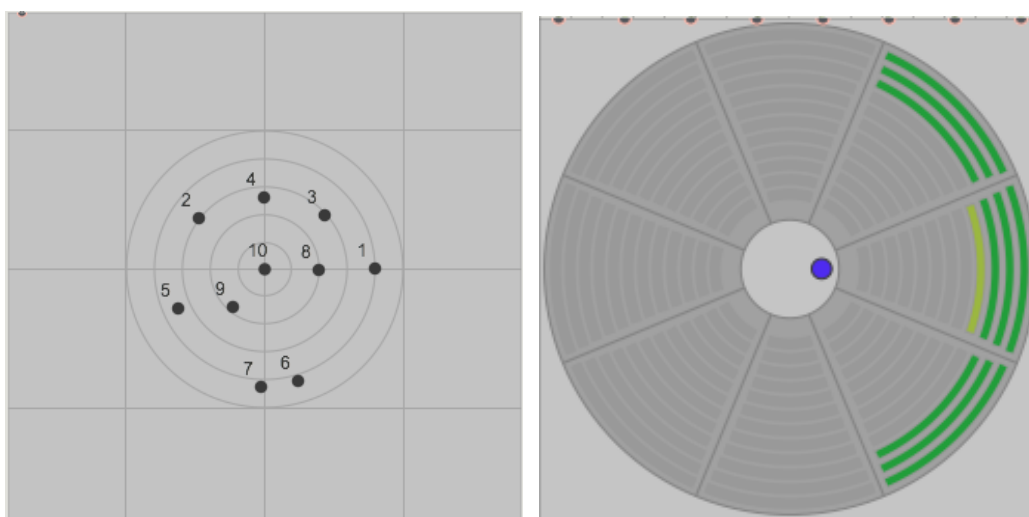


Figure 3.4 : *Patch* de contrôle des sources – *Patch* de diffusion ambisonique

L'objet informatique de la librairie *HOA MSH Paris Nord* qui permet de créer les trajectoires spatiales n'est pas le plus développé. Les trajectoires pouvant être implémentées sont relativement simples, mais l'outil est très suffisant dans le cadre de ce mémoire, et facilement contrôlable par des données de contrôle MIDI.

L'image de gauche de la *Figure 3.4* représente les sources que l'on peut déplacer à l'aide de données de contrôle MIDI. Chaque numéro/point correspond à une source sonore indépendante. L'image de droite représente quant à elle la traduction en ambisonique de la position des sources. Chaque huitième de cercle est relié à une sortie audio, et donc à un haut-parleur. Dans la figure, seule la source 1 était active, ce qui explique que le son ne soit présent qu'à droite (image de droite).

Le *patch Max/MSP* donne donc en sortie 8 canaux distincts, à envoyer chacun dans une enceinte. Il faut donc disposer d'une interface audio qui comporte huit sorties. Fort heureusement, de nombreuses consoles comme la Q24 de *Allen&Heath* (matériel de prêt de l'ENS Louis Lumière) sont connectables à un ordinateur *via* une connectique USB standard, ce qui permet de disposer d'une carte son avec assez de sorties. Cette configuration permettra d'envoyer le signal facilement de l'ordinateur vers les enceintes. En outre, étant donné la relative simplicité du système de diffusion, on utilisera une diffusion câblée en direct.

On a donc tous les éléments pour le schéma synoptique de la chaîne de projection. Ce schéma est présenté dans la *Figure 3.4* qui suit. Il comporte les principaux éléments de la chaîne de diffusion. Cependant, quelques éléments qui sont représentés vont probablement être modifiés, lors de la performance musicale. Par exemple, le nombre d'amplificateurs dépend du nombre de sorties de ceux-ci : sur le schéma, il y a 4 amplificateurs pour 8 enceintes, mais il est probable que l'on ait recours à seulement 2 ou 3 amplificateurs. Les enceintes représentées sont passives, donc nécessitent une amplification extérieure, mais il est possible que celles-ci soient actives, ce qui rendrait les amplificateurs inutiles.

