

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE LOUIS LUMIÈRE

---

Mémoire de fin d'études :  
De la relation entre Acoustique et Composition  
"Espaces d'errances"

---

*Auteurs :*

Adrien ZANNI

*Directeurs :*

Alan BLUM

Markus NOISTERING

Thierry CODUYS

*Rapporteur :*

Mireille FAURE



## Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de création autour de l'acte de composition de l'espace dans un processus musical. Il se consacre à la création d'une pièce mixte en duo pour flûte et acoustique constituée d'une partie logicielle et d'une partie compositionnelle. La partie logicielle comprend le développement d'un simulateur d'acoustique *perceptif* et la création d'une partition logicielle pour celui-ci. La partie compositionnelle comprend l'écriture d'une partition pour un interprète utilisant trois flûtes sur différents registres et s'intéresse à l'utilisation de modes de jeux contemporains et leurs relations avec l'acoustique.

Pour réaliser ce projet, ce mémoire se consacre tout d'abord à l'étude de l'état de l'art de la composition dans l'espace dans deux situations distinctes ; la musique acoustique occidentale et la musique électroacoustique du XX<sup>ième</sup> siècle. Ces deux parties sont accompagnées de réflexions préliminaires qui amènent à l'écriture de cette pièce. Le mémoire se consacre ensuite à la présentation et au suivi de la création de l'oeuvre, des influences, des réflexions et choix jusqu'à la réalisation et la représentation.

La présentation de l'écriture de cette pièce dans le cadre de ce mémoire est pensée pour pouvoir s'adresser à de artistes qui seraient dans des questionnements similaires. Ce mémoire aborde notamment l'émergence de nouvelles règles de composition liées à l'architecture, la remise en question des enjeux de la perception de l'espace dans la philosophie acousmatique, l'influence des acoustiques variables sur la composition.

## Abstract

This thesis deconstructs the use of space as a compositional tool in a process of musical composition. With a focus on research through composition, we explore two parts to the construction of a mixed piece duo written for flute and acoustics. The first part centers on the development of a perceptive acoustic simulator, which enables the compositional application of acoustics in a piece, as well as a tool that notates its use in a score. The second part explores the nuances of the compositional use of acoustics. This involves writing a score for three flutes of various registers, therein exploring the different modes of contemporary playing and their interaction with different acoustics.

In order to go about this project, this thesis begins with a historical analysis of the compositional use of acoustics during two distinct time periods : occidental acoustic music from prehistoric era to the 20th century's Modern period, and electroacoustic music from the 20th century. Both sections are accompanied by reflections on the evolution of the compositional use of acoustics. This then serves as a basis to understand the choices, influences, and thought process of the use of acoustics in my own creative process as well as in the consequent composition.

The form of the composition, along with the body of thought that it represents, hopes to address artists who may find themselves in the midst of similar compositional problematics. The goal of this thesis is to evoke some of them - to explore the emergence of new rules of composition linked to architecture, to question how we perceive space in the realm of acousmatic thought, and lastly, to understand the influence of the acoustic variable on composition.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Musique Acoustique &amp; Espaces</b>	<b>4</b>
1.1	Rappels sur l'audition spatiale . . . . .	4
1.1.1	Critères psycho-acoustiques de la perception spatiale . . . . .	4
1.1.1.1	Différence de temps : ITD . . . . .	5
1.1.1.2	Différence d'intensité : IID . . . . .	5
1.1.1.3	Élévation . . . . .	6
1.1.1.4	Distance . . . . .	6
1.1.2	Système auditif périphérique . . . . .	7
1.1.2.1	L'oreille externe et moyenne . . . . .	8
1.1.2.2	L'oreille interne . . . . .	8
1.1.3	Système auditif central . . . . .	9
1.1.3.1	Perception Multi-modale . . . . .	11
1.1.3.2	Cortex auditif . . . . .	12
1.2	Innovations architecturales et compositionnelles . . . . .	14
1.2.1	Préhistoire . . . . .	14
1.2.2	Antiquité . . . . .	19
1.2.2.1	Invention du théâtre Grec étape par étape . . . . .	20
1.2.2.2	Utilisation de vases "acoustiques" ? . . . . .	22
1.3	Chrétienté, Espace et Polyphonie . . . . .	25
1.3.1	Légalisation du Christianisme . . . . .	25
1.3.2	Standardisation des chants Chrétiens . . . . .	28
1.3.3	Acoustique des premières églises romanes . . . . .	30
1.3.4	Naissance de la polyphonie ? . . . . .	31
1.3.5	Gothique, Notre-Dames de Paris : lieu d'influence . . . . .	32
1.3.5.1	La polyphonie de l'École Notre-Dame . . . . .	34
1.3.5.2	La cathédrale et la polyphonie . . . . .	35
1.3.5.3	Mémoire, Acoustique et improvisation . . . . .	38
1.3.5.4	Le Rythme . . . . .	39
1.4	Innovations spatiales dans la musique acoustique : musique sacrée / musique profane . . . . .	41
1.4.1	Séparation spatiale dans la Renaissance . . . . .	41
1.4.1.1	Basilique Saint Marc & <i>Coro Spezzato</i> . . . . .	42
1.4.2	Baroque & Réformes . . . . .	45
1.4.2.1	Styles baroques & affirmation de la Nation . . . . .	45
1.4.2.2	Opéra & Théâtres à l'italienne . . . . .	50
1.4.2.3	Musique instrumentale . . . . .	54
1.4.2.4	Eglises baroques & Virtuosité . . . . .	57
1.4.2.5	Le cas du baroque colossal . . . . .	58
1.4.3	Période Classique . . . . .	59
1.4.3.1	Mozart & Salzbourg ? . . . . .	59
1.4.3.2	Echos . . . . .	59
1.4.3.3	Expérimentation dans la symphonie & Salles de concert . . . . .	60
1.4.4	Période Romantique . . . . .	62
1.4.4.1	Berlioz & la musique à programme . . . . .	62
1.4.4.2	Salles de concert romantique . . . . .	64
1.4.5	Musique acoustique du XXe siècle . . . . .	65
1.4.5.1	Musique expérimental aux États-Unis . . . . .	65

1.4.5.2	Salles de concert modernes . . . . .	67
1.5	Conclusion . . . . .	69
<b>2</b>	<b>Musique Électroacoustique &amp; Espaces</b>	<b>73</b>
2.1	Innovations Spatiales dans la musique électro-acoustique . . . . .	73
2.2	Vue & Réflexions de Compositeurs . . . . .	74
2.2.1	Changement du paradigme d'écoute musicale . . . . .	74
2.2.1.1	Luigi Nono : une écoute essentielle . . . . .	74
2.2.1.2	Critique de la relation image-son . . . . .	75
2.2.1.3	Critique de l'universalisation des espaces . . . . .	77
2.2.1.4	Relation de l'oeuvre à l'espace . . . . .	78
2.2.1.5	Deux philosophies de l'écoute . . . . .	79
2.2.2	L'espace musical ? . . . . .	80
2.2.2.1	Espèces d'espaces - François BAYLE . . . . .	81
2.2.3	Mouvement & Matière sonore . . . . .	83
2.2.3.1	Définir le mouvement ? . . . . .	83
2.2.3.2	Écrire le mouvement ? . . . . .	85
2.2.3.3	Xenakis et les Polytopes . . . . .	86
2.2.3.4	Perspective du compositeur . . . . .	87
2.2.3.5	Perspective de l'auditeur . . . . .	87
2.2.4	1959 : <i>Music im Raum</i> - Stockhausen & l'égalitarisme des paramètres du son. . . . .	89
2.2.5	1959 : <i>Music im Raum</i> - Souhait de salles adaptées . . . . .	91
2.3	Étude de pièces marquantes de la musique électro-acoustique . . . . .	94
2.3.1	Expériences marquantes du <i>support-espace</i> selon F. Bayle . . . . .	94
2.3.2	1981 : Respons (Pierre Boulez) . . . . .	96
2.3.2.1	Système 4X . . . . .	98
2.3.2.2	"Matrix 32" pour la spatialisation . . . . .	100
2.3.2.3	Ecriture de l'espace . . . . .	102
2.3.3	1984 : Prometeo (Luigi Nono, Renzo Piano) église San Lorenzo à Venise . . . . .	106
2.3.3.1	Mythe, absence de narration, multiplicité d'un parcours . . . . .	106
2.3.3.2	Genèse de la création d'un "espace musical" . . . . .	107
2.3.3.3	L' <i>Halaphon</i> de l'EXPERIMENTALSTUDIO des SWR de Freiburg . . . . .	108
2.3.3.4	Espace architectural . . . . .	109
2.3.3.5	Ecriture spatiale Nono - Coro Lontanissimo & Suono Mobile . . . . .	114
2.3.4	Technologies objets . . . . .	119
2.3.4.1	Panoramisation standard . . . . .	119
2.3.4.2	Panoramisation sur base de vecteur (VBAP/VBIP/LBAP...) . . . . .	121
2.3.4.3	Synthèse de front d'ondes . . . . .	123
2.3.4.4	Ambisonique . . . . .	123
2.3.4.5	WFS . . . . .	127
2.3.4.6	Binaural . . . . .	130
2.3.4.7	Transaural . . . . .	131
2.4	Conclusion . . . . .	132
<b>3</b>	<b>Réflexion sur le cas particulier des acoustiques variables</b>	<b>134</b>
3.1	Définition des acoustiques variables et de leur simulation . . . . .	134
3.1.1	Salles à Acoustique Variable Passive . . . . .	134
3.1.1.1	Salles à volumes couplés . . . . .	135
3.1.1.2	L'Espro & Expérimentations . . . . .	138
3.2	Parcours d'expérimentations, la genèse d'une idée musicale . . . . .	140
3.2.1	Natasha Barrett : Espace tangible et Hyperréalité . . . . .	140
3.2.1.1	Expériences "images sonores" . . . . .	141
3.2.1.2	Expériences aire d'écoute . . . . .	141
3.2.1.3	NFC-HOA ? . . . . .	142
3.2.1.4	Composition de <i>Hidden Values</i> . . . . .	142
3.2.2	Rama Gottfried : Lutherie numérique . . . . .	144
3.2.2.1	Détournement de la WFS : le " <i>Focus delay</i> " . . . . .	144
3.2.2.2	Détournement de la HOA3D : . . . . .	145

3.2.2.3	Groupes de sources et leurs relations . . . . .	145
3.2.2.4	Espace de Timbre et Timbres d'espaces . . . . .	146
3.2.3	Acoustique active & Simulation d'acoustique . . . . .	147
3.2.3.1	Méthode par Réponse Impulsionnelle . . . . .	147
3.2.3.2	Les facteurs perceptifs . . . . .	150
3.2.3.3	Les méthodes hybrides . . . . .	150
3.2.3.4	Modélisation dynamique et interactive . . . . .	154
3.2.4	Critères perceptifs de l'impression spatiale . . . . .	156
3.2.4.1	Critère de latéralité . . . . .	156
3.2.4.2	Critère de largeur de source . . . . .	157
3.2.4.3	Distance apparente . . . . .	157
3.2.4.4	Volume apparent d'une salle . . . . .	158
3.2.5	Inspirations préliminaires pour l'acoustique variable . . . . .	158
3.2.5.1	Enjeux des acoustiques variables dans la composition . . . . .	158
3.2.5.2	Lieux Perdus Augstin Muller et Pedro Garcia Velasquez . . . . .	158
3.2.5.3	Encantadas - Olga Neuwirth . . . . .	159
3.3	Partie Pratique - Réalisation . . . . .	161
3.3.1	Synopsis . . . . .	161
3.3.2	Choix de l'instrumentarium . . . . .	162
3.3.2.1	Électro-acoustique ou musique mixte . . . . .	162
3.3.2.2	Ensemble ou soliste . . . . .	162
3.3.2.3	Voix ou flûte : La voix candidat idéal ? . . . . .	162
3.3.3	Choix des Technologies : Acoustique réelle ou simulation . . . . .	163
3.4	Composition de la partition pour flûte . . . . .	164
3.4.1	Expérimentation avec le musicien pour valider les intentions . . . . .	164
3.4.2	Recherche sur les techniques de jeux et de composition contemporaines . . . . .	166
3.4.3	Écriture d'une première partie et retour avec l'interprète . . . . .	169
3.4.4	Choix des parties . . . . .	171
3.4.4.1	Profondeur : Le couloir . . . . .	171
3.4.4.2	Englobement : La cathédrale . . . . .	171
3.4.4.3	Espace final de jeu . . . . .	172
3.4.4.4	Transition entre les espaces . . . . .	174
3.5	Composition logicielle . . . . .	174
3.5.1	Choix du logiciel et des librairies . . . . .	174
3.5.2	Première approche perceptive très simplifiée . . . . .	175
3.5.3	Création d'un conducteur . . . . .	177
3.5.4	Seconde approche perceptive et séparation des fonctions . . . . .	178
3.5.4.1	Présentation du projet à la Lange Nacht . . . . .	178
3.5.4.2	Implémentation dans Max . . . . .	181
3.5.5	Hans Tutschku : <i>Remembering from Japan</i> . . . . .	183
3.5.5.1	Une interface de contrôle . . . . .	184
3.5.5.2	Un modélisateur d'acoustique . . . . .	185
3.5.5.3	Un moteur d'auralisation . . . . .	187
3.6	Composition Scénographique . . . . .	188
3.6.1	La muse en Circuit . . . . .	188
3.6.2	Choix de Lumières . . . . .	188
3.6.3	Décors . . . . .	188
3.7	Production . . . . .	188
3.7.1	Préparation Matériel & Montage . . . . .	188
3.7.2	Calage système et modifications . . . . .	188
3.7.3	Optimisations à la salle . . . . .	188
3.7.4	Répétition . . . . .	188
3.7.5	Concert . . . . .	188
3.8	Retours & Expérience . . . . .	188
3.8.1	Retours personnels . . . . .	188
3.8.2	Retours du public . . . . .	188
3.8.3	Perspectives ? . . . . .	188

<b>4 Conclusion</b>	<b>189</b>
<b>Annexes</b>	<b>191</b>
<b>Bibliographie Complète</b>	<b>198</b>
Livres et Articles Scientifiques . . . . .	205
Références artistiques . . . . .	210
Réflexions d'artistes . . . . .	211
<b>Glossaire</b>	<b>212</b>
<b>Acronymes</b>	<b>214</b>



# Introduction

La composition musicale est un art complexe qui a toujours été influencé par des courants musicaux, philosophiques ou culturels. Selon les périodes certains compositeurs ont approfondi le travail sur la mélodie, l'harmonie, sur les hauteurs ou encore le rythme. Qu'en est-il alors de l'espace? Nous nous intéressons à la manière dont l'histoire de nos lieux d'écoute a transformé la composition musicale jusqu'à aujourd'hui dans l'apparition de règles de composition, d'habitudes d'écoutes, de placement des sources dans l'espace, et de choix de narration sonore. Réciproquement nous étudierons comment la composition elle-même a modelé ces espaces.

Ce mémoire abordera plusieurs domaines de réflexions autour de la relation entre espaces d'écoute et composition dans la musique acoustique et électro-acoustique :

- L'émergence de nouvelles règles de composition : polyphonie, canon, contrepoint
- Remise en question des enjeux de la perception de l'espace dans la philosophie acousmatique : mouvement & matière
- Influence des acoustiques variables sur la composition

Nous présentons ici la création d'une pièce acousmatique qui s'imprègne de cette histoire pour nous faire vivre un voyage imaginaire au travers des acoustiques. La sculpture de l'espace est un sujet passionnant ; ma précédente pièce mixte, *Sésame*, s'intéressait au couplage du jeu du musicien avec l'acoustique. Ce projet quant à lui s'articulera autour de l'acte de composition avec l'espace. Pour la réalisation de ce projet et des recherches associées je souhaiterais répondre aux questions suivantes : comment raconter un voyage à l'aide de la composition spatiale dans un dispositif acousmatique? Comment s'inspirer de l'histoire de ces pratiques afin de créer de nouveaux processus de composition musicale?

Nous serons amenés à nous poser les questions suivantes : les espaces d'écoutes ont-ils eu un rôle dans l'apparition de règles de composition musicale? La possibilité d'écrire pour des lieux à acoustique variable est-elle une révolution pour la composition musicale? Jusqu'où vont nos capacités de simulation d'acoustique? Ces techniques peuvent-elles être détournées pour créer de nouveaux outils artistiques?

Nous nous concentrerons tout d'abord sur la co-évolution de la composition et des espaces de représentation dans la musique acoustique. Nous aborderons ensuite les apports de la musique électroacoustique par les réflexions qui y ont émergé à propos de la composition dans l'espace. Nous nous intéresserons finalement au cas des acoustiques variables qui sera au coeur de la réalisation de ma partie pratique de mémoire. Nous détaillerons en début de chapitre certains points de base, notamment sur le fonctionnement du système auditif humain, accompagnés de réflexions repérées en italique. Le lecteur familier des notions abordées dans ces points pourra ainsi accéder à une lecture rapide en ne consultant que les passages en italiques qui explicitent la démarche adoptée dans ce travail.

## Réflexions & Influences préliminaires

La partie pratique de ce mémoire porte sur la réalisation d'une pièce mixte pour flûte et électronique, dans l'objectif de faire vivre à l'auditeur un voyage entre différents espaces. Cette pièce aura pour vocation de soulever des questions sur la pratique compositionnelle pour acoustique variable. L'objectif sera de mettre en pratique ces enjeux dans une démarche artistique, afin de créer une narration par l'utilisation de l'espace sonore, à la fois par l'utilisation de l'acoustique réelle et par simulation d'autres espaces mais aussi par la mise en place d'un travail sur les référents sonores. Pour cela, nous étudierons l'histoire de la musique "spatiale" et un corpus d'œuvres sonores s'intéressant à la composition de l'espace. Nous verrons comment s'approprier ces expériences dans notre composition.

La réalisation de ce projet nous amènera à nous poser plusieurs questions. Tout d'abord qu'est-ce que l'espace sonore, comment y avons-nous accès ? Et ainsi se poser la question de comment créer chez l'auditeur la perception d'un voyage. En effet, dans l'utilisation courante on traitera bien souvent de l'espace sonore perçu qui lui seul nous est accessible. Il faudra donc prendre en compte l'auditeur dans l'équation et notamment son écoute. Entendre l'espace nous est impossible, l'écoute ne nous donnant accès qu'à une représentation de celui-ci : « L'espace cache et l'écoute veut voir » (BAYLE 1993, Musique acousmatique, p101). Or l'écoute est très complexe et nous ne comprenons pas encore tous ses mécanismes, il nous faudra par exemple différencier l'écoute de sources « naturelles » de l'écoute de sources diffusées car celles-ci ne semblent pas être régies par les mêmes règles. Stefano GERVASONI dans sa pièce *VOCI INVISIBILI* (GERVASONI 2018) en hommage à Robert Schumann utilise ainsi directement la directivité du piano au travers d'excitateurs audio pour diffuser ses bandes et ainsi créer une impression totalement différente de celle obtenue s'il avait mis en place un dispositif de haut-parleurs. Cela lui permet de « donner vie » à ce piano. Cette pièce est aussi intéressante, car elle met en avant la problématique de l'acte de création par rapport à l'histoire. Ici, un hommage à un autre compositeur mort, et la question de la réappropriation de règles de composition pour en trouver de nouvelles - problématique essentielle de ce projet. Ici GERVASONI reprend l'idée des voix fantômes de Robert Schumann (mélodies que le pianiste devait chanter dans sa tête lorsqu'il jouait la pièce et ainsi la faire ressentir en creux dans la partie au piano) pour aller vers l'idée d'un dialogue au sein du même piano entre un interprète et le compositeur et sur le jeu avec le filtrage en peigne<sup>1</sup> entre eux deux, donnant un caractère éthéré à l'œuvre. Je vais devoir mettre en place ce type de réflexion pour mon projet : comment s'inspirer des règles de composition de ces époques, de leur histoire pour façonner les propres règles de ce projet.

L'analyse de Braxton Boren (B. BOREN 2018) nous à amène à réfléchir sur notre rapport aux espaces réverbérants. Il semblerait que dans notre rapport culturel aux grands espaces réverbérants aujourd'hui - des grottes aux cathédrales et aux philharmonies - notre rapport aux longs temps de réverbération a été relié au sacré ou du moins à des émotions fortes, notamment en ce qui concerne la voix. C'est une réflexion importante par rapport à ce projet, la voix étant un référent sonore fort et universel. Pascal Dusapin dans sa composition pour la pièce *LULLABY EXPERIENCE* (DUSAPIN 2019) travaille ainsi sur l'enregistrement de comptines du monde entier afin de les retravailler dans sa composition, de les spatialiser dans des espaces réverbérants pour créer des masses homogènes de voix. Cette pièce permet de questionner la place de la spatialisation des voix dans le couplage acoustique du lieu et acoustique projetée, ici une pièce mate afin de pouvoir utiliser des outils

---

1.

de spatialisation tels que l'*ambisonique*<sup>2</sup> et être au plus libre durant la performance. Cette pièce me fit aussi réfléchir sur la question de la présence de performeurs venant interagir avec la projection et ainsi personnifier l'acte de création par rapport à l'existant.

Il faut ajouter à cela que notre perception sonore est intrinsèquement subjective et influencée par notre expérience, notre culture. Dans son traité de l'écriture sonore, Daniel Deshays (DESHAYS 2008) explique que le son étant un média de temps - qui ne vit que par le mouvement – notre écoute est donc directement reliée à notre mémoire et sera fortement influencée par celle-ci. Ce qui va nous obliger à nous poser la question du choix des référents sonores qui aideront le mieux à préciser la perception de l'espace sonore par les auditeurs.

Il va donc me falloir choisir un lieu de diffusion. Choisir un espace réverbérant, comme une chapelle par exemple, qui nous servirait de base acoustique que l'on viendrait déformer pour donner par la suite une perception de grotte, de cathédrale ou bien choisir un espace moins résonnant tel que le Studio de la Muse en circuit afin d'avoir un contrôle plus important sur les simulations d'acoustiques. Certaines églises sont habituées à ce genre de pratiques comme l'église de Saint-Merry située à côté de l'*IRCAM*<sup>3</sup> qui accueille *les rendez-vous contemporains* ou l'Église Saint-Eustache avec les *36 h de Saint-Eustache*. Une possibilité serait de se rapprocher de ces lieux ou de ces organismes pour s'intégrer dans un événement, ou alors de travailler dans des studios comme ceux de l'*IRCAM*, de la *Muse en Circuit*, de la *MSH*<sup>4</sup> et monter un système de simulation d'acoustique. Je m'intéresse notamment aux travaux d'Augustin MULLER (GARCIA-VELASQUEZ et MULLER 2019) à l'*IRCAM* sur le jeu entre des réponses impulsionnelles de salles en ambisonie et des ambiances ambisoniques dans les mêmes lieux.

---

2. Algorithme de spatialisation dit de synthèse de front d'onde (**voir section concernée**)

3. Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique : centre de recherche publique français se consacrant à la création musicale et à la recherche scientifique, fondé par P. Boulez

4. Maison des Sciences de l'Homme (MSH) qui accueille en son lieu le CICM : Centre de recherche Informatique et Création Musicale

# Chapitre 1

## Musique Acoustique & Espaces

Dans ce premier chapitre nous étudierons comment, dans la musique acoustique, les lieux d'écoute ont pu influencer la composition et comment certains styles musicaux ont pu transformer l'architecture des lieux où ils étaient représentés. Après avoir évoqué les espaces d'écoute lors de la Préhistoire, nous nous concentrerons sur la musique occidentale écrite, en commençant par faire le point sur le fonctionnement de notre système auditif.

### 1.1 Rappels sur l'audition spatiale

Ce mémoire a pour but de mettre en réflexion la démarche de composition de l'espace dans un processus de création. Au delà de ce projet de recherche, cette réflexion s'adresse à des compositeurs qui seraient dans des questionnements similaires. Avant de commencer à sculpter l'espace il est bon de bien comprendre comment nous le percevons. Quels sont les mécanismes qui rentrent en jeu pour pouvoir les utiliser à des fins artistiques. Nous commencerons par les principes de la psychoacoustique puis nous rentrerons dans le détail de la physiologie de l'oreille pour essayer de comprendre comment fonctionnent les mécanismes cognitifs de la perception sonore.

#### 1.1.1 Critères psycho-acoustiques de la perception spatiale

*" There is no non-spatial hearing " Blauert, 1997*

Dans l'air, tout son se propage en trois dimensions et notre sens de l'audition a aussi évolué pour pouvoir évaluer notre environnement sonore en 3D. Cependant nous n'avons que deux oreilles, comment donc notre sens de l'audition fonctionne-t-il pour percevoir un environnement sonore en 3D ?

Grâce à de nombreuses études en psycho-acoustiques notamment depuis l'étude *Duplex theory* (RAYLEIGH 1907) de Lord Rayleigh nous savons que la localisation sur le plan azimutal ("horizontal") est majoritairement due à la comparaison des signaux arrivant aux deux oreilles, en termes de différences temporelles (ITDs<sup>1</sup>) et d'intensité (IIDs<sup>2</sup>). La perception de l'élévation quant à elle est due à un mécanisme d'apprentissage complexe

---

1. ITDs : Interaural Time Differences  
2. IIDs : Interaural Intensity Differences

de l'influence spectrale et temporelle de la morphologie de notre tête, notre buste (HRTF<sup>3</sup>) tout au long de notre vie. Étant donné que ces notions sont très documentées notamment dans nos formations, nous ferons ici seulement le résumé de celles importantes dans le cadre de ce mémoire.

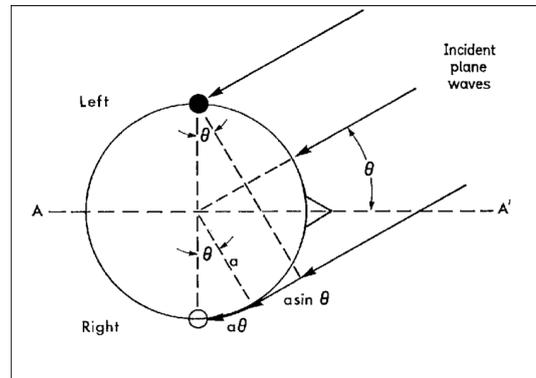


FIGURE 1.1 – Simulation à partir d'un modèle de tête sphérique

#### 1.1.1.1 Différence de temps : ITD

Celle-ci correspond à l'intervalle temporel entre l'arrivée d'un son à une oreille comparée à celle opposée. Elle sera dépendante de la différence de marche et de la célérité du son, pour une écoute naturelle cette différence de temps maximum est de 0.5 ms pour une tête moyenne de 17 cm à 20 degrés Celsius. Cette analyse en différence temporelle est prédominante sur la différence en intensité pour les fréquences en dessous de 2 kHz en moyenne. Elle n'est efficace que pour des fréquences dont les longueurs d'onde sont plus grandes que la dimension de la tête. Au-delà de 1.4 kHz pour un son pur et 4 kHz en moyenne pour un son complexe on mesure expérimentalement que l'atténuation du son par la tête est trop importante pour que notre système auditif arrive à garder la boucle de phase qui lui permet de faire cette comparaison.

#### 1.1.1.2 Différence d'intensité : IID

La différence d'intensité sera quant à elle prédominante pour la localisation des fréquences au-delà de 2 kHz et à l'inverse des ITDs ne sera pas efficace pour les fréquences en dessous car l'atténuation par la tête de ces fréquences n'est plus assez importante. Il est important de noter que cette différence d'intensité sera très liée au contenu spectral du son. Par exemple un son pur à 3 kHz à 90° (sur un côté) sera en moyenne atténué de 10 dB lorsqu'il atteindra l'oreille opposée. Un son pur à 10 kHz sera quant à lui atténué d'environ 35 dB dans la même situation (FEDDERSEN et al. 1957).

D'un point de vue perceptif, la localisation par différence de temps apporte une plus grande sensation d'espace et de profondeur, tandis que la localisation par différence d'intensité apporte une meilleure précision de localisation. On peut se faire une idée de cette sensation en écoutant un même environnement sonore enregistré par des couples AB (différence de temps pure) et XY (différence d'intensité pur) équivalents. Le panoramique

3. HRTF : Head Related Transfer Function

stéréo standard est par exemple une simple différence en intensité suivant une loi en logarithme ou en cosinus (voir **Annexe 1**).

*Dans un objectif de projection d'une source dans un espace 3D on pourrait ainsi imaginer un bus de spatialisation qui consisterait à placer une position dans l'espace puis choisir un ratio  $\Delta I / \Delta T^4$  entre un panning d'intensité multicanal et son équivalent en différence de temps pour ajuster l'impression d'espace qui s'en dégagerait. J'ai eu l'occasion d'expérimenter une implémentation de cette proposition pour un panning KNN.*<sup>5</sup>

### 1.1.1.3 Élévation

Comme nous l'avons vu précédemment, les ITDs et IIDs permettent simplement la localisation en latéralisation, pour avoir une information sur l'élévation il nous faut une nouvelle donnée. Une source placée à une même position de latéralisation mais avec une élévation différente sera projetée avec un angle d'incidence différent sur notre tête / buste et aura donc un filtrage propre. Par apprentissage nous sommes habitués à associer ces filtrages spécifiques à une localisation particulière dans l'espace. De très jeunes enfants par exemple n'auront donc pas encore un apprentissage de la localisation en élévation développée et seront plus facilement désorientés par une source en élévation.

*On pourra donc désorienter des adultes ou les remettre dans la situation d'écoute d'un nouveau-né simplement en leur posant un moule de pavillon différent. (HOFMAN, VAN RISWICK et VAN OPSTAL 1998). Notre précision en localisation n'est pas homogène autour de nous. Nous avons tendance à être très précis en face de nous ( $\approx 1$  degré) et moins en dehors de notre champ de vision, et nous sommes très peu précis en élévation ( $\approx 20$  degrés). Ce sont donc des données à garder en tête lorsque l'on crée un environnement 3D, il y aura une grande différence entre ce qui est projeté et ce qui est perçu par l'auditeur. Il y aura donc un travail totalement différent à faire entre un public assis et donc dirigé et un public en mouvement dans la création de notre univers sonore.*

### 1.1.1.4 Distance

Nous ne sommes pas très performants pour évaluer la distance uniquement par le son, par exemple nous ne disposons pas d'une référence sonore en proximité nous permettant de calculer le délai de propagation. Dans l'ordre d'importance psychoacoustique nous nous fierons au niveau, au rapport son direct / champ réverbéré, à l'atténuation des aigus par l'air et les obstacles puis à la mise en relation des ITDs et IIDs. Tous ces paramètres nous donnent seulement accès à une estimation relative de la distance. Les relations entre ITDs et IIDs donnent une estimation absolue mais seulement jusqu'à 1 m de distance. Nous faisons donc une estimation par rapport à des critères qualitatifs, on connaît par exemple la source en proximité et on estime sa distance par rapport aux différents critères évoqués.

*Il est difficile de créer une sensation de distance chez le public avec un système de diffusion. Tout d'abord Il est difficile de simuler de manière acoustiquement valable la distance avec des bus de*

---

4. ratio entre différences de temps et d'intensité

5. voir aussi le plugin DeltaPan développé par J.L. Pecquais dans le cadre de son mémoire à Louis Lumière qui réalise cette approche en stéréophonie (PECQUAIS 2019)

*spatialisation (seule la WFS<sup>6</sup> le permet). Ensuite nous avons la plupart du temps des haut-parleurs statiques, que l'on ne pourra pas reculer pendant la pièce. Nous sommes de plus limités par les distances des murs et des plafonds. Et pour finir notre perception de la distance est très imprécise. Si l'on veut donner des effets de distance, il ne faudra donc pas hésiter à jouer sur le contraste et à exagérer les effets. Lorsque l'on se trouve dans une salle trop petite, une solution pourra être de tourner certaines enceintes vers le mur. Ainsi le public, ne recevant plus le son direct mais toujours les réflexions, aura l'impression que la source se situe plus loin.*

### 1.1.2 Système auditif périphérique

Le système auditif extrait par divers moyens des paramètres des stimuli sonores comme la composition fréquentielle, les propriétés temporelles, la position dans l'espace. Il les transforme en *patterns*<sup>7</sup> distincts d'activités neuronales. Ces patterns donneront par la suite naissance à l'expérience de caractères qualitatifs tels que la hauteur, le volume sonore, le timbre, la localisation (WENZEL, BEGAULT et GODFROY-COOPER 2018). Finalement ces informations seront intégrées avec celles provenant des autres sens afin de former une représentation perceptuelle unifiée.

Nous allons ici présenter les organes de l'ouïe, afin d'essayer de comprendre comment se construisent les perceptions présentées plus tôt. Nous pouvons distinguer deux blocs ; la partie périphérique (oreille externe, moyenne, interne), qui est souvent celle que l'on présente quand on pense à l'ouïe, et la partie centrale (ou partie cognitive) tout aussi indispensable.

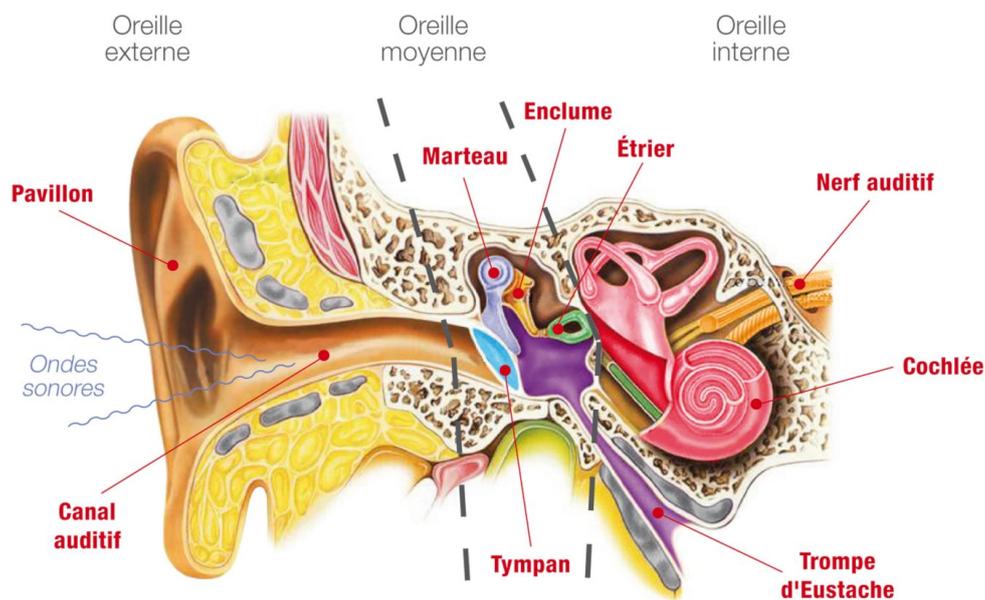


FIGURE 1.2 – Physiologie de l'oreille humaine

6. Wave Field Synthesis ou synthèse de front d'onde en français

7. Forme, modèle. Figure, construction donnant une représentation simplifiée et fonctionnelle d'un objet, d'un mouvement, d'un processus.

Le rôle de la partie périphérique est de transformer le signal acoustique en un signal électrique vers le nerf auditif. Pour cela elle est constituée de trois parties ; l'oreille externe, moyenne et interne. Le fonctionnement des deux premières a été maintes fois expliqué dans la littérature nous concentrerons ici sur l'oreille interne et la partie cognitive.