2.3 Schéma synoptique de la chaîne de projection

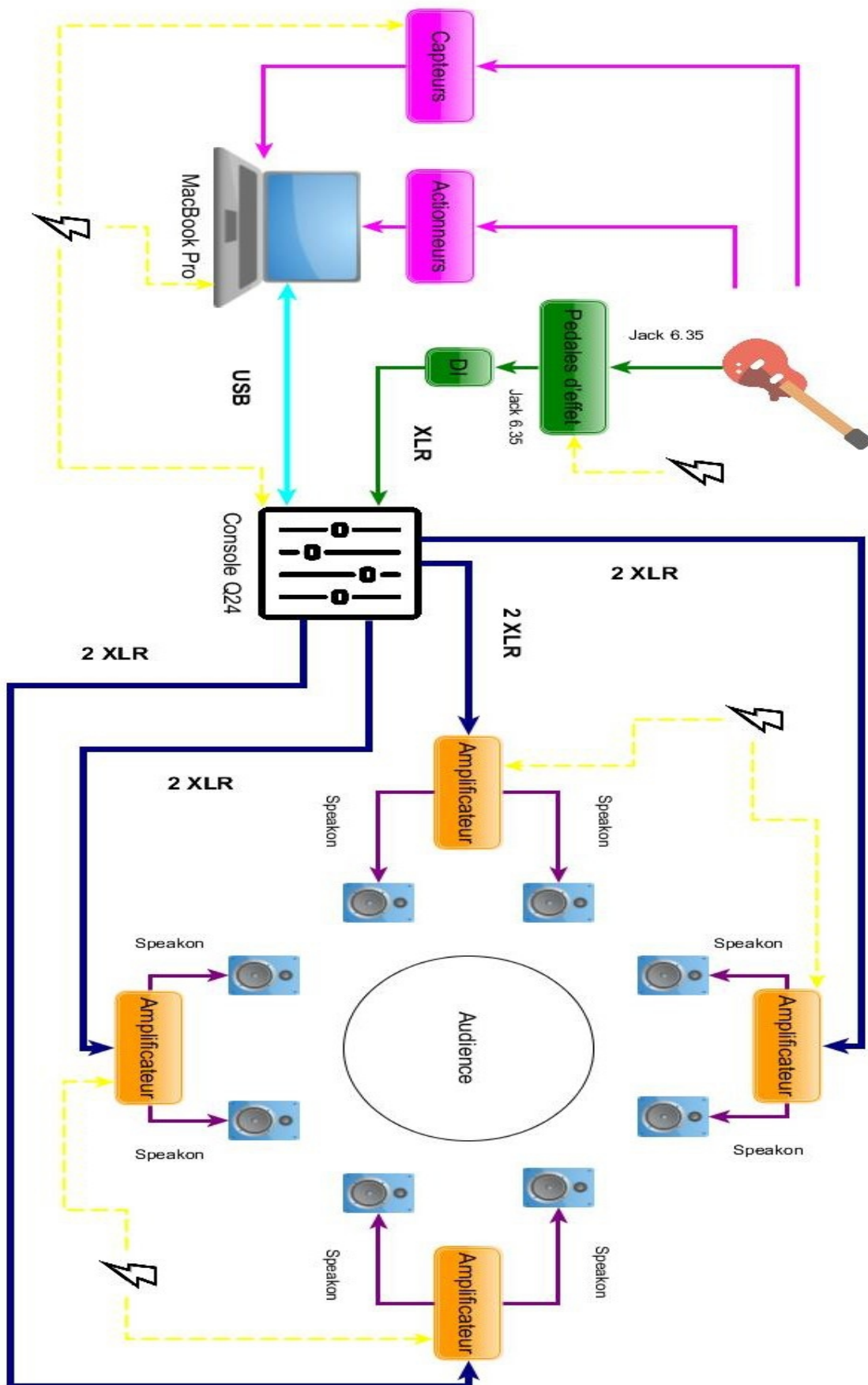


Figure 3.5 : Schéma synoptique de la chaîne de diffusion

3 Perspectives musicales

3.1 *Choix de l'improvisation, sa pertinence vis-à-vis du dispositif*

Le méta-instrument de spatialisation proposé dans le présent mémoire n'a pas pour finalité d'être lié à un langage musical particulier. Que la musique soit tonale, atonale, sérielle, improvisée, ce méta-instrument apporte des solutions aux compositeurs et aux improvisateurs pour pouvoir inclure l'espace dans leurs idées musicales. Néanmoins, dans le cadre de mon approche personnelle de l'instrument, utiliser un langage improvisé avec un tel dispositif provient d'une volonté d'intégration de l'espace sonore à l'improvisation. Comme le note Alain Savouret dans son ouvrage *Introduction à un solfège de l'audible* :

« Il faut au moins se résoudre à penser la musique comme un art de l'espace-temps, la penser non assujettie au seul temps (encore moins aux seules durées), et ce dès nos approches les plus élémentaires de la musique. »⁹⁷

Cette pensée de la musique en tant qu'art de l'espace-temps est pour l'auteur un « réflexe » qu'il faut acquérir. La finalité du processus de développement d'un méta-instrument vise donc à mettre en exergue ce « réflexe », parfois oublié par les improvisateurs de la scène actuelle. Par exemple, Savouret propose à ses étudiants, lors de ses cours d'improvisation au Conservatoire National Supérieur de Musique (CNSM), de se réappropriier le lieu de l'improvisation, en proposant différents essais de placement des musiciens les uns par rapport aux autres et dans l'espace physique de la salle. Ceci redonne donc à l'espace, l'espace physique, une place importante dans la création musicale. L'inclusion d'une spatialisation temps-réel dans un contexte d'improvisation est donc un des moyens de faire « sonner » cet espace.

En outre, le méta-instrument de spatialisation présenté met aussi en lumière un autre enjeu musical moderne, souligné dans les performances de musique improvisées. C'est ce rapport qu'entretiennent le geste et le son. Par l'augmentation, de nouvelles connexions entre les deux objets sont créées, ce qui donne plus d'importance à ce lien qui unit mouvement et écoute. « Le musicien aujourd'hui ne peut pas se préoccuper uniquement de ce qui "sonne" à son oreille, c'est tout ce que son corps "en-tend" (vers quoi il tend) qui doit être "solfié". »⁹⁸ En ce sens, c'est une implication complète du musicien, depuis ses gestes jusqu'à son écoute, que permet plus que tout autre langage celui de l'improvisation non idiomatique. Pour l'un des fondateurs du genre de l'improvisation libre, le guitariste Derek Bailey, « Mieux que tout autre moyen, [l'improvisation] donne [au musicien] la

97 Savouret, A., *Introduction à un solfège de l'audible*, Lyon, Symétrie, 2010, page 7

98 Savouret, A., *Ibid*, page 8

possibilité de s'identifier complètement à la musique »⁹⁹. Pour corroborer ces propos, Alfred Willener rassemble dans *Le désir d'improvisation musicale*, des témoignages d'improvisateurs au sujet de leur pratique de la musique improvisée.

3.2 *Élargissement aux autres instruments*

Le méta-instrument de spatialisation proposé a été éprouvé avec une guitare électrique. Cependant, il n'a pas pour vocation de n'être utilisable que par les guitaristes. On peut déjà étendre son application à tous les instruments ne produisant pas de son direct, comme les claviers ou les batteries électroniques. Bien sûr, la captation ne serait pas la même : les mouvements que l'on peut exploiter lors de celle-ci sont différents pour chaque instrument de musique. Concernant les instruments à percussions par exemple, on peut s'inspirer à nouveau du mémoire de Jimmy Beaufils, *Esthétique et approche de l'instrument augmenté dans la percussion*.

Cependant, l'utilisation du méta-instrument de spatialisation risque d'être plus problématique, autant conceptuellement que techniquement, dans le cas d'instruments acoustiques. On introduit une nouvelle source sonore, immobile, dans le dispositif de spatialisation. Ainsi le placement dans l'espace sera toujours lié à celui du musicien, ce qui rend le travail de l'espace sonore plus compliqué. De plus, cela introduit un dispositif supplémentaire de prise de son à prendre en considération, avec de plus du matériel mobile si le musicien choisit de se déplacer, pouvant entraîner des *larsen* et autres effets indésirables. On pourrait imaginer un dispositif avec des microphones de contact, seulement le timbre original de l'instrument en serait dégradé dans la diffusion, donnant ainsi un résultat médiocre et peu fidèle au son réel de l'instrumentiste.

99 Bailey, D. *L'improvisation, sa nature et sa pratique dans la musique*, Paris, Outre Mesure, coll. Contrepoints, 1998, page 33

CONCLUSION

Le travail effectué dans ce mémoire propose un méta-instrument de spatialisation donnant la possibilité aux musiciens instrumentistes de traiter l'espace sonore en performance, au travers du prisme de l'augmentation. L'écriture de l'espace envisagée s'appuie sur les recherches musicales des compositeurs ayant exploré cette dimension. La contrainte de l'augmentation, et de la maîtrise des nouveaux outils technologiques, amène ainsi à se demander comment concilier jeu musical spontané et complexité de dispositif de travail de l'espace sonore.