#### 1.1.2.1 L'oreille externe et moyenne

Pour en savoir plus sur cette partie voir **Annexe 2** . Notons seulement que la structure de l'oreille externe et moyenne rend l'être humain particulièrement sensible à la bande 2-5 kHz qui se trouve être directement reliée à la perception de la parole. Nous verrons par la suite que la voix a eu une grande influence sur l'histoire de la musique.

*En partie à cause de l'effet d'amplification de cette bande, l'oreille n'a pas la même sensibilité sur l'ensemble du spectre audible. Nous devons donc faire attention au niveau d'écoute en studio afin que celui-ci corresponde au niveau lors de la représentation.*

#### 1.1.2.2 L'oreille interne

Elle réalise une conversion mécano-électrique vers le nerf auditif. Elle est constituée de la cochlée et du vestibule. La cochlée abrite l'organe de Corti contenant du liquide (pérylimphe) et les cellules ciliées. Ces cellules sensorielles sont disposées de manière tonotopique<sup>8</sup> le long du tube cochléaire et vont s'activer par bandes de fréquences pour transformer les fréquences détectées en signaux nerveux qui sont transmis au cerveau par le nerf cochléaire. La membrane basilaire (MB), en vibrant, va activer les cellules ciliées liées à cette fréquence, mais a tendance à activer les cellules autour. On peut donc décrire la MB comme une banque de filtres résonants se superposant (PATTERSON et al. 1988). L'organe de Corti réalise donc l'encodage des fréquences, phases, et amplitudes des stimuli acoustiques puis les transmet au nerf cochléaire (l'analogie est souvent faite avec une analyse de transformée de Fourier). Le fonctionnement de cet organe provoque des effets de masque entre les sources sonores, les sons basses fréquences auront tendance à perturber le fonctionnement des cellules ciliées associées aux fréquences plus aiguës. Pour plus de détails sur le fonctionnement de l'organe de Corti voir **Annexe 3** .

*Si l'on essaye de créer une scène sonore complexe il faudra donc faire attention à ce que certaines sources n'en masquent pas d'autres. Lorsque l'on travaille sur des scènes 3D, ce problème peut être généralement contrôlé en séparant spatialement les sources ponctuelles créant ainsi un dé-masquage (G. JR. KIDD et al. 1998). Dans cette situation le problème proviendra en majorité de l'utilisation des subwoofers (à cause de leurs fréquences) et des sources omnidirectionnelles (qui auront tendance à rester corrélées aux autres). Par exemple les réflexions tardives d'une réverbération.*

*Dans le cas d'une simulation d'acoustique : pour créer une impression de réverbération d'église nous devons jouer sur l'accentuation de résonances dans les graves et risquons donc de masquer l'interprète. Dans cette situation le modèle d'acoustique pourra avoir tendance à produire des infrasons (en dessous de 20 Hz) que les subwoofers pourraient reproduire. Il est donc important de gérer la limite basse fréquentielle du modèle avec un filtre.*

---

8. Tonotopique : organisation spatiale en fonction de la fréquence, ici des plus aigus aux plus graves

### 1.1.3 Système auditif central

À la sortie du système auditif périphérique se trouve le noyau cochléaire dorsal (NCD) et ventral (NCV) (suivre le schéma page suivante). C'est le premier organe qui vient faire la liaison avec le système auditif central notamment via le nerf cochléaire. Il va s'adresser à plusieurs cibles dont celles qui nous intéressent ; le complexe olivaire supérieur (SOC) et le lemnisque latéral (LL). Il est bon de rappeler qu'à la sortie du noyau cochléaire (NCV), l'information auditive se propage de manière tonotopique, toutes les analyses effectuées par le système central qui vont suivre se font par bandes critiques. Le SOC (complexe olivaire supérieur) est le premier point de liaison entre les deux oreilles, il est extrêmement important pour la localisation puisque c'est ici que vont être calculés les ITDs, les IIDs mais aussi une première estimation de l'élévation liée seulement à la coloration spectrale du pavillon, toutes ces données sont, pour le moment, indépendantes. La liaison au lemnisque latéral (LL) quant à elle évite le SOC et s'occupera de l'analyse des signaux séparément (monophoniques), il fera notamment une première analyse de la durée des sons. Ces deux chemins se retrouvent ensuite ensemble au colliculus inférieur (IC) qui est un noeud d'information, il intègre beaucoup de données provenant du nerf cochléaire, du nerf vestibulaire (orientation dans l'espace), etc. En intégrant toutes ces données le colliculus inférieur (IC) va commencer à mettre en place une représentation topographique<sup>9</sup> de l'espace auditif en ayant des sensibilités particulières à certains points de l'espace (ce qui explique en partie notre précision de localisation focalisée en certains points). C'est notamment le premier organe de la chaîne auditive qui va interagir avec des réflexes moteurs.

*Les informations brutes d'ITDs, IIDs, du vestibule et de composition spectrale vont venir ici contrôler des réflexes moteurs de manière totalement inconsciente. Parlons des réactions que l'on peut créer volontairement ou involontairement par cet organe :*

*Tout d'abord, il participe à l'orientation via les données provenant du nerf vestibulaire c'est lui qui est responsable de la plupart des vertiges dus à une sensation de rotation « comme dans un manège », une sensation de déplacement du corps dans le plan vertical « comme dans un ascenseur », une sensation d'instabilité, décrite comme un tangage « comme sur un bateau ».*

*C'est lui qui activera le muscle stapédien en cas de niveau sonore trop important qui provoquera une atténuation du signal et de la dynamique pour quelques secondes. L'effet du réflexe stapédien ne dure pas longtemps, dans une création il faut donc faire attention à ne pas brusquer l'écoute de l'auditeur au risque de "fermer" son écoute. De plus le réflexe est lent au déclenchement (100 ms) et ne protégera pas d'un fort et brusque impact, le muscle ne pouvant rester contracté longtemps, un son fort et continu endommagera inévitablement l'oreille interne.*

*Enfin, cet organe est responsable de réflexes moteurs liés au danger et peut provoquer des pics de stress liés par exemple à un son en proximité en dehors du champ de vision Une étude avait mesuré ce même taux de stress en simulant brusquement l'acoustique d'un gouffre sous les pieds du sujet, lui faisant perdre l'équilibre. Attention donc dans la création de nos espaces à ne pas provoquer des crises de stress involontaire.*

---

9. topographie : technique de représentation sur un plan des formes, du relief d'un lieu.

L'IC aura aussi pour rôle de faire une analyse temporelle plus approfondie notamment pour tous les sons de type modulation de fréquence (sons biologiques, prédateurs, voix) et transmet ensuite ces informations au corps genouillé médian (MGC) dans le thalamus. Celui-ci va analyser les relations en fréquences ; le timbre, les harmoniques associés à des combinaisons temporelles notamment pour la voix. Dans le même temps l'IC envoie ses informations au colliculus supérieur (SC) qui lui s'occupera de mettre en relation les ITDs et les IIDs pour mettre en place une représentation point à point de l'espace auditif plus précise, par exemple pour l'estimation de la distance (KING et PALMER 1983).

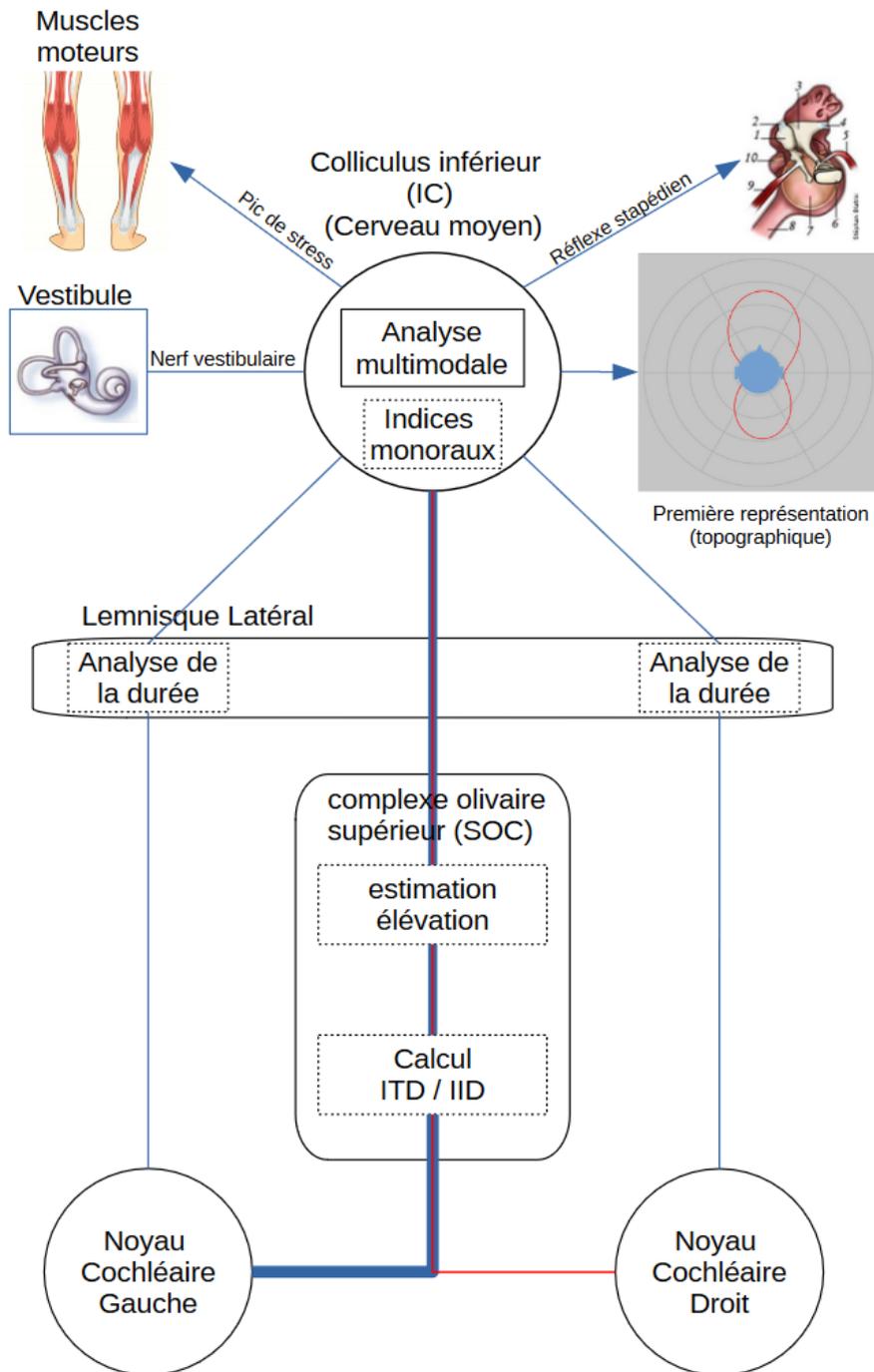


FIGURE 1.3 – Schéma fonctionnel simplifié du noyau cochléaire jusqu'au colliculus inférieur

### 1.1.3.1 Perception Multi-modale

On aura aussi ici un nouveau noyau multi-modal reliant sens auditif, visuel, somesthésique<sup>10</sup> et kinesthésique<sup>11</sup> cette fois pour contrôler les muscles moteurs liés au déplacement dans une certaine direction. Cet organe pourra participer aux effets incontrôlés sur l'équilibre présenter ultérieurement.

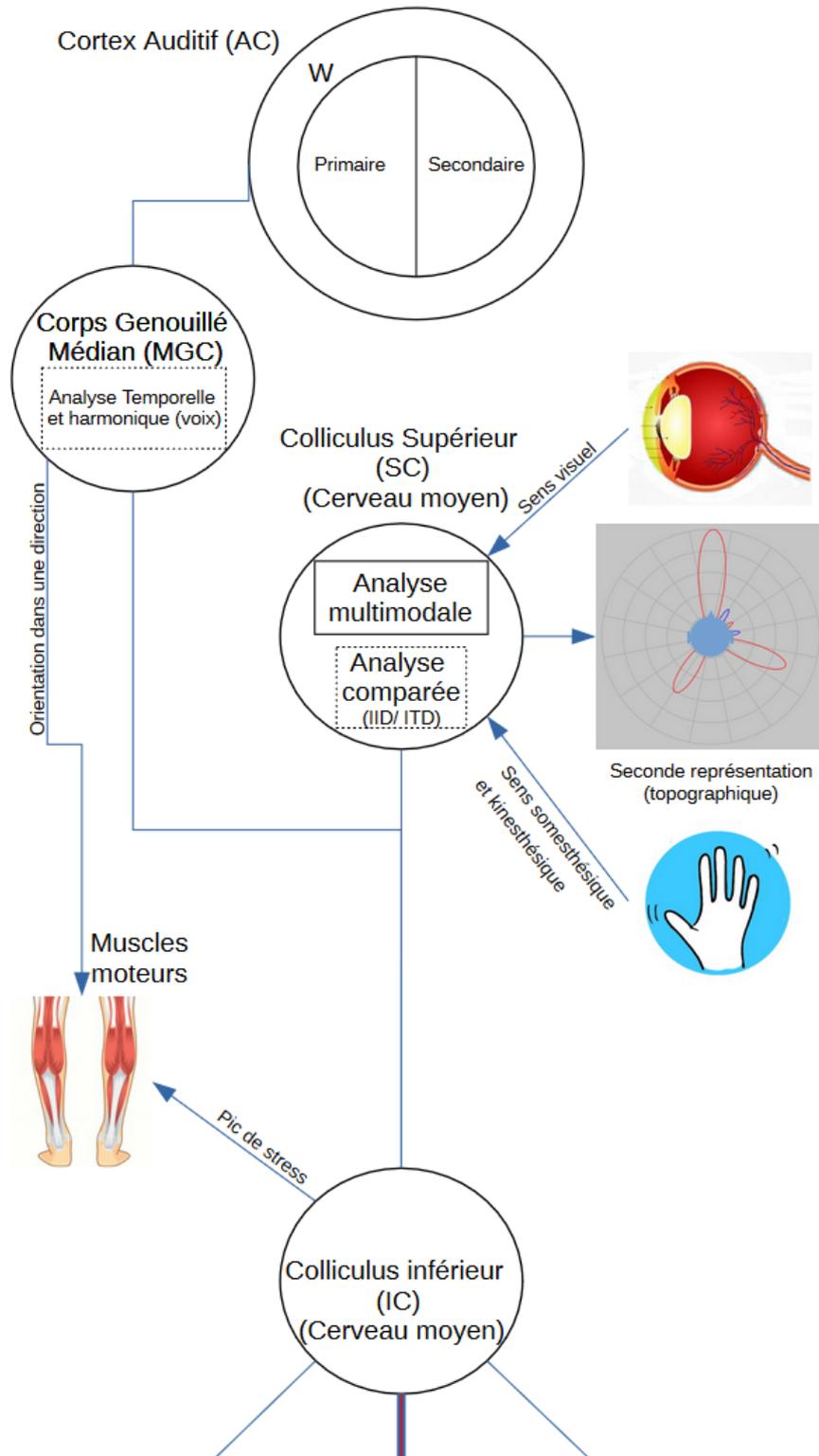


FIGURE 1.4 – Schéma fonctionnel simplifié du colliculus inférieur jusqu'au cortex auditif

10. Somesthésie : rassemble les sens de la pression, de la chaleur et de la douleur

11. Kinesthésie : qui concerne la sensation de mouvement des parties du corps

### 1.1.3.2 Cortex auditif

À la sortie du corps genouillé médian (MGC) se trouve le Cortex Auditif (AC) et c'est seulement à ce point que nous commençons à avoir une perception consciente du son. Celui-ci est divisé en deux parties (primaire, secondaire) et entouré par l'aire de Wernicke. Le cortex auditif fera notamment le lien avec le lobe frontal dans les zones motrices de la parole, les lèvres, la mâchoire, la langue, le larynx et la zone de Broca (elle aussi dédiée à la parole). En plus d'être le premier organe de la conscience du son c'est donc aussi un organe essentiel au langage.

Le cortex primaire a une représentation tonotopique très structurée en 3 couches distinctes. Il s'occupe de l'analyse des sons harmoniques ; discrimination en fréquence, fondamentale et fait une nouvelle analyse de la localisation de ces sons.

Le cortex secondaire, quant à lui, a une représentation tonotopique moins forte. Il s'occupe de l'analyse des sons complexes pour leur localisation, et il fait aussi appel à la mémoire pour identifier la nature des sons.

La partie qui entoure le cortex auditif est dédiée à la connexion avec les autres sens (ex : vue) notamment pour valider les positions de localisation (cf : effet ventriloque) et les gestes moteurs de la parole.

À la sortie du cortex auditif deux principaux flux d'informations allant au lobe frontal ; le flux ventral et le flux dorsal. Le flux ventral s'occupe majoritairement de transmettre l'information de spatialisation ("*where ?*") et le flux dorsal les informations non spatiales ("*what ?*") comme la reconnaissance d'objets sonores, de mots, de notes et toute la relation avec la mémoire auditive à court thème (ex : mélodie, phrases) (RAUSCHECKER et TIAN 2000 ; ROMANSKI et GOLDMAN-RAKIC 2002) (Voir Chapitre 2 - position de D. DESHAYS). Il est bon de noter que dans le cortex auditif et le lobe frontal il y a en permanence des influences mutuelles entre la localisation ("*where ?*") et les objets sonores ("*what ?*"). Par exemple si l'on reconnaît un avion on aura tendance à le localiser en hauteur.

*Notre perception de l'espace et des sons serait donc influencée par des critères subjectifs comme la mémoire et l'expérience. Il ne faut donc pas s'attendre à ce que tout le public perçoive les mêmes objets sonores et le même espace. Nous discuterons ces notions plus en profondeur dans les chapitres 2.2.1 et 2.2.2 sur l'écoute et l'espace musical (Voir Chap 2.2 Vue & Réflexions de compositeurs). De la même manière qu'il ne faut pas penser qu'il y aura une égalité d'écoute entre les auditeurs, l'écart sera encore plus grand entre le compositeur/créateur et son public, pour des raisons que nous détaillerons plus tard en nous appuyant notamment sur les points de vue de Xenakis et Schaeffer (Voir Perspective du compositeur / Perspective de l'auditeur). Il pourra alors être judicieux de faire écouter régulièrement l'avancée de vos projets à des oreilles "fraîches", sans leur donner d'indication d'écoute pour ne pas les influencer.*

Nous nous arrêtons au lobe frontal dans nos recherches sur la conscientisation du son, à partir de ce point le sujet devient trop complexe et n'est pas encore assez documenté. Nous avons désormais une meilleure compréhension de la manière dont se crée l'écoute spatiale et des limites à ne pas dépasser. Nous pourrions donc nous appuyer sur ces connaissances plus tard au moment de la création des espaces de nos pièces. Mais avant de se lancer dans cette écriture, intéressons-nous à la manière dont les compositeurs des époques précédentes ont approché ces problématiques.

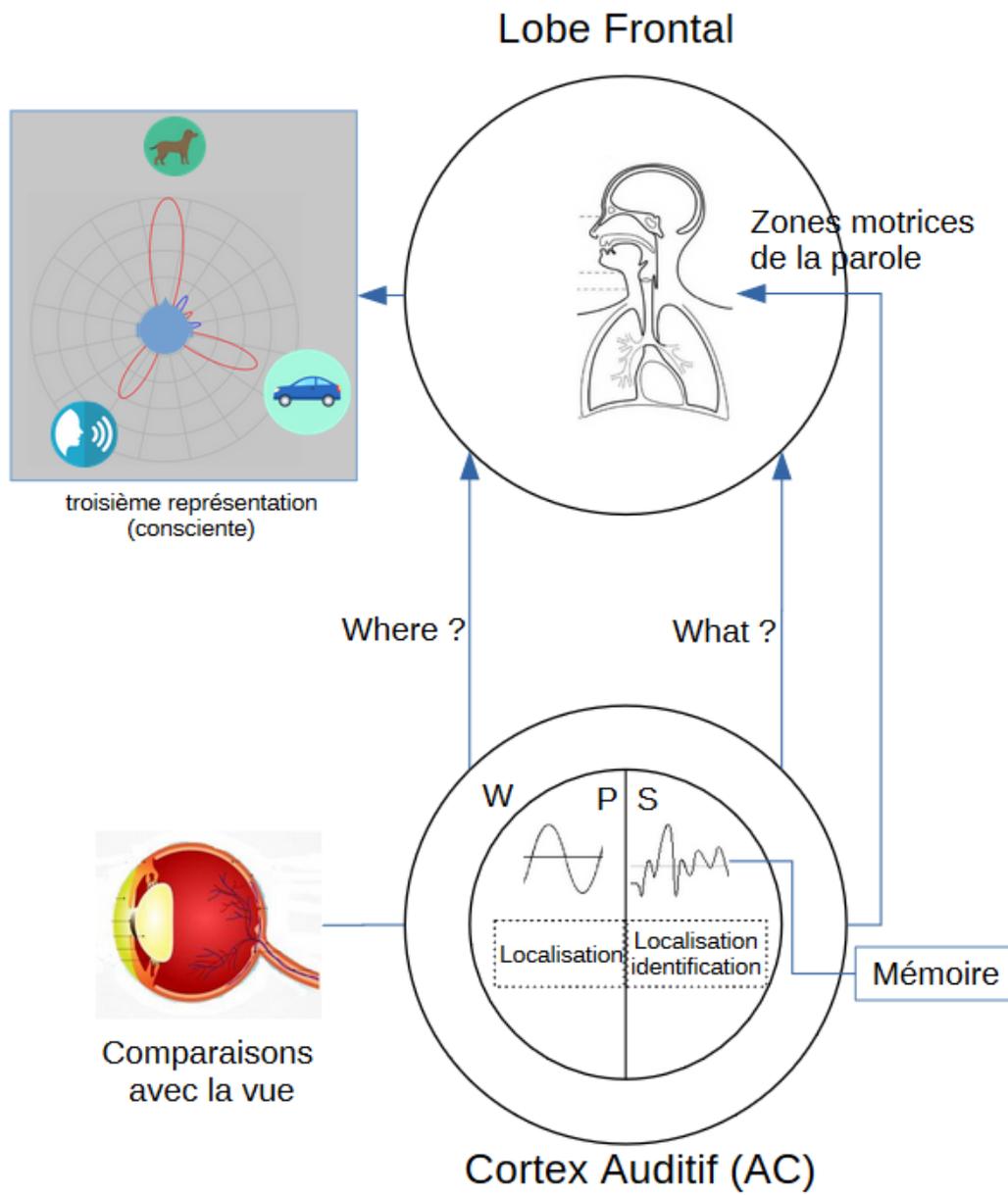


FIGURE 1.5 – Schéma fonctionnel simplifié du cortex auditif au lobe frontal

## 1.2 Innovations architecturales et compositionnelles

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, tous les sons qui nous entourent dans l'air sont par nature en trois dimensions et notre audition a évolué pour permettre une perception de ceux-ci elle aussi en trois dimensions. Contrairement à l'apparition du concept au XX<sup>ième</sup> siècle, l'histoire du son spatial a une origine très ancienne. En ce sens, le concept de "son 3D" qui émerge au vingtième siècle est une sorte de redécouverte d'un principe bien établi. Cette re-conceptualisation vient en partie du fait que le XIX<sup>ième</sup> siècle a amené au développement de sons, ou plutôt systèmes de spatialisation, zéro-dimension (monophonie), une dimension (stéréophonie), deux-dimensions (Quadriphonie ...) et plus récemment trois-dimensions (VBAP, HOA ...). Les premières technologies se sont focalisées sur le plan azimutal. La possibilité de synthétiser un champ sonore total est finalement assez récente. Ces innovations et les découvertes en acoustique qui les ont rendues possibles ont apporté des changements dans notre manière d'aborder l'espace. Dans l'historique que nous allons aborder, il sera important de ne pas juger avec nos connaissances actuelles et tâcher de comprendre quels étaient les paradigmes de chaque époque. Pour clore ce préambule il est bon de rappeler que l'influence d'une acoustique ne se fait pas seulement sur la perception de la localisation mais aussi sur les domaines temporels et fréquentiels.

### 1.2.1 Préhistoire

Le son étant par définition transitoire, lié à un déplacement, il ne peut pas être figé dans un instant. Alors que nous retrouvons des fresques, sculptures de la Préhistoire utilisées par les premiers hommes pour représenter leur réel, nous ne retrouvons pas de représentations sonores de l'époque, l'enregistrement sonore n'arrivera que très tard dans l'histoire humaine. Nous retrouvons cependant les outils qui produisaient certains de ces sons (ex : flûte). Mais de manière générale, la plupart des sons de la pré-histoire nous sont donc perdus. Et comme nous manquons même de descriptions subjectives des sons de cette époque nous ne pouvons nous fier qu'à l'archéologie, et la recherche en reconstruction d'environnements sonores pour se faire une idée de l'univers sonore dans lequel les hommes préhistoriques étaient immergés. Il est en revanche possible de se faire une idée des acoustiques dans lesquelles ils pouvaient être plongés. Pour développer cette présentation des acoustiques je commencerai par introduire un outil théorique proposé par l'acousticien et théoricien en architecture Bagenal (BAGENAL 1951). Il propose de classer les acoustiques de tout espace d'écoute entre deux archétypes "originaux" : la plaine ou champ-libre (*open air*) et la grotte (*cave*). L'intérêt de cet outil est de pouvoir représenter l'évolution d'un style architectural entre ces deux extrêmes au cours de l'Histoire. Le premier extrême, le champ libre, est dans une recherche de clarté, de compréhension de la voix du fait de l'absence de réflexions tardives qui favorisera la prose, le discours. Cet archétype est donc plutôt lié à un objectif de s'adresser à la conscience, à la raison. Et le second, la grotte, de par sa réverbération aura une faible clarté de la voix, une résonance qui forcera à ralentir le flot de paroles et se mariera mieux au chant qu'à la voix parlée. L'acoustique résonne avec l'interprète, "prend vie", au cours de l'analyse que présente Boren ces acoustiques se trouveront en général plus adaptées pour s'adresser aux émotions ou invoquer le sacré, notamment pour la voix chantée (B. BOREN 2018).

*Il peut être intéressant de garder en tête cet outil d'analyse lorsque l'on souhaite créer des espaces sonores et tenter de placer notre espace imaginaire entre ces deux archétypes. Si l'on souhaite créer un contenu où le discours sera important, alors il ne sera peut-être pas judicieux de créer un espace*

*trop réverbérant. Nous risquerions de perdre en clarté et ainsi de perdre le "fil rouge" de notre narration sonore ou musicale. Même réflexion pour un contenu musical au tempo rapide dont l'on ne veut pas perdre l'intelligibilité de la mélodie ou du rythme.*

Dans le cas de nos premiers ancêtres, on peut dire qu'ils expérimentaient la plupart du temps une acoustique de plaine, proche de celle d'une chambre semi-anéchoïque, lorsqu'ils chassaient, cueillaient des fruits ou dormaient dans des habitations semblables à des huttes. On peut hypothétiser que leur sens de la localisation sonore était particulièrement habitué à ces espaces non-réverbérants, d'autant qu'à cette époque l'écoute était particulièrement importante pour échapper aux dangers. Ils étaient donc habitués et entraînés à localiser la provenance de sources sonores à partir d'une source directe et de quelques premières réflexions, sur le sol, les arbres, etc.

Nous pouvons donc essayer d'imaginer l'étonnement perceptif qu'a été pour ces premiers hommes la découverte des espaces réverbérants des grottes, entourés d'échos, de résonances modales, de réverbérations créées par des milliers de copies de leurs voix. Cela peut paraître anecdotique pour le lecteur du XXI<sup>ème</sup> siècle car nous sommes habitués à vivre dans des espaces clos et réverbérants. En effet pour les habitants urbains actuels, il est presque devenu difficile d'avoir un environnement s'apparentant au champ libre ; même dans nos rues nous sommes plongés dans une certaine acoustique générée par les façades des bâtiments qui nous entourent. De plus il n'est pas impossible qu'au cours de notre évolution notre oreille se soit perfectionnée pour l'écoute des champs réverbérés. Malgré cela, encore aujourd'hui lorsque l'on entre pour la première fois dans une grande cathédrale en pierre qui a un long temps de réverbération, on expérimente une sensation d'enveloppement sonore intense qu'il est encore très difficile de simuler.

*Un espace très absorbant pourra aussi nous émerveiller. On voit tout d'abord l'intérêt que peut porter le public aux salles anéchoïques. Mais aussi une acoustique mate et bien contrôlée pourra permettre une précision de localisation étonnante pour nos oreilles habituées aux espaces réverbérants.*

Nous pouvons donc nous interroger sur l'influence de cette sensation sur l'utilisation qui a été faite des grottes par ces premiers hommes. Nous savons aujourd'hui qu'ils ne vivaient pas à l'intérieur des grottes ou alors seulement à l'entrée de celles-ci pour s'abriter des intempéries et que la plupart des premiers hommes vivaient plutôt dans les plaines. La recherche actuelle tend à s'accorder sur le fait que ces grottes étaient majoritairement utilisées à des fins symboliques ; de culte, d'apprentissage, de rite.

*Construire de grands espaces réverbérants nous ramène culturellement à cet archétype de la grotte et aux habitudes qui y sont associées. En Occident les grands volumes de pierre ont souvent été utilisés à des fins de cultes, de rites et donc d'émotions fortes envers un "au-delà". Le choix d'une acoustique pourra donc aussi véhiculer un bagage symbolique.*

Certaines études (JAHN, DEVEREUX et IBISON 1996, DIAZ-ANDREU et BENITO 2012, REZKNIKOFF 2008) présentent d'ailleurs une certaine corrélation entre les emplacements de fresques et de fortes résonances acoustiques particulièrement dans la bande passante de la voix d'homme chantée, suggérant un choix de ces lieux pour des caractéristiques acoustiques lors de rites. Il est cependant bon de rappeler que nos connaissances sur cette période sont très lacunaires et que les interprétations proposées ici nécessitent encore des recherches pour être considérées comme une théorie solide.

« L'utilisation des niches comme résonateurs ou vases acoustiques en rapport avec des peintures et particulièrement des points rouges paraît [...] une caractéristique commune de nombreuses grottes. Cette utilisation est en fait naturelle, car elle se fait facilement, on peut dire de façon imagée qu'il s'agit de conques géantes ; dans certaines niches (p. ex. au Camarin), il suffit de parler ou même seulement de respirer pour ressentir l'effet puis la puissance de la résonance. »<sup>12</sup>

Iegor REZNIKOFF, l'auteur de cette étude, pose l'hypothèse que ces peintures associées à des noeuds de résonances auraient aussi eu un rôle de repère dans la pénombre de ces grottes.

« Les points rouges, surtout d'ocre rouge, nombreux dans certaines grottes, apparaissent comme des signes marquant des endroits sonores ou servant de repérage dans la grotte en utilisant sa résonance. Cette fonction se révèle très nettement dans des tunnels étroits où les points rouges furent apposés aux points mêmes des maxima de résonance. C'est le cas au Portel où, dans un long boyau étroit, où il faut ramper : le seul signe présent dans le boyau est un point rouge que l'on découvre aisément en cherchant à la voix le ventre acoustique de ce long boyau [...]. Dans la grotte d'Oxocelhaya, il existe deux tels boyaux, l'un dans la galerie Laplace [...], l'autre en rapport avec tout un réseau de points rouges et des stalactites lithophones ; chaque fois, des points rouges sont aux maxima de résonance, et aucune autre marque ou peinture ne s'y trouve par ailleurs. La coïncidence est si remarquable que la conclusion paraît certaine : ce sont des signes de signification purement sonore, et servant de repère dans ces boyaux étroits. »<sup>13</sup>



FIGURE 1.6 – Grotte d'Arcy-sur-Cure, Salle des Vagues, dans la partie la plus résonante, Mammouth diamanté.(Collection La Varende, photo M. Girard.)

12. REZNIKOFF, Iegor, «La dimension sonore des grottes paléolithiques et des rochers à peintures», 2012, dans L'art pléistocène dans le monde, CLOTTE Jean (dir.)

13. *Ibidem*, p50

Les hommes du paléolithiques auraient donc utilisé leur voix comme une sorte de système d'écholocation? L'idée n'est pas totalement folle, en effet dans le cas de la grotte de Portel, les étroits boyaux où l'on doit parfois ramper rendent difficile l'utilisation de torches sans danger. Il est donc probable que nos ancêtres se soient en partie repérés dans ses galeries sans pouvoir voir à plus d'un ou deux mètres et se soient servis de leurs voix pour se repérer.

*Cette dernière idée peut-être intéressante pour le projet de ce mémoire. Comme nous l'expliquions dans l'introduction celui-ci se porte sur la création d'un voyage au travers des acoustiques et d'un simulateur d'acoustique adapté à ses besoins. Pour inciter au déplacement, une idée pourrait être d'utiliser des résonances judicieusement placées servant de fil rouge à l'avancement de la pièce. L'auditeur serait ainsi replacé dans des conditions acousmatiques<sup>14</sup> similaires à celles de nos ancêtres, dans la pénombre, s'orientant à la résonance des acoustiques.*

Pour conclure cette période nous pouvons dire que l'innovation majeure de cette époque a été la découverte des cavernes et l'appropriation de celles-ci par les premiers hommes, en opposition à leur mode d'écoute habituelle en champ libre. Il semblerait que la sensation intense d'englobement sonore et de longues réverbérations aient incité les premiers hommes à utiliser ces espaces pour le chant, et que cette utilisation de la voix humaine chantée dans de grands espaces réverbérants ait été très vite associée à un caractère sacré, rituel. Pour ce faire une idée des rites qui s'y déroulaient, l'exemple de la grotte de Lascaux est un cas intéressant. Les dessins sur les murs alliant empreintes de mains et représentations d'animaux et de scènes de chasse sont arrangés comme une longue fresque de chaque côté s'enfonçant dans la profondeur de la grotte, les animaux courant vers le fond. À l'époque, la seule manière d'explorer cette fresque était à la lumière faible et vacillante d'une torche, on découvrait donc au fur et à mesure l'avancement chronologique de l'histoire. Dans ce contexte de pénombre nos sens sont aux aguets et notamment l'écoute pour compenser le manque de vision, les pas et voix résonnent et il est difficile de localiser leurs provenances. À la fin de ce parcours se trouve la première représentation totémique d'humain connue, un homme totem avec une tête d'oiseau et un sexe en érection, allongé face à un bison qui semble éventré. Il est difficile d'imaginer les chants qui pouvaient y être produits mais on peut tout de même imaginer la force émotionnelle de cette expérience. La découverte des grottes aurait donc été pour les premiers hommes à la fois un étonnement perceptif et la possibilité d'expérimenter des premières formes d'art dans des lieux réverbérants. Nous remarquons que dès cette époque la voix semblait être l'instrument privilégié de ces acoustiques. Il semblerait que les premiers hommes avaient un sens de l'écoute très développé à la fois dans les acoustiques de "plaines" pour chasser mais aussi dans les acoustiques de "grottes", s'orientant à la résonance de leurs voix.