Pour l'instant, la spatialisation des sons permise par le méta-instrument proposé s'effectue par un placement statique ou par un déplacement dynamique des sources sonores dans l'espace. Grâce aux avancées technologiques, la quantité de source sonores n'est plus limitée, mais malgré cela, l'aspect dynamique de la spatialisation, par l'implémentation de trajectoires sonores, n'est qu'effleuré. Les prochains champs d'expérimentation sont les systèmes génératifs et récurrents, et les fonctions basées sur des modélisations physiques et statistiques. Ceci se développe depuis une vingtaine d'année, et permettrait de soulager le musicien d'un apprentissage gestuel tout en lui laissant les possibilités de spatialisation. La composition de l'espace par des algorithmes mathématiques permettrait d'obtenir des trajectoires auto-gérées mais toujours en lien direct avec la hauteur, la durée, le timbre et l'intensité des sons émis par le musicien.

Cette mise en espace est signifiante quelle qu'en soit la musique concernée. Cependant, laisser l'improvisation s'accaparer de l'espace sonore relève plus que d'une seule volonté musicale : c'est une volonté idéologique, une recherche sur l'essence de la musique improvisée, sur son but et son devenir. Cette recherche d'espaces non seulement *composables*, mais aussi *improvisables*, n'en est qu'à son commencement et l'émulation technologique va permettre la création d'une nouvelle esthétique de la musique improvisée.

TABLE DES FIGURES

- 1.1 Place des instruments sur scène dans Kreuzspiel (<http://www.karlheinzstockhausen.org/>)
- 1.2 Disposition spatiale dans *Gruppen*, Philharmonie de Paris (<https://philharmoniedeparis.fr/>)
- 1.3 Disposition scénique pour *Kontakte* (<http://www.karlheinzstockhausen.org/>)
- 1.4 Stockhausen, table rotative et microphones (<http://www.karlheinzstockhausen.org/>)
- 1.5 Intérieur de l'auditorium de l'Exposition Universelle d'Osaka, 1970 (© Universal Edition)
- 1.6 Vue de côté de l'auditorium d'Osaka (<http://www.karlheinzstockhausen.org/>)
- 1.7 Vue de dessus de l'auditorium d'Osaka (<http://www.karlheinzstockhausen.org/>)
- 1.8 Extrait des différentes trajectoires spatiales dans *Cosmic Pulse* (<http://stockhausenspace.blogspot.fr/>)
- 1.9 Acousmonium du GRM en 1974 (© INA-GRM)
- 1.10 Photographie d'une configuration du Spat' Sonore (www.spatsonore.fr/)

- 2.1 L'effet piézoélectrique, cas de la compression et de l'étirement du matériau (*Piezoelectric Materials - Springer*)
- 2.2 Modèle simplifié d'un accéléromètre capacitif (users.polytech.unice.fr/)
- 2.3 Schéma d'un accéléromètre piézoélectrique (© AllianTech)
- 2.4 Schéma d'un gyroscope (<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>)
- 2.5 Photographie d'un potentiomètre linéaire souple (*Interface-Z*)
- 2.6 Schéma d'un *Ribbon* (http://memoir.okno.be/phys_comp_tutorial/ribbon4/ribbon4.htm)
- 2.7 Composition d'un capteur *FSR* (© Interlink Electronics)
- 2.8 Éléments constitutifs de la guitare électrique (*Audiofanzine*)
- 2.9 Carte percussive d'une guitare classique. (© *The techniques of Guitar Playing*)
- 2.10 Hans Tammen, *Endangered Guitar* (© tammen.org/)
- 2.11 Configuration spatiale pour *Endangered Guitar* (© tammen.org/)
- 2.12 Environnement instrumental de la guitare augmentée d'Otso Lähdeoja (© *Une approche de l'instrument augmenté : la guitare électrique*)
- 2.13 *DuoTouch Augmented Guitar* d'Adrian Freed (<http://cnmat.berkeley.edu/content/many-and-duotouch-augmented-guitar-prototype>)
- 2.14 Placement des capteurs sur une *Gibson Les Paul* (<https://www.maxguitarstore.com/>)
- 2.15 Mouvements du guitariste, inclinaison vers le sol et rotation sur soi-même
- 2.16 Tableau récapitulatif mouvement/captation
- 2.17 Capteurs utilisés (*Interface-Z*)
- 2.18 Mini-HF, émetteur et récepteur (*Interface-Z*)
- 2.19 Carte 4 entrées analogiques 8 numériques (*Interface-Z*)
- 2.20 Pédalier MIDI *Behringer FCB 1010* (*Audiofanzine*)
- 2.21 Récapitulatif des pédales d'effet
- 2.22 Synthèse de la chaîne de capteurs et d'actionneurs

- 3.1 Schéma récapitulatif des trajectoires de spatialisation
- 3.2 Simulation d'amplificateur *ENGL Powerball* (*Lepou*)
- 3.3 Schéma synoptique informatique
- 3.4 Patch de contrôle des sources – Patch de diffusion ambisonique
- 3.5 Schéma synoptique de la chaîne de diffusion

BIBLIOGRAPHIE

1. Thèses et mémoires

Bates, E. , The Composition and Performance of Spatial Music, Music & Electronic and Electrical Engineering, Université de Dublin, 2009.

Beaufils, J. , Esthétique et approche de l'instrument augmenté dans la percussion, Son, ENS Louis Lumière, 2012.

Giomi, A. , La pensée sonore du corps : pour une approche écologique à la médiation technologique, au mouvement et à l'interaction sonore, Musique, musicologie et arts de la scène. Université Côte d'Azur, 2017.

Maisonnnet, J. , Optimisation et réalisation d'un micro-gyromètre deux axes à poutres vibrantes en silicium. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Franche-Comté, 2009.

Refsum-Jensenius, A. , Action-sound – Developing methods and tools to study music-related body movement, Musicologie, Université d'Oslo, 2007.

2. Ouvrages

Armengaud, J-P. , Du temps brisé à l'espace unifié, avec un détour allégorique par l'interprétation pianistique, 1997, in L'espace : Musique/Philosophie, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008.

Bailey, D. , L'improvisation, sa nature et sa pratique dans la musique, Paris, Outre Mesure, coll. Contrepoints, 1998.

Bayle, F. , Musique acousmatique, propositions ... positions, Paris, Buchet/Chastel, 1993.

Boulez, P. , Penser la musique aujourd'hui, Paris, Gallimard, 1963.

Cazaban, C. , Le temps de l'immanence contre l'espace de la transcendance : œuvre organique contre œuvre critique, 1997, in L'espace : Musique/Philosophie, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008.

Cott, J. , Conversations avec K. Stockhausen, Paris, Jean-Claude Lattès, 1979.

Dufourt, H. , L'espace sonore, « Paradigme » de la musique de la seconde moitié du XXème siècle, 1997, in L'espace : Musique/Philosophie, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008.

Josel, S. et Tsao, M. , The Techniques of guitar playing, Kassel, Bärenreiter, 2014.

Louvier, A. , L'orchestre, Paris, Combre, 1995.

- Miranda, E. et Wanderley, M.** , New digital musical instruments : control and interaction beyond the keyboard, Middleton, A-R Editions, 2006.
- Merlier, B.** , Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques, Paris, Delatour France, coll. Musique/Pédagogie, 2006.
- Savouret, A.** , Introduction à un solfège de l'audible, Lyon, Symétrie, 2010.
- Solomos, M.** , Notes sur la spatialisation de la musique et l'émergence du son, 1998, in Le son & l'espace, Lyon, Aléas Grame, coll. Musique et Sciences, 1998.
- Stockhausen, K.** , Texte zur Musik, Kürten, Stockhausen-Verlag, 1977-1984.
- Stockhausen, K.** , Texte zur Musik, « Kontakte », Kürten, Stockhausen-Verlag, 1984 – 1991, vol 7.
- Stockhausen, K.** , Texte zur Muzik, « Osaka-Projekt », Kürten, Stockhausen-Verlag, 1963-1970, vol 3.
- Stoïanova, I.** , Karlheinz Stockhausen « Je suis les sons... », Condé-sur-Noireau, Beauchesne, coll. L'éducation musicale, 2014.
- Vaggione, H.** , L'espace composable. Sur quelques catégories opératoires dans la musique électroacoustique, 1997, in L'espace : Musique/Philosophie, Paris, l'Harmattan, coll. Musique et Musicologie, 2008.
- Vande Gorne, A.** , L'espace comme cinquième paramètre musical, in Pottier, E. La spatialisation des musiques électroacoustiques, Publication de l'université de Saint-Etienne, CIEREC, Travaux 157, *Musique et Musicologie*, 2012.

3. Publications

- Collins, N.** , Karlheinz Stockhausen: Cosmic Pulses, MIT Computer Music Journal, Vol. 32, No. 1.
- Doscher, J.** , Accelerometer Design and Applications, (Analog Devices), Company brochure, Norwood, Massachusetts, 2005.
- Ledoux, A.** , Theory of Piezoelectric Material And Their Applications in Civil Engineering, MIT, MIT Press, 2011.

4. Publications internet

- Bonardi, A. et Guillot, P.** , Concevoir des traitements sonores ambisoniques en 2D et en 3D – l'exemple de pianotronics 2,
http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Bonardi_A_et_al.pdf
- Cadoz, C.** , Le geste canal de communication homme-machine. la communication "instrumentale", Technique et Science Informatique, Hermès Lavoisier, 1994.

https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/867517/filename/C94_TechScienceInfo.pdf

Feneyrou, L. , Stockhausen et la constante recherche de l'unité,

<https://philharmoniedeparis.fr/fr/magazine/stockhausen-et-la-constante-recherche-de-lunite>

Interlink Electronics , FSR, Integration Guide and Evalutaion Parts Catalog.

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>

Lähdeoja, O. , Une approche de l'instrument augmenté : la guitare électrique, Bibliothèque numérique Paris 8, 2010

<http://octaviana.fr/document/155983601>

Maconie, R. Stockhausen's Cosmic Pulses,

<http://www.jimstonebraker.com/Cosmic%20Pulses%201.pdf>

Pulkki, V. , Generic panning tools for Max/MSP,

<http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512255324/article4.pdf>

5. Sites internet

<https://etud.insa-toulouse.fr/~bouvot/Cours/5AE/BE%20Capteurs/5ESE%20-%20Gyroscope%20-%20Bouvot%20Ferte.pdf>

<http://stockhausenspace.blogspot.fr>

<http://stockhausenspace.blogspot.fr/2015/11/kontakte-planning-design.html>

<http://tammen.org/multichannel-endangered-guitar-works/>

<http://tammen.org/musical-instruments-in-the-21st-century-endangered-guitar/>

http://www.alliantech.com/pdf/coin_des_experts/generalite_sur_accelerometrie1.pdf

<http://www.artperformance.org/article-19127353.html>

http://www.grebz.fr/simulator_freeamp_poulin.php

http://www.karlheinzstockhausen.org/gruppen_english.htm

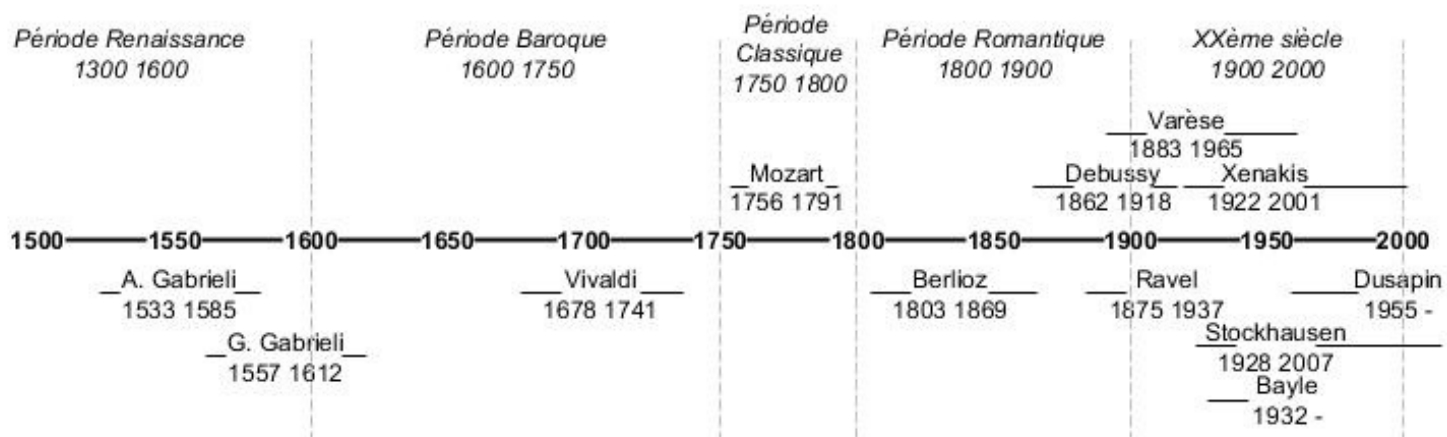
http://www.karlheinzstockhausen.org/gruppen_german.htm

<https://www.omega.fr/prodinfo/accelerometre.html>

<http://www.polymesure.com/fr/mpg2-803522—Les-accelerometres-capacitifs---Servo-accelerometres.html>

https://zumbuhllab.unibas.ch/fileadmin/user_upload/zumbuhllab-unibas-ch/Presentations_Group_Meeting/Older_Semesters/100730_petar_Piezo.pdf

Annexe 1 : Frise chronologique détaillant les périodes de la musique classique



Annexe 2 : Partition du Requiem de Berlioz, Dies Irae, pages 19 à 21.