---

14. Est dit acousmatique un son que l'on entend sans voir la cause qui le produit.



FIGURE 1.7 – Galerie de Lascaux II, @crédit DAN COURTICE



FIGURE 1.8 – Lascaux IV

## 1.2.2 Antiquité

L'Antiquité marque le début de l'Histoire en opposition à la Préhistoire, avec l'apparition de l'écriture. Sa date de commencement dépend des premières écritures connues, elle est donc sujette à changer avec de nouvelles découvertes et pourra être différente d'une région à une autre. La naissance de l'écriture signifie aussi la possibilité d'écrire des partitions et ainsi d'avoir une première trace des formes musicales de l'époque.

Avec l'arrivée de la sédentarisation et de l'agriculture la situation de champ libre se transformera petit à petit de la plaine aux bâtiments en dur. Les hommes construisirent des habitations, des enclos, des silos et finalement des lieux de représentations. Intéressons-nous à l'une des formes architecturales les plus reconnus de l'Antiquité; les théâtres grecs. Ces derniers prennent leurs racines dans les théâtres Minoans (-20 000 av. J.C.) mais la forme architecturale trouvera son apothéose dans la période Classique au V<sup>ème</sup> siècle ap. J.C. (CHOURMOUZIADOU et KANG 2008) et deviendra le standard des théâtres en Occident.

Tout d'abord d'où provient cette forme architecturale? Comment s'est-elle construite? Est-elle liée à un style musical particulier?

Revenons au VII<sup>ème</sup> siècle av. J.C. et suivons l'évolution d'un style musical dont nous trouvons la première trace dans un poème d'Archiloque : le dithyrambe. Ce style de poème lyrique apparaît tout d'abord dans les banquets et est chanté en l'honneur de Dionysos. Il était traditionnellement constitué d'un *exarchôn* (meneur), d'un chœur d'hommes et d'un *aulos*<sup>15</sup> les accompagnant. L'*exarchôn* est le "roi" du banquet et mène les festivités, le meneur proclame des vers lyriques et le chœur lui répond à l'unisson. Suivons étape par étape l'invention du théâtre Grec tel que nous le connaissons aujourd'hui autour de ce style musical :

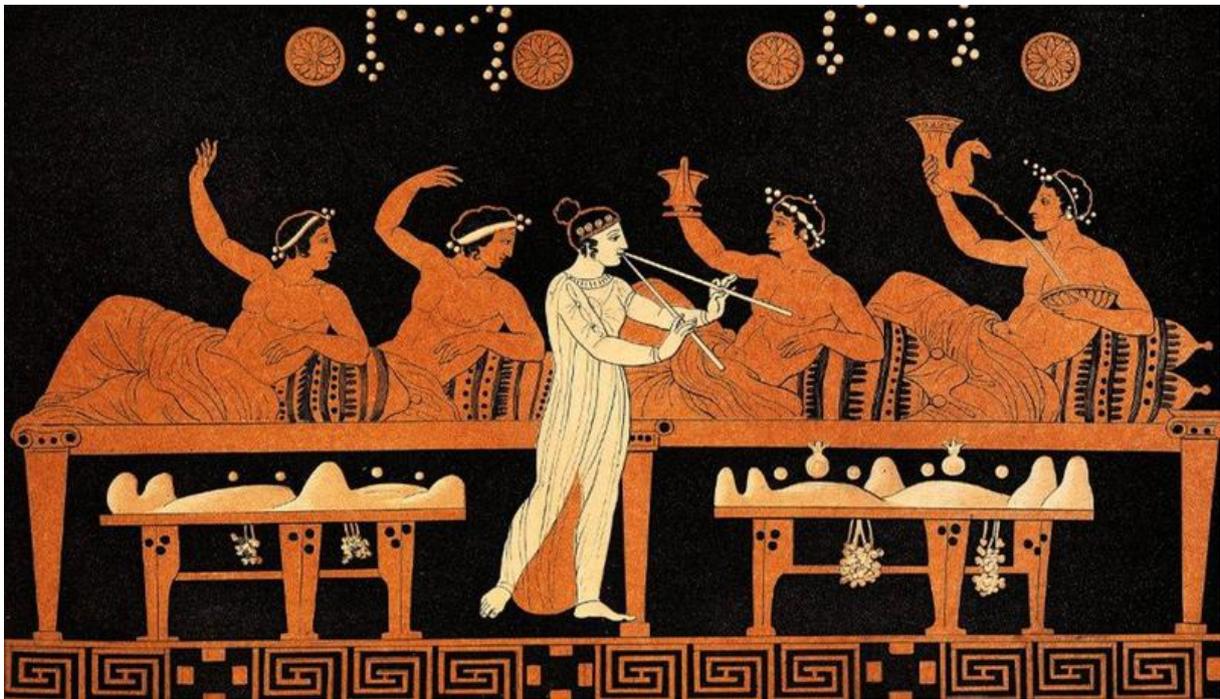


FIGURE 1.9 – Représentation de banquet sur vase, joueuse de *aulos*, Grèce antique

15. instrument à deux tuyaux et à anche double

### 1.2.2.1 Invention du théâtre Grec étape par étape

Au V<sup>ième</sup> s. av. J.C. le genre prend une forme publique, plus forcément en lien avec Dionysos, et est interprété par des chœurs de cinquante hommes qui s'affrontent dans le cadre de concours (en Annexe un schéma étape par étape : **Annexe 6**). Chaque chœur représente une des dix tribus<sup>16</sup> athéniennes. L'*exarchôn* devient un *coryphée* (chef de chœur) et les joutes se produisent à un endroit particulier de l'Agora d'Athènes : l'*orchestra*, place circulaire (littéralement le lieu où l'on danse). Les chœurs en effet dansent durant les représentations. C'est à cette époque que le style musical commence à se fixer ; notamment dans une structure sur le principe strophe-antistrophe, c'est-à-dire que l'antistrophe reprend la même structure rythmique que la strophe, mais pas la mélodie. Rappelons que tout cela se passe avant l'aménagement du théâtre dans le sanctuaire de Dionysos Eleuthereus au début du V<sup>ième</sup> siècle .

Les concours ayant du succès on rajoutera des gradins en bois pour les spectateurs (*ikria*). Aristote dans sa poétique pense que la tragédie est issue du dithyrambe, au sens où de ce chœur initial serait sorti un acteur (ainsi serait né le théâtre), puis deux (avec les pièces du dramaturge Eschyle) puis trois (avec Sophocle). Ainsi entre -480 et -470 on rajoutera une estrade en bois surélevée (*proskene*) devant le bâtiment de scène (*skene*) et derrière l'orchestra pour y placer les acteurs.

À Athènes le dispositif architectural se fixe, au IV<sup>ième</sup> siècle le bois est remplacé par la pierre et le style ne changera plus chez les Grecs après. Cette forme deviendra un modèle pour de nombreux autres édifices de la société grecque notamment pour les lieux de débats, de politique.

Cette prédominance architecturale influencera la Tragédie à devenir un style phare de cette période. En effet cette acoustique favorise une très bonne intelligibilité de la voix, avec des premières réflexions fortes amplifiant sa portée tout en évitant une confusion qui proviendrait de réverbérations tardives. Certaines études récentes montrent aussi que la diffraction du son par les sièges Grecs avaient tendance à accentuer la bande fréquentielle liée à l'intelligibilité de la voix (DECLERCQ et DEKEYSER 2007).

En effet la forme des gradins et de l'estrade tels que nous les connaissons est le résultat de nombreux essais de positionnement entre les années -480 et le IV<sup>ième</sup> siècle. Durant cette période les Grecs essaieront plusieurs formes de gradins pour à la fois maximiser la visibilité et l'intelligibilité de la voix pour le public. On se servira d'une estrade collée à la *skene* pour amplifier la voix des acteurs avec les réflexions produites par le mur du bâtiment de scène (*skene*) (Figure 1.10).

Le dispositif était pensé de manière à ce que le chœur ait lui aussi une amplification mais sur l'estrade seulement et pas sur la *skene*, ceci permettait que l'acteur ne soit pas masqué par le chœur tout en ayant une bonne intelligibilité et homogénéité des deux pour l'ensemble du public (Figure 1.11).

Nous voyons donc comment la naissance d'un style musical (le dithyrambe) a provoqué la naissance de nouveaux espaces de représentation (théâtres grecs) adaptés à ce dernier. Nous avons vu comment l'évolution du dithyrambe et sa popularité ont transformé petit à petit ces espaces jusqu'à aboutir à une forme stabilisée un siècle après sa création. Quand bien même les Grecs n'avaient pas les connaissances actuelles en acoustique, ils ont réussi à développer une acoustique très adaptée à leurs besoins, que l'on continue encore d'étudier, en rassemblant connaissances et expériences. Nous remarquons que cette acoustique, de type "plaine", est encore orientée pour la voix parlée et chantée tout comme pour l'acoustique des grottes. Nous remarquons cependant

---

16. sorte de grande circonscription administrative

que cette acoustique sèche permettait une très bonne intelligibilité, idéale à la liturgie des vers grecs.

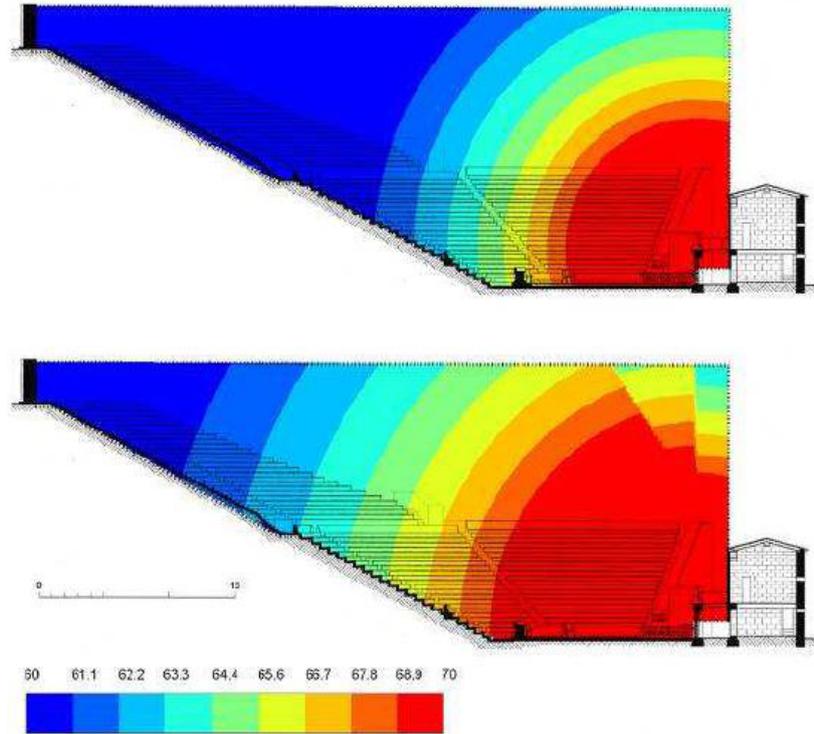


FIGURE 1.10 – Le son direct seul (en haut), puis ajouté aux réflexions sur l'*orchestra* et sur la *skene* (en bas), théâtre de Priène

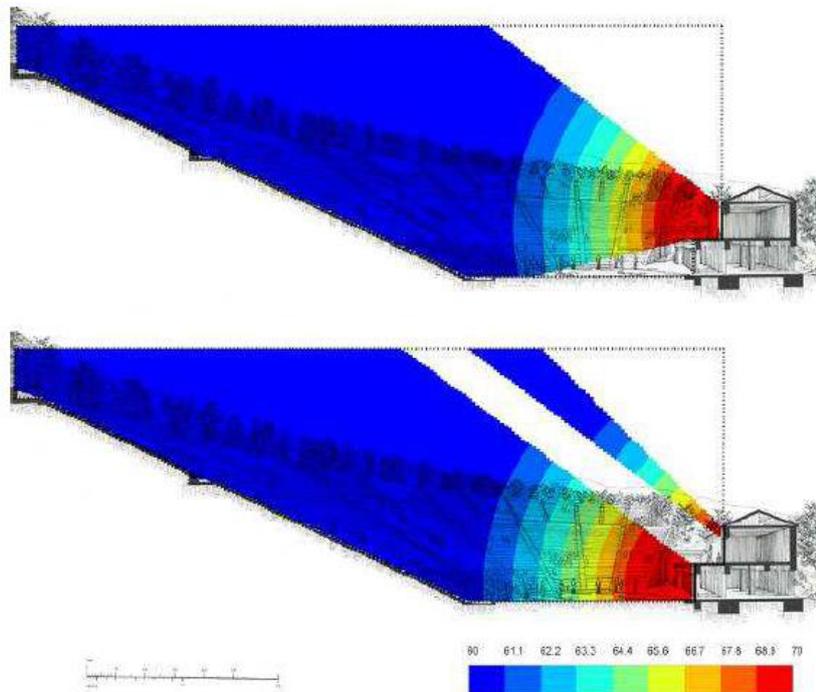


FIGURE 1.11 – Source sur le *proskenion* d'Epidaure (en haut), puis sur l'*orchestra* (en bas), on note que la réflexion sur la *skene* n'atteint plus le public, théâtre d'Epidaure

### 1.2.2.2 Utilisation de vases "acoustiques" ?

Les écrits de l'architecte Romain Vitruve (*Vitruvius*) (VITRUVÉ 0015) mentionnent l'utilisation dans certains théâtres grecs d'amphores en bronze situées sous les sièges dont la résonance "amplifiait la voix des acteurs" <sup>17</sup>.

« Cette disposition des vases d'airain fera que la voix qui viendra de la scène comme d'un centre s'étendant en rond frappera dans les cavités des vases et en sera rendue plus forte et plus claire selon la consonance et le rapport que son ton aura avec quelqu'un des vases » <sup>18</sup> VITRUVÉ

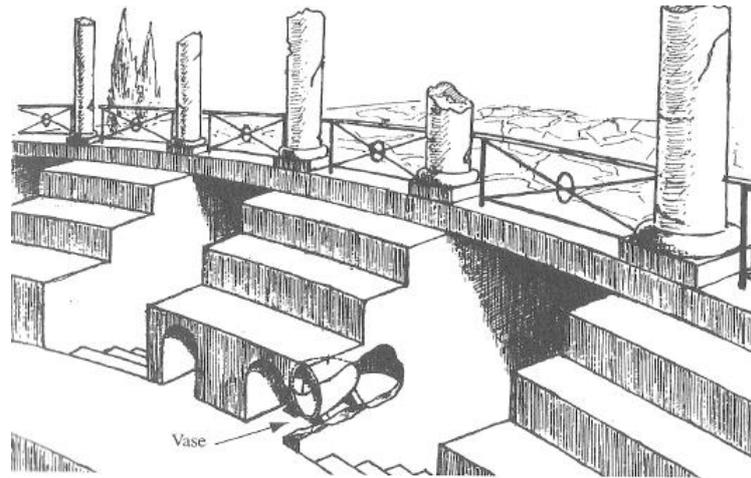


FIGURE 1.12 – Positionnement de résonateurs de Helmholtz dans un théâtre antique

Pour être plus exact ces vases acoustiques fonctionnaient comme des résonateurs de Helmholtz et servaient plutôt à absorber certaines fréquences parasites notamment dans les basses fréquences afin de ne pas masquer la bande passante de la voix humaine. On retrouvera d'ailleurs ces amphores au moyen-âge dans certaines églises censées améliorer l'intelligibilité de la voix du prêcheur et des chants. Même si les études récentes tendent à montrer que l'influence de ces amphores était minime sur l'acoustique globale de ces lieux il en demeure une volonté de contrôler certains éléments de l'acoustique des lieux d'écoutes pour satisfaire un type de projection sonore (PALAZZO-BERTHOLON et VALIERE 2007). Les auteurs d'une étude plus récente concluent que ces vases ont plusieurs effets cumulés sur l'acoustique :

- «
- en diminuant le temps de réverbération en basses fréquences (effet d'absorption) ;
  - en amplifiant localement le niveau sonore à certaines fréquences (effet d'amplification) ;
  - en diminuant les effets de focalisation (d'une voûte ou d'une coupole) par les ondes réémises de façon omnidirectionnelle avec un certain retard (effet de diffusion) ;
  - en diminuant les phénomènes d'onde stationnaire (effets de diffusion et d'absorption) ;
  - en régularisant les transitoires (phénomène de diffusion)
- »

Il est cependant difficile de savoir si Vitruve aurait lui-même fait l'expérience de ces vases. Il écrit

17. Vitruvius, 1914

18. Vitruve, *De architectura*, livre V, chap 5

en effet au I<sup>er</sup> siècle ap. J.C. soit au moins 500 ans après les faits qu'il décrit et il n'utilisait pas ces vases acoustiques dans ses propres constructions.

Intéressons-nous à la définition que donne Vitruvius du phénomène sonore. Il est important de noter que le terme d'acoustique tel que nous le connaissons aujourd'hui n'apparaîtra réellement qu'au XVII<sup>ième</sup> siècle.

« Or la voix

Est un souffle d'air courant, (né) d'un choc (et) sensible à l'ouïe.

Elle se meut en une infinité d'anneaux concentriques : comme lorsque, une pierre ayant été lancée dans une eau dormante, prennent naissance d'innombrables cercles d'ondes croissant à partir du centre par élargissement aussi grand que possible ; et errant à moins que l'exiguïté du lieu ne s'y oppose, ou quelque obstacle qui ne laisse pas les contours de ces ondes parvenir à leur terme.

Aussi, lorsqu'elles sont interceptées par des obstacles : les premières, refluant, troublent les contours des suivantes.

De la même manière, la voix se propage ainsi par mouvements circulaires :

Mais, dans l'eau, les cercles se meuvent à plat (et seulement) en largeur ; La voix, et marche en largeur, et franchit graduellement la hauteur.<sup>19</sup>

Donc, comme dans l'eau pour les contours des ondes, ainsi dans la voix : Tant qu'aucun obstacle n'aura intercepté la première onde, celle-ci ne troublera pas la deuxième ni les suivantes : mais toutes, sans résonance, parviennent aux oreilles des (auditeurs) les plus bas et les plus élevés.

Aussi les anciens architectes, suivant la nature à la trace, combinèrent les gradins des théâtres par les considérations de l'ascension de la voix ; et, d'après l'échelle de sons des mathématiciens et des musiciens, ils avisèrent à ce que, quelle que fût la voix sur la scène, elle parvint plus claire et plus suave aux oreilles des spectateurs.

Et en effet, de même qu'en vue de la clarté du son des cordes, des instruments de musique sont montés sur des feuilles d'airain ou des caisses de corne : de même les combinaisons des théâtres ont été constituées par les anciens, d'après l'Harmonique, en vue d'augmenter (les effets de) la voix

»<sup>20</sup>

On voit tout d'abord que Vitruve au I<sup>er</sup> siècle ap. J.C. avait une bonne idée de comment se propageait le son. Il avait compris la propagation sphérique dans l'espace, les effets de diffraction aux contours des obstacles et semblait avoir compris le caractère longitudinal des ondes sonores. Ne pouvant ni enregistrer ni voir les ondes sonores il prit en exemple la propagation des ondes à la surface de l'eau pour extrapoler celle des ondes sonores dans l'air. Il semblerait que les Grecs avaient déjà une idée similaire sur la propagation des ondes sonores au vu de la construction en arc de cercle des gradins de leurs amphithéâtres.

19. Le premier "et" est dans le texte. La double utilisation du "et" est probablement une ancienne tournure de phrase et veut peut-être signifier la simultanéité de la propagation en largeur et en hauteur.

20. Traduction du tome II de Vitruve par Auguste CHOISY, en 1909, p225-226

*De la même manière que l'acoustique des théâtres a évolué avec le style du dithyrambe, je voudrais dans ma pièce proposer des acoustiques variables, qui puissent se transformer progressivement au cours de la pièce durant un geste musical ininterrompu. À la fin de cette citation Vitruve propose un concept intéressant : considérer l'acoustique comme un instrument. J'aimerais en effet pouvoir considérer la simulation d'acoustique comme plus qu'un phénomène physique et que cet outil devienne un véritable outil artistique voire un instrument parmi les autres.*

Pour conclure, nous avons observé plus tôt la relation entre la naissance d'un style musical et une architecture, l'adaptation et la recherche qui l'a permis. L'étude des vases acoustiques et de la présentation des phénomènes sonores nous a permis quant à elle de mieux comprendre comment Vitruve percevait les sons au I<sup>er</sup> siècle ap. J.C. Cela nous donne une idée des réflexions qu'on put avoir les Grecs dans l'Antiquité et comment cette vision a pu influencer l'architecture de leurs lieux de représentation.

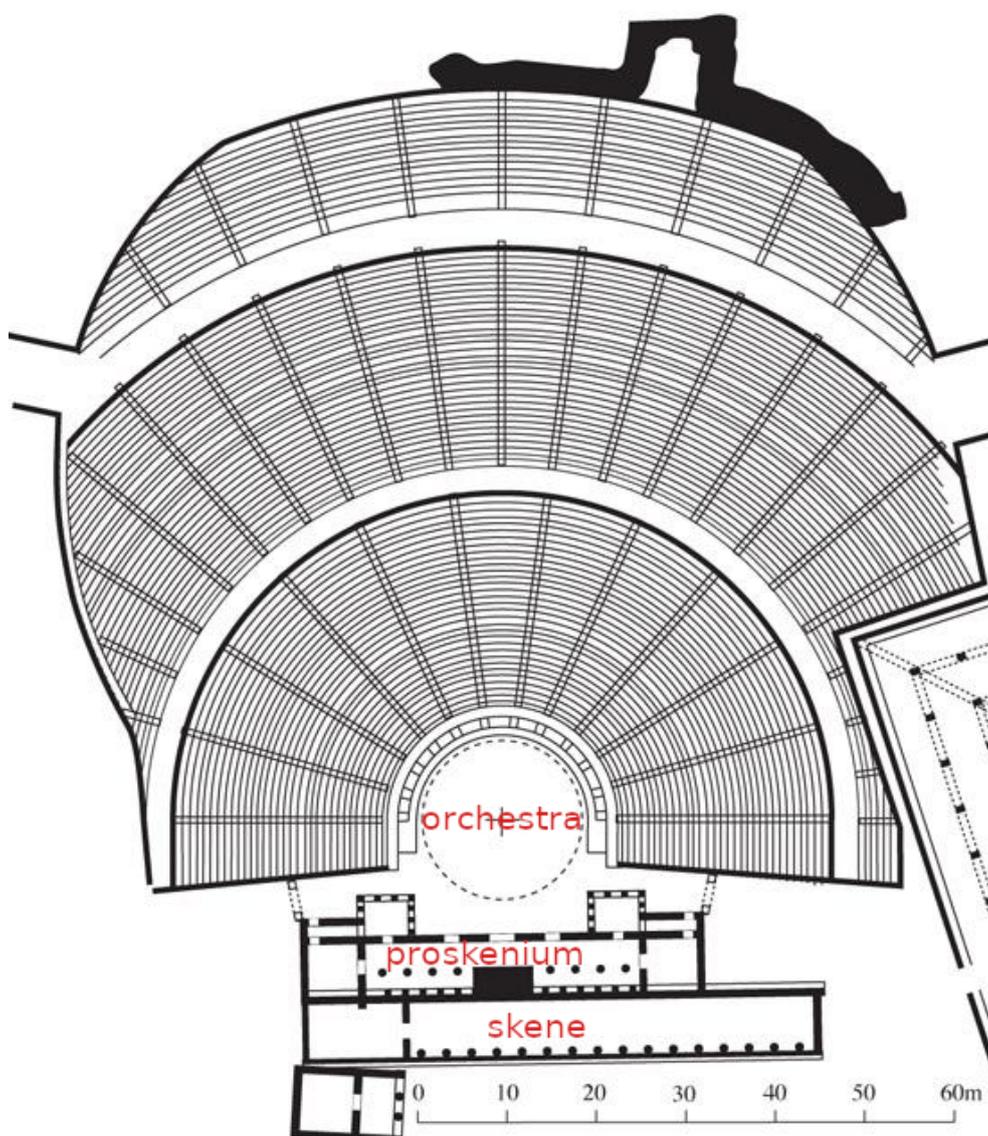


FIGURE 1.13 – Plan du théâtre de Dionysos, adossé à l'acropole, le temple (*skene*) devant l'ensemble, capacité de 17 000 places

## 1.3 Chrétienté, Espace et Polyphonie

Pour comprendre l'influence de l'espace dans le développement de la composition musicale du premier millénaire après J.C. en Occident il est important de s'intéresser à l'Église chrétienne et à sa musique. Nous voudrions savoir si une co-évolution a existé entre les styles architecturaux des lieux de culte et l'innovation compositionnelle dans les musiques sacrées. Pour commencer par le plus évident, la chrétienté prend ses racines dans les synagogues Juives et en a donc conservé un certain héritage, tout du moins au début. On pratiquait alors dans ces synagogues, lors des cérémonies religieuses, des lectures et exhortations parlées ou chantées sur une seule note, donc monotones (BURKHOLDER, GROUT et C. PALISCA 2006). Les premiers chrétiens reprendront cette liturgie qui conviendra à leur pratique. Ils sont en effet à cette époque traqués par l'Empire romain et pratiquent leur foi dans des maisons privées à l'acoustique très sèche. On retrouve des traces de ces "Églises de maison" ("*House churches*") décrite dans le cinquième livre du *Nouveau Testament, Actes des Apôtres*.

### 1.3.1 Légalisation du Christianisme

Les conditions de cultes changeront avec la légalisation du christianisme en 313 par les empereurs Constantin 1er et Licinus avec *l'Édit de Milan*. Rapidement, des églises en pierre commenceront à être construites par des architectes Romains. Le choix du modèle architectural païen ramènera chez les chrétiens les anciennes habitudes liturgiques et les conceptions théologiques des cultes païens et juifs. Et notamment la sacralisation du lieu plutôt que de l'assemblée; célébrations de tombeaux de martyrs, vénération de reliques. Ceci provoquera une différenciation à la fois théologique et spatiale entre la communauté et le clergé.

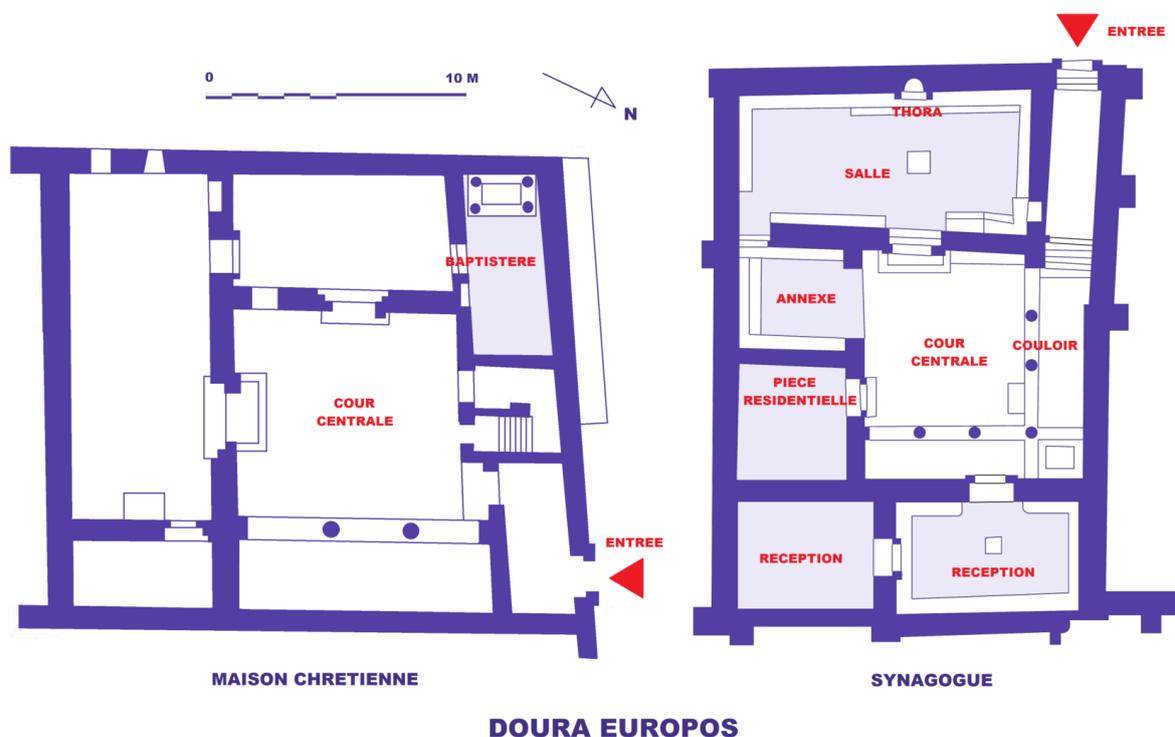


FIGURE 1.14 – À Doura Europos, plans de la plus ancienne église chrétienne connue (la domus ecclesiae de Doura Europos) et d'une synagogue voisine, III<sup>ème</sup> siècle ap. J.C.

Comme le remarque Biéler (BIELER 1961) :

« avant la paix de l'Église (313), les constructions religieuses suivent nettement deux orientations, correspondant à deux conceptions du culte : une conception synagogale, la plus ancienne, dont le plan carré centré convient au rassemblement naturel d'une communauté sans ségrégation cléricale, et une conception rituelle, d'abord centrée, puis dont le plan s'allonge et se diversifie au fur et à mesure que la sacralisation d'un lieu saint et d'un clergé le desservant s'intensifie, rejetant à distance les fidèles »

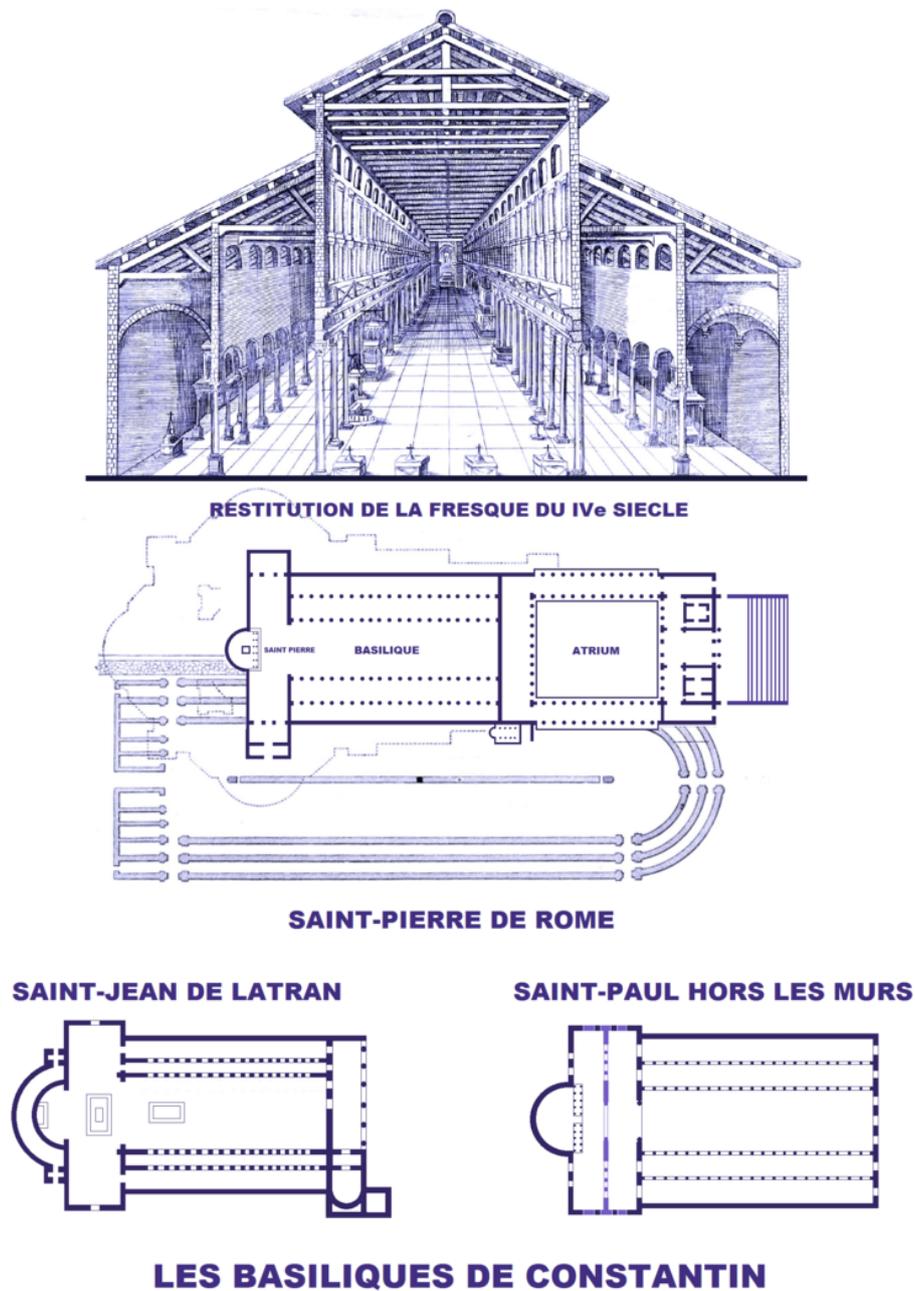


FIGURE 1.15 – Basiliques Saint-Jean-de-Latran, Saint-Pierre du Vatican, Saint-Paul-hors-les-Murs, bâties au IV<sup>e</sup> siècle à la demande de l'empereur Constantin

Alors que les premières églises gardaient un agencement permettant une bonne intelligibilité de la parole, le deuxième type d'églises cause de plus en plus de difficultés au niveau acoustique notamment dû à l'allongement des temps de réverbération. Durant cette même période la liturgie chrétienne favorise de plus en plus le chant à la parole. Ceci induit un ralentissement temporel des variations spectrales qui se trouve être un avantage pour la compréhension des voix dans ces églises. En effet les grands volumes en pierre tendent à avoir une forte dispersion temporelle, par exemple de la position du prêtre jusqu'aux croyants, ce qui rend difficile la compréhension d'un texte parlé (LUBMAN et KISER 2001). Le chant permettait donc de mieux propager la voix jusqu'aux fidèles les plus éloignés, avec une variation fréquentielle et un débit de mots limités afin de ne pas perdre l'intelligibilité du message. Cependant ce flot limité rend très longue la lecture de textes, les chants sont alors privilégiés car ils permettent notamment de transmettre une émotion ou une histoire de manière plus imagée. De plus, la légalisation du christianisme a permis d'atteindre un plus grand nombre d'adeptes, pas nécessairement alphabètes, et les chants permettent de créer des mythes communs simples à retenir où l'on se retrouve pour prier ensemble. Ceci provoquera un grand changement dans l'histoire de la musique Occidentale. Prenons un temps pour l'analyser avec le concept de Bagenal :

Alors que les églises de maison avaient une acoustique proche de celle de la "plaine" ("open air"), les nouvelles églises en pierre se trouvent du côté de l'archétype de la "grotte" ("cave"). Cette transition transforma l'intérêt de la sémantique dans la prière parlée vers une esthétique immersive peut-être plus orientée vers des émotions comme l'élévation ou la transcendance. Le chant se reflète alors sur les parois en pierre et les centaines de voix ainsi générées se superposent en une seule entité musicale qui entoure la congrégation. On pourrait supposer que le passage des églises de maisons aux églises en pierre aurait donc influé une transition des pratiques religieuses, allant du discours au chant, d'un message à la raison vers les émotions, de la réflexion vers l'expérience. On retrouve ici une transition similaire à celle que nous présentions par la découverte des grottes dans la Préhistoire, mais cette fois-ci dans un style particulier : le chant sacré chrétien.

Nous voyons ici comment une décision politique comme la légalisation du christianisme a pu influencer l'architecture des églises et par la suite la musique sacrée chrétienne. L'étude de la co-évolution de la musique et de l'architecture ne doit pas être déconnectée d'un contexte historique, culturel et politique.

*Dans le cadre de ma pièce je devrai donc réfléchir aux changements à apporter sur la musique due aux transformations d'espaces que je choisirai.*

### 1.3.2 Standardisation des chants Chrétiens

Différents courants de chants sacrés chrétiens se développeront par la suite, dont le chant Grégorien qui sera le plus connu et le plus codifié. Celui-ci est souvent attribué au pape Grégoire I (590-604), mais il semblerait que la standardisation de ce chant s'est produit sous le pape Grégoire II (715-731) (BURKHOLDER, GROUT et C. PALISCA 2006). Le chant grégorien est issu du chant vieux-romain et du chant gallican. Sa notation notamment remonte au chant byzantin (THIBAUT 1920).

Le chant vieux-romain était le chant liturgique et ecclésiastique du Vatican, notamment le chant officiel de la *Schola cantorum* (école de chantres et chœur papal) dès le IV<sup>ième</sup> siècle jusqu'au début du XIII<sup>ième</sup> siècle. Il sera officiellement remplacé par le chant grégorien par le pape Innocent III au XII<sup>ième</sup> siècle.

Le chant gallican quant à lui est le nom donné au chant liturgique des chrétiens de Gaule, sous la dynastie mérovingienne. Le chant gallican se caractérisait surtout de la liturgie orientale. Remplacé formellement par le chant romain en 789, celui-ci disparut, à la suite de la centralisation de la liturgie selon le rite romain, favorisée par Charlemagne (*Admonitio generalis*, 789).

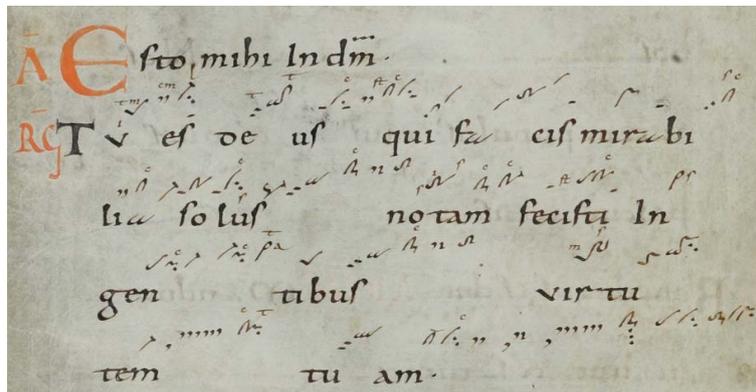


FIGURE 1.16 – Cantatorium de Saint-Gall, manuscrit complet le plus ancien et considéré comme un chef-d'oeuvre de l'époque

Le chant grégorien se veut fidèle au texte latin et en respecte donc la forme en prose. La mélodie se fait donc au rythme des mots. On distingue les *neumes*<sup>21</sup> légers et rapides des neumes longs et importants. Mais la durée de chaque neume n'est pas fixe. Ce sont les textes sacrés en latin ainsi que leurs accentuations qui déterminent la valeur de note. Si le texte change alors la mélodie aussi.

Le chant Grégorien était, au départ, essentiellement le chant ecclésiastique du royaume carolingien (dont Charlemagne fut le premier empereur couronné par le pape Léon III), mais il conquiert progressivement toute l'Europe entre les IX<sup>ième</sup> et XI<sup>ième</sup> siècle faisant ainsi disparaître les autres chants liturgiques (à l'exception du chant hispanique et du chant ambrosien). Cette standardisation intervint notamment avec l'invention de Guido d'Arezzo : la notation en quatre lignes. Ce qui permit de conserver à l'écrit le chant, oralement transmis jusqu'à présent.

Le chant sacré chrétien fut donc au centre de politiques menées à la fois par l'Empire carolingien et le Vatican dans une volonté d'unification de l'Église catholique. Le chant grégorien fut l'élément fondateur de la

21. Le neume est un signe en forme de point, de trait ou d'accent représentant un élément mélodique. Cette notation musicale fut employée dans les livres liturgiques du VIII<sup>e</sup> s. au XIV<sup>e</sup> s.



FIGURE 1.17 – Exemple d’écriture de chant grégorien en quatre lignes

musique occidentale telle qu’on la connaît aujourd’hui, aussi bien profane que sacrée. Il fut notamment la référence de la musique modale médiévale. Il se chante *a cappella* et à l’unisson, sans accompagnement harmonisé, car, selon l’étude de Franz Liszt : « toute harmonisation modifie la structure de cette musique » (CARDINE 1977). La musique sacrée chrétienne n’est alors pas encore polyphonique. Intéressons-nous désormais à l’acoustique de ces lieux.

Exemple d’interprétation authentique selon le rythme verbal : cantique Magnificat avec antienne Exsultet omnium par les chantres et le chœur de l’abbaye Notre-Dame de Fontgombault ([lien](#)).

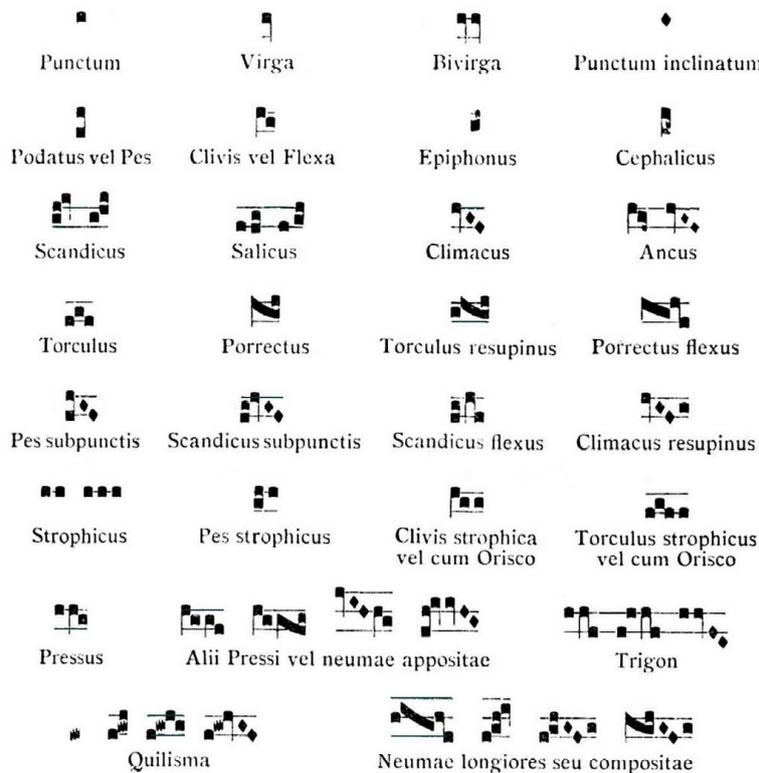


FIGURE 1.18 – Exemple de neumes

### 1.3.3 Acoustique des premières églises romanes



FIGURE 1.19 – Église romane *Sante Prassede* de Rome construite en 822

À cette époque les églises *proto-romanes*<sup>22</sup> sont construites en pierre, donc réfléchissantes, et peuvent avoir de grands volumes. En effet, même si les églises romanes restent globalement moins larges que les églises gothiques, la clef de voûte permet tout de même d'atteindre des hauteurs conséquentes et donc de grands volumes. Intéressons-nous à l'étude de Desarnaulds et Carvholo (DESARNAULDS et CARVALHO 2001) qui analyse plus de 360 églises en Europe par pays, styles et temps de réverbération. On y trouve un panel de 29 églises romanes ayant un volume moyen de 4500 m<sup>3</sup> (soit par exemple 22,5 m\*20 m\*10 m), ce qui correspond à un temps de réverbération entre 3 et 3,5 secondes.

Country	CH		D		P		YU		All countries	
	<i>n</i>	<i>Vm</i>	<i>n</i>	<i>Vm</i>	<i>n</i>	<i>Vm</i>	<i>n</i>	<i>Vm</i>	<i>n</i>	<i>Vm</i>
<i>Romanesque</i>	8	4507	-	-	13	3534	4	1880	29	4571
<i>Gothic</i>	33	6410	8	22588	12	6407	12	1226	79	18025
<i>Baroque</i>	32	4876	7	21180	10	6049	9	1873	63	7689
<i>Neoclassic</i>	43	5236	2	10425	2	15049	15	1404	66	5521
<i>Modern</i>	61	3579	18	4782	4	5813	16	2560	124	5482
All styles	177	4718	35	17260	41	5772	56	1806	361	9783

FIGURE 1.20 – Nombre d'églises (*n*) et volumes (*Vm*) moyens par styles et pays, étude de Desarnaulds et Carvholo. CH : Suisse, D : Allemagne, P : Portugal, YU : Serbie

On considère qu'il faut en moyenne 50 ms (entre 20 et 60 ms) entre la source et le son délayé pour que l'on perçoive un écho franc. Pour une température de 20 degrés Celsius, cela représente une différence de marche de 17 mètres environ. Un choriste situé à plus de 8,5 mètres d'une paroi réfléchissante entendra donc un écho de sa propre voix. Dans un volume moyen de 4500 m<sup>3</sup> les conditions sont donc facilement remplies. Notons que l'on observe un volume moyen de 18 000 m<sup>3</sup> pour le panel d'églises Gothiques dans l'étude de

22. Églises primitives romanes.

Desarnaulds et Carvholo, soit près de 4 fois plus que durant la période romane. On a donc dès le XII<sup>ième</sup> siècle un public, des musiciens et des compositeurs habitués à ces effets acoustiques. L'acoustique de ces églises crée donc ce que l'on appelle une *polyphonie virtuelle* ou *polyphonie implicite*<sup>23</sup>. On peut en effet faire l'hypothèse que la familiarisation avec la *polyphonie virtuelle* produite par la résonance tardive de ces lieux a influencé les compositeurs à développer une écriture en canon<sup>24</sup> ou en fugue<sup>25</sup>, à la manière de l'écho de la réverbération.

Une autre approche, spectrale cette fois, pourrait compléter cette réflexion. Les églises étaient à cette époque connues pour avoir des zones spectrales de résonances fixes liées à la géométrie de ces lieux, souvent dans les basses fréquences. Ceci provoquait une sorte de *bourdon* constant sous la mélodie. Les compositeurs l'appelaient la "note" de l'église, qui servait notamment de diapason (BAGENAL 1951, B. BOREN 2018). Ce bourdon sous la mélodie correspond elle aussi à une forme, simple, de polyphonie. De plus, suivant les positions des choristes dans l'église et la géométrie de celle-ci, les jeux de sommations des voix dans l'acoustique pouvaient faire sortir certaines harmoniques de la mélodie, créant ainsi une seconde voix parallèle à la mélodie. Les compositeurs de l'époque, souvent rattachés à des lieux de culte, devaient donc prendre en compte ces phénomènes de polyphonies (virtuelle, bourdon et parallèle) propres à leur église pour chacune de leurs compositions.

Navarro (NAVARRO, SENDRA et MUNOZ 2009) défend l'idée qu'avec le temps cela « assura une certaine éducation et familiarisation avec les sons polyphoniques. En effet, la persistance du son des différentes notes d'une mélodie (amène) à des développements mélodiques, structurés de manière que la simultanéité des notes résout certaines harmonies. » (en anglais dans le texte). Lubman et Kiser (LUBMAN et KISER 2001) iront même plus loin et diront que l'empilement de notes dans des églises réverbérantes fut un catalyseur au développement de la musique polyphonique en Occident.

### 1.3.4 Naissance de la polyphonie ?

Un petit rappel s'impose : La polyphonie la plus primitive qui consiste en un bourdon, d'abord unique, sous une mélodie existe depuis l'Antiquité, cependant la polyphonie avec au moins deux voix mélodiques se développera de manière étendue en Occident avec la naissance de *l'Organum*. On retrouve les premières traces de celui-ci au IX<sup>ième</sup> siècle dans le traité *Musica Enchiriadis* mais le style se généralisera surtout entre les XI<sup>ième</sup> et XII<sup>ième</sup> siècle. À son apparition l'organum s'inspire du chant grégorien, il est constitué de deux voix ; la *vox principalis* située au-dessus et la *vox organa* (voix organale), en contre-chant. On parle à ce moment de polyphonie parallèle : les deux voix se suivent et réalisent les mêmes intervalles. Généralement les deux voix étaient espacées d'une quarte ou d'une quinte parfaite. Cependant il arrivait toujours d'avoir recours à des bourdons ou à des assemblages des deux techniques. Il n'y alors pas de notation du rythme et la prosodie est celle chant grégorien et de la poésie classique. Cet état primaire n'est alors pas encore une polyphonie « totale » dans le sens où l'on ne trouve pas réellement deux voix mélodiques indépendantes. On parlerait plus d'une forme *d'hétérophonie*<sup>26</sup>. Il est amusant de noter que dans sa forme première, la *vox organa* n'était pas écrite

23. Enchevêtrement de deux lignes mélodiques (ou une ligne mélodique et un continuo) en faisant alterner les notes successives de chaque ligne. Si les lignes enchevêtrées sont suffisamment séparées, et si chaque ligne possède une certaine continuité mélodique, la séquence de fréquences successives se scinde à l'audition en deux lignes séparées. (M. F. Bukofzer)

24. Un canon est un procédé de composition musical contrapuntique, dans laquelle plusieurs voix jouent ou chantent une imitation de la mélodie, mais de manière différée. C'est la forme la plus stricte de l'imitation polyphonique.

25. Selon le CNRTL la fugue est une forme de composition contrapuntique fondée sur l'entrée et le développement successifs de voix selon un principe strict d'imitation qui donne à l'auditeur l'impression que chaque voix fuit ou en poursuit une autre.

26. Variations simultanées d'une simple ligne mélodique. La texture ainsi créée peut être vue comme une monophonie complexe qui aurait une seule mélodie de base mais réalisée par plusieurs voix en même temps.

et était performée par un chanteur en transposant à l'oreille. Plus tard la seconde voix sera écrite. Certains compositeurs essayeront de placer la *vox organa* au-dessus de la *vox principalis*, l'incitant par la même occasion à créer des mouvements contraires note contre note, un *déchant*, et ainsi créer de « réelles » polyphonies.

### 1.3.5 Gothique, Notre-Dames de Paris : lieu d'influence

La polyphonie dans l'organum se développera ensuite surtout à partir du XII<sup>ème</sup> siècle avec *l'organum fleuri*<sup>27</sup>, en même temps que la naissance d'un nouveau style architectural venant de France : l'architecture Gothique et ses églises et cathédrales monumentales. L'organum fleuri verra d'ailleurs son apogée au XII<sup>ème</sup> siècle avec *l'école de Notre-Dame*, style musical regroupant des compositeurs ayant exercé à la cathédrale Notre-Dame de Paris de 1160 à 1250, durant la période gothique primitive du bâtiment. On regroupe ses compositeurs dans le style de *l'Ars antiqua*. Mais plus qu'une connotation géographique, l'expression fait référence aux caractères des compositions : outre l'utilisation des modes rythmiques et mélodiques (les huit tons d'église) en usage, on constate surtout l'apparition, suivie d'un important développement, de formes musicales polyphoniques telles que le *conductus* (le conduit)<sup>28</sup>, l'organum fleuri ou encore le hoquet<sup>29</sup>.

Antoine Guerber, chef de l'ensemble *Diabolus in Musica* et spécialiste de cette période en parle ainsi à l'occasion de la sortie d'un CD sur cette école en particulier (GUERBER 2005) :

« À partir de la fin du XII<sup>e</sup> siècle [...], un lieu de création musicale émerge, lieu primordial servant de modèle pour tout le monde chrétien : la cathédrale Notre-Dame de Paris. Si l'on continue à y célébrer comme ailleurs les liturgies au son des mélodies du chant grégorien, les chantres et chanoines de la cathédrale parisienne développent à partir des années 1170 de nouveaux styles qu'on appelle aujourd'hui l'École de Notre-Dame, introduisant des innovations majeures. D'une part la polyphonie, de plus en plus pratiquée dans de nombreuses abbayes ou cathédrales françaises, gagne ses premières véritables lettres de noblesse à Notre-Dame. D'autre part l'utilisation de pulsations rythmiques régulières dans la musique constitue également une grande nouveauté et il semble bien que les chantres parisiens en soient les initiateurs. Très vite, les procédés des compositeurs de cette « École » seront imités, copiés, chantés dans les grandes églises de France puis dans toute l'Europe. Cette diffusion exceptionnelle pour l'époque s'explique par le génie des créateurs parisiens, au premier rang desquels figurent les fameux Léonin et Pérotin, mais aussi par la renommée et la prépondérance extraordinaire de Paris au début du XIII<sup>e</sup> siècle, ville-lumière déjà surnommée « Mater artium » (Mère des Arts), « Secunda Athena » (Seconde Athènes), « Paris experts Paris » (Paris sans égal). La présence des institutions royales et religieuses contribue désormais au statut de capitale, mais c'est la vie intellectuelle, la création et l'immense succès immédiat de l'Université [créée à partir de 1253] qui font le renom de Paris, véritable phare culturel européen. Dès les premières décennies du XII<sup>e</sup> siècle, Abélard et d'autres maîtres parisiens attiraient déjà des foules d'élèves venant d'horizons très divers sur la montagne Sainte-Geneviève et dans le futur Quartier latin. Ceux-ci repartaient ensuite avec un bagage théologique, mais souvent également musical, et contribuèrent ainsi à la diffusion dans toute l'Europe du répertoire de l'École de Notre-Dame. »

---

27. L'organum fleuri désigne une forme organale qui se complexifie au XII<sup>e</sup> s. avec l'ajout notamment de fioritures sur la voix organale

28. Chant latin, essentiellement en vogue aux XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles. Correspond à des chants versifiés non liturgiques, dont la voix principale n'est pas basée sur des mélodies grégoriennes. Au XII<sup>e</sup> s. Le conduit utilise le procédé de l'organum fleuri ; de cette combinaison, naît le motet.

29. Le hoquet consiste à faire alterner une ligne mélodique par plusieurs voix, chacune tout au long de sa partie s'interrompant et reprenant à contretemps des autres



FIGURE 1.21 – Nef principale de la cathédrale Notre-Dames de Paris construite entre 1163 et 1345

### 1.3.5.1 La polyphonie de l'École Notre-Dame

Guillaume Gross, musicologue, consacre justement un article dédié à la polyphonie à Notre-Dame de Paris sur cette période (GROSS 2006). Dans son introduction l'auteur nous explique l'importance de ce courant sur la polyphonie Occidentale :

« La polyphonie est attestée à la cathédrale Notre-Dame de Paris dès la fin du XIIe siècle. Composés pour les plus grandes fêtes liturgiques de la nouvelle église de Paris, les organa à deux, trois et quatre voix, ont profondément marqué leur temps. La virtuosité dont ont fait preuve les chœurs dans l'exécution de leur art, l'audace des scribes qui ont consigné ces chants dans une notation mesurée alors totalement inédite et l'intérêt que les intellectuels médiévaux y ont porté, ont accordé à l'organum parisien une place remarquable dans l'histoire de la musique occidentale. »

Jacques Chailley précise :

« L'école de Notre-Dame a produit un nombre considérable de conduits. L'écriture à trois voix y acquiert une souplesse considérable et une force d'expression d'autant plus grandes qu'entre les points d'appui consonants, la liberté des notes de passage introduit des harmonies étrangement riche et « modernes ». On trouve (par exemple dans le *Crucifigat Omnes*, déploration sur la perte de Jérusalem), aux points de consonances, des quintes superposées qui sonnent pour nous comme des accords de « neuvième », accords qu'on ne réinventera qu'avec Wagner et Debussy »<sup>30</sup> (CHAILLEY et DUFOURCQ 1946)

Comment ce savoir s'est-il transmis en Europe? Sous quelle forme? Intéressons-nous aux écrits de cette époque :

L'école de Notre Dame fut à la fois influente de par des traités sur l'*organum*, notamment le *Magnus Liber* ("le grand livre de l'organum"), mais aussi par de très nombreux manuscrits de pièces. Jouissant d'une très haute considération, le répertoire circula dans toute l'Europe. Notamment le manuscrit "F" (1240), qui a une des plus vaste et ancienne collection. Les relations entre les pièces transmises par les sources du XIIIe siècle et l'église Notre-Dame de Paris ne sont pas toujours faciles à identifier. Cependant, depuis le travail de Craig Wright, musicologue, nous savons que le répertoire contenu dans le manuscrit F entretient d'étroites relations avec la tradition liturgique de la cathédrale (ROSNER 1993). Il a démontré que F, était la collection mère et que son berceau liturgique était uniquement Notre-Dame de Paris. Les origines de ce manuscrit sont donc incontestablement parisiennes.

Guillaume Gross (GROSS 2006) nous explique qu'« à partir des années 1230-1240 et jusqu'au début du XIVe siècle, de nombreux manuscrits transmettent une vaste et riche collection d'organa, de conduits et de motets, les trois grands « genres » polyphoniques alors à l'honneur dans le Paris du XIIIe siècle.<sup>31</sup> »

Durant cette époque, qui ne connaît pas encore le motet, c'est la voix supérieure de l'organum qui s'ornement de plus en plus jusqu'à atteindre quatre voix chez Pérotin. Les chants virtuoses à trois ou quatre voix, les *tripla* et les *quadrupla* étaient particulièrement appréciés et tenaient des places de choix dans les

30. Jacques Chailley et Norbert Dufourcq (dir.), *La musique des origines à nos jours*, Paris, Larousse, 1946, livre III, « La musique polyphonique et la suprématie française, des origines à la fin du XV<sup>e</sup> siècle », p. 112.

31. Le répertoire des organa comprend, outre la mise en musique à deux, trois et quatre voix des répons de la messe et de l'office et le *Benedicamus domino* qui conclut les vêpres et la plupart des autres offices, quelques chants processionnels et des clausules.

catalogues médiévaux des bibliothèques (GROSS 2006). Ceci s'explique notamment par leur relation forte aux festivités :

« Ils ont été composés pour les fêtes doubles, semi-doubles et de neuf leçons, et surtout pour les fêtes de Noël, de Pâques et de l'Assomption. Sur les soixante organa (avec clausules) contenues dans les sources, vingt-cinq étaient destinées à ces trois fêtes. Plusieurs pièces étaient associées à des fêtes particulièrement importantes comme la Saint-Étienne (co-patron de la cathédrale) ou la Saint-Denis, premier évêque de Paris. »

Mais aussi de par des décisions du clergé, désireux de moderniser le chant sacré.

« L'insertion de la polyphonie au sein du rite correspond à la volonté d'une hiérarchie ecclésiastique désireuse de réformer l'office. Inquiet de la dégradation du service liturgique parisien à l'occasion des fêtes qui suivaient Noël durant le mois de janvier et en particulier lors de l'« Office des Fous » – qui parodiait l'office et dont les exactions exaspéraient Rome –, le légat du pape Pierre de Capuano enjoint à Eudes de Sully de prendre des mesures coercitives. L'ordonnance du 1er janvier traduit ainsi une nette volonté de réforme. En 1199, un second décret de l'évêque interdit la « Fête des diacres » le 26 décembre et donne des directives pour le déroulement de la fête de la Saint-Étienne afin d'éviter les inconvenances des diacres et s'assurer de la présence de tout le clergé. »

L'École Notre-Dame, notamment les pièces de Léonin et Pérotin, eurent donc une influence majeure sur la musique polyphonique occidentale durant près d'un siècle (1160-1250). Ces oeuvres ont permis à la fois un développement et une complexification de la polyphonie des *organum* avec ce qu'on l'on appellera l'*organum fleuri* jusqu'à trois ou quatre voix. Mais aussi en développant de nouveaux styles tel que le *hoquet* ou la *clausule*<sup>32</sup> dont s'inspirera le *motet*<sup>33</sup>. La notoriété et l'influence de cette école s'explique donc à la fois par le talent des compositeurs, par une relation étroite avec la vie de la cité (festivités), par des décisions politiques et par une diffusion massive et appréciée des écrits de ces compositeurs. Qu'en est-il donc de la cathédrale Notre-Dame de Paris en elle-même ? Le développement des pratiques polyphoniques a-t-elle un lien avec la cathédrale ?

### 1.3.5.2 La cathédrale et la polyphonie

Guillaume Gross nous éclaire à ce sujet :

« L'organum apparaît d'abord et se développe dans le cadre très structuré du chapitre de la cathédrale. Les décrets de la cathédrale Notre-Dame, promulgués en 1198 et 1199 par l'évêque Eudes de Sully, attestent en effet une pratique à deux, trois et quatre voix pour les chants responsoriaux de la messe et des offices ainsi que pour le *Benedicamus Domino* des Vêpres. Entrant dans la structure même de l'office (de la cathédrale), l'organum se chantait donc à six occasions : pour le répons et le *Benedicamus Domino* des premières Vêpres (les deux pouvant être répétés aux secondes Vêpres), pour les troisième et sixième répons des matines et pour le graduel et l'alleluia de la messe. Cette introduction au chœur de Notre-Dame à tous les offices liturgiques des jours de fête s'est préparée progressivement dans la seconde moitié du XIIe siècle et au début du XIIIe siècle, et son déve-

---

32. La clausule est une forme musicale polyphonique du XIIIe siècle, apparue comme section d'un organum. On en trouve des exemples dans les organums de l'école de Notre-Dame, où le ténor adopte un rythme beaucoup plus rapide, se distinguant des passages à valeurs longues.

33. L'adjonction à la clausule d'un texte qui lui était propre donnera naissance au motet.

loppement coïncide avec la reconstruction de l'église de Paris. »<sup>34</sup> (HUGLO 1991,GROSS 2006, HUGLO 1982)

L'organum qui se développe dans cette école est donc bien dans la lignée de la liturgie de la cathédrale. Il est intéressant de noter que la cathédrale fut effectivement en construction durant toute la période de l'Ecole de Notre-Dame (1160-1250). En effet du VI<sup>ème</sup> au XII<sup>ème</sup> siècle se situe à cet emplacement la *Cathédrale primitive Notre-Dame de Paris*, de construction romane, constituée de la basilique Saint-Etienne et du Baptistère Saint-Jean-le-Rond. En 1163 commence donc la construction de la cathédrale Gothique à la place de la cathédrale romane détruite au fur et à mesure. La construction se fera sous la direction de l'évêque Maurice de Sully (1160-1195) puis sous celle d'Eudes de Sully (1196-1206) :

- 1163-1182 : construction du chœur et de ses deux déambulatoires.
- 1182-1190 : construction des quatre premières travées de la nef, des bas-côtés et des tribunes. La construction de la nef commença en 1182, après la consécration du chœur. Les travaux s'arrêtèrent après la quatrième travée laissant la nef inachevée.
- 1190-1225 : construction de la base de la façade et des deux dernières travées de la nef. On commença l'édification de la façade en 1208.
- 1225-1230 : selon Viollet-le-Duc, qui en trouve les traces dans le monument, un incendie aurait détruit à cette époque la charpente supérieure et les combles.
- 1225-1250 : partie haute de la façade, et les deux tours. Agrandissement des fenêtres hautes (suppression des petites rosaces) pour remédier à l'obscurité (vers 1230). Simultanément la toiture des combles des tribunes est remplacée par des terrasses, et de nouveaux arcs-boutants. On construit les chapelles latérales de la nef entre les culées des arcs-boutants. La tour sud est achevée en 1240 et l'on abandonne la même année l'idée de doter les tours d'une flèche. En 1250, fin de la construction de la tour nord. À cette date, la cathédrale est en fait terminée et totalement opérationnelle.

Alors, il y a-t-il eu des offices durant cette période dans la cathédrale Notre Dames de Paris ?

Antony Pitts nous répond à l'occasion de la sortie de son CD "LEONIN • PEROTIN : Musique sacrée de Notre-Dame", qui se veut retracer l'évolution du style avec la construction de la cathédrale du point de vue des visiteurs de l'époque.

« Léonin, qui à son époque était considéré comme le maître de la composition polyphonique et qui semble avoir été responsable du magnus liber sous sa forme d'origine, doit avoir passé la majeure partie de sa carrière dans le chœur inachevé, la portion Est de la cathédrale, isolé des bruits lancinants de la maçonnerie par quelque cloison temporaire qui au fil des ans fut sans doute déplacée de colonne en colonne vers le côté ouest. Lorsque Pérotin réalisa une nouvelle édition du magnus liber de Léonin et y ajouta ses propres versions polyphoniques, massives, de deux chants graduels, très probablement pour des jours fériés de 1198 et 1199, presque tout l'espace de la cathédrale était prêt à en renvoyer les échos. Pendant le demi-siècle suivant et au-delà, les travaux du bâtiment se poursuivirent jusqu'à ce qu'enfin il soit parachevé. »

---

34. Guillaume GROSS, Chanter en polyphonie à Notre-Dame de Paris sous le règne de Philippe Auguste : un art de la magnificence, CAIRN, 2006

L'étude acoustique de Michèle Castellengo, Benoit Fabre et Eric Vivie réalisée en 1978 pour étudier la pertinence de l'ajout d'un orgue dans la cathédrale nous renseigne sur l'acoustique actuelle à vide à divers points d'émission (CASTELLENGO, FABRE et VIVIE 1987). Globalement la cathédrale a un temps de réverbération de 12 secondes à 125 Hz qui diminue linéairement à 2 s à 2 kHz. Les trois points étudiés montrent une certaine homogénéité de l'église à l'exception de la position transept Nord, à la limite du chœur. Cette position apporte une distribution très inhomogène dans le public pouvant aller de +15dB à -5dB dans la zone 2kHz à 6kHz. Néanmoins, nous disent les auteurs, ce problème semble être lié à la position à la croisée de la "croix" de l'église. Il ne semblerait pas qu'il y ait ce problème au niveau du chœur en lui-même. À la période de Léonin, lorsque se fit le développement polyphonique, la cathédrale n'était donc pas encore terminée. Léonin, nous dit Anthony Pitts, aurait fait jouer le chœur dans des parties cloisonnées de la cathédrale. On peut supposer que dans ces conditions Léonin fit jouer son chœur dans une acoustique beaucoup moins réverbérante que celle de la cathédrale terminée. Il est possible que cette situation ait favorisé le développement d'une complexité polyphonique qui fut par la suite conservée à la fin de la construction (sous la période de Pérotion qui succéda à Léonin). C'est peut être ce contexte historique qui fit qu'on développa au XVII<sup>ième</sup> siècle le style polyphonique le plus complexe de l'époque dans ce que John Julius Norwich appela "la première cathédrale bâtie à une échelle vraiment monumentale"<sup>35</sup>.

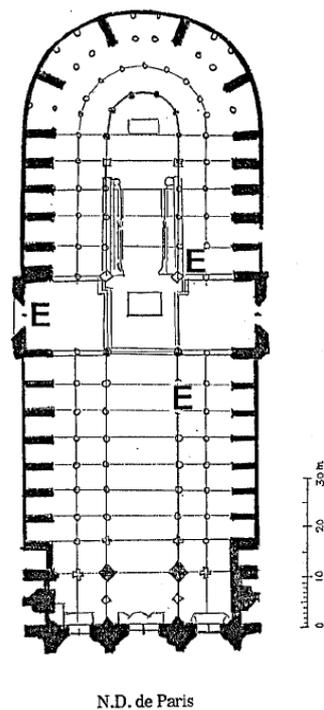


FIGURE 1.22 – Points d'émissions pour l'étude acoustique de Michèle Castellengo, Benoit Fabre et Eric Vivie réalisée en 1978

35. John Julius Norwich, ed. *Great Architecture of the World.*, 2001, p116.

### 1.3.5.3 Mémoire, Acoustique et improvisation

Les *Tripla* et *Quadrupla* n'avaient parfois que la partie soliste d'écrite. Il était en effet courant à l'époque de ne pas noter toutes les notes de la partition. Les ornements notamment étaient laissés "au bon goût" des interprètes. On les appelle alors les *colores*, terme emprunté à la rhétorique. Il y a donc un élément d'improvisation dans ces pièces, cependant les ornements étaient alors très codifiés. Jean de Garlande (XIII<sup>ème</sup> siècle) nous les présentent ainsi :

« Color est la beauté du son ou phénomène auditif par l'intermédiaire de quoi le sens de l'ouïe prend plaisir. »

« Et il [*le color*] se fait de bien des manières, soit au moyen d'un son ordonné [*sono ordinato*], soit par l'ornementation du son [*in florificatio soni*], ou au moyen d'une répétition dans la même voix ou dans une autre [*repetitione eiusdem vocis vel diversae*]. » (REIMER 1972)

Selon Guillaume Gross (GROSS 2006) : le *Sono ordinato* (ou *color in ordinatione*) est la répétition d'une note dans un motif étagé sur une quinte ou dans une succession de formules parallèles. Le *Florificatio vocis* est la répétition d'une ou de plusieurs notes dans un mouvement mélodique conjoint. La *repetitio diversae vocis* (ou « chiasme ») est un échange entre les voix supérieures pour agencer les parties entre elles. Leur point commun est la répétition. Pour l'interprète il s'agit donc d'un travail de mémorisation, à la fois des mélodies mais aussi de tout un jeu d'ornementations qui font "sensation". Jean de Garlande, premier théoricien majeur de cette période, en parle ainsi dans son traité *De mensurabili musica* :

« La répétition de la même [note/voix] est le color qui fait qu'un passage (ou un son) inconnu devient connu ; et, grâce à cette reconnaissance, l'audition procure du plaisir. Faites des colores plutôt que des sons inconnus et plus il y aura de colores, plus le son sera connu, et s'il est connu, il plaira » (REIMER 1972)

Jean de Garlande fait ici apparaître une autre mémoire : celle de l'auditeur. Au fur et à mesure que le public devient connaisseur, les jeux de colores deviennent de plus en plus complexe, les ornementations se font alors à plusieurs échelles ; de la figure à la phrase puis au bloc :

« La répétition mélodique organise et structure la polyphonie selon des schémas similaires à ceux de la rhétorique. Opérant à petite échelle, l'ornementation joue également sur une plus grande échelle et divise le discours musical en plusieurs grandes propositions mélodiques. La redite de figures permet de construire de larges blocs ayant chacun leur propre caractère mélodique, variant ainsi le propos afin d'en ménager les effets. De la figure à la phrase, de la phrase au bloc puis sur l'ensemble de la composition, l'on découvre un discours musical fondé sur les colores et la repetitio. L'organum se présente comme un jeu complexe fait de figures imbriquées, combinées entre elles où les possibilités de variation, de construction sont infinies. Entre deux consonances, les chantres développent une idée ornementale et la saturent dans un dialogue sans cesse renouvelé. » GROSS 2006)

L'auteur nous explique que l'étude polyphonique des chantres atteint alors un très haut niveau. Seules une élite de clercs peuvent chanter les *trippla* et *quadrupla* présentés lors des grandes fêtes liturgiques. Cette virtuosité s'explique en deux points ; la place fondamentale de la mémoire dans la culture médiévale (YATES 1975) et l'apprentissage approfondi de la langue latine et de la versification à des fins didactiques et mnémotechniques. Concernant la mémoire, Jean Claude Schmidt nous rappelle qu'à l'époque les engagements écrits n'ont

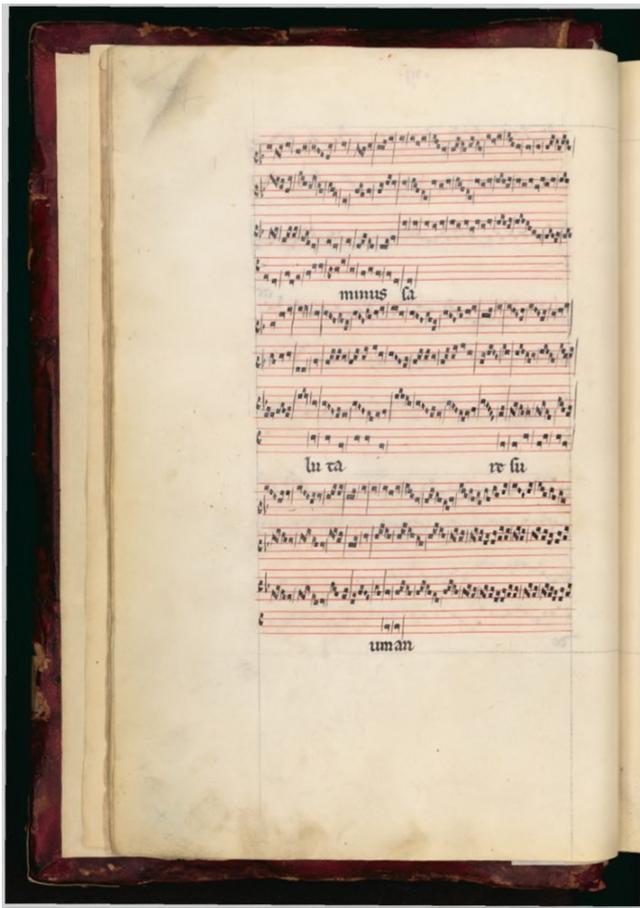
pas une valeur importante, c'est l'engagement oral qui compte (SCHMITT 1990). Guillaume Gross rajoute que la majorité de l'enseignement se faisait alors par coeur. On recommandait d'ailleurs de chanter les organums de mémoire afin d'atteindre une dimension d'éthique, un sommet de l'art musical (GROSS 2006).