Pour une lecture plus aisée de la pièce, seules les parties de cuivres sont montrées ici. Les numéros montrent les entrées successives des pupitres de cuivre spatialisés.

Ces quatre petits Orchestres d'instruments de cuivre doivent être placés isolément, aux quatre angles de la grande masse chorale et instrumentale. Les Cors seuls restent au milieu du grand Orchestre.

Diese vier kleinen Orchester von Blechinstrumenten müssen einzeln an den vier Ecken des grossen Chor- und Orchesterkörpers aufgestellt sein. Die Hörner allein verbleiben im grossen Orchester.

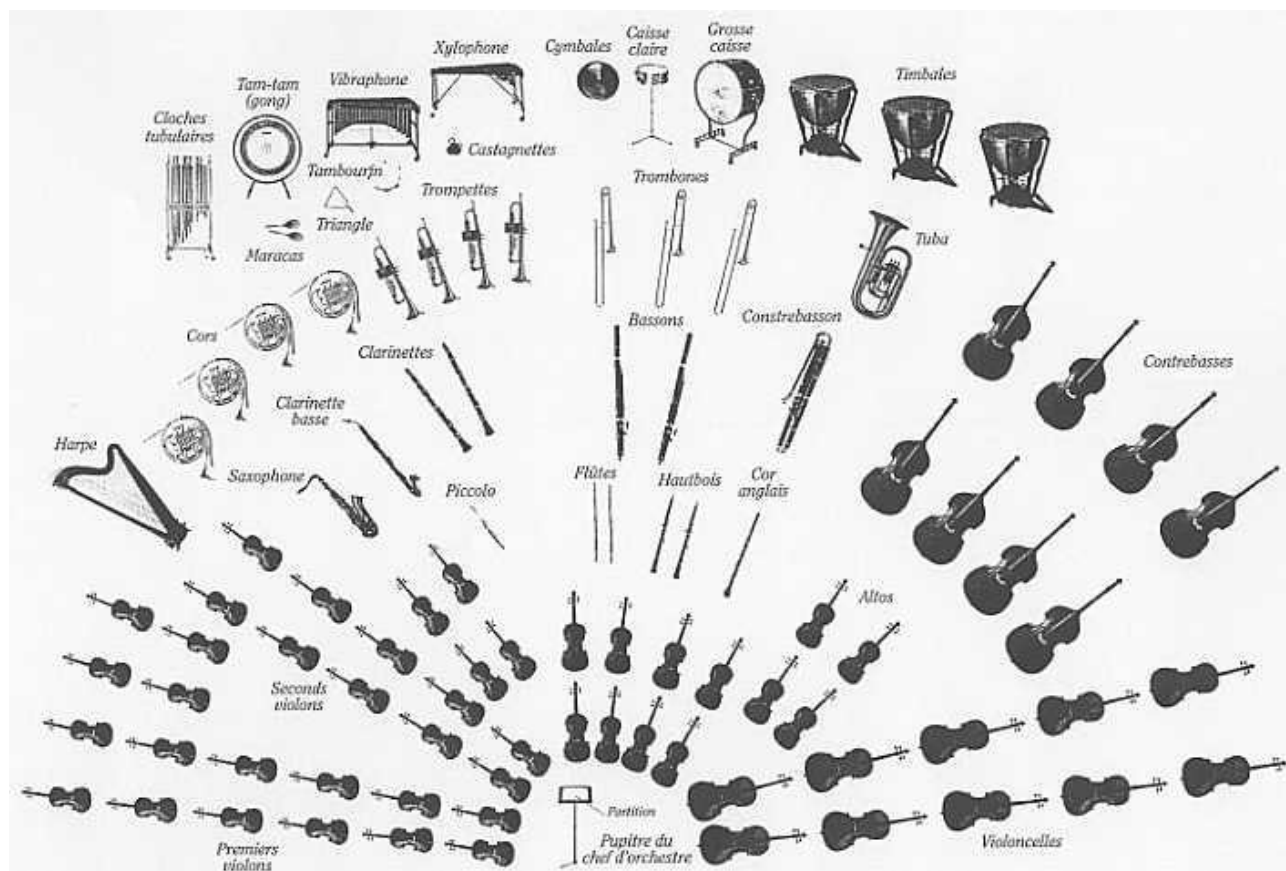
These four small brass-wind orchestras must be placed separately at the four corners of the grand group of choral singers and instrumentalists. Only the French horns remain in the grand orchestra.

- | | |
|---|---|
| 4 Cornetti in B (Si \flat). | 1 ^{er} Orchestre au Nord.
<i>Orchester I im Norden.</i>
Orchestra No I to the North. |
| 4 Tromboni.
2 Tube. | |
| 2 Trombe I in F (Fa). | 2 ^e Orchestre à l'Est.
<i>Orchester II im Osten.</i>
Orchestra No II to the East. |
| 2 Trombe II in Es (Mi \flat). | |
| 4 Tromboni. | |
| 4 Trombe in Es (Mi \flat). | 3 ^e Orchestre à l'Ouest.
<i>Orchester III im Westen.</i>
Orchestra No III to the West. |
| 4 Tromboni. | |
| 4 Trombe in B (Si \flat) basso. | 4 ^e Orchestre au Sud.
<i>Orchester IV im Süden.</i>
Orchestra No IV to the South. |
| 4 Tromboni.
4 Tube. | |

Musical score for the brass instruments, showing four staves with dynamic markings and articulation. The score is divided into two systems, with a large number '2' at the top right and a large number '1' in the middle of the second system.

Musical score for the brass instruments, showing four staves with dynamic markings and articulation. The score is divided into two systems, with a large number '3' at the top left and a large number '4' in the middle of the second system.

Annexe 3: Disposition des instruments de l'orchestre



Annexe 4 : Partition de GRUPPEN

Les numéros représentent les entrées successives des orchestres, numéro de partition 119

The image displays three pages of a musical score for 'GRUPPEN', numbered 119. Each page features a 4/4 time signature and a tempo marking of quarter note = 120. The score is divided into three systems, each with numbered boxes highlighting specific orchestral entries:

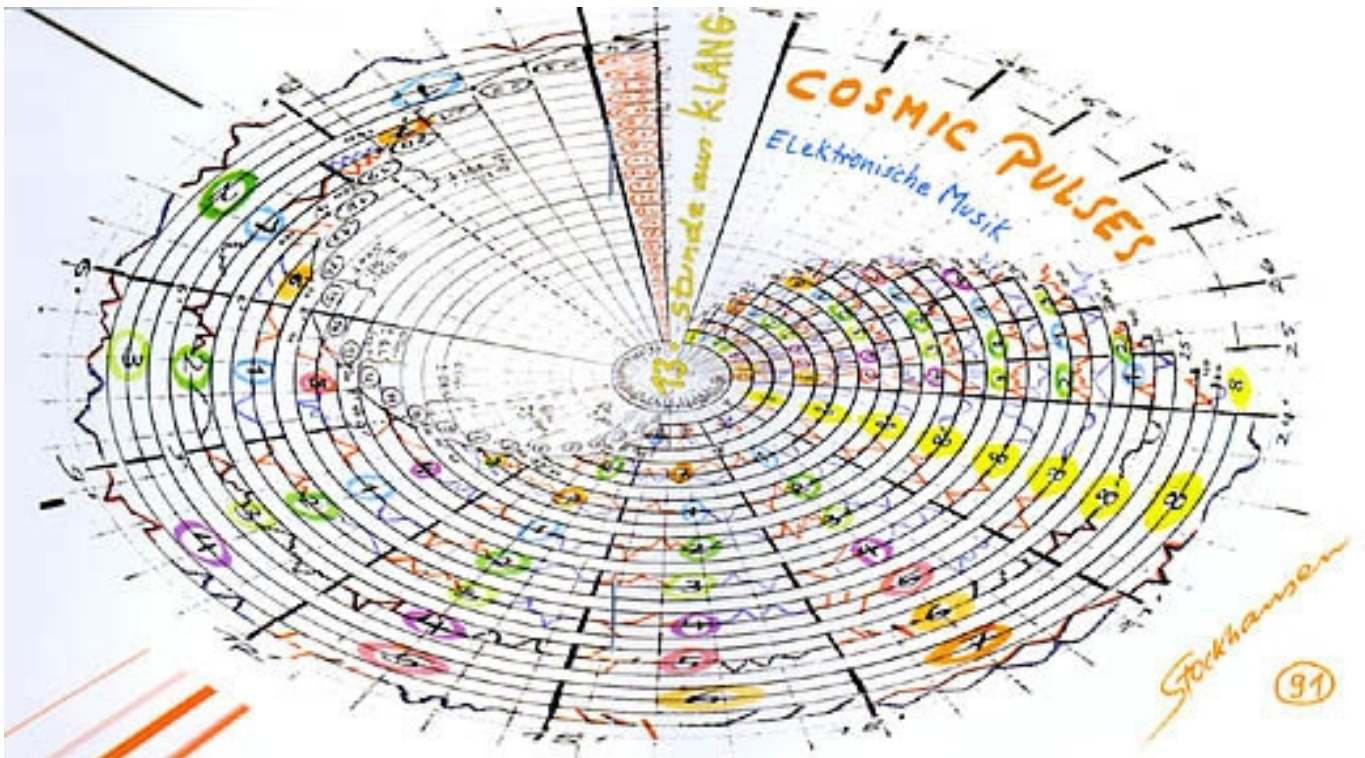
- System 1:** Features Horns (Hörner 1.2, 3.4), Trombones (Posaunen 1.2, 3.4), and Clarinet/Bassoon (Klarinet Tenor/ Bass). Box 1 highlights the Horns' entry. Box 3 highlights the Trombones' entry, marked *pp* to *ff*. Box 6 highlights the Clarinet/Bassoon's entry, marked *ppp*.
- System 2:** Features Horns (Hörner 1.2, 3.4), Trombones (Posaunen 1.2, 3.4), and Clarinet/Bassoon (Klarinet Tenor/ Bass). Box 2 highlights the Horns' entry, marked *ppp* to *ff*. Box 5 highlights the Trombones' entry, marked *ppp* to *sfz*.
- System 3:** Features Horns (Hörner 1.2, 3.4), Trombones (Posaunen 1.2, 3.4), and Clarinet/Bassoon (Klarinet Tenor/ Bass). Box 1 highlights the Horns' entry, marked *ppp* to *ff*. Box 4 highlights the Trombones' entry, marked *pp* to *ff*.

Annexe 5 : Liste des caractéristiques optimales des salles établie par Stockhausen

- un espace rond ou carré permettant des placements différents et variables pour les musiciens-interprètes et les auditeurs ;
- l'absence de scène(s) ou de podium(s) fixe(s) : plusieurs podiums ou praticables amovibles de préférence ;
- un plancher plat ;
- pas de sièges fixes pour les auditeurs, mais des possibilités de placements variables pour le public ;
- des prises et des raccordements pour les haut-parleurs et les microphones tout autour et au plafond ;
- plusieurs portes ;
- des possibilités de contrôle de la réverbération selon la pièce jouée ;
- un studio de régie sonore extérieur à la salle pour la transmission par haut-parleurs de la musique pré-enregistrée ;
- un système d'éclairage diversifié de la salle et des lampes séparées pour les pupitres des musiciens ;
- des sièges en bois, pas de fauteuils recouverts de velours, etc...

Annexe 6: Partition de Cosmic Pulses

Les modèles de mouvement incluent détermination des hauteurs et du tempo. Les traits colorés indiquent ces changements pour chaque section.



Töne pro Schleife 5 1 6
COSMIC PULSES
 Anfangs-Tonhöhen der 24 Schritten:

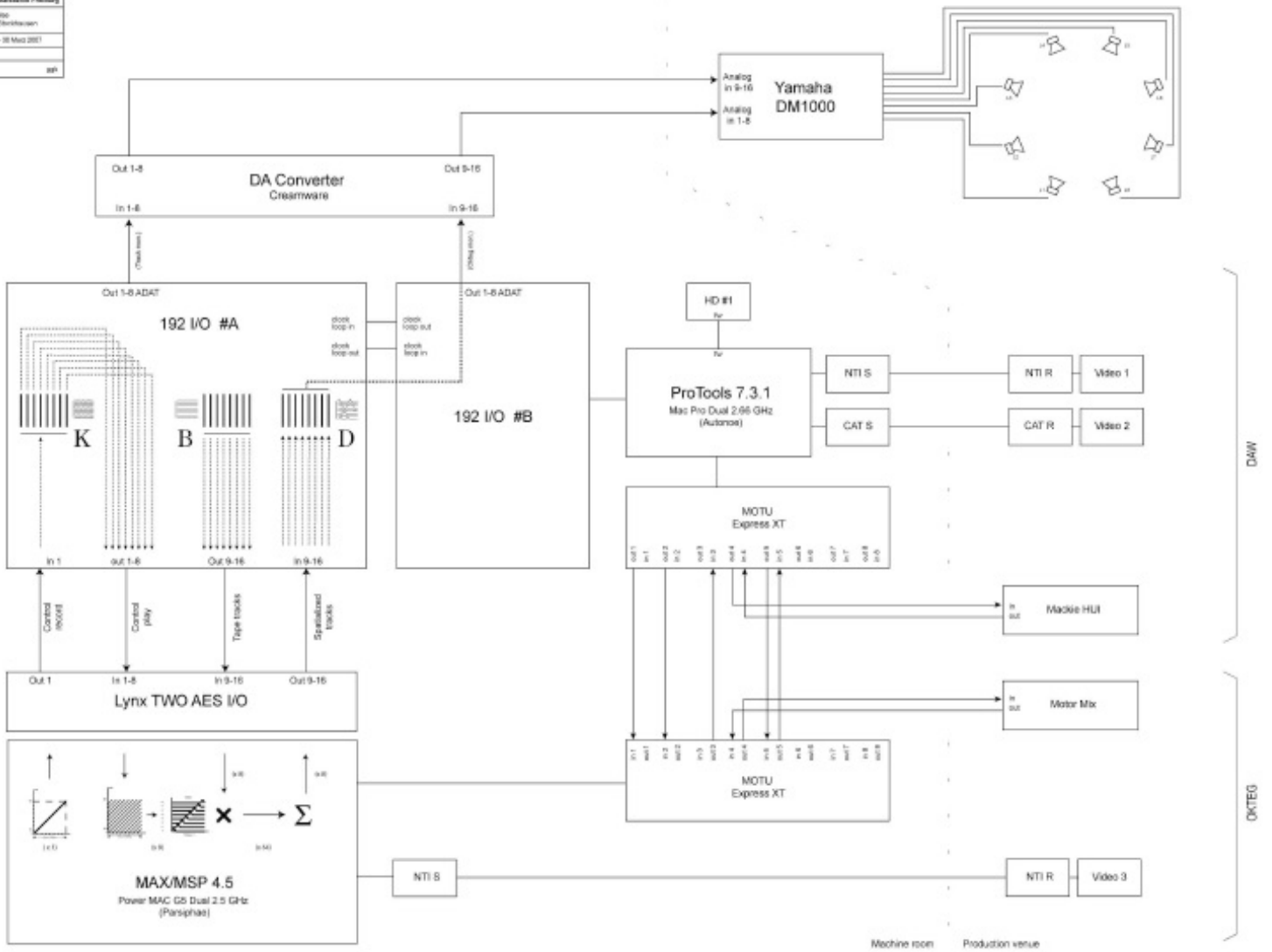
In jedem Abschnitt müssen das vorgeschriebene Tempo und die Tonhöhen der Schleife während längerer Dauern bleiben oder etwas unspielt werden; die gezeichneten Figuren nah oben oder unten soll man einzeln und nicht zu oft einfügen, manchmal in einer heraufgehenden Position länger stehen lassen.

Ton-Dauer sec.	Schleifen-Dauer sec.	Tempo
0,03	0,15	240
0,04	0,04	23
0,05	0,3	22
0,06	0,96	21
0,08	1,12	20
0,1	1,6	19
0,15	3,75	18
0,2	4,2	16
0,25	3	15
0,3	2,1	14
0,4	4,4	13
0,5	2	12
0,63	1,26	11
0,8	2,4	10
1	1,8	9
1,27	16,5	8
1,6	27,2	7
2	46	6
3,5	73,5	5
3,2	28,8	4
4,0	3,2	3
5,1	5,1	2
6,4	153,6	1

In den Abschnitten 1-3-7 kann auch manchmal eine längere Dauer eingestakt werden, in den Abschnitten 1-5-7 manchmal ein Glissando oberhalb der Mitte, in den Abschnitten 2-4-6 manchmal ein Glissando unterhalb. Man soll insbesondere kurze Schleifen rhythmisch unregelmäßig verändern.

Annexe 7 : Schéma fonctionnel de Cosmic Pulses, chemin du signal

Experimentelle/aktuelle Preisung
 Control Suite
 Markheim /Görtschmann
 Rahmen, 25 - 30. März 2007
 207



5.2 Diverse preparations and descriptions from Yates and Elgart

Yates and Elgart, Prepared Guitar Techniques, 6–12. Illustrations by Peter Yates. Reprinted with

permission from the California Guitar Archives, Los Angeles. www.calguitar.com

PREPARATION MATERIALS

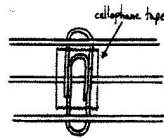
Please note that not all examples are illustrated. Space has been left for the reader to make any sketches necessary to recall the preparations as they appear on the reader's instrument.

A. METAL

1. Nuts and Bolts. One or more small bolts can be clamped onto a string by pinning the string between the head of the bolt and a nut. A low gong sound is produced.



2. Nails, Hairpins, Paper Clips, and Screws. Any of these materials can be woven between three or more strings to produce a "steel drum" sound. If necessary a small piece of tape can be used to keep them from working themselves free during playing.

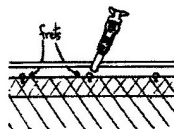


3. Alligator Clips. These versatile items are available in a variety of sizes and either with or without teeth. They can be clamped onto any string to produce a very clear gong of definite pitch.



If a clip is placed directly over a fret it can produce a snare drum effect by rattling against the fret when the string is plucked.

A very satisfying "rattlesnake" sound can be created by attaching a small clip above a fret that is near the nut (usually the third or fourth fret and the first or second string work best) and then suddenly bringing the string into contact with a fret near the string's midpoint. When the string is so activated, the clip rattles against the edge of the fret in a steadily accelerating buzz. Even among clips of the same size and type, some will produce better rattles than others, so the preparer is advised to try several clips before making a final decision.



7. Split-Shot (Lead Fishing Sinkers). These sinkers are available in a variety of sizes and can be attached and removed from a string without damaging it. (If possible, obtain varieties that are designed to be attached and removed by hand.) They produce a deep gong effect much like that produced by nuts and bolts.

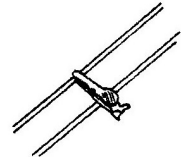
NOTE: keep a ready supply of extra sinkers; they should be replaced after two or three uses due to metal fatigue. If the metal wears too much the sinker will fly off the string.

8. Metal Foils and Sheet Metal. Small pieces of metal foils (aluminum foil or the lead foil used to seal wine bottles) can be wrapped, folded or bunched around a string. The resulting sound can be clear as a bell or muted and subtle like a wooden gong, depending on the amount of a string's length that is wrapped.



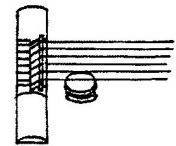
Alligator clips (continued)

A bouncing sound resembling that of a dropped ping-pong ball can be achieved by attaching a clip to a wound string and letting it lean by gravity against another string. When the latter string is plucked, the clip bounces against it.



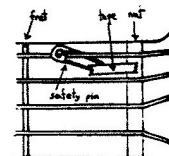
4. Aluminum bottle cap. When a threaded aluminum cap from a quart-sized bottle is lightly pinned between a string and the soundboard, the flexible, rounded top of the cap will cause the string to buzz like a sitar string. By carefully adjusting the position of the bottle cap a surprisingly haunting sound with great sustaining power can be obtained. Caps of varying sizes should be tried in order to determine which provide the preferred sounds.