« La rhétorique mnémotechnique n'avait pas pour but de donner aux étudiants une mémoire prodigieuse où serait stocké tout le savoir qu'ils étaient susceptibles d'avoir à répéter à l'examen, mais de donner à l'orateur les moyens d'inventer son matériau à l'avance, et surtout, sur le moment. Il est donc plus opératoire de considérer la memoria comme un art de la composition. » Mary J. Carruthers, *Machina memorialis*, p. 20. (CARRUTHERS 2002)

#### 1.3.5.4 Le Rythme

Pour permettre cette polyphonie et tout ce travail de répétitions, les clercs ont eu besoin d'un langage d'écriture plus poussé que le celui du chant grégorien, notamment du point de vue rythmique. La flexibilité rythmique du chant grégorien ne posait pas de problème puisque tout le choeur chantait à l'unisson. Mais avec le développement des *Tripla* et *Quadrupla* et de leur complexité d'ornementation, il fallut trouver un moyen de garder les différentes voix ensemble : ce qui mena à l'invention de la notation mesurée.

« La polyphonie parisienne a forcé l'admiration des médiévaux, et tout au long du XIII<sup>e</sup> siècle les œuvres connurent une très grande fortune critique longtemps après leur exécution au chœur de Notre-Dame. Invention sans précédent dans l'histoire de la musique, le répertoire est en effet consigné dans un langage rythmique inédit, la notation mesurée. Ce nouveau langage, qui suggère un comptage désormais précis des valeurs de notes, a suscité un immense engouement chez les intellectuels. De tous les éléments mentionnant, transmettant ou évoquant l'organum, c'est le paramètre rythmique qui fit l'objet de toute leur attention, et ils s'attachent à décrire et expliquer toujours plus précisément les innovations des scribes. À l'aide d'un vocabulaire emprunté à la scolastique et à ses méthodes, ils établissent des normes de lecture et bâtissent ainsi progressivement une théorie capable d'expliquer la notation dans laquelle les chants sont consignés. L'élaboration de six modes rythmiques « musicaux » calqués sur ceux de la prosodie définis dès 1199 par Alexandre de Villedieu dans le *Doctrinale* conditionne et légitime le développement de ce que l'on appellera désormais la *musica mensurabilis*. » (GROSS 2006)



(a) Exemple de Quadrupla, écriture sur 5 lignes



(b) Exemple de Quadrupla, notation mesurée

FIGURE 1.23 – Second *Magnus Liber Organi* de la cathédrale de Paris, écrit par Pérotin, reprenant celui écrit par Léonin



FIGURE 1.24 – Exemple de quadrupla du *Magnus Liber Organi* de 1250, notation mesurée

## 1.4 Innovations spatiales dans la musique acoustique : musique sacrée / musique profane

### 1.4.1 Séparation spatiale dans la Renaissance

On considère le début du XV<sup>ième</sup> siècle comme sonnant la fin de la musique médiévale et le début de la musique Renaissance. Ce fut l'occasion d'un renouveau de l'intérêt pour les cultures antiques grecques et romaines. C'est de cette volonté de faire renaître la musique des Antiques que provient le terme "Renaissance". Les compositeurs de cette période ont ainsi cherché à imiter les musiques des Grecs anciens. Ils ne disposaient cependant que d'écrits théoriques de cette époque et ont donc élaboré leur propre interprétation de ces écrits. Notons le travail de Franchino Gaffurio, théoricien, qui travailla notamment les concepts des modes, des consonances et dissonances, la portée du système tonal, les diapasons, les relations mot-musique et l'harmonie de la musique (GROUT et V. PALISCA 2014).

La Renaissance sera notamment le passage de la gamme Pythagoricienne à la gamme de Zarlino. Cette gamme a notamment l'avantage d'avoir des tierces et sixtes plus justes, les rendant ainsi considérés comme des intervalles consonants. Ainsi, on commence à pouvoir les utiliser avec des quintes, quarts et octaves (déjà très utilisées et seules consonances du Moyen-Âge). Cela va donc permettre un travail sur l'harmonie plus poussé. À cette époque, le contrepoint se complexifie notamment par l'ajout de règles pour contrôler ces dissonances (GROUT et V. PALISCA 2014). Le manuel de référence pour le contrepoint à cette époque fut le *Liber de arte contrapuncti*, 1477.

L'invention de l'imprimerie vers 1450 aura une influence marquante sur la diffusion de la musique ; l'impression musicale sera inventée dès 1476 par Hahn à Rome et sera accompagnée par l'invention des tablatures pour claviers et instruments à cordes pincées. La Renaissance verra aussi un important développement organologique des instruments de musique influençant la musique instrumentale à devenir plus indépendante - bien que la musique vocale sacrée reste prédominante. Notons l'impression de la première partition musicale polyphonique en 1501 par Ottaviano Petrucci et le premier livre imprimé de madrigaux en 1566, *Il primo libro de madrigali*<sup>36</sup>, composé par Maddalena Casulana.

On considère que c'est lors de la Renaissance que la musique polyphonique atteindra son apogée, notamment à Venise. Pourtant au premier abord, les longs temps de réverbérations des églises vénitienes de la Renaissance semblent ne pas correspondre à un style avec une grande complexité polyphonique (HOWARD et MORETTI 2010). Certaines simulations d'acoustiques récentes ont pu montrer que la large audience et les nombreuses tapisseries lors de ces cérémonies pouvaient diminuer le temps de réverbération de ces églises de moitié (B. B. BOREN 2011, B. B. BOREN 2013, BONSI et al. 2013). Mais ce qui permit notamment cette complexité fut le placement spatial particulier des ensembles à Venise à cette époque (que nous évoquerons ci-dessous). Néanmoins, il est intéressant de noter que l'innovation polyphonique ne se fera plus uniquement au travers de la musique sacrée, comme pour les siècles précédents, mais aussi au travers de la musique profane. Vers la fin du XVI<sup>ième</sup> siècle, le madrigal acquiert une complexité croissante et même un chromatisme exacerbé ; en exemple les madrigaux de Luzzasco Luzzaschi, Vittoria Aleotti, Luca Marenzio ou encore Carlo Gesualdo. Vers la fin du XVI<sup>ième</sup> siècle, la musique polyphonique sacrée (par exemple, les messes d'Ockeghem et d'Obrecht)

---

<sup>36</sup>. Madrigal : C'est forme polyphonique vocale a cappella, non accompagnée par des instruments. Elle se développe entre le XVI<sup>ième</sup> et XVII<sup>ième</sup> siècle, et pouvait être écrite pour 2 à 8 voix (plus fréquemment entre 3 et 5)

retrouve elle aussi une certaine complexité mais on constate dès la première partie du XVI<sup>ème</sup> siècle un retour vers plus de dépouillement, perceptible dans les œuvres de Josquin des Prés ou de Palestrina.

C'est à Florence que naîtra réellement cette ambition de faire revivre les formes dramatiques et musicales de la Grèce antique - notamment avec le groupe de musiciens *Camerata de Bardi*. On fera alors de nouveau appel à la monodie, reprenant la forme des déclamations et l'accompagnement musical simplifié qui donnera le *stile rappresentativo*<sup>37</sup> des opéras baroques. Ce courant se retrouve donc à l'opposé de la polyphonie des madrigaux de l'époque, ces deux courants profanes cohabiteront néanmoins.

#### 1.4.1.1 Basilique Saint Marc & *Coro Spezzato*

C'est à la toute fin du XVI<sup>ème</sup> siècle (1550-1610) à Venise que se déroule une innovation majeure dans l'utilisation de l'espace : les *Corzi Spezzati* ou chœurs séparés. Cette pratique consiste en une composition pour plusieurs chœurs séparés spatialement dans le lieu de représentation. Cette innovation se développa plus précisément dans la basilique Saint-Marc. On y plaça alors plusieurs ensembles de chœurs (écriture polychorale) se répondant en ce que Stockhausen appellera l'*antiphonie spatiale*<sup>38</sup>.



FIGURE 1.25 – Place Saint-Marc à Venise, 1740-1750 Musée d'Art contemporain de Rolandseck

L'intérêt grandissant pour cette polychoralité à Venise serait à attribué à Adrien Willaert qui fut nommé maître de la chapelle de la Basilique Saint-Marc en 1527 (ARNOLD 1959, HOWARD et MORETTI

37. *stile rappresentativo* ou « style représentatif », « style dramatique » ou simplement « récitatif »

38. l'*antiphonie* est l'alternance de deux chœurs, ici l'adjectif spatial met l'accent sur la position séparée des chœurs dans un espace

2010). Il voyagea beaucoup dans le nord de l'Europe notamment avec la cour du cardinal Hippolyte Ier d'Este et ce serait à l'occasion de ces voyages qu'il aurait développé cet intérêt pour la séparation spatiale. Ainsi le compositeur flamand Ockeghem pratiquait dès la fin du XV<sup>ième</sup> siècle une réelle écriture polychorale en France.

Ockeghem est considéré comme un des trois grands compositeurs de son époque avec Guillaume Dufay et Josquin Des Prés. À la fin de sa vie, ces oeuvres seront notamment présentées à la place de celles de Guillaume Dufay comme modèles à ses contemporains, par le traité *musiques pratique* du brabançon<sup>39</sup> Johannes Tinctoris. Ainsi, bien que Venise développera et fera rayonner cette pratique dans toute l'Europe, il semblerait que ces expérimentations aient été tout d'abord menées à la cour de France, ou du moins dans le Nord de l'Italie (B. BOREN 2018). « On raconte qu'en 1520, lors des cérémonies qui marquèrent la rencontre du roi de France et du roi d'Angleterre, on exécuta une messe qui avait été divisée en sections réparties en alternance entre les chœurs des deux nations. » (STOCKHAUSEN 1958).

Les considérations musicales que prendra Willaert dans ses compositions polychorales sont très intéressantes. Tout d'abord, il implémenta une des premières utilisations documentée de doubles lignes de basses afin de garder les différents chœurs ensemble malgré l'espacement. Ensuite, il a fait attention à ce qu'il y ait une grande homogénéité de timbres dans l'aire d'audience en donnant à chaque chœur séparé une large bande fréquentielle. Ainsi, un auditeur placé trop proche d'un des chœurs ne risquait pas d'entendre seulement le soprano ou la basse par exemple. Il semblerait donc que la séparation spatiale des chœurs soit à la base même du style *coro spezzato* et qu'il ne s'agisse pas seulement d'une possibilité de placement (MORETTI 2004).



FIGURE 1.26 – Intérieur de la basilique Saint-Marc

---

39. Habitant du duché de Brabant, situé entre les actuels Pays-Bas et la Belgique

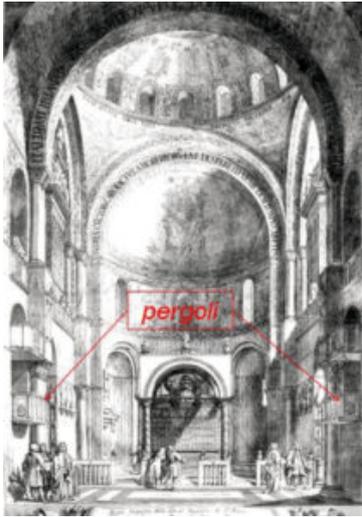


FIGURE 1.27 – Antonio Visentini (1688-1782), Vue du sanctuaire, représentation des pergoli de Sansovino, images prise de *la Iconografia della Ducal Basilica dell'Evangelista Marco*

Laura Moretti and Deborah Howard, dans leur livre *Sound and Space in Renaissance Venice* (HOWARD et MORETTI 2010), racontent qu'à cette période le dirigeant de Venise, le *doge*<sup>40</sup> Andrea Gritti, serait devenue trop gros pour atteindre l'ancien trône en or situé en hauteur dans la basilique Saint-Marc. Il aurait donc déplacé en 1530 son trône au niveau du presbytérium<sup>41</sup>. Après ce déplacement, l'architecte en chef Jacopo Sansovino fit construire deux *pergoli*, des balcons pour les chanteurs, de chaque côté du nouveau trône (MORETTI 2004). Ces balcons auraient servit à créer des effets stéréophoniques à l'emplacement du doge. Certaines mesures acoustiques dans la basilique tendent à montrer que la place du trône était idéale pour avoir un bon rapport entre clarté et résonance, le reste de la congrégation se trouvait ainsi à une distance bien au delà de la distance critique<sup>42</sup> (HOWARD et MORETTI 2010).

D'autres études ont montré que ce constat provient du placement des balcons par Sansovino. Les balcons permettaient d'avoir une ligne de vue directe avec le doge, qui lui permettait de recevoir le son direct des choeurs élevés tandis que le reste de la congrégation ne recevait pas ce son direct et recevait donc en premier des premières réflexions et donc une perte de clarté et de localisation (BONSI et al. 2013).

La forme de base de cette polychoralité, nous dit Stockhausen, était donc le dialogue, et la configuration vénitienne s'y prêtait parfaitement. La basilique Saint-Marc, avec ces deux orgues face à face, favorisait cette forme. Ainsi pour Stockhausen, les effets d'échos que provoque cette séparation des choeurs seront à l'origine de l'écriture en imitation qui aboutira sur le *ricercare*<sup>43</sup> puis la fugue. Les jeux de questions-réponses n'étaient pas nouveaux dans la musique religieuse. Ainsi le Moyen-Âge a connu une longue tradition de chants alternés et on retrouve des traces de ces pratiques dès l'Antiquité (SLOTKI 1936). Cependant, nous dit Stockhausen, Cipriano de Rore fut le premier à appliquer ce jeu alterné et séparé spatialement directement à l'intérieur de la structure du madrigal.

Pour Stockhausen, les formes plus tardives composées de jeux symétriques de type "question-réponse", demi-période "ouvertes" et demi-périodes "closes", ainsi que le principe formel de la période Classique de la reprise simple ou de la corrélation de phrases à deux, quatre ou huit temps proviennent indirectement de ces jeux spatiaux du XVI<sup>ième</sup> siècle (STOCKHAUSEN 1958).

« Répétez une fois, après quoi vous pouvez poursuivre »<sup>44</sup>, Debussy

40. Le doge de Venise était le magistrat en chef et le dirigeant de la république de Venise entre 726 et 1797.

41. Dans l'église le presbytérium (ou chancel en anglais) correspond à l'espace de la nef réservé au clergé, comprenant le choeur et le sanctuaire.

42. La distance critique en acoustique correspond à la distance d'une source sonore pour laquelle le niveau du son direct équivaut à celui du son réverbéré.

43. Basée sur le procédé de l'imitation. C'est une forme contrapuntique plus ancienne et moins élaborée que la fugue, cette dernière exploite un thème générateur de façon systématique tandis que le *ricercare* enchaîne des épisodes différents qui peuvent être sans lien thématique.

44. Debussy, cité par Franck Martin

À la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle Giovanni Gabrielli (neveu d'Andrea Gabrielli) dépassera la "forme constructive" jusqu'alors présente; « la polychoralité atteignait des effets de sonorités et de timbre qui ouvraient à un univers musical tout à fait nouveau et annonçaient la fin de la Renaissance »<sup>45</sup>(STOCKHAUSEN 1958). Il composa notamment ses *Cantiones Sacrae* en 1578 pour six à seize voix et ses *Symphonia Sacrae* en 1597 et 1615.

## 1.4.2 Baroque & Réformes

On considère généralement le début du baroque à l'avènement de l'opéra à Venise en 1600, en particulier avec *l'Orfeo* de Monteverdi (1607). La fin du baroque elle est généralement placée en 1750 à la mort de J. S. Bach considéré comme le compositeur le plus influent de cette époque. Le baroque succède donc à la Renaissance, considéré comme l'apogée de la polyphonie. Il précède le classicisme, et la naissance d'éléments discursifs et rationnels, la standardisation du solfège et de l'harmonie. Le style baroque est notamment reconnaissable par sa *basse continue*, très stable qui soutient la mélodie.

### 1.4.2.1 Styles baroques & affirmation de la Nation

La période baroque voit la naissance de plusieurs écoles nationales très importantes ayant chacune leurs particularités. On nommera notamment le *baroque français*, le *baroque italien*, le *baroque germanique* et le *baroque anglais*. Durant la première partie de cette période les deux styles majeurs et d'une certaine manière rivaux, furent les styles français et italien.

Au cours du XVII<sup>ème</sup> siècle s'opère une appropriation de plus en plus marquée des arts en vue du renforcer l'influence culturelle de l'État. L'état se définit davantage au-dessus de l'individu et voit l'art comme un moyen de renforcer des liens identitaires et nationaux (ZIEGLER 2018). L'apogée de cette pratique se fera sous Louis XIV avec *l'absolutisme*<sup>46</sup> et la construction du château de Versailles et de l'utilisation de tous les arts à la gloire du "Roi-Soleil".

La France et l'Italie s'observent l'une et l'autre. En 1724 Couperin sortait son recueil *les goûts réunis* deux ans après son recueil *les concerts royaux*. Dans ces deux recueils Couperin présente les pièces de musique de chambres qu'il avait écrites pour le Roi-Soleil.

« Les pièces qui suivent sont d'une autre espèce que celles que j'ai données jusqu'à présent. Elles conviennent non seulement au clavecin, mais aussi au violon, à la flûte, au hautbois, à la viole et au basson. Je les avais faite pour les petits concerts de chambre où Louis quatorze me faisait venir presque tous les dimanches de l'année. . . Si elles sont autant du goût du public qu'elles ont été approuvées du feu Roi, j'en ai suffisamment pour en donner dans la suite quelques volumes complets.  
» Couperin, *les concerts royaux*, Préface, 1722

Dans ce recueil Couperin essaya de s'inspirer des thèmes italiens et de les reprendre dans un style français. Pour Couperin ces deux styles sont les deux principaux de l'époque et il veut leur rendre hommage en

---

45. Stockhausen, *Musik im Raum*, dans *Karlheinz Stockhausen - comment passe le temps, essais sur la musique 1952-1961*, Contrechamps éditions, p218

46. L'absolutisme est un concept lié aux réactions de régimes politiques centraux, généralement monarchiques. [...] L'absolutisme est lié aux périodes de centralisation politique et militaire caractérisées par la consolidation de la souveraineté territoriale des États. [...] ainsi qu'une importance accrue du rôle de la cour et surtout du roi dont la sacralité ne se porte plus simplement sur la fonction mais sur la personne physique. (**Wikipedia**)

sortant du clivage de la nation (COUPERIN 1724, Preface). Partant de cette inspiration il essaye de les faire écrire "à la française", notamment pour le roi. La proposition était risquée car la musique française encouragée par le roi faisait partie du rayonnement culturelle de la France et de la puissance de Louis XIV à l'étranger. Le pari est réussi, Pierre Citron nous dit que Couperin n'a guère composé de musique aussi française (CITRON 1956). Il s'autorise quelques détours ; il sort des orchestrations habituelles, du style de la danse et donne des titres à certains de ses morceaux. Ces deux derniers points sont importants car à l'époque la musique de chambre est majoritairement de la musique de danse, et l'on n'avait pas non plus l'habitude de donner des noms aux morceaux durant la première partie de la période baroque. La musique de chambre n'est alors pas considérée comme un art aussi important que la musique sacrée ou les opéras, nous en reparlerons ci-dessous lorsque nous aborderons la section sur l'opéra. Couperin réussit le pari d'allier le charme et l'accessibilité à l'italienne avec un style "Louis XIV" nous dit Michel Rusquet, critique musical (RUSQUET 2018).

Les deux nations, bien que s'inspirant l'une de l'autre se livrent une bataille culturelle. Un bon exemple de cette rivalité fut la *querelle des bouffons* ou *guerre des Coïns*. C'est une querelle qui opposa au cours des années 1752 – 1754 les défenseurs de la musique française, derrière Jean-Philippe Rameau (coin du Roi), et les partisans d'une ouverture vers d'autres horizons musicaux, réunis autour du philosophe et musicologue Jean-Jacques Rousseau (coin de la Reine), partisans de l'italianisation de l'opéra français. Le scandale débute lorsqu'une troupe itinérante italienne, celle d'Eustacchio Bambini, s'installe à l'Académie royale de musique pour y donner des représentations d'intermezzos et d'*opéra buffa*<sup>47</sup>. Ce qui créa la polémique ne fut pas la pièce en elle-même mais sa représentation à l'Académie royale de musique - qui avait le monopole de l'opéra en France. Pour mieux comprendre cette rivalité présentons rapidement les deux styles ;

Le style baroque français se constituera de mélodies "raisonnables" mais avec un travail sur l'ornementation très codifié. Les codes dans la musique sont alors à l'image de l'étiquette de la cour Versaillaise. On travaille un style millimétré dans une recherche de raffinement. On travaille la prononciation, on classe les "ornements" et le style français dans de nombreux manuscrits (HOTTETERRE 1715, COUPERIN 1716, DE MONTECLAIR 1736, QUANTZ 1752). Arrêtons-nous un instant sur le traité *Principes de Musiques* de Mr de Montclair en 1736, et intéressons-nous à la notation de cette période (DE MONTECLAIR 1736). La première leçon que nous donne Mr de Montclair est très intéressante dans le cadre de notre projet et fait écho aux réflexions de notre prochain chapitre ((**Voir section Mouvement**) :

« *Le Mouvement est l'origine du Son*

*Le Son est l'objet matériel de la Musique* » Mr de MONTECLAIR, *Principes de Musique*, 1736, p 7

Mr de Montclair nous rappelle les sept notes telles que nous les connaissons (Ut<sup>48</sup>, Ré, Mi, Fa Sol, La, Si), les intervalles<sup>49</sup> (Seconde, Tierce, Quarte, Quinte, Sixte, Septième et Octave), les tons et demi-tons<sup>50</sup>. Il nous présente sept *clefs*<sup>51</sup> - pour adapter l'écriture au registre des voix, des instruments - les *bémols* et *dièses*<sup>52</sup>,

---

47. L'opéra buffa est un genre d'opéra italien traitant d'un sujet comique. **Wikipedia**

48. Ut : Ancien nom du Do

49. En musique, l'intervalle entre deux notes est l'écart entre leurs hauteurs respectives.

50. La tonalité est le langage musical utilisé en occident entre le XVIII<sup>ème</sup> siècle et le XIX<sup>ème</sup> siècle. Une tonalité se définit comme une gamme de huit notes, désignée par sa tonique et son mode (majeur ou mineur)

51. signe graphique placé au début de la portée qui indique la hauteur des notes associées à chaque ligne.

52. Altérations destinées à indiquer sur une partition de musique un abaissement ou une montée d'un demi-ton chromatique de la hauteur naturelle des notes associées.

les modes (majeur, mineur), et ce qui nous intéresse particulièrement : la notation de la valeur des notes (leur durée).

La clé de Sol sur la première ligne et celle de Fa sur la quatrième, se rapportent pour l'ordre et pour le nom des notes . Exemple .

Les différentes positions de ces trois Clés, produisent sept changements, par le moyen desquels on peut trouver les sept noms de notte, sur chaque ligne et dans chaque espace

EXEMPLE .

FIGURE 1.28 – Présentation de la notation des clefs par Mr de Monteclair, *Principes de musique*, 1736, p9

Table de la valeur des notes comparées les unes aux autres .

I

La Ronde est unique dans sa valeur . Elle vaut deux Blanches, quatre Noires, huit Croches, et seize Double-croches, de sorte qu'elle contient toutes les autres valeurs .

Ronde ..... 1.  
 Blanches ..... 2.  
 Noires ..... 4.  
 Croches ..... 8.  
 Double-croches ..... 16.

On règle là juste durée des sons ou Notes, par plusieurs Temps ou mouvements égaux qui se font de la main : c'est ce qu'on appelle, Battre la mesure

FIGURE 1.29 – Présentation de la notation des durées par Mr de Monteclair, *Principes de musique*, 1736, p25

La notation de la musique a beaucoup évolué depuis la *notation mesurée* de l'École de Notre-Dame. Cela permet une plus grande précision d'écriture, qui permet notamment la complexité d'écriture des *cadences*<sup>53</sup> baroques françaises (QUANTZ 1752).

53. le mot "cadence" a plusieurs significations à l'époque baroque : trille, tremblements, ornementation, moment soliste

23

<i>La Ronde pointée</i> <i>vaut trois Blanches.</i>		<i>La Blanche pointée</i> <i>vaut trois Noires.</i>	
<i>La Noire pointée</i> <i>vaut trois Croches.</i>		<i>La Croche pointée</i> <i>vaut trois double-croches.</i>	

*Maniere de concevoir et d'étudier la Tenüe et le point, . ,*



FIGURE 1.30 – Présentation de la notation des valeurs pointées par Mr de Monteclair, *Principes de musique*, 1736, p29

Le style italien quant à lui sera plus porté sur le "bel canto" c'est-à-dire une recherche du timbre, mêlant virtuosité vocale et utilisation d'ornements, de nuances et de vocalises sur une tessiture plus étendue. Le style italien privilégie une mélodie virtuose accompagnée et a déjà un travail par accord qui sera amplifié à la période classique. Le bel canto était notamment chanté par les *castrats*<sup>54</sup>. La pratique du *castrat* c'est surtout développé en Italie. En France on leur préfère les voix de *haute contre*<sup>55</sup>. Ce style italien proviendra notamment du *stile rappresentivo* qui se développa avec la naissance de l'opéra.

Durant la seconde moitié du baroque, les tensions commenceront à s'apaiser, le style allemand est de plus en plus apprécié - réussissant le pari des goûts réunis. Il fait un mélange entre les arabesques italiennes et les ornements précis français, tout en conservant un travail polyphonique et modal important provenant de la Renaissance. Les Anglais rayonneront à leur tour avec Haendel et Purcell.

« Les choses bougent en profondeur : après le « règne » de Lully, et surtout après la déferlante corellienne qui s'est abattue sur la France musicale à la fin du XVIIe siècle, l'heure va être de plus en plus aux « goûts réunis », à l'importation de la sonate en trio et au développement de formes nouvelles du type sonate ou concerto pour instrumentiste soliste. » (RUSQUET 2018) (concernant la flute : (QUANTZ 1752, HOTTETERRE 1715, le clavecin (COUPERIN 1716))

Parallèlement, on va assister en France à l'émergence de deux instruments en tant que solistes : le violon et la flûte traversière.

54. Un castrat est un chanteur de sexe masculin ayant subi la castration avant sa puberté, dans le but de conserver le registre aigu de sa voix enfantine, tout en bénéficiant du volume sonore produit par la capacité thoracique d'un adulte.

55. Technique vocale française baroque qui se rapproche de la tessiture du contre-ténor.

### 1.4.2.2 Opéra & Théâtres à l'italienne

Comme nous l'avons vu au début du chapitre, le baroque est la période de la naissance de l'opéra. On considère généralement le début de cette période avec l'*Orfeo* de Claudio Monteverdi. Quand bien même ce ne fut pas le premier opéra italien (le premier opéra, *Dafne*, étant attribué à Jacopo Peri en 1598 chez le comte Bardi). Monteverdi fut néanmoins l'un des plus influents et l'élément déclencheur de la propagation du style. Les opéras de Monteverdi appliquent les bases de l'opéra, définies à Florence par la *Camerata de Bardi* à la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle, en réaction envers les excès de la polyphonie de la Renaissance (**voir chapitre Renaissance**). On trouve à la période baroque un regain d'intérêt pour la tragédie antique et on cherchera donc à construire de nouveaux lieux pour la représentation de cet art.

Alors que les théâtres antiques avaient été délaissés durant le Moyen Âge, au XV<sup>ème</sup> siècle, le théâtre chanté à caractère religieux retrouvait une place de choix, de par les représentations des *mystères*<sup>56</sup> joués sur le parvis des cathédrales, notamment à l'occasion de festivités.

Au XVI<sup>ème</sup> siècle, naît le théâtre à l'italienne. Il est le résultat d'une réflexion sur la construction d'un nouvel espace théâtral. Les architectes italiens cherchaient une communion entre la pratique du théâtre de cour - joué dans des cours et des salles rectangulaires - et le théâtre grec et latin (**voir section naissance du théâtre grec**). Les premiers prototypes en bois existent déjà dès 1513 (*Teatro sul Campidoglio*), mais celui qui marqua l'histoire fut le *Teatro Olimpico* de Vincence - commandité par l'*Académie Olympique*. La construction débuta en 1580, il fut dessiné par l'architecte Andrea Palladio, à sa mort le projet est repris par son disciple Vincenzo Scamozzi.

Andrea Palladio dota la salle de l'auditorium d'un demi-cercle sur le modèle des théâtres grecs anciens et d'un proscenium inspiré du théâtre romain. La scène - dont le dessin est dû à Vincenzo Scamozzi - a une profondeur de 12 mètres et joue avec la perspective à la demande explicite de l'Académie Olympique. L'ajout d'ailes elles aussi en perspective, rend l'illusion d'autant plus grande.



(a) *Teatro Olimpico*, Vue de la scène

(b) *Teatro Olimpico*, Vue des gradins et plafond

FIGURE 1.31 – Teatro Olimpico de Vincence, construit par Andre Palladio à partir de 1580.

56. Spectacle semi-religieux et semi-populaire, qui se représentait au Moyen âge sous le porche ou sur le parvis des églises et à l'embellissement duquel participaient les orgues et des instruments de musique de toute nature.



FIGURE 1.32 – Teatro Olimpico de Vincence, perspective en profondeur

La forme des théâtres à l'italienne évoluera encore et sera reconnaissable par trois caractéristiques particulières :

1. La forme de la salle en *fer à cheval*.
2. La suppression des gradins au profit de la construction de loges, séparées les unes des autres.
3. Une plus grande profondeur de la scène que dans les théâtres de la Renaissance - pour permettre des jeux de perspectives et de pouvoir jouer dans le décor plutôt que devant.

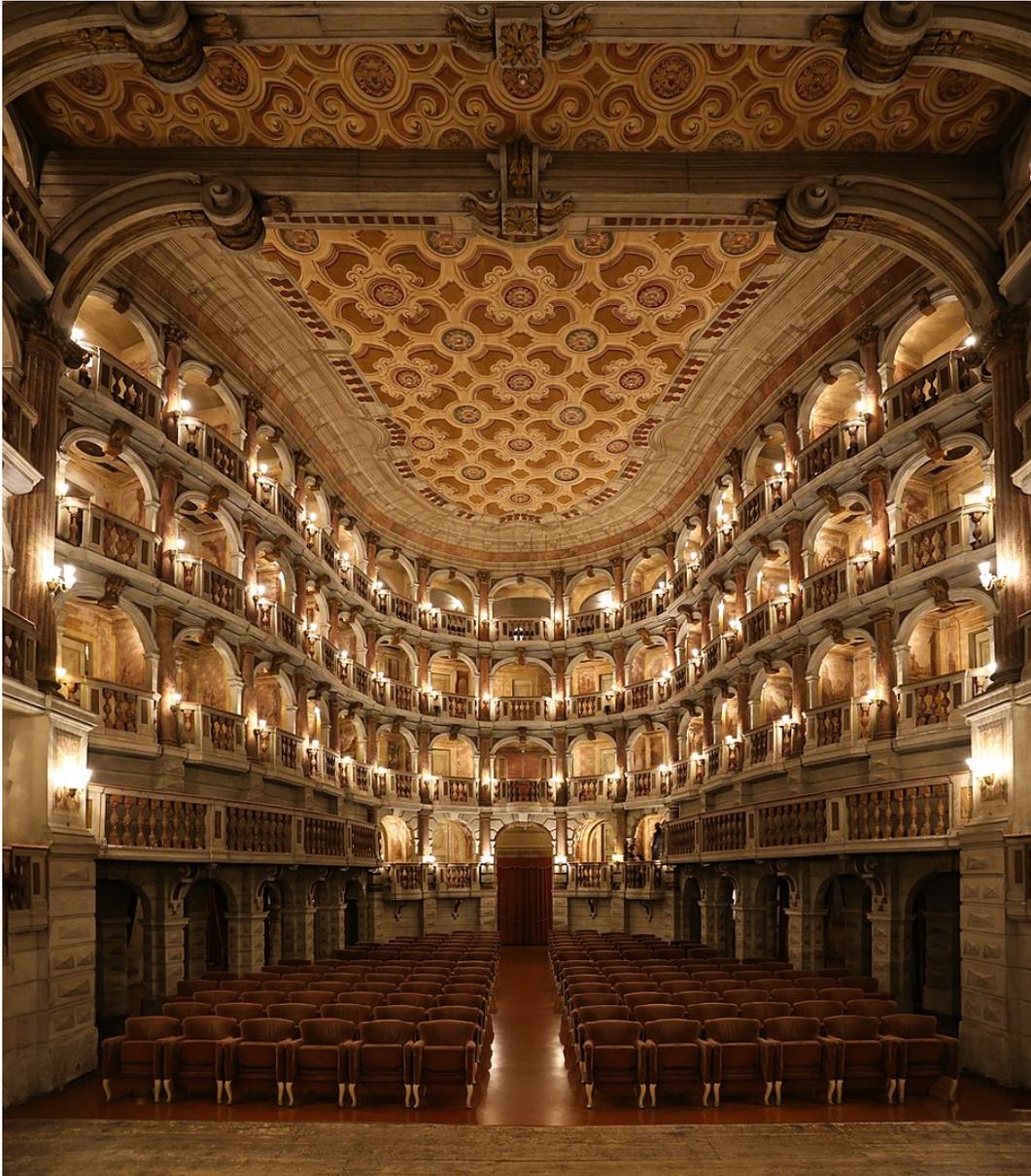


FIGURE 1.33 – Teatro Bibiena dans l'Accademia degli Invaghiti à Mantova, construction baroque à partir de 1767 à la place de l'ancien théâtre où Monteverdi aurait représenté la première de son *Orfeo*

Dans les premiers théâtres à gradin seuls les galeries pour les spectateurs étaient protégées par un toit. La scène était à ciel ouvert, au milieu de l'espace ou en avancée dans le parterre. Au XVII<sup>ème</sup> siècle les théâtres italiens deviendront clos et couverts et comprennent une séparation entre les spectateurs et les acteurs par un *cadre de scène*<sup>57</sup> et, à sa base, le plancher de l'avant-scène ou *proscenium*.