NOTE: any plastic gaskets that are attached to the cap should be removed in order to allow the cap to vibrate freely.



5. Metal Wire. A soft buzzing sound can be produced by looping a short piece of wire around part of another object, such as an alligator clip. Pieces of wire can also be looped directly around a string, but will have a tendency to move along the string unless they are held in position by masking tape "leashes" connecting them to another part of the guitar.

6. Safety Pins. Small safety pins can also be used to produce buzzing sounds. They can be closed loosely around a string and then anchored, as in the previous example, with a thin leash of masking tape.



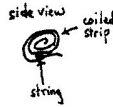
2. Cork. Cork is another material which can be partly split and pushed onto a string. Its spongy consistency gives a thick, muted quality to the resultant sounds. One advantage of cork is that very small pieces can be used, thereby allowing preparation near the nut of the guitar, where the strings are quite close to the fingerboard.

NOTE: Once a piece of cork is on a string, its split end can be taped together to help secure it.

3. Masking Tape. Paper masking tape can be folded over a string to produce a wide variety of sounds. A string can be made to sound like a drum or gong depending on the amount of tape that is used and the percentage of string length that is covered.

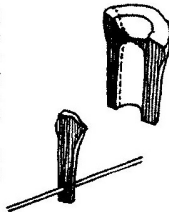
NOTE: A bit of gum residue is sometimes left on a string when tape is removed, but it can be rubbed off easily.

With thicker, more springy sheet metal, such as pie tin aluminum, a coiled strip can be fashioned to actually clamp onto a string. This technique is particularly useful in producing bell-like sounds from the wound bass strings.



B. WOOD

1. **Bamboo.** Bamboo's fibrous and resilient nature makes it well suited for preparations. Pieces of almost any size can be attached to a string by splitting them slightly along the grain and then pushing the string into the crevice that is thus created.

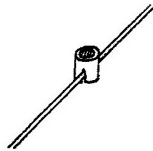


Longer pieces of bamboo can be woven between three or more strings to create a kalimba-like sound.

D. RUBBER AND PLASTIC

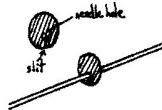
1. **Rubber Erasers.** Pencil erasers of the "cap" type or pieces of larger erasers can be pinned between a string and the nut, fingerboard, soundboard, or saddle of the guitar. Results range from soft thuds of indefinite pitch to penetrating sounds of definite pitch which suggest Chinese wood blocks.

2. **Rubber Tubing and Rubber Washers.** Pieces of various types of rubber tubing, such as surgical tubing or automobile fuel line, can be partly split and pushed onto a string to create a low drum sound. Small pieces cut from rubber washers can also be used in this way, and are particularly useful near the nut, where clearance is limited.



NOTE: the split ends can be taped together once the preparation is in place in order to help keep it from working its way off the string during playing.

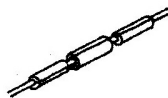
3. **Sheet Plastic.** Many types of sheet plastic, ranging from the soft varieties used for bread bag fasteners to the brittle, stiff varieties used for guitar picks, can be cut into suitable shapes and attached to a string. Once a piece of plastic is chosen and cut, it should be pierced near its middle with a needle in order to provide a "seat" for the string and then slit with a scissors from its edge to the needle hole. It can then be pushed onto the string until the string snaps into the needle hole and the piece of plastic is firmly held in place.



NOTE: the size of the needle hole should be gauged to suit the string for which the preparation is intended. The hole should be slightly smaller in diameter than the string.

Wire Insulation (continued)

Two small, tight-fitting pieces of insulation can be used to surround, and thus keep in place, a loosely fitting object (such as a larger piece of insulation). This creates a buzzing or rattling sound.



E. MISCELLANEOUS

1. **Wax.** Paraffin or beeswax can be molded around any of the monofilament treble strings to produce a dependable bell sound. Although the wax is a bit messy to remove, it stays in place well and will not harm the string. This technique should be avoided for the bass strings, where removal of wax from the interstices of the wire wrappings would be difficult.

C. CLOTH

1. **Felt.** Small blocks of very dense felt, such as the types used by piano technicians, can be pinned between a string and the nut, fingerboard, soundboard, or saddle of the guitar. It is tempting to use the word "wooly" to describe the muted sound that results.

2. **String and Cloth Tape.** Small pieces of string can be tied around a string to achieve a subtle or pronounced muting, depending on the quantity of string and its location. Cloth tape, like paper masking tape, can be folded around a string in various amounts to produce sounds ranging from bell-like chords to dull thuds.

Sheet Plastic (continued)

The stiff, brittle plastics result in a marvelously clear "church bell" sound, particularly on the treble strings of the guitar.

Larger pieces of plastic, such as an entire guitar pick, can be woven between three or more strings to produce a steel drum or kalimba sound. They may be held in place with a bit of tape, if necessary.

4. **Foam Rubber and Polyurethane Foam.** A block of dense, resilient foam rubber or spongy polyurethane can be pinned between a string and the nut, fretboard, soundboard, or saddle of the guitar. A foam block near the bridge under one of the treble strings produces a muted tone but with a surprisingly loud, percussive "pop" attack. The "pop" is especially noticeable when the string is fretted high on the fretboard, close to the foam.

Certain types of foam are resilient enough to stay in place when partly split and pushed onto a string. A soft drum sound is usually produced with this method.

5. **Wire Insulation.** Insulated electrical wire is sold in a wide variety of standardized sizes. After being stripped off a piece of wire, the insulation can be cut to an appropriate length and then slit lengthwise with a small scissors so that it can be slipped onto a string. The insulation can be made to fit either tightly or loosely, depending on the size of the string and the size of the wire that is chosen. Short pieces of insulation that fit tightly around a treble string will yield a remarkable bell-like sound, with two clear fundamentals.



2. **Pipe Cleaner.** A pipe cleaner, wrapped tightly around a string, can produce a satisfying gong sound and has the added virtue of being a very secure preparation.

F. HYBRID PREPARATIONS

The term *hybrid preparations* was coined by Bunger to refer to preparations in which more than one object is attached to a string. On a guitar, hybrid preparations can be used to produce different combinations of timbres depending on where the string is fretted and plucked. These preparations are useful in expanding the vocabulary of sounds that can be used in any one piece. One interesting hybrid can be created by attaching a small disc of sheet plastic (cut from a medium gauge guitar pick) to the first string near the nut of the guitar, and then pinning an aluminum bottle cap between the same string and the soundboard, near the bridge. When the unstopped, or "open" string is plucked, one hears a combination of a bell sound and a "sitar" buzz. However, when the string is fretted anywhere between the sheet plastic disc and the bottle cap, only the sitar effect is heard.