57. Le cadre de scène délimite sur un plan vertical les trois côtés formant l'ouverture entre la salle de spectacle et la scène.

Jürgen Meyer, acousticien, nous renseigne sur l'acoustique de ces théâtres dans le livre *Acoustics and the Performance of Music* (MEYER 2009) :

« Les passages de *bel-canto* nécessitent une réverbération suffisante, si possible aussi une certaine sensation d'espace, pour que la voix atteigne une brillante plénitude (*luminous fullness*), et la ligne mélodique une continuité tonale. De plus, les cantateurs veulent ressentir une certaine sensation de résonance de la salle qui leur donne une sensation de sécurité dans la projection de leur voix, mais aussi une sécurité d'ajustement avec l'ensemble (qui l'accompagne). Ainsi, le temps de réverbération d'un opéra doit être plus court que celui d'une salle de concert (classique). » (MEYER 2009, p 234, en anglais dans le texte)

Le temps de réverbération d'un opéra se situe typiquement entre 1 et 1.5 secondes en fonction de sa taille, nous explique Jürgen Meyer. Il continue plus loin :

« Dans presque tous les anciens théâtres la fosse d'orchestre était rarement située en dessous du niveau du public. Le son était donc brillant et transparent grâce aux hautes fréquences qui n'étaient quasiment pas atténuées. [...] Le petit opéra baroque de Böhmisch Krumau (Cesky Krumlov) fut l'une des rares exceptions, la fosse d'orchestre était située à 2.7 mètres en dessous du niveau du public. Quand la fosse est abaissée, le son direct est bloqué par les bords de la fosse pour le public aux premiers rangs, le son de l'orchestre est alors affaibli par cette diffraction. » (MEYER 2009, p 239, en anglais dans le texte)

La disposition du public en cercle et sur plusieurs étages de galeries permet d'avoir à des distances similaires l'ensemble du public afin de maximiser l'intelligibilité et d'éviter un temps de réverbération trop long dû à une salle qui serait trop profonde (**Voir section sur l'évolution de la taille des églises**). Le proscenium a une légère pente vers le public afin d'améliorer la projection de la voix. Le plafond permet d'améliorer la balance entre l'orchestre et les chanteurs, tandis que les réflexions sur les balcons permettent d'augmenter le niveau dans les parties latérales et ainsi d'homogénéiser la distribution dans le public (MEYER 2009).

L'affirmation de la nation à l'époque baroque provoquera aussi une naissance de l'identité de l'artiste. Alors que les compositeurs étaient longtemps considérés comme des valets ou des clercs (maîtres de chapelle), leur statut changera avec les grands mécènes de l'époque baroque. Pour ces derniers, les artistes qu'ils emploient contribuent désormais à leur notoriété et leur influence culturelle. Les compositeurs, architectes, peintres, musiciens, etc. jusqu'alors anonymes et considérés comme des artisans se voient désormais donner un statut d'artiste. Et l'opéra fut, à l'époque, le style le plus valorisé (Jean-Jacques Rousseau par exemple espérait avoir la même reconnaissance comme compositeur d'opéra que dans ses écrits). Cette affirmation de l'artiste fit aussi sortir les premiers grands solistes et aidera la musique instrumentale à devenir indépendante.

### 1.4.2.3 Musique instrumentale

La période baroque signera l'essor des grands concerts privés, en France sous Louis XV se développeront ; *Les Concerts de la Reine* (1725-1768) créés pour la reine Marie Leszczyńska , *Le Concert Italien* (à partir de 1724) organisé par la marquise de Prie, *le Concert des Mélophilètes* sous la protection du Prince de Conti, *Le Concert Spirituel* dirigé par Anne Danican Philidor, etc.

« Dans ce siècle [...], la musique est devenue tellement à la mode, qu'il n'y a presque point de maison dont elle ne fasse un des principaux amusements » (DE LERIS 1756, p 4)

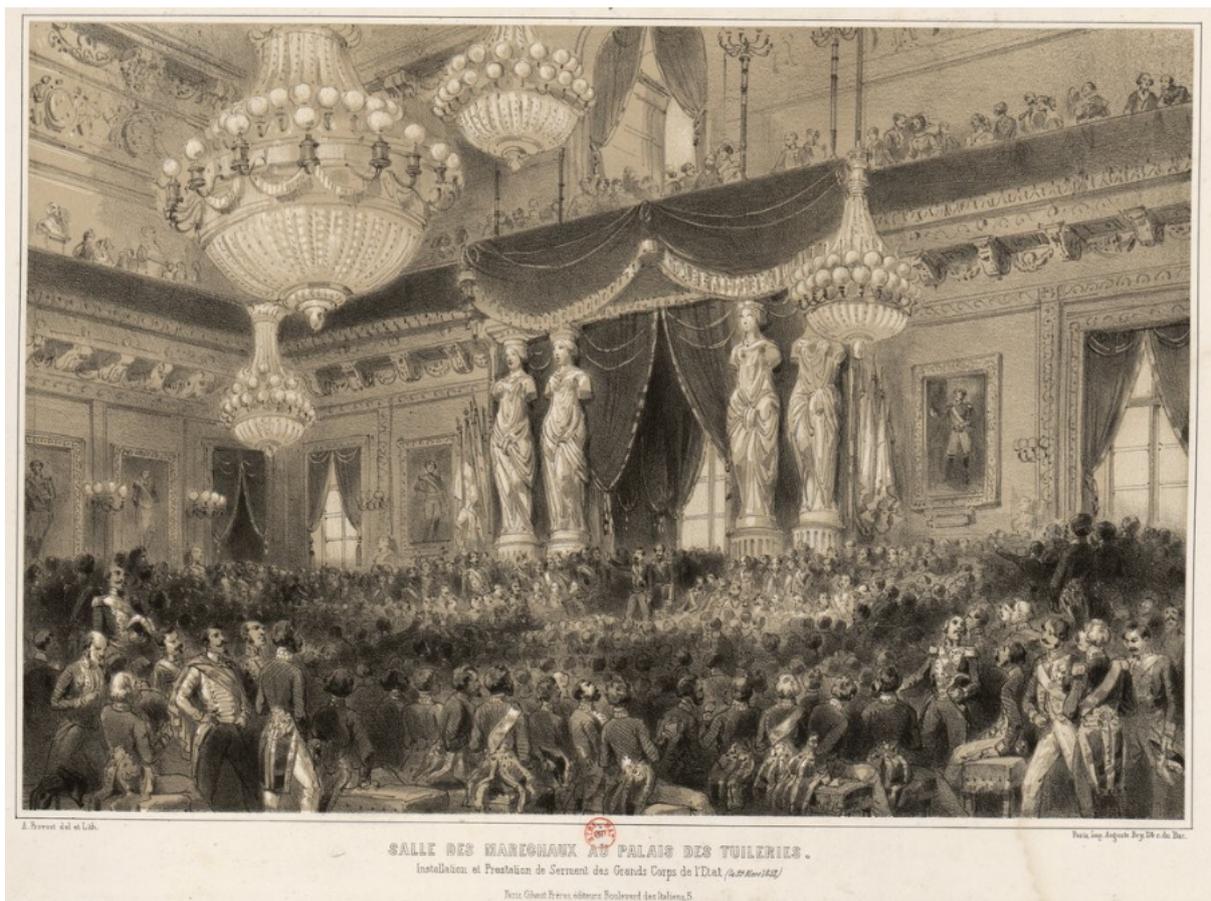
Parmi ces concerts c'est le *Concert Spirituel* qui va nous intéresser tout particulièrement. Ce fut le plus influent de tous et un des premiers concerts public à billetterie - et non plus à invitation ou à abonnement. À la Cour, l'Académie royale de musique détient le monopole sur la musique, on ne peut jouer un concert qui ferait de la concurrence à l'Académie. Sous Louis XIV la musique était très encadrée, les jours de représentations dépendaient notamment du calendrier chrétien. Il était ainsi d'usage de suspendre les concerts et spectacles durant certains événements du calendrier liturgique tel que la Semaine sainte - soit 35 jours environ dans l'année (DRATWICKI 2012, p 28). Anne Danican Philidor (1681-1728), hautboïste à la Chapelle royale, obtient de pouvoir organiser des concerts publics payants, aux Tuileries, les jours pendant lesquels, l'Académie royale doit fermer ses portes.

« Ce palliatif aux journées chômées et sans entrées d'argent, va devenir une importante institution musicale. Le Concert Spirituel, est confiné, aux termes des premiers règlements, à des concerts de musique spirituelle, particulièrement les motets à grand chœur, sur des textes latins. Mais les différentes directions qui se succèdent pendant soixante-cinq ans, font reculer les restrictions, et inscrivent 456 compositeurs et 1253 œuvres aux programmes de l'institution. Si le grand motet français est à l'honneur, le Concert Spirituel est aussi un tremplin exceptionnel pour de nombreux compositeurs et virtuoses, français et étrangers, et pour la constitution d'une tradition publique. » (Claude Charlier, cf musicologie.org)

À partir de 1724 le périodique le "*Mercur de France*" se consacre à rendre compte des activités de la Cour, de Paris et du reste de la France.

« Les colonnes du *Mercur de France* représentent la principale source de renseignements concernant le déroulement et le répertoire de ces concerts, même si la somme d'informations qui s'y trouve réunie doit être relativisée : au-delà des quelques sept cents références jalonnant ce mensuel entre 1725 et 1755, il est certain qu'un grand nombre de concerts n'est pas signalé, notamment lorsque l'actualité politique ou artistique est trop intense. » (DRATWICKI 2012, p 5)

Par faveur du roi le Concert Spirituel se produit dans le Salon dit des Suisses ou des Cent-Suisses, qui deviendra la *Salle des Maréchaux*.



**SALLE DES MARÉCHAUX AU PALAIS DES TUILERIES.**  
Installation et Prestation de Serment des Grands Corps de l'État (le 29 Mars 1852)  
Paris chez Brevet éditeur Boulevard des Capucines, 5.

FIGURE 1.34 – Estampe d'A. Provost : salle des Maréchaux au palais des Tuileries. Installation et Prestation de Serment des Grands Corps de l'État (le 29 mars 1852), BNF

À partir de 1784 il est accueilli dans la *salle des machines*. Elle fut construite par l'architecte Louis le Vau en même temps que le palais des Tuileries. Ce fut à l'époque l'une des plus grandes salles de spectacles d'Europe, elle pouvait accueillir 4000 spectateurs, une capacité équivalente à celle de l'opéra Bastille. À partir de 1788, la salle des machines a été partagée avec le Théâtre italien dit « de Monsieur »<sup>58</sup>.



FIGURE 1.35 – Peinture d'Eugène-Emmanuel Viollot-Le-Duc : *Banquet des Dames dans la salle du spectacle des Tuileries, salle des machines*, 1835, Musée du Louvre

---

58. Titre réservé au frère du roi

#### 1.4.2.4 Eglises baroques & Virtuosité

Braxton Boren (B. BOREN 2018) nous explique que la réforme Luthérienne et la contre-réforme ont créé des tensions dans l'Église chrétienne. Concernant la musique les luthériens mettent l'emphase sur le prêche et le chant, en Allemand désormais. Ce qui a incité les réformateurs à accentuer l'importance de la clarté et l'intelligibilité de la voix dans leurs églises. Ils ont pour cela modifié l'acoustique de ces églises (DESARNAULDS et CARVALHO 2001, LUBMAN et KISER 2001).

Dans l'étude de Desarnaulds et Carvholo (DESARNAULDS et CARVALHO 2001) nous avons observé une forte augmentation du volume des églises entre les périodes romanes et gothiques (4500 à 18000 m<sup>3</sup>) mais celle-ci est suivie d'une forte diminution dès la période baroque (7700 m<sup>3</sup>) pour finalement se stabiliser autour de 5500 m<sup>3</sup>. Non seulement l'étude des temps de réverbérations normalisés en volume nous montre que cette diminution des volumes n'a pas été compensée par des matériaux ou une construction particulière qui favoriserait une queue de réverbération plus longue - on trouve quasiment le même temps de réverbération normalisé qu'à l'époque romane. Mais en plus l'étude des temps de réverbération par fréquence nous montre un choix de diminution forte de la résonance dans les basses fréquences. Les auteurs expliquent ce changement par une évolution de la liturgie avec la *Reforme* et *Contre-réforme* qui ont mis l'intelligibilité de la voix en priorité.

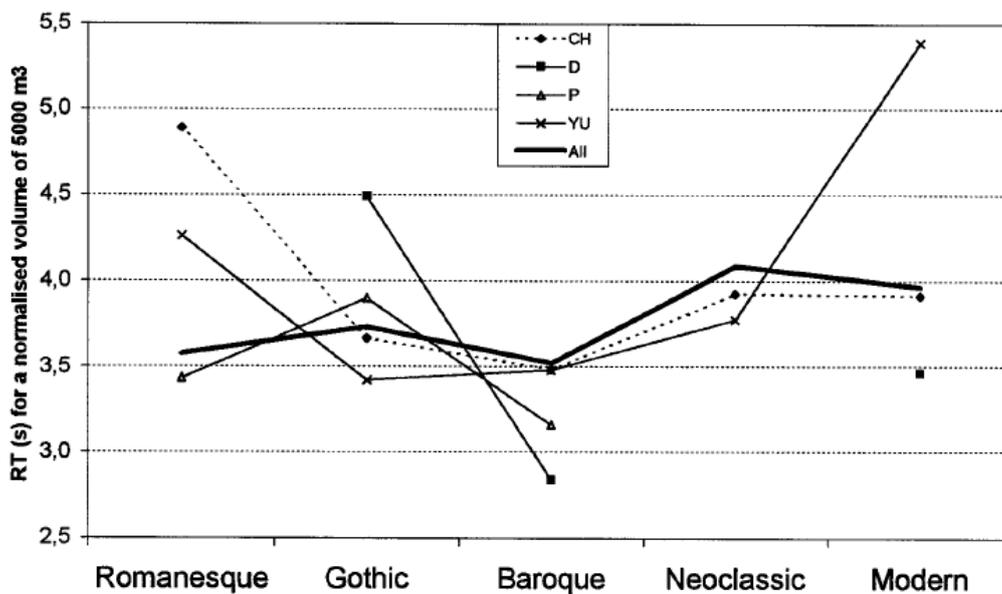


FIGURE 1.36 – Evolution du temps de réverbération (normalisé sur un volume de 5000m<sup>3</sup>) suivant les styles et pays, CH : Suisse, D : Allemagne, P : Pologne, Y : Yougoslavie, All : moyenne sur l'ensemble des états de l'étude

Boren nous donne l'exemple de l'église de Thomasskirche à Leipzig, réformé en 1539, qui fut par la suite l'église de J.S. Bach. La Thomasskirche avait en effet un temps de réverbération entre 1.6 et 1.8 secondes. Boren et Bagenal (B. BOREN 2018, BAGENAL 1951) pensent que ce changement d'acoustique aurait permis à Bach d'avoir plus de variation de tempo et de virtuosité et donnent l'exemple de la *Passion selon St Matthieu*. C'est selon Bagenal ces changements d'acoustiques qui ont permis le développement des *cantates*<sup>59</sup> et des *passions*<sup>60</sup>

59. Une cantate (du latin : cantare, « chanter ») est une composition vocale avec accompagnement instrumental, requérant parfois un chœur, qui comporte plusieurs mouvements. La cantate se développe et se partage en deux catégories : elle peut être basée sur un texte au thème profane (cantata da camera) ou sacré (cantata da chiesa). **Wikipedia**

60. Dans la musique sacrée « classique », une passion est une catégorie d'oratorio, c'est-à-dire une composition musicale pour solistes vocaux, chœur et orchestre, dont la principale caractéristique est d'être écrite à partir du récit de la passion du Christ.

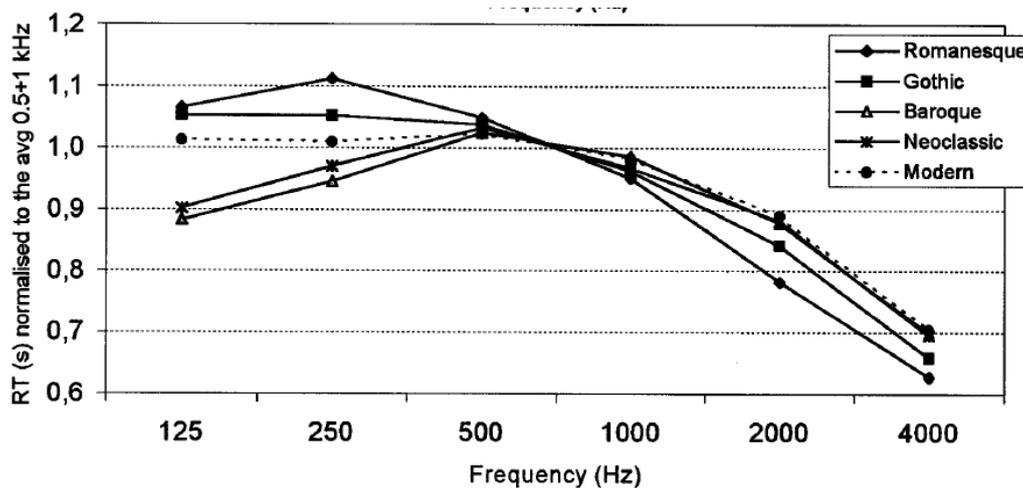


FIGURE 1.37 – Analyse spectrale des  $T_R$  suivant les styles architecturaux, les valeurs sont normalisées sur la bande fréquence entre 500 Hz et 1 kHz

au XVII<sup>ème</sup> siècle. Boren conclut que ces changements théologiques ont changé le développement musical de cette époque notamment de par l'influence de Bach à cette époque.

#### 1.4.2.5 Le cas du baroque colossal

Pendant ce temps du côté catholique au sud de l'Europe les grandes églises comme la Basilique St Pierre à Rome ont permis au style du baroque colossal de se développer, ayant jusqu'à 12 choeurs séparés en antiphonie spatiale, accompagnées par des orgues (Dixon 1979). Le baroque colossal fut un courant minoritaire musical qui traversa tous les styles du baroque. Boren nous donne l'exemple de la pièce *Salisburgensis* d'Heinrich Biber pour 5 choeurs séparés accompagnés par des ensembles de cuivres, timbales... positionnés dans la galerie de la cathédrale de Salzbourg, dont Biber fut le maître de chapelle (HINTERMAIER 1975, HOLMAN 1994). Ceci a notamment été rendu possible par les avancées de la notation du rythme, permettant aux ensembles séparés d'être synchrones.

Pour conclure selon Boren (B. BOREN 2018), les acoustiques plus sèches des églises luthériennes ont permis à Bach notamment d'explorer les dimensions tonales et temporelles. Tandis que dans les plus longues réverbérations, des églises italiennes notamment, les compositeurs ont utilisé la séparation des ensembles dans l'espace afin de permettre une meilleure discrimination des polyphonies.

### 1.4.3 Période Classique

#### 1.4.3.1 Mozart & Salzburg ?

Wolfgang A. Mozart fut lui aussi le maître de chapelle de la cathédrale de Salzburg, un siècle après Biber. Mozart a-t-il donc écrit comme son prédécesseur des oeuvres polychorales ? Malheureusement le Prince-Archibishop de Salzburg émit un décret en 1729 qui interdit les séparations spatiales des ensembles, privilégiant le chœur central (ROSENTHAL et MENDEL 1941). Ce décret, sûrement écrit en réaction à l'excessivité du baroque colossal, apparut donc bien avant la naissance de Mozart (en 1756). Pourtant la cathédrale est toujours équipée de ses cinq orgues, quatre proches du *presbyterium* et le dernier et le plus massive sur le côté. Selon les notes du père de Mozart il ne semblerait pas que les cinq aient été utilisés en même temps (HARMON 1941). Cependant bien que Mozart n'ait pas pu expérimenter la séparation spatiale dans la cathédrale, il eut l'occasion lors de représentations extérieures.

Notamment pour son Opéra *Don Giovanni* (1787) : il écrit certaines parties pour trois orchestres séparés, un dans la fosse, un second sur scène et un dernier en coulisse. Chaque ensemble joue des parties différentes, ce qui demande une direction temporelle très précise (BRANT 1978). Il écrivit aussi sa *Serenade pour Quatre Orchestres* pour une représentation à l'extérieur de la cathédrale de Salzburg. Cette fois avec encore plus d'espace entre les orchestres. Boren nous l'exprime ainsi : « Cette pièce utilise des effets d'échos entre les orchestres séparés qui pourraient manquer de clarté dans l'acoustique réverbérante d'une salle, mais convient parfaitement à une performance en plein air (champ-libre), puisque chaque orchestre fournit les "réflexions" des motifs initiaux des autres orchestres » (B. BOREN 2018, en anglais dans le texte).

#### 1.4.3.2 Echos

Les jeux d'échos étaient en effet très populaires durant la période Classique. Haydn, ami et mentor de Mozart, employa lui aussi ces échos dans sa symphonie N38 (parfois appelée "*Echo symphonie*"), bien que lui ne séparât pas spatialement les ensembles. Dans cette pièce les échos sont d'abord présentés une première fois par des violons avec une attaque normale puis répétés par d'autres violons dont les cordes sont assourdies - dans une volonté d'imiter l'atténuation et le filtrage d'un écho acoustique. Haydn développera plus cette idée dans sa pièce *Das Echo* : elle est écrite pour un sextet de cordes, deux trios séparés, traditionnellement dans deux salles différentes (DURAND, TREJO et LEONARD 1941). Dans cette pièce Haydn se sert des échos pour altérer notre perception de l'espace. Il va ainsi diminuer progressivement le délai entre les deux trios, commençant avec un délai d'une mesure, puis jusqu'à une croche, une double croche. Ceci a pour effet de modifier notre perception du volume de l'espace dont on se trouve (B. BOREN 2018). En effet, une plus grande densité temporelle des réflexions (*early* et *cluster*) correspondent à une salle plus petite (donc moins de temps entre chaque réflexion) (FISCHETTI 2004). Ceci nous dit Boren est peut-être la plus ancienne pièce connue tentant d'altérer dynamiquement un espace comme d'un élément d'écriture (B. BOREN 2018).

*Ce dernier exemple est particulièrement intéressant. Il montre en effet chez Haydn une volonté de dépasser "l'effet" de l'écho et de s'en servir comme d'un outil musical pour altérer la perception du public. Il était en effet à l'époque impossible d'avoir des simulations d'acoustiques telles que nous pouvons avoir aujourd'hui, cet exemple montre un intérêt pour l'espace assez inédit pour l'époque. Généralement les technologies apparaissent pour venir répondre à des volontés artistiques de longue date, le contraire est en réalité moins fréquent. Cet effet d'écho m'inspirera notamment pour la première partie de la pièce de ce mémoire. Nous tâcherons de simuler un tunnel acousmatique dans lequel l'interprète s'avance virtuellement (voir chapitre 3, présentation des parties)*

#### **1.4.3.3 Expérimentation dans la symphonie & Salles de concert**

Haydn est souvent considéré comme le "père de la symphonie" - bien qu'il ait des prédécesseurs. Il se consacra en effet à ce style pendant près de quarante années de sa vie où il en écrivit 106. Les premières symphonies ont des effectifs réduits, mais Haydn expérimenta beaucoup sur ce point durant cette période. C'est d'ailleurs à cette époque que le terme s'affirme comme un style indépendant. Selon Stockhausen (STOCKHAUSEN 1958, p6) ce serait en grande partie à Haydn, que l'on devrait l'effectif actuel des symphonies. Rapidement une demande de création de salles adaptées à ces nouveaux orchestres se fait sentir.

Selon Antoine Pecqueur, les premiers concerts symphoniques étaient donnés exclusivement dans les cours princières (PECQUEUR 2015). Les orchestres jouaient alors dans les salles de bal, de salons à disposition des cours.

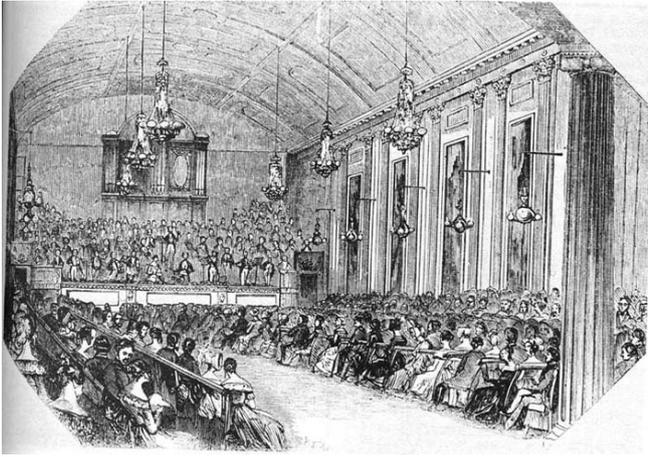
« Si l'Italie a été pionnière en matière d'opéra, l'Angleterre joue un rôle comparable dans le domaine symphonique. C'est à Londres que furent construites à la fin du XVII<sup>ième</sup> siècle, les premières salles de concert à proprement parler. Ces lieux de petites dimensions accueillent un public nombreux, ce qui explique leur acoustique plutôt sèche, avec un temps de réverbération très court »  
(PECQUEUR 2015, Parenthèses Philharmonie de Paris, p 5)

Ce sont des salles de formes rectangulaire (dites de forme de "boîte à chaussures"), les sièges sont sur le sol (plat) et la scène est légèrement surélevée. Certaines ont aménagé un balcon.

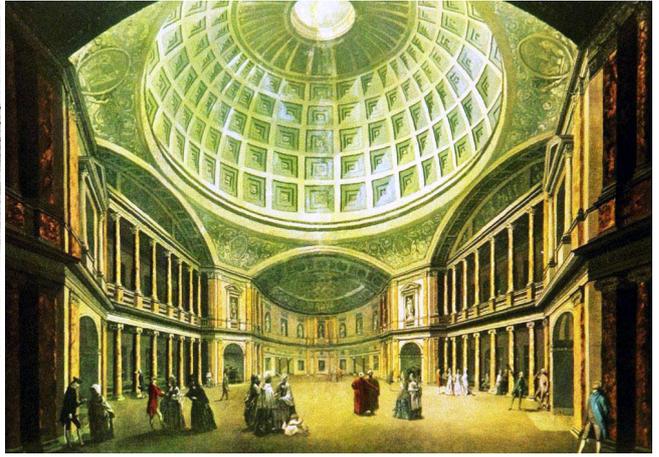
« De nombreuses oeuvres de Haendel sont données au York Buildings, tandis que le Hanover Square Rooms accueille la création des fameuses symphonies londoniennes de Haydn. »  
(PECQUEUR 2015, Parenthèses Philharmonie de Paris, p 5)

Le *Hanover Square Rooms* était un ensemble de salles de concert, elle fut l'un des lieux de concert le plus influent de Londres pendant près d'un siècle. Pour Antoine Pecqueur la salle la plus emblématique de cette période est le *Pathéon* construite par l'architecte James Wyatt en 1772. Son acoustique et sa rotonde seront vantés par les commentateurs de son époque, notamment dans les écrits de Charles Burney qui la qualifia de « salle la plus élégante d'Europe » (PECQUEUR 2015).

Du côté de l'Allemagne la première salle publique ouvre en 1761 (PECQUEUR 2015). Une des salles remarquable de cette période est le *Gewandhaus* de Leipzig, construit en 1781, dont Felix Mendelssohn fut l'un des directeurs musicaux. La salle est remarquable par la disposition de son public, face à face de chaque côté de la salle (Figure 1.39). Elle pouvait accueillir 400 spectateurs. Tandis qu'en France l'une des premières salles fut la salle du *Conservatoire*, édifié en 1811. C'est une commande de Napoléon I<sup>er</sup>, elle fut confiée à l'architecte



(a) *Hanover Square Rooms*, Londres, construit en 1774, Gravure extraite de *Illustrated London News*



(b) James Wyatt, *Pantheon* de la rue d'Oxford à Londres (1772), peinture probablement peinte par William Hodgeski.

FIGURE 1.38 – Deux salles de concert londonniennes emblématiques de la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle

François-Jacques Delannoy et pouvait accueillir 1078 spectateurs (PECQUEUR 2015). C'est notamment ici que fut inaugurée la première de *la Symphonie fantastique* de Berlioz.

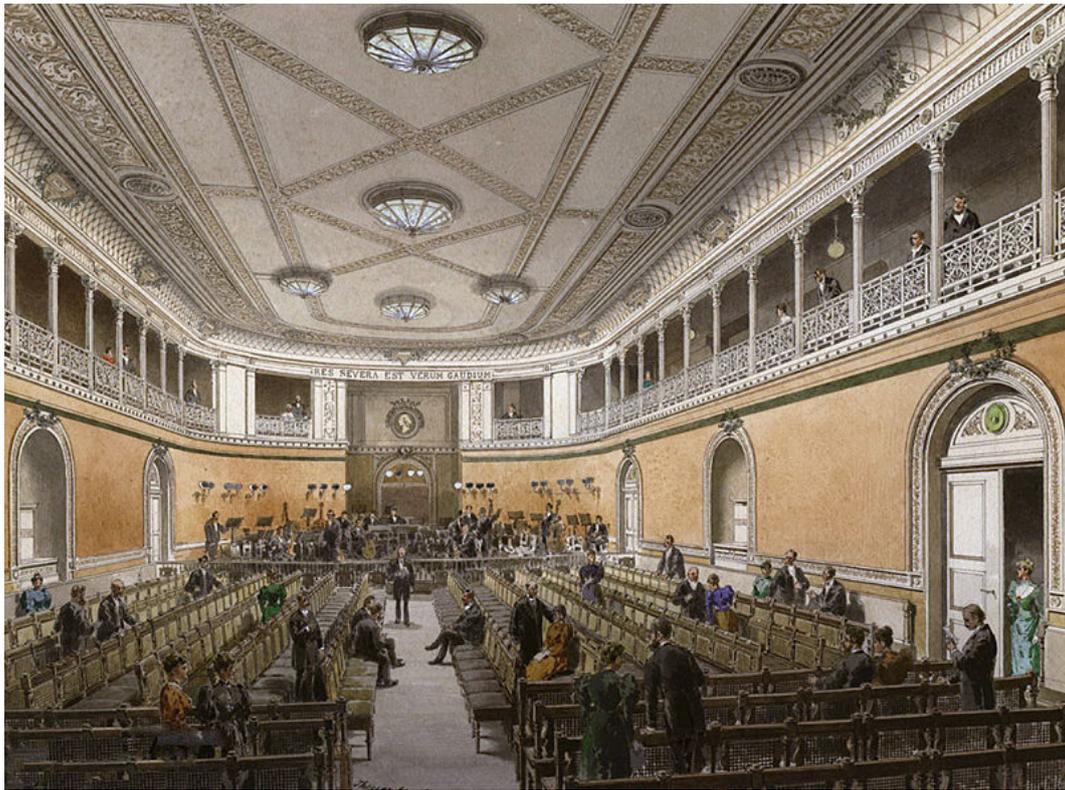


FIGURE 1.39 – Johann Carl Friedrich Dauthe, salle de concert de la Altes Gewandhaus, Leipzig, construite en 1781, aquarelle sur plume, 1894

## 1.4.4 Période Romantique

### 1.4.4.1 Berlioz & la musique à programme

La période Romantique est la grande période des concerts à programme et donc de la musique qui raconte des histoires. Ceci amena à des utilisations plus drastiques de l'espace sonore nous explique Boren (B. BOREN 2018). Ainsi Hector Berlioz (1803-1869) fut sûrement celui qui explora le plus la narration par l'espace de cette période. Stockhausen nous dit de Berlioz (STOCKHAUSEN 1958) qu'il cherche à créer une "musique architecturale", un "drame musical". Il semblerait qu'il est été inspiré par François Joseph Gossec, qui écrivit sa *Grande messe des morts* (1760) où il utilisa des ensembles de cuivres séparés cachés dans les couloirs supérieurs de l'église. Il utilisa ces cuivres pour surprendre son audience lors de l'*appel du jugement dernier*. De cette inspiration Berlioz écrira son *Requiem* (aussi nommé la *Grande messe des morts*) en 1837 comprenant quatre ensembles de cuivres en antiphonies, chacun placé à un point cardinal de l'église (BRODERICK 2012). Broderick nous explique que cette pièce fut une commande du gouvernement Français pour composer un requiem de messe afin de restaurer la tradition de la musique sacrée en France. Berlioz a donc essayé à travers cette oeuvre de représenter la tradition catholique romane du requiem et de l'adapter au contexte Romantique de l'époque. Berlioz rencontra une opposition forte à ce projet, les plus conservateurs le jugeant trop Romantique, il eut néanmoins un fort succès critique.

« Au moment de [l'entrée des quatre orchestres de cuivres], au début du Tuba mirum qui s'enchaîne sans interruption avec le Dies irae, le mouvement s'élargit du double ; tous les instruments de cuivre éclatent d'abord ensemble dans le nouveau mouvement, puis s'interpellent et se répondent à distance, par des entrées successives, à la tierce supérieure les unes des autres. Il est donc de la plus haute importance de clairement indiquer les quatre temps de la grande mesure à l'instant où elle intervient. Sans quoi ce terrible cataclysme musical, préparé de si longue main, où des moyens exceptionnels et formidables sont employés dans des proportions et des combinaisons que nul n'avait tentées alors et n'a essayées depuis, ce tableau musical du Jugement dernier, qui restera, je l'espère, comme quelque chose de grand dans notre art, peut ne produire qu'une immense et effroyable cacophonie.

Par suite de ma méfiance habituelle, j'étais resté derrière Habeneck et, lui tournant le dos, je surveillais le groupe des timbaliers, qu'il ne pouvait pas voir, le moment approchant où ils allaient prendre part à la mêlée générale. Il y a peut-être mille mesures dans mon Requiem. Précisément sur celle dont je viens de parler, celle où le mouvement s'élargit, celle où les instruments de cuivre lancent leur terrible fanfare, sur la mesure unique enfin dans laquelle l'action du chef d'orchestre est absolument indispensable, Habeneck baisse son bâton, tire tranquillement sa tabatière et se met à prendre une prise de tabac. J'avais toujours l'œil de son côté ; à l'instant je pivote rapidement sur un talon, et m'élançant devant lui, j'étends mon bras et je marque les quatre grands temps du nouveau mouvement. Les orchestres me suivent, tout part en ordre, je conduis le morceau jusqu'à la fin, et l'effet que j'avais rêvé est produit. Quand, aux derniers mots du chœur, Habeneck vit le Tuba mirum sauvé : "Quelle sueur froide j'ai eu, me dit-il, sans vous nous étions perdus ! — Oui, je le sais bien", répondis-je en le regardant fixement. Je n'ajoutai pas un mot [...] L'a-t-il fait exprès ? Serait-il possible que cet homme, d'accord avec M. XX., qui me détestait, et les amis de Cherubini aient osé méditer et tenter de commettre une aussi basse scélératessse ? Je n'y veux pas songer... Mais je n'en doute pas. Dieu me pardonne si je lui fais injure. » Hector Berlioz, Mémoires (BERLIOZ 1870)

Berlioz a choisi, plutôt que de créer une surprise en élévation, un dispositif "immersif" les quatre ensembles et leurs réflexions dans l'église crée un effet d'enveloppement. Berlioz était très au courant de cet effet d'acoustique, il écrivit :

« Many fail to recognize that the very building in which music is made is itself a musical instrument, that it is to the performers what the sound board is to the strings of the violin, viola, cello, bass, harp, and piano stretched above » Hector Berlioz traduit en anglais par Peter Bloom (BLOOM 1998)

*Berlioz a ici une réflexion similaire à celle de Vitruve au I<sup>er</sup> siècle ap. J.C. Alors que Vitruve pensait l'acoustique comme un instrument, Berlioz pense lui que c'est l'ensemble musiciens-salle qui crée l'instrument. Le premier est l'excitateur (la corde), le second est la caisse de résonance (la table d'harmonie).*



(a) Vue en coupe de la chapelle des Invalides



(b) Intérieur de la chapelle des Invalides

FIGURE 1.40 – La chapelle des invalides où fut représentée la première de la *Grande messe des morts*

Il semblerait donc que Berlioz n'ait pas écrit le *Requiem* seulement comme un ensemble de sources dans l'espace mais bien comme un seul environnement sonore tridimensionnel dont il contrôlait les paramètres par l'orchestration, le placement (B. BOREN 2018).

Plus tard dans sa *Symphonie Fantastique* Berlioz utilisa des instruments dans les coulisses. Le programme était réfléchi pour faire entendre à l'auditoire deux plans musicaux ; "here" (ici) and "there" (là-bas) (DURAND, TREJO et LEONARD 1941).

La manipulation de la distance perçue par le public fut en effet particulièrement explorée durant la période Romantique, notamment du fait que les changements de dynamiques et de timbres étaient facilités par les effectifs plus grands des orchestres (DURAND, TREJO et LEONARD 1941). Cette manipulation peut être créée avec des jeux de dynamiques, en réduisant l'effectif ou en modifiant le timbre. On utilisa beaucoup de cuivres avec sourdine par exemple. Certains compositeurs nous dit Begault, placèrent des musiciens derrière des rideaux et utilisèrent des jeux de positionnement en distance (DURAND, TREJO et LEONARD 1941).

Ainsi Berlioz dans le troisième mouvement de sa *Symphonie Fantastique* place un hautbois dans les coulisses qui répond au cor anglais, dans l'orchestre, en écho. Berlioz voulait ainsi figurer deux bergers se répondant au loin, le timbre du hautbois dans les coulisses devant "simuler" l'atténuation et le filtrage d'un cor anglais distant qui lui répondait. Pour ne pas être perçu comme un simple écho, le second "berger" changeait

légèrement le thème. À la fin de ce mouvement le cor anglais fini par un appel qui n'est pas répété par le hautbois. Ceci incite le public à écouter un lointain, mais au lieu du hautbois arrive la "*Marche au supplice*", figurant la procession des bourreaux de la guillotine s'approchant du protagoniste (RITCHEY 2010). Nous pourrions encore citer chez Berlioz la *Symphonie funèbre et triomphale*, pour deux orchestres et chœurs, ou encore *L'impériale*, cantate pour deux chœurs. Berlioz influencera d'autres compositeurs comme Giuseppe Verdi (1813-1901) pour l'utilisation d'instruments au lointain. Ce dernier utilisa notamment un ensemble en coulisse pour son *Requiem* (1874). Gustav Mahler (1860-1911) utilisera lui aussi cet effet avec un ensemble de cuivre pour la première de sa symphonie N2 : *Résurrection* (ZVONAR 2006).

#### 1.4.4.2 Salles de concert romantique

« En Angleterre, au XIXe siècle, c'est le règne de la démesure. Les effectifs instrumentaux des orchestres augmentent et les salles deviennent de plus en plus grandes. À Londres, des concerts se déroulent même dans de gigantesques serres de verre et d'acier, notamment le Crystal Palace de Sydenham. Des dizaines de milliers de spectateurs assistent aux prestations de centaines d'instrumentistes et de milliers de choristes! » (PECQUEUR 2015, p6)

C'est à cette époque que fut construit le *Royal Albert Hall* par les architectes Francis Fowke et Henry Scott. Le bâtiment est construit en ovale avec la scène au centre et un orgue au fond - une forme qu'on retrouvera par la suite dans les philharmonies. La salle peut accueillir plus de 8000 spectateurs et son dôme atteint 41 mètres. Ceci posa des problèmes d'acoustique. Pendant près d'un siècle, nous dit Pecqueur, des techniciens tentent de supprimer les échos et y arrivent finalement en 1971 grâce à l'installation de diffuseurs acoustiques (PECQUEUR 2015).



FIGURE 1.41 – Francis Fowke et Henry Scott, Royal Albert Hall, Londres, 1871, *Ouverture du Royal Albert Hall par la reine Victoria en 1871, artiste inconnu*

## 1.4.5 Musique acoustique du XXe siècle

### 1.4.5.1 Musique expérimental aux États-Unis

Intéressons-nous à la période du début du XX<sup>ième</sup> siècle, celle-ci regroupe divers styles qui sont généralement englobés sous le terme *Musique Moderne*. Nous nous intéresserons ici seulement aux pièces "spatiales" acoustiques de cette période.

Dans la *musique expérimentale*<sup>61</sup> américaine de ce début de siècle, Boren (B. BOREN 2018) retient notamment le travail de Charles Ives (1874-1954). Charles Ives aurait été influencé par son père Georges Ives, chef de fanfare, celui-ci a notamment fait des expériences avec des fanfares marchant dans des directions opposées (ZVONAR 2006). De son père il retiendra un travail sur la séparation spatiale et sur des mélanges de timbres inhabituels dans l'orchestration traditionnelle (B. BOREN 2018). Celui-ci a une approche particulière de la séparation spatiale. Il s'en sert notamment pour représenter dans l'espace des questionnements philosophiques et leurs réponses. Dans la pièce *The Unanswered Question* (1908) Charles Yves place ainsi une trompette et un ensemble de voix sur scène, sensé poser « L'éternelle question de l'existence » (« The Perrenial Question of Existence ») et les réponses à cette question. Un quatuor à cordes séparé spatialement est lui aussi placé en dehors de la scène et représente *Les silences des Druides - qui ne savent, ne voient et n'entendent rien* (« The silences of the Druids - Who know, See and Hear Nothing ») et peuvent être plus globalement vu comme des « représentants du cosmos impénétrable de l'au-delà » (« representatives of the unfathomable cosmos beyond ») (MC-DONALD 2004). Pour Boren, Ives utilise la séparation spatiale comme une représentation de la séparation entre « "Nous" - les penseurs, les artistes, ceux qui posent les questions et y répondent - et "Eux" ("It" dans le texte) - le cosmos, qui restera silencieux bien après qu'on est fini de poser nos questions »<sup>62</sup>. Plus tard Henry Brant (1913-2008), compositeur américain connu pour son travail sur la spatialisation, organisa une représentation de cette pièce. Il choisit de rajouter une séparation entre la trompette qui pose les questions (*Questioner*) et les bois qui répondent (*Answerers*) (B. BOREN 2018).

Le travail de Charles Ives et cette pièce notamment furent pour Brant une importante source d'inspiration sur son utilisation de l'espace.

« Bien qu'il ne fût pas une figure importante de la musique du XX<sup>ième</sup> siècle, le travail de Brant explora la musique spatiale plus que tout compositeur acoustique avant lui. » (B. BOREN 2018, p48, en anglais dans le texte)

Il commença en 1953 avec *Antiphony I* et continuera d'écrire de la musique pour des ensembles séparés durant plus de 50 ans (HARLEY 1997). Brant admettait que les outils électro-acoustiques auraient pu l'aider pour gagner en flexibilité sur la gestion de l'espace mais il n'appréciait pas la directivité des hauts-parleurs, qu'il trouvait trop différente de celle des instrumentistes (BRANT 1978).

*Brant aurait souhaité pouvoir faire "disparaître" les haut-parleurs, pour pouvoir mélanger les timbres des sons acoustiques et électro-acoustiques sans que l'on ne distingue l'un de l'autre. Malheureusement les technologies de l'époque semble l'avoir limité. Aujourd'hui les méthodes qui permettent le*

---

61. La musique expérimentale est le nom donné à toute musique qui pousse les limites actuelle d'un genre musical.

62. B. BOREN 2018, page 48

*plus de s'en approché sont les méthodes de synthèse de front d'ondes, qui ont pour but de simuler un champ sonore naturel. Les utilisateurs de ces technologies (compositeurs, techniciens, etc.) disent souvent qu'elles font "disparaître" les haut-parleurs. Nous en reparlerons plus en détail à la fin du chapitre 2 (Synthèse de front d'ondes)*

Brant sera plus exigeant qu'Ives dans le placement de ces ensembles : alors qu'Ives indiquait seulement que les ensembles devaient être séparés, Brant quant à lui donnait rigoureusement la position des ensembles dans l'espace (HARLEY 1997).

Brant fut aussi un théoricien de la musique et il écrivit notamment sur l'espace. Contrairement aux exemples des époques précédentes où la séparation dans l'espace fut utilisée pour permettre une plus grande complexité polyphonique - en se servant du démasquage spatial. Brant lui s'intéresse à cette séparation dans l'espace pour travailler la "compression tonale". Brant voulait composer des pièces avec un *ambitus*<sup>63</sup> resserré. Avec un ensemble unique (non-séparé) il faisait face à des problèmes concernant les unissons entre des instruments différents. Il utilisa donc la séparation spatiale pour pouvoir composer plus librement cette "compression tonale", sans avoir à se soucier de ces unissons.

En 1967 Brant résume sa vision sur l'antiphonie spatiale en quatre points ici présentée avec les commentaires de Maria Anna Harey, musicologue, (HARLEY 1997) (les citations de Brant sont en italiques et entre guillemets) :

1. « *La séparation spatiale clarifie les textures* - si une musique contient plusieurs couches, "chacune avec ses propres schémas de sonorités, sur une même octave," la présence occasionnelle d'unissons devrait être évitée par une distribution des performeurs dans la salle.
2. *Des groupes séparés sont difficiles à coordonner* - effectivement des rythmiques simultanées sont quasiment impossibles à réaliser à cause de la distance entre les musiciens.
3. *La séparation spatiale correspond à une séparation des textures dans l'espace (si les performeurs sont ensemble sur scène)* - la séparation permet une différenciation des éléments musicaux "sans collision ou mélange de textures" et cela permet une plus grande complexité dans la musique.
4. *Les arrangements spatiaux doivent être prévus précisément, mais permettent certains ajustements dans les détails* - il n'y a pas de position optimale pour l'auditeur ou les performeurs dans la salle : chaque situation est différente. » (HARLEY 1997, p 5-6, en anglais dans le texte)

Bien que Brant n'est eu aucune éducation scientifique il découvrit par lui-même de nombreux concepts psychoacoustiques, nous dit Boren (B. BOREN 2018). Il aurait même anticipé certaines recherches sur le flou de localisation, nous dit l'auteur.

Maria Anna Harley nous apprend que les écrits de Brant sur l'utilisation de l'espace dans un but compositionnel furent antérieurs à ceux de Stockhausen et de John Cage. Stockhausen en avait probablement connaissance lorsqu'il écrivit son manifeste sur la spatialisation "Musik im Raum". Cependant sa vision est à l'opposé de celle de Brant. Alors que Stockhausen réfutait les oeuvres de Gabrieli, Berlioz et Mahler - qui ont inspiré Brant - car trop iconographiques, trop théâtrales. Stockhausen s'intéressait plus aux trajectoires et à leur sérialisation.

---

63. Quantifie l'étendue d'une mélodie, d'une voix ou d'un instrument, entre sa note la plus grave et sa note la plus élevée

Brant était donc lui aussi très hostile à l'utilisation de l'espace de Stockhausen. Il critiqua le *Grupper für drei Orchester* de Stockhausen comme n'étant pas réellement spatial, car les trois orchestres avaient les mêmes ensembles d'instruments et ne seraient donc pas assez différenciés pour permettre une spatialisation (HARLEY 1997). En effet pour Brant les placements dans l'espace et les timbres devaient être choisis ensemble, afin que les couleurs spectrales différenciées permettent de clarifier la compréhension de l'espace. Sinon « l'espace n'a aucun effet, à part rajouter de la confusion » (Brant, cité dans HARLEY 1997, p6).

Brant et Cage au contraire avaient plus de similarités. Notamment, nous Maria Anna Harley, sur les concepts de groupes indépendants. Ce que Brant appelle « une antiphonie totale » et ce que Cage décrit comme une « Co-existence des différends » (*Co-existence of dissimilars*. John Cage, dans son livre *Experimental Music*, observe que son courant artistique « n'est pas concerné par l'harmonie dans le sens généralement compris. Ici nous sommes préoccupés par la co-existence d'entités différentes, et les points centraux où la fusion s'opère sont nombreux : les oreilles des auditeurs où qu'ils soient. » (CAGE 1957, en anglais dans le texte, cité par Maria Anna Harley (HARLEY 1997), p 22 )

#### 1.4.5.2 Salles de concert modernes

Vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle Wallace Clement Sabine, physicien américain, propose une méthode pour estimer le temps de réverbération d'une salle : le  $T_R$  Sabine.

$$T = \frac{V}{A} * 0.161 \quad (s.m^{-1})$$

Avec T : le temps de réverbération, V : le volume de la salle et A : L'aire effective d'absorption.

À la même époque les architectes McKim, Mead et White travaillent sur les plan du *Boston's Symphony Hall*. Ils demandent alors à Sabine de venir les assister sur l'acoustique. C'est le début du métier d'acousticien tel que nous l'entendons aujourd'hui.

« Cette salle a depuis établi le standard de l'acoustique idéale (*acoustical gold standard*) pour l'acoustique des symphonies dans l'Amérique du Nord, et est l'une des trois salles de concert les mieux considérées au monde (les deux autres étant le *Musikverein* de Vienne et le *Concertgebouw* d'Amsterdam qui sont elles-aussi des salles de type "boîte à chaussures"). » (ERMANN 2015, "Performance Venues", en anglais dans le texte)

Les trois salles ont été construites entre 1869 et 1900, elles appartiennent au mouvement néo-classique (architectural), c'est donc une nouvelle fois un retour à l'Antique. Les architectes de ce mouvement s'inspireront notamment de Vitruve et de ses écrits. « Le Musikverein de Vienne (est) inauguré en 1869. Son architecte, Theophile Ritter von Hansen, l'inscrit dans le plus parfait style néo-classique. » (PECQUEUR 2015, p 6). Le *Concertgebouw* est lui aussi dans un style néo-classique, le *Boston's Symphony Hall* s'inspire quant à lui du style de la Renaissance. Le *Concertgebouw* et le *Musikverein* ont respectivement un volume de 18 700 m<sup>3</sup> et 14 600 m<sup>3</sup>. Le *Concertgebouw* a un Volume équivalant à celui des églises gothiques de l'étude de Desarnaulds et Carvalho (DESARNAULDS et CARVALHO 2001). Cependant alors que le temps moyen de réverbération

ses églises devait se situer autour de 8 secondes<sup>64</sup>, le *Concertgebouw* lui a seulement 2.8 secondes de temps de réverbération. On voit ici la différence de traitement acoustique entre une église tout en pierres et les nouvelles salles de concert de la fin du XIX<sup>ième</sup> siècle.

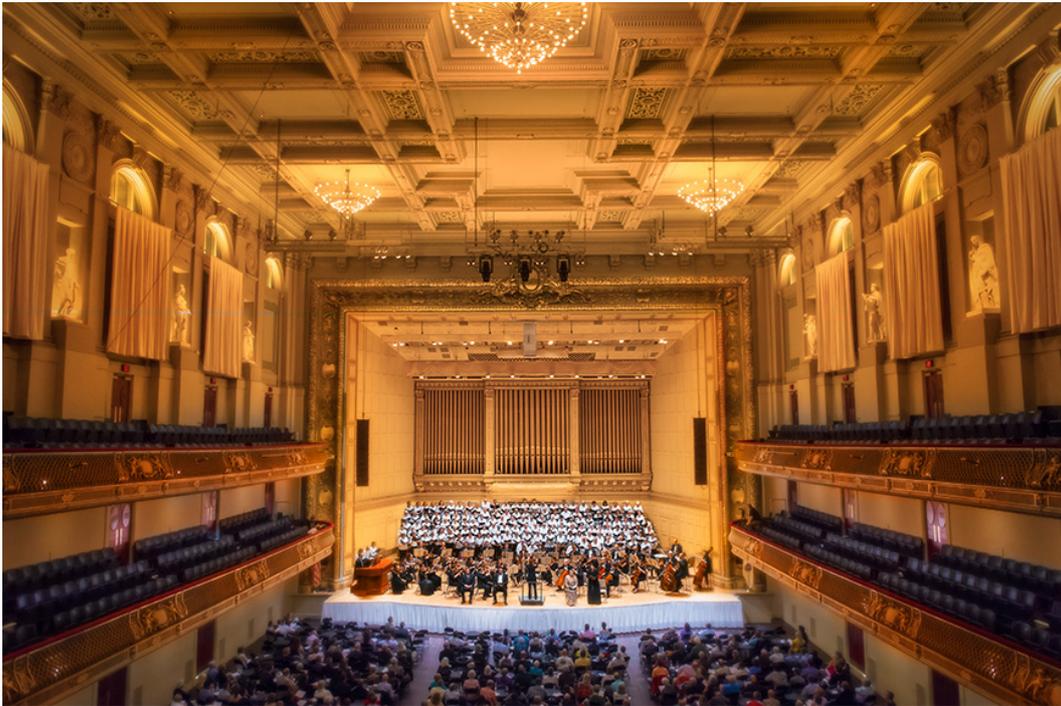


FIGURE 1.42 – McKim, Mead , White et Sabine, *Boston's Symphony Hall* (1900)

Les dimensions de la "boîte" ont été calculés avec la formule de Sabine. Ermann nous explique l'acoustique de cette salle (ERMANN 2015) : la hauteur du plafond est calculée pour que la salle est environ 1.9 secondes (salle occupée) de réverbération dans les médiums et 2.5 secondes à vide, qui serait idéal pour une symphonie. La largeur de seulement 22 mètres de large et la forme rectangulaire permettent une bonne impression spatiale grâce aux réflexions sur les murs latéraux (**voir section sur l'impression spatiale**). La décision fut prise de ne pas avoir de surface en bois apparent. Sabine leurs préférera des murs en plâtre et des sièges imitant l'absorption du public, pour donner un résultat à la fois puissant et chaud (ERMANN 2015). Les décorations et statues permettent de crée des irrégularités et d'éviter des échos, ou ondes stationnaires. Les balcons sont peu profonds et situé dans la partie basse de la boîte, ce qui permet d'avoir une plus grande quantité de réflexions de second ordre sur les parois latérales.

Ce type de salle a été de nombreuses fois répliqués avec de bons résultats en terme d'acoustique nous dit l'auteur. Cependant, nous explique-t-il, ce modèle a une limite en terme de capacité et ne peut dépasser les 2400 places. Au milieu du XX<sup>ième</sup> siècle un nouveau type de salle va gagner en succès : les "salles à balcons" (*terrace style halls*). La scène devient alors centrale et le public se situe autour sur des balcons situés à différentes hauteurs. Ce style favorise la vision entre le public et l'orchestre et évite les problèmes d'acoustiques rencontrés dans le *Royal Albert Hall*. Néanmoins nous dit Ermann, ces salles manquent d'impression spatiale comparées au modèle rectangulaire. En effet ces dernières bénéficiaient de murs latéraux pour améliorer cette impression, la géométrie des salles à balcon ne permet pas cela. Généralement les acousticiens font placer des diffuseurs

64. Moyenne volume gothique = 18025 m<sup>3</sup> et temps moyen de réverbération normalisé à 5500 m<sup>3</sup> = 3.75 secondes. Utilisons la formule de Sabine pour estimer le temps de réverbération. De 5500 à 18 0025 il y a un rapport 3.27, V sera donc multiplié par 3.27. Estimons que A varie d'un rapport  $(\sqrt[3]{3.27})^2 = 1.48$  donc  $T_2 = T_1 * \frac{3.27}{1.48} = 8.28s$

suspendus pour maximiser les réflexions latérales pour l'ensemble du public.



FIGURE 1.43 – Hans Scharoun, Grande salle de la Philharmonie de Berlin (1963), 2440 places.

## 1.5 Conclusion

Dans l'objectif d'écrire une pièce spatiale nous avons vu qu'il nous fallait d'abord comprendre comme fonctionnait l'écoute de l'espace. Nous avons abordé certains critères psycho-acoustique. Cela nous a permis de comprendre comment certaines composantes apportaient plutôt une sensation d'espace (ITD) tandis que d'autres apportaient plutôt une sensation de précision (IID). Nous avons compris que la perception en élévation dépendait d'un apprentissage, et que nous n'avions pas une précision de localisation homogène en trois dimensions. Cela nous obligera à être vigilant à travailler différemment l'espace pour un public assis et donc dirigé et pour un public en mouvement. Nous avons vu qu'il était difficile de donner une impression de distance et qu'il ne faudra donc pas hésiter à accentuer l'effet.

Nous avons ensuite présenté les organes de l'ouïe de l'oreille externe jusqu'au cortex auditif. Cela nous a permis de comprendre que notre oreille n'avait pas la même sensibilité sur l'ensemble du spectre audible et qu'il faudra donc faire attention au niveau d'écoute. L'étude de l'oreille interne nous a fait prendre conscience de l'importance de faire attention aux effets de masque et l'intérêt du démasquage spatial. L'étude du système auditif central quant à lui nous a fait apercevoir les limites du système auditif et l'influence des autres sens sur l'écoute. La compréhension du fonctionnement du cortex auditif nous a fait prendre conscience de l'unicité de l'écoute de chaque auditeur.

Notre parcours dans l'histoire spatiale de la musique nous a fait découvrir quatre grands points ;

1. *Les acoustiques ont majoritairement été conçues pour la voix parlée et chantée* - que ce soit en Grèce antique, dans les églises de chaque époque ou encore les opéras, ces lieux ont d'abord été pensés et essentiellement utilisés pour la voix parlée ou chantée. Ce n'est finalement qu'avec l'essor de la musique instrumentale que des salles de concert commenceront à être érigés pour privilégier l'orchestre symphonique notamment.
2. *La musique a transformé les espaces de représentation. Les architectures ont permis la découverte de règles de composition* - Nous avons pu suivre l'évolution des églises et du chant sacré chrétien. Nous avons vu comment ces acoustiques pouvaient créer une polyphonie "naturelle" et comment cela aurait pu influencer la naissance de la polyphonie. Nous avons pu voir comment la demande d'intelligibilité liée à la réforme et contre-réforme a fait diminuer le volume des églises baroques ce qui a permis une plus grande liberté de tempo et de virtuosité à des compositeurs comme J. S. Bach. Nous avons aussi pu remarquer comment la naissance de nouveaux styles a pu provoquer l'invention de nouveaux lieux de représentation : le dithyrambe et le théâtre antique, l'opéra et les théâtres italiens, la symphonie et les salles de concert publiques.
3. *Les avancées sur la notation de la musique ont rendu possible une complexification de l'écriture polyphonique* - pour le chant grégorien, à l'unisson et avec un chœur unique, une notation du rythme liée à celle de la prose n'était pas un problème et permettait même une liberté d'adaptation aux situations. En revanche lorsque la polyphonie devint plus complexe, à l'École de Notre-Dame par exemple, les clercs eurent besoin d'une notation plus précise pour garder les trois ou quatre voix ensemble et inventèrent donc la *notation mesurée*. Au baroque l'écriture se complexifie encore et est permise par un ensemble d'outils tels que les valeurs de notes, les clefs, les altérations.
4. *La musique et l'architecture ont été utilisés par les pouvoirs politiques pour créer un sentiment d'appartenance à un groupe* - la légalisation puis l'officialisation de la religion chrétienne par les empereurs romains a permis d'unifier cet Empire. Le chant grégorien permit par la suite d'unifier les pays chrétiens sous des rites communs, sous l'influence du Pape et de Charlemagne. La période Baroque fut l'occasion d'une affirmation de la nation par les arts, le meilleur exemple fut Louis XIV, le "Roi-Soleil".

À la manière de Brant, combinons en plusieurs points et dans l'ordre chronologique nos réflexions sur l'écriture spatiale acoustique issue de cette présentation historique.

1. *Le concept de Bagenal open-air/cave permet de classer les espaces que nous créons entre deux archétypes* - voir la présentation du concept, dans la section Préhistoire ([lien](#)).
2. *L'acoustique est porteuse d'une symbolique liée à notre culture* - dans la culture occidentale, les acoustiques de type "cave" ont par exemple été rattachées à la dimension du sacrée, du rituel, du mystique.
3. *L'acoustique peut servir de repère, à une "écho-localisation"* - voir le passage sur la grotte du Portel dans la section Préhistoire ([lien](#)).
4. *Une acoustique peut servir à porter la voix, l'amplifier, améliorer l'intelligibilité d'un discours ou d'une mélodie* - ce fut notamment le cas pour les théâtres Grecs ou les théâtres à l'italienne.
5. *Nous pouvons modifier une acoustique/ une architecture existante, pour s'adapter à la pièce, aux besoins, au public* - l'utilisation d'éléments acoustiques (vases, tissus, etc.) permettront de travailler des détails de l'acoustique.
6. *L'acoustique peut être considérée comme un instrument* - Vitruve et Berlioz ont tous deux pensé l'espace comme un instrument, avec quelques nuances cependant. Les chantres de l'École Notre-Dame jouent avec l'acoustique de la cathédrale lorsqu'ils font un travail de mémoire et de *colores*.
7. *Les lieux de représentation à long temps de réverbération créent une polyphonie "naturelle"* - voir la section consacrée sur la polyphonie des églises ([lien](#)).
8. *Des groupes séparés sont difficiles à coordonner* - nous avons pu l'observer à l'École Notre-Dame, ce qui a provoqué l'invention de la *notation mesurée*. Mais aussi à la Basilique Saint-Marc où Willaert écrit des parties de double basses pour stabiliser les ensembles séparés ou encore avec le cas particulier de la *Grande messe des morts* de Berlioz. Brant pour finir le théorisa.
9. *La Séparation spatiale clarifie les textures* - cet effet fut utilisé par le baroque colossal permettant d'avoir jusqu'à 12 chœurs séparés, mais aussi dans la Renaissance Vénitienne, dans la *Serenade pour Quatre Orchestres* de Mozart, ou encore dans les pièces de Ives et Brant.
10. *La séparation spatiale correspond à une séparation des textures dans l'espace* - certains s'en servirent comme Ives, Brant ou Cage tandis que d'autres essayèrent d'en diminuer les effets comme Willaert, Stockhausen, ou Mozart en séparant des ensembles de mêmes effectifs.
11. *La séparation spatiale permet une complexification de la polyphonie* - nous l'avons observé dans la Renaissance vénitienne ou le Baroque colossal.
12. *La séparation spatiale permet de transformer dynamiquement la perception de l'acoustique* - ceci fut notamment utilisé par Haydn dans sa pièce *Das Echo* ([lien](#)).
13. *L'espace est un lieu de théâtralisation, de mise en scène* - ceci correspond particulièrement à la période Romantique et ses concerts à programme, Berlioz notamment ([lien](#)).
14. *Les arrangements spatiaux doivent être prévus précisément, mais permettent certains ajustements dans les détails* - ceci fut notamment présent chez Berlioz et Brant, le premier pour des raisons dramaturgiques, le second pour ajuster le son.

Nous avons étudié la relation de la musique acoustique à l'espace de la préhistoire à la moitié du XX<sup>ième</sup> siècle. Le XX<sup>ième</sup> verra de nouveaux outils et une profonde modification de la philosophie musicale. Nous étudierons donc dans ce second chapitre les nouvelles réflexions qui émergent et comment celles-ci ont transformé le rapport de la composition à l'espace.

## Chapitre 2

# Musique Électroacoustique & Espaces

### 2.1 Innovations Spatiales dans la musique électro-acoustique

**Définition d'Électroacoustique et limites :** Nous définissons ici la musique électro-acoustique de manière assez large en englobant les musiques dont la représentation n'est plus exclusivement instrumentale. Il pourra s'agir de systèmes de projections du son, de synthèses qui soient reproduits aussi bien par ordinateurs que par bandes. Nous placerons son origine en 1948 avec la conceptualisation de la musique concrète par Pierre Schaeffer. Elle comprendra cependant plusieurs courants aussi divers que la musique acousmatique, la musique mixte, ou bien des travaux radiophoniques. Nous nous intéresserons ici à la musique pouvant plus généralement être classée dans le terme générique "Musique Contemporaine" dans le sens qui fait suite à la musique moderne - qui regroupe les courants du début du XX<sup>ième</sup> siècle. Nous n'aborderons donc pas ici, ou très brièvement, les musiques dites *populaires* de cette seconde moitié du siècle bien qu'elles aient elles-mêmes suivi une transformation technologique impliquant des systèmes de diffusion et des instruments électroacoustiques (ex : la guitare électrique en 1920).

Les années 60 verront émerger un bouleversement de la société aussi bien politique, culturel, idéologique, mais aussi artistique et la musique n'en est pas épargnée. À la lueur de ce désir global de révolution, au sens de changement de paradigme, les compositeurs remettront en question les a priori, les conventions ou dogmes présents dans la musique. Ils critiqueront notamment un certain fantasme pour le passé présent chez certains néoclassiques et modernes. Ils remettront en question la hiérarchisation des propriétés du son et exploieront de nouvelles approches, notamment celle de l'espace. Nous nous étions précédemment arrêté dans notre historique autour des années 50, avec l'émergence de plus en plus inévitable de la musique électro-acoustique. Nous commencerons par nous arrêter sur les réflexions qui émergent à cette époque afin de comprendre les changements que cela provoquera dans la composition musicale. À la lumière de cette philosophie musicale nouvelle nous étudierons quelques oeuvres des compositeurs majeurs de cette époque. Pour cela nous présenterons les technologies sonores qui permirent ces pièces. Nous finirons le chapitre par un état de l'art rapide sur l'état des technologies de nos jours afin de suivre les réflexions qui seront exposés dans le prochain chapitre sur la simulation d'acoustique.

## 2.2 Vue & Réflexions de Compositeurs

### 2.2.1 Changement du paradigme d'écoute musicale

Dans son livre *Appréhender l'espace sonore* (MERIC 2012) le musicologue Renaud MERIC nous explique que la révolution théorique qui s'est opérée au cours des années 60 chez les compositeurs fut accompagnée d'une réflexion nouvelle sur la place de l'écoute dans l'oeuvre musicale. À cette époque on remet en question les concepts qui rendent le son et l'espace étranger l'un de l'autre et les compositeurs s'accordent sur une relation forte entre les deux. Cependant leurs interprétations diffèrent légèrement dans leurs processus créatifs et dans la perception de la place de l'écoute dans l'oeuvre. L'auteur nous propose à titre de corpus les positions des compositeurs Luigi Nono, Iannis Xenakis et John Cage. Nous introduirons cette nouvelle conception de l'écoute par le prisme de Luigi Nono. Il fut en effet l'un des compositeurs dont le concept d'écoute fut le plus important dans son oeuvre et l'analyse historique de Nono nous permettra de donner une réflexion nouvelle sur le chapitre précédent. Nous comparerons ensuite sa vision avec celle d'autres compositeurs.

#### 2.2.1.1 Luigi Nono : une écoute essentielle

Pour Luigi Nono la combinaison des concepts d'espace et de son est primordiale. Il considère la projection des sons dans l'espace comme à part entière du processus compositionnel.

« Pour moi, la relation qui unit les sons et les espaces est fondamentale : comment le son se combine avec d'autres sons dans l'espace, comment ils se re-composent en lui... En d'autres termes : comment le son lit l'espace, et comment l'espace découvre, révèle le son. »<sup>1</sup>

Pour Nono les deux concepts sont donc inséparables il n'y a pas d'espace sans son et l'espace transforme, réarrange les sons entre eux, il les "re-compose". Dans ses écrits et conversation Nono ne précise pas clairement sa conception de l'espace, celle-ci semble être assez complexe. Faisons pour le moment la supposition qu'il parle de l'espace sonore perçu (nous reviendrons plus tard sur les difficultés liées à la définition d'un espace musical). En effet comme nous l'aborderons par la suite Luigi Nono ne s'intéresse pas temps à une réalité acoustique, "pure", mesurable par des appareils, mais plus à la recherche de cette réalité au travers de l'écoute. Le musicologue Renaud MERIC reformule l'idée de Nono ainsi (MERIC 2012) :

« [...] *l'espace provoque des métamorphoses sonores et les sons dévoilent des espaces fluctuants*<sup>2</sup> »

Ce qui est intéressant dans cette reformulation est qu'elle met en avant le caractère changeant de l'espace pour Nono, par l'écoute des sons qui se propagent dans l'espace notre perception de celui-ci se transforme.

« *L'espace est à l'image des sons : en perpétuelle mutation*<sup>3</sup> »

Ceci aura une grande importance dans son processus créatif. Pour Nono le son et l'espace sont donc deux matériaux musicaux, qui peuvent être travaillés séparément, mais apparaissent comme un matériau musical unique qui se révèle seulement par l'écoute. Cette relation entre son/espace est à lier avec celle de per-

---

1. Luigi Nono : *Conversation entre Luigi Nono, Michel Bertaglia et Massimo Cacciari, Ecrits*, Laurent Feneyrou, Paris, 1993, p. 483

2. Renaud MERIC, *Appréhender l'espace Sonore*, Harmmatant, 2012, p. 212

3. Renaud MERIC, *op. cit.*

ception/imagination pour comprendre le propos de Luigi Nono. En effet le concept d'écoute chez Nono est très important dans son oeuvre. Il se positionnait en faux d'une idée "traditionnelle" de l'écoute dans la musique. Il remet au centre de la question le principe de croyance en l'écoute.

La conversation entre Luigi Nono, Massimo Cacciari et Michele Bertaglia nous permet de faire un point historique et d'introduire cette réflexion. Nous présenterons ici volontairement de longs segments de cette conversation pour ne pas déformer les propos du compositeur et parce qu'elle présente très bien notre problématique et nous permet de donner une réflexion nouvelle sur le chapitre précédent :

« **Cacciari.** Ecoute-Silence-Possible... Sans vouloir réduire à une formule diachronique ton travail des dix dernières années, il me semble, mon cher Gigi, que ces trois mots pourraient permettre de cerner cette constellation problématique où se joue le sens même de la recherche actuelle. [...]

Tout d'abord, j'ai l'impression que tes efforts visent récemment à susciter une sorte *d'épochè*, de *suspension de jugement*, et ce précisément vis-à-vis de l'élément qui semble le moins questionnable de l'expérience musicale, à savoir la position de l'écoute.

Cette *épochè* suggère que ce qui semble appartenir *a priori* au langage musical (la dimension de l'écoute) est en réalité à redécouvrir de A à Z. On dirait en quelque sorte que tu soulignes l'urgence d'un *retour à l'écoute*. [...]

**Nono.** Pour moi, compte avant tout la différence entre la pensée et la praxis qui disent "écoute!" et la pensée et la praxis qui disent "crois!"...

**Cacciari.** Tu veux dire que, plutôt que de continuer à se développer dans une véritable pensée de l'écoute, le langage musical aurait commencé, à un certain moment de son histoire, à en appeler à une sorte de "foi" en l'écoute?

**Nono.** Absolument! Une foi religieuse, ou aussi bien laïque, naturaliste, déterministe ou mécaniste, ou, dans le pire des cas, narrative... [...] <sup>4</sup> »

Nono combat donc les croyances lors de l'écoute, les idées préconçues sur ce que l'on devrait entendre. Il interroge son écoute pour savoir si ce qu'il entend correspond à la "réalité" sonore ou bien s'il s'agit de son imagination, de ce qu'on lui a appris à entendre. Il voit donc l'écoute comme un moyen d'approcher, d'explorer la réalité, en interrogeant sans arrêt son écoute.

### 2.2.1.2 Critique de la relation image-son

Pour Nono l'apparition de cette écoute "traditionnelle" provient de la relation qui s'est faite entre l'image et le son et nous propose un rappel historique :

« **Cacciari.** L'écoute se serait donc usée, consumée peu à peu, à partir du moment où l'on ne s'est plus situé dans une dimension du *merveilleux* vis-à-vis du son, mais où l'on a commencé à écouter

---

4. Luigi Nono, *op. cit.*, p. 487-488

des images, dans une vision véristico-naturaliste ou dans le cadre d'un discours idéologique...

**Nono**... ou littéraire...

**Cacciari.** Par opposition, la pensée qui dit "écoute!" inviterait à ne pas traduire le son dans une tentative de répondre à la question "qu'est-ce que le son?", autrement dit à ne plus se placer - pour reprendre la formule de Rosenzweig - du point de vue de la "*Was ist? Frage*", de l'exigence de déchiffrement qui guide aujourd'hui encore la critique et la recherche musicologique, qui opèrent toujours une aliénation fondamentale du son, en donnant de lui une métaphore imagée, c'est-à-dire en expliquant le son précisément par tout ce qu'il *n'est pas*!

**Nono.** Absolument! Et si nous considérons qu'il s'agit d'images au sens propre et au sens fort du terme, à savoir d'*images-idées*, générales-génériques, il est plus facile dès lors de localiser dans l'histoire de la musique la genèse de ce processus d'effacement de la dimension originelle de l'écoute. Elle se situe vraisemblablement au XVIII<sup>ème</sup> siècle, dans le retour qui s'effectue sous l'impulsion de Rameau à la classification classico-platonicienne des modes grecs - basée sur l'identification de sentiments descriptibles -, et dont son *Traité de l'Harmonie* est l'aboutissement : ainsi la définition, par exemple, de l'accord majeur et mineur, à travers "L'Héroïque, le Furieux, le Faible le Plaintif", etc. qui confine à la bureaucratisation soviétique : la tonalité majeure est positive, la mineure, négative... C'est le manichéisme de l'idéologie... C'est aussi l'écueil du théâtre d'opéra italien ou "à l'italienne", qui produisit une *totale neutralisation de l'espace*... alors que, pour moi, la relation qui unit les sons et les espaces est fondamentale : comment le son se combine avec d'autres sons dans l'espace, comment ils se re-composent en lui... En d'autres termes : comment le son lit l'espace, et comment l'espace découvre, révèle le son.

[...]

**Nono.** Lorsque c'est la géométrie unifiée des salles de concert ou des théâtres qui sévit, la disposition est réduite au *face à face*...

**Cacciari.** Le son s'en trouve ainsi irrémédiablement visualisé... en lieu et place de l'écoute, c'est la vision, l'image qui sont privilégiées.

**Nono.** C'est en suivant cette voie qu'on en arriva à l'actuel culte des vedettes : l'auditeur doit avoir la possibilité de voir non seulement le chanteur, mais surtout, le chef d'orchestre! Le cas de la philharmonie de Berlin est à cet égard édifiant, avec sa séparation des espaces élaborée par Scharoun... qui en proposait l'altérité continue. Non seulement on n'a pas tenu compte du potentiel offert par cette solution, mais du fait du caractère monolithique de l'orchestre et de Karajan, les divers espaces non centralisés proposés par Scharoun restent inexploités et ramènent le public à la "célébration" du chef comme centre unique de l'attention, au point que la plupart des auditeurs se placent derrière l'orchestre.

»<sup>5</sup>

L'écoute se serait donc "usée" à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle, effacée derrière des concepts visuels, des idées sur ce que l'on doit écouter. On voit que pour Nono cette critique est à lier avec une certaine unification

---

5. Luigi Nono : *Conversation entre Luigi Nono, Michel Bertaglia et Massimo Cacciari, Ecrits, Laurent Feneyrou, Paris, 1993, p. 483*

des salles de concert, qui produiraient une *neutralisation de l'espace*. Nono semble encore plus critique envers les salles de concert à balcons dont il considère le potentiel sonore inexploité et une pratique dédiée à la vision. On regarde le chef avant d'écouter l'orchestre.

Renaud Meric fait un constat similaire dans son chapitre "*Le romantisme : la disparition de l'écoute*" (MERIC 2012, p 50). Pour lui cette disparition provient de la diffusion des idées de Rousseau et d'une vision *spiritualiste* de la musique. Jean-Jacques Rousseau faisait une analyse d'une origine commune de la musique et du langage. L'interprétation de cette analyse aurait entraîné une transformation de la conception de la musique : « après Jean-Jacques Rousseau, la musique s'est métamorphosée en un langage universel, qui se passe de mots. Elle est alors devenue un langage intérieur : l'aspect matériel, appartenant au visible, naissant chez Jean-Jacques Rousseau est peu à peu devenu illusion, narration, légende, histoire ou poème. » (MERIC 2012, p 50). Renaud Meric nous met en garde sur un point : Jean-Jacques Rousseau ne parle pas encore de musique discours, ce seront les romantiques qui utiliseront plus tard ce terme.

### 2.2.1.3 Critique de l'universalisation des espaces

Nono développe plus loin sa critique sur l'unification des espaces et ses conséquences :

« **Nono.** L'unification de l'écoute spatiale et musicale est le résultat de l'utilisation unidirectionnelle, unidimensionnelle de la géométrie, aggravée dans le cas particulier par les possibilités de réverbération. Avec la concentration de l'expérience musicale dans les théâtres et les salles de concert, ce qui disparaît irrémédiablement est la spatialité propre à des lieux où s'entremêlent dans un continuels bouleversement des géométries innombrables... Que l'on songe seulement à la basilique Saint-Marc ou à Notre-Dame de Paris...

L'infinie différence architecturale de ces "temples" !... Et pourtant, il faut rappeler que, dans presque tous, les chœurs, les maîtrises, les orgues étaient disposés à mi-hauteur : la musique était exécutée dans la verticalité, elle se produisait à différentes hauteurs, "répondant" à des géométries différentes, qui *apparemment* bouleversaient la composition. Mais en réalité, la composition était pensée, construite précisément *pour* et *avec* ces géométries. Songeons, par exemple, à la technique de composition de Giovanni Gabrieli : l'écriture est totalement différente selon qu'une pièce est destinée à cinq chœurs, ou à un chœur à quatre voix...

L'unicité de l'espace géométrisé se développait, dans ces lieux, selon les lignes génératrices de géométries polyvalentes... dans la basilique de Saint-Marc, tu avances, tu chemines et tu découvres des espaces toujours nouveaux, mais tu les *sens*, plutôt que tu ne les lis, tu les *écoutes*, même s'il n'y a pas de musique...

**Bertaglia.** Ces lieux offraient donc à l'auditeur la possibilité de modifier (ou recueillir) par ses déplacements le système des écoutes possibles, illimitées ? L'auditeur devenait, si je comprends bien - lui-même protagoniste non seulement de l'exécution, mais aussi du travail de composition... »<sup>6</sup>

Nono regrette donc l'uniformisation des salles de concert, de ces lieux *neutres*. Il préfère l'unicité de l'acoustique de certains lieux, comme Notre-Dame ou Saint-Marc, la complexité de leur acoustique, l'exploration

---

6. Luigi Nono, *op. cit.*, p. 487-488

de celles-ci. « L'infinie différence architecturale de ces "temples"!... » Il critique la disparition d'une écriture verticale propre à ces monuments de culte au profit d'une horizontalisation des salles de spectacle. Bertaggia soulève un point intéressant qui sera important dans l'oeuvre de Nono : l'écoute comme acte de composition. L'auditeur fait partie intégrante du processus créatif, l'oeuvre ne peut être dissociée de son écoute.

Stockhausen fait une critique similaire dans son essai "*Musik im Raum*" il regrette le monopole de salles de concert "symphoniques", l'absence de salle dédiée à la musique contemporaine. Nono et Stockhausen divergent sur ce dernier point. Alors que Nono est plutôt intéressé par jouer avec des acoustiques uniques et complexes des basiliques et cathédrales comme Saint-Marc ou Notre-Dame. Stockhausen lui souhaite une salle dédiée à la musique électro-acoustique, à acoustique variable et de grandes flexibilités de transformations de l'espace, d'installation technique. Nous explorerons plus en détail ce point dans la section concernant l'essai *Musik im Raum* de Stockhausen ([lien](#)).

#### 2.2.1.4 Relation de l'oeuvre à l'espace

Nono critique pas seulement ces salles mais aussi leur utilisation :

« **Nono.** Ce n'est pas seulement l'universelle homogénéité sérielle des théâtres ou des salles qui est en cause ; bien plus grave encore est le fait d'exécuter de la même façon de la musique à Saint-Marc ou à Notre-Dame... La basilique de Sant'Andrea de Leon Battista Alberti à Mantoue, ou le Musikverein de Vienne, sont considérés comme des *entrepôts* interchangeables où l'on peut placer indifféremment, ou de manière équivalente, exécutants et auditeurs, sons et écoutes...

C'est là aussi que se situe la limite de la didactique actuelle : la non-considération, la complète neutralisation du problème de l'espace... Les Gabrieli ne sont ni étudiés ni même connus en Italie pour ne pas parler de Willaert ! Mais il suffit même de songer aux *Motets pour deux chœurs* de Bach : on les joue, bien sûr, mais d'une façon totalement artificielle, sans tenir compte du fait qu'ils ont été conçus spécifiquement pour la Thomaskirche de Leipzig, et que leur écriture avait une relation directe avec les voûtes, les coupes, avec toutes les particularités architecturales du bâtiment... Aujourd'hui dans les salles de concert, ils sonnent tout autrement !! »<sup>7</sup>

Dans la pensée de l'écoute traditionnelle les salles sont devenues des lieux interchangeables, dissociés des oeuvres, oubliant que certaines oeuvres furent composées pour des lieux spécifiques. Pour Nono cette pensée traditionnelle n'a donc pas seulement dissocié l'oeuvre de l'écoute mais aussi l'oeuvre de l'espace. Il se pose en opposition totale à cette vision, pour Nono la pièce est liée à son espace. Il ira même plus loin en considérant que ses oeuvres sont à rattacher à la géographie du lieu où il les a composés, de leur environnement sonore.

« Quand il évoque l'acoustique de ses pièces, Nono dit souvent que les sons du Prometeo cherchent à révéler le jeu entre les espaces et les silences des églises de Venise, San Marco, San Lorenzo, et aussi ceux de la ville entière de Venise qui bien que situés à l'extérieur, se font entendre de manière déformée dans ces édifices » (DAUTREY 2007)

À la manière du "promeneur écoutant" de Michel Chion, Nono apprécie l'écoute de son environnement et s'en sert d'inspiration pour ses "espaces musicaux" (CHION 1993).

---

7. Luigi Nono, *op. cit.*, p. 487-488

### 2.2.1.5 Deux philosophies de l'écoute

Synthétisons les différentes réflexions qu'abordent Nono, Cacciari et Bertaglia : Nono combat les croyances lors de l'écoute, il voit l'écoute comme un moyen d'approcher, d'explorer la réalité, en interrogeant sans arrêt son écoute. C'est pourquoi il tient en horreur la croyance narrative ; Nono tient à éviter *l'iconisme* et lui préfère la matérialité sonore. Pour lui l'oeuvre ne peut ni être dissociée de son espace d'écriture, ni de son écoute. Il met donc en opposition deux philosophies de l'écoute :

1. La première, traditionnelle, qui considère la musique comme un langage où le son ne serait qu'une étape transitionnelle, de la même manière que le son de la voix ne servirait qu'à transmettre un mot, une phrase. L'écoute a alors pour seul intérêt d'aller chercher au-delà du son pour accéder à un imaginaire, une narration.

« *Le son ne constitue pas ainsi une image : il est le moyen de la faire apparaître*<sup>8</sup> »

2. La seconde, dans laquelle il s'inscrit, où l'écoute fait partie intégrante de l'oeuvre. On s'intéresse alors à cet unique matériau musical qu'est la fusion des sons et de l'espace. L'espace ne peut alors pas être détaché de l'oeuvre.

*Le matériau musical ne peut plus être conçu comme préexistant à l'oeuvre elle-même et à l'écoute ; et réciproquement l'oeuvre musicale ne peut plus être considérée comme préexistante à l'écoute.*<sup>9</sup>

Ces deux philosophies mettent donc aussi en opposition des temporalités ; dans un premier cas la temporalité de la narration, dans le second la temporalité éphémère et insaisissable de l'écoute, nous y reviendrons plus tard.

---

8. *Renaud Meric, op. cit.*

9. *Renaud Meric, op. cit.*

## 2.2.2 L'espace musical ?

Nous le voyons dans les citations précédentes : nous nous heurtons régulièrement à la définition de l'emploi du mot *espace* par les compositeurs ou musicologues. Celui-ci ne se limite pas à une définition physique du phénomène mais pourra avoir des sens perceptif, philosophique, géographique anthropologique... et donc être interprété de différentes manières. « Or, il s'agit là du problème central de l'espace et de sa relation au sonore ou au musical : personne ne peut dire où il commence et où il se termine, de quoi et à partir de quoi il se crée, quels en sont les fondements et les origines... »<sup>10</sup>. Le réflexe est bien souvent de délimiter l'espace par des entités, (son de quelque chose, d'un objet) et ainsi de définir l'espace par l'addition de ces entités. Nous avons vu précédemment qu'une approche simplifiée du rapport à l'espace a existé dans les musiques avant le XX<sup>ème</sup> siècle, souvent tournée autour d'un *geste vocal* ou de chorégraphies, de gestes vocaux. Ceci non pas comme un matériau musical, d'écriture mais plus comme une *finalité esthétique*. « Le rapprochement entre l'écoute et l'espace peut ainsi être bâti autour de la notion de mouvement. » Nous commencerons par nous intéresser à cette première notion d'espace, et nous intéresserons ensuite à la notion de mouvement. Makis Solomos et Jean-Marc Chouvel s'expriment très clairement sur ce sujet dans l'introduction au recueil *L'espace : Musique/Philosophie* (CHOUVEL et SOLOMOS 1998) :

« En effet, qu'est-ce que l'espace musical ? Depuis un certain nombre d'années, cette notion est entrée dans le vocabulaire le plus commun ; on en parle d'une manière de plus en plus insistante, construit notamment du fait de l'évolution de la musique du XX siècle. Cependant, à l'heure actuelle, il semble difficile de la circonscrire avec précision. L'espace (musical, mais aussi l'espace tout court) est tout, il est bien plus qu'un simple cadre ; mais il est aussi rien, synonyme du vide (et du silence) : entre ces deux définitions multiples, se situent des acceptations multiples.

Parce qu'ils transgressent les barrières entre "disciplines" - musique et philosophie, mais aussi musique instrumentale/électroacoustique, musicologie/ethnomusicologie, etc. , [...] L'auditeur devra partir de l'idée qu'il existe plusieurs espèces d'espace et plusieurs manières de s'interroger sur l'espace. »

Cette diversité peut à la fois être un atout et une faiblesse ; elle peut représenter une richesse, mais la difficulté de définir l'espace pourra avoir tendance à lui donner une place secondaire en ne le prenant que comme une propriété passive, une structure et non pas élément de création, de réflexion. Pour en revenir à l'analogie visuelle citée plus haut, le simple fait d'avoir affaire à un ensemble d'entités évoquant l'espace visible suffit pour que nous qualifions cet ensemble d'espace. François Noudelmann dans *L'espace à double entente* l'exprime ainsi :

« Philosophiquement l'espace renvoie aussi bien à la géométrie universelle qu'à la disposition de la conscience ; musicalement, il se construit sur un paradoxe pour redéfinir à la fois la réception sonore et la composition musicale.

La prise en compte de l'espace en musique recèle de nombreuses équivoques : d'une part à l'écoute des emplois et références philosophiques de la catégorie d'espace, d'autre part quant aux usages internes de l'analyse musicologique de l'espace comme métaphore ou schème<sup>11</sup> compositionnel. La confusion

---

10. Renaud Meric, op. cit.

11. Dans cette situation selon le Larousse : Forme ou ensemble de formes artistiques.

paraît d'autant plus forte que la notion s'inscrit dans un volontarisme musical, philosophique et social, plus généralement idéologique. Revendiquée par certains compositeurs depuis le début du XX<sup>ième</sup> siècle, elle participe de l'émancipation propre la modernité artistique; mais elle résonne aussi des discours et des pratiques d'appropriation d'une modernité plus lointaine, celle de l'âge classique et de la rationalisation de l'espace et du sujet. »<sup>12</sup>

L'auteur nous dit ensuite que si l'espace libère la musique du temps, il est aussi nécessaire de se libérer de celui-ci, d'en prendre de la distance pour y découvrir le mouvement de notre propre corps. Celui-ci « déplie et défie l'ordre de l'espace. La notion d'espace musical peut alors désigner la façon dont la musique temporalise l'espace pour lui donner mesure ou démesure. [...] L'espace que produit la musique elle-même (s'il n'est pas une métaphore) tient dans la déstabilisation de la conscience d'espace, dans ce vacillement qui fait vibrer ma place, qui met en cause le site de ma propre situation. Espace qui me fait entendre mon propre déplacement, qui rend toute localisation – et peut-être tout discours - déplacés. »<sup>13</sup>. Il ne faut ainsi pas opposer ou mettre en parallèle l'espace et le temps comme de simples supports à la musique; l'espace et le temps sont intrinsèquement liés par l'écoute qui les transforme, les modifie. Makis Solomos propose ainsi une nouvelle notion, celle d'espace-son (SOLOMOS 1998) :

« La spatialisation de la musique va de pair ou entraîne la mutation majeure de ce siècle où la musique cesse d'être l'art des sons (sous-entendu : de la combinatoire des sons) pour devenir l'art de la synthèse du son : le repli dans l'instant qui découle de la spatialisation est synonyme de construction intérieure du son.

A ce titre, nous pourrions proposer d'employer l'expression espace-son comme un cadre utile à l'analyse d'une partie de la musique d'un passé récent ou de la musique actuelle. Ce cadre offrirait un double avantage. D'une part, il autoriserait de penser que le son, devenu très important pour la musique d'aujourd'hui, n'est pas une métaphore, un modèle comme un autre, utile simplement en temps de crise : il constitue une issue à ce nouvel "art de l'espace". D'autre part, il permettrait d'envisager l'hypothèse que l'espace n'est plus simplement une "dimension" du son, que la spatialisation du son n'est, finalement, qu'un des aspects du continuum espace-son »<sup>14</sup>

### 2.2.2.1 Espèces d'espaces - François BAYLE

Dans *l'espace du son* I<sup>15</sup> (BAYLE 1993) François Bayle propose sa propre classification des espaces. Tout d'abord tout comme Nono, il recentre cette notion d'espace autour de celle d'écoute. « Inversant la fonction du regard - tourné vers le dehors- elle repère ce qui est dedans, ce qui est derrière, ce qui est caché. L'espace cache et l'écoute veut voir. ». Tout comme Renaud Meric, F. Bayle associe tout de suite l'écoute à l'imagination. F. Bayle voit l'espace comme le lieu de l'intime, de la protection, de la paisibilité, il y voit du silence. C'est seulement dans cet état qu'une écoute, acousmatique, est possible. Pour lui cette écoute dans sa recherche de repères nécessite une fragilité. Pour Bayle on n'écoute pas l'espace directement (impossible selon lui) mais plutôt les mouvements en lui. Il analyse l'espace comme une structure complexe et s'intéresse à sa dynamique. Nous

12. François Noudelmann, *L'espace à double entente, L'Espace, Musique/Philosophie*, dir. de Jean-Marc Chauvel, p391

13. François Noudelmann, *Ibid*, p401

14. Makis Solomos. L'ESPACE-SON. Jean-Marc Chauvel; Makis Solomos. L'espace : musique, philosophie, L'Harmattan, p. 211-224, 1998. hal-01202926

15. François Bayle, *L'espace du son I*, dir. Francis Dhomont, Lien, Musiques et Recherches, 1988

reviendrons plus tard sur cet aspect au regard de la vision de Xenakis. Ainsi Pour Bayle, avant d'étudier les espaces il lui a d'abord fallu étudier son écoute et son expérience; il propose une tripartition de l'audible en s'inspirant de la "trichromie" de Ch. -S. Peirce :

<i>trois stades de l'expérience</i>	<i>mettant en oeuvre</i>	<i>qui fait jouer</i>	<i>en vue d'une</i>
priméité	audition	qualités	présentification
secondéité	cognition	objets	identification
tiercéité	musicalisation	mises en scène	interprétation

Dans le premier stade Bayle y décrit l'expérience sensori-motrice, on se plonge dans le temps de l'écoute, dans l'instantanéité et on se satisfait d'une jouissance de l'écoute "pour elle-même". C'est ce qu'il nomme l'écoute intuitive. C'est pour lui la première étape de l'écoute, on n'identifie alors pas encore des objets sonores, des formes. L'auteur nous explique que l'on peut faire cette expérience couramment dans un espace de diffusion; lors de la diffusion d'un son on identifiera en premier des bruits modulés, des timbres, des discriminations interaurales pures (voir chapitre 1 sur l'écoute humaine).

La seconde étape est celle de l'émergence de formes et de jeux de causalités. C'est ce qu'il nomme l'identification qui demande un effort de concentration, c'est pour lui, la première étape qui reconnaît l'extérieur. On retrouve alors chez Bayle une analyse proche de celle de Deshayes sur la mémoire : « L'espace (extérieur local) et la mémoire (extérieur temporel) constituent les conditions de la conscience des objets, des bordures, contours et de leur identification possible »<sup>16</sup>. Cette étape est donc pour Bayle une étape similaire à l'écoute réduite de P. Schaeffer, c'est l'oreille sélective qui apprend à écouter, à extraire du signal. « Par-dessus la perception égocentrique de l'immédiateté sonore (orientation) s'édifie la conscience de formes spatiales et autonomes (centration) utiles à une stratégie (relation). »<sup>17</sup>

La troisième étape est celle des correspondances, des mises en relation. La mise en relation des objets sonores identifiés dans l'étape précédente nous permet encore de transformer notre écoute de l'espace : l'association du ronflement d'un frigidaire et du tic-tac pourront suffire à nous projeter dans un intérieur de maison, à une certaine acoustique, les bruits et fond-airs jusqu'alors inidentifiables pourront être interprétés comme autant de signes de vie provenant de l'intérieur ou l'extérieur de cet espace imaginaire. Il n'est alors pas question d'une réalité objective de cet espace, la frontière entre l'imagination et la perception est alors très fine. Chacun interprétera ce lieu selon sa propre expérience (voir l'analyse de DESHAYS plus haut).

En 1988 François Bayle nous propose donc trois espaces : l'espace des figures, l'espace-objet et l'espace de représentation correspondant chacun à un des trois modes d'écoutes présentés plus haut.

*Ce concept nous permet de prendre conscience du temps que prend l'écoute à se construire un espace mental. On retrouve un concept similaire à celui de Nono : l'espace n'est pas une entité figée, elle dépend de notre écoute, des sons qui se propagent et de notre expérience. Cela nous montre aussi*

16. François Bayle, *Musique acousmatique - propositions... ..positions*, INA-GRM, Buchet/Chastel, 1993, p105

17. François Bayle, *Ibid.*, p105

*l'importance de réfléchir aux référents sonores, aux sons qui - lorsqu'ils seront identifiés - rappelleront culturellement certains espaces. Dans le cadre d'une simulation 3D d'acoustique il faudra donc faire un travail, dans l'espace, de placement de ces marqueurs sonores - afin de créer l'"ambiance" propre aux espaces que l'on souhaite créer.*

## 2.2.3 Mouvement & Matière sonore

### 2.2.3.1 Définir le mouvement ?

La notion de mouvement se transformera au passage du XX<sup>ième</sup> siècle. Alors que dans les musiques tonales elle s'articulait surtout autour de la voix, le XX<sup>ième</sup> siècle a développé une multiplicité de mouvements qui ont permis de révéler l'espace (MERIC 2012). Les parties précédentes sur l'écoute et l'espace nous ont amenés à ne pas voir les deux notions autonomes l'une de l'autre. Il ne sera donc pas ici question d'aborder le mouvement comme une entité géométrique autonome de notre écoute ou notre imagination. Il n'est pas non plus question de venir substituer la mobilité inhérente du son par une nouvelle entité musicale. Essayons plutôt, dans la fragilité de la notion même de son de voir où la notion de mouvement nous amène. Pierre Schaeffer dans le chapitre préliminaire du *Traité des objets musicaux* analysait ainsi (SCHAEFFER 2015) :

« Les découvreurs eux-mêmes, à leurs débuts, méconnaissent leurs trouvailles, s'ingéniant à les faire entrer de force dans les systèmes de pensée qu'ils ont appris à pratiquer ; les moyens nouveaux sont rarement saisis dans leur originalité propre, pour ce qu'ils permettent, mais comme autant de moyens de perfectionner l'acquis ; les faits nouveaux sont aperçus dans le prolongement du passé ou, lorsque cela devient impossible comme des anomalies, quelque chose de supplémentaire et d'exceptionnel. Jusqu'au moment où le réel s'est transformé de manière décisive, avant les notions qui permettaient d'en rendre compte.

Brusquement ces notions, qui paraissaient à la fois évidentes et exhaustives, s'avèrent contredites et dépassées, inaptées à comprendre les phénomènes dans leur ensemble. Ce qui, par rapport à l'inventaire dressé par les prédécesseurs, apparaissait excentrique, devient l'occasion de remettre en cause ce qui était le plus universellement admis. C'est alors que tout chercheur sérieux doit reprendre à son compte l'ascèse cartésienne : "(se) défaire de toutes les opinions (qu'il) avait reçues jusqu'en (sa) créance, et commencer tout de nouveau par les fondements »<sup>18</sup>

Et précise plus loin concernant la musique :

« Au lieu d'une correspondance, en vérité, un examen sérieux est loin de faire apparaître de claires corrélations, une harmonie pré-établie entre musique et mathématique, ou aisée entre psychologie et acoustique ; on est obligé de constater le disparate et la dispersion : la musique est une montagne dans laquelle chacun perce son tunnel, et les galeries s'entrecroisent sans jamais se rencontrer »<sup>19</sup>

Renaud Meric exprimait ainsi cette idée : « Le son en tant qu'entité bien définie et clairement délimitée, est insaisissable... » et complète ensuite « les définitions du son que nous donnons voudraient qu'il ait des caractéristiques objectives [...] bien qu'il soit, forcément et concurremment, le fruit, subjectif, d'une écoute »<sup>20</sup>.

18. Pierre Schaeffer, *Traité des objets musicaux*, Paris, Seuil, 1966, p 15

19. Pierre Schaeffer, *Traité des objets musicaux*, Paris, Seuil, 1966, p 29

20. Renaud Meric, *op. cit.*, p228-229

Ceci nous ramène à une réflexion abordée par l'ingénieur du son, metteur en scène sonore et essayiste Daniel Deshays dans son ouvrage *Pour une écriture du son* (DESHAYS 2008). L'auteur expliquait ainsi la nature subjective du son par sa mobilité intrinsèque. Le son nous dit-il est par définition originaire d'un mouvement et ne vit que dans celui-ci. Là où l'on peut stopper un film pour en analyser l'image en profondeur on ne peut stopper le son, il est insaisissable. Si l'on stoppe la bande il disparaît. Lorsque nous écoutons ce son, il nous faudra alors faire appel à notre mémoire pour essayer de se faire une idée de la forme globale. Cette étape de mise en mémoire nous permet d'identifier des objets sonores qu'il faudra ensuite identifier. Dans le cas du langage d'abord pour former des mots puis les comparer à notre "bibliothèque" de mots dans la langue présumée, puis de mémoriser ces mots pour en créer une phrase. Dans le cas des autres objets sonores le processus reste similaire mais cette fois l'on ne comparera plus à des mots mais à d'autres sons entendus. Ainsi pour un même son projeté deux auditeurs pourront avoir deux compréhensions bien différentes, évoquant aussi des émotions différentes (car dépendantes de notre expérience à ces sons). Renaud Meric fait une analyse similaire sur le mouvement comme origine du son : « Le son est le signe de sa présence, il en est une trace, une image voire il est ce mouvement lui-même. Lorsque nous entendons un son quelque chose s'est mu. »<sup>21</sup>. L'auteur précise que l'on ne s'intéresse alors pas au mouvement *d'un* son mais du ou des mouvements à l'origine même de ce son, qui l'accompagnent ou le révèlent : « L'écoute est indéniablement, l'exploration d'un espace »<sup>22</sup>

Renaud Meric nous donne un exemple simple : le "son de voiture". Quand bien même on pourrait le considérer comme un seul objet sonore il est en réalité construit d'un ensemble complexe de processus. Chaque pièce en mouvement dans le moteur interagit avec les autres pièces pour créer un vrombissement. Les pneus donnent leur son caractéristique sur l'asphalte<sup>23</sup> qui dépendra notamment de l'état d'usure des pneus, la vitesse, l'hygrométrie<sup>24</sup>. Le son de la carrosserie qui fend l'air, des suspensions. Tous ces éléments interagissent entre eux, transformant leur sonorité, et ne peuvent être considéré comme un point unique d'émission. L'acoustique de l'environnement rentre ensuite en jeu, les réflexions mouvantes sur les parois des immeubles et de la route lorsque la voiture se déplace. Puis vient notre écoute et notre perception de "ce son" qui vient encore complexifier ce phénomène

---

21. Renaud Meric, *op. cit.*, p231

22. Renaud Meric, *op. cit.*, p231

23. Mélange de calcaire et de bitume utilisé pour le revêtement des chaussées.

24. Mesure du degré d'humidité de l'atmosphère

### 2.2.3.2 Écrire le mouvement ?

La partie précédente nous amène à nous poser la question : Peut-on écrire un mouvement si l'écoute en est elle-même créatrice ? Intéressons-nous pour cela à la vision de Iannis Xenakis dans l'article *musiques stochastiques libres* de *Musiques formelles* (XENAKIS 1963b) :

« Voici comment, à partir de l'impasse des musiques sérielles, est née en 1954, une musique fabriquée du principe de l'indéterminisme que deux ans plus tard j'ai baptisée : Musique stochastique. Les lois du calcul des probabilités entraînent par nécessité musicale dans la composition.

Mais d'autres voies conduisent au même carrefour stochastique. Tout d'abord des événements naturels tels que les chocs de la grêle ou de la pluie sur des surfaces dures ou encore le chant des cigales dans un champ en plein été. Ces événements sonores globaux sont faits de milliers de sons isolés, dont la multitude crée un événement sonore nouveau sur un plan d'ensemble. Or cet événement d'ensemble est articulé et forme une plastique temporelle qui suit, elle aussi, des lois aléatoires, stochastiques. Si on peut modeler un grand amas de notes ponctuelles telles que les pizzicati de cordes, il faut connaître ces lois mathématiques, qui ne sont d'ailleurs ni plus ni moins qu'une expression dense et serrée d'une chaîne de raisonnements logiques. Tout le monde a observé des phénomènes sonores d'une grande foule politisée de dizaines ou de centaines de milliers de personnes. Le fleuve humain qui scande un mot d'ordre en rythme unanime. Puis un autre mot d'ordre est lancé en tête de la manifestation, et se propage à la queue en remplaçant le premier. Une onde de transition part ainsi de la tête à la queue. La clameur emplit la ville, la force inhibitrice de la voix et du rythme est culminante. C'est un événement hautement puissant et beau dans sa férocité. Puis le choc des manifestants et de l'ennemi se produit. Le rythme parfait dernier mot d'ordre se rompt en un amas énorme de cris chaotiques qui, lui aussi, se propage à la queue. Imaginons de plus des crépitements de dizaines de mitrailleuses et des sifflements des balles qui ajoutent leur ponctuation à ce désordre total. Puis rapidement la foule est dispersée et, à l'enfer sonore et visuel, succède un calme détonant, plein de désespoir, de mort et de poussière. Les lois statistiques de ces événements vidés de leur contenu politique ou moral, sont celles des cigales et de la pluie. Ce sont des lois de passage de l'ordre parfait au désordre total d'une manière continue ou explosive. Ce sont des lois stochastiques. »<sup>25</sup> (XENAKIS 1963b, p 19)

Xenakis nous amène ici un nouveau concept musical, un changement d'échelle. Il ne s'intéresse alors non pas aux éléments distincts mais à la dynamique globale d'une structure complexe.

*Lors de mon échange à Zürich j'ai eu l'occasion de discuter de ce sujet avec Hans Tutschku<sup>26</sup> ; il prenait en exemple l'intention de donner l'impression qu'un train immense passe près de nous. Une source monophonique que l'on fera défiler de gauche à droite ne sera alors pas suffisante pour donner cette impression, il nous faudra alors une multitude d'objets sonores différents parcourant cette trajectoire. Pourtant, il s'agit d'une idée "simple" de mouvement continue dans une direction. On s'intéresse donc désormais à des ensembles d'objets sonores, des amas de sources.*

---

25. Iannis Xenakis, *Musiques formelles*, Paris, Richard-Masse, 1963, p19

26. Hans Tutschku, compositeur et actuellement professeur de composition électro-acoustique à Harvard

### 2.2.3.3 Xenakis et les Polytopes

Dans cette idée d'écrire des structures complexes Iannis Xenakis commencera à imaginer des *Polytopes*. Ce mot, inventé par le compositeur greco-français, est une combinaison des termes grecques "poly" (plusieurs) et "topos" (lieux). Xenakis était insatisfait du *Poème électronique*, il le trouvait trop figuratif, et proposa par ses créations sa propre vision d'un spectacle d'art total électronique. Il associe ainsi son, musique, architecture et lumière dans des performances lives. Il s'agit pour lui de faire une superposition de différents espaces : son, lumière, architecture, couleurs, d'où la signification de "lieu multiples" des Polytopes. Il envisage ces oeuvres comme des grandes sculptures transversales la lumière devient par exemple matière à sculpture, et non plus simple véhicule de l'image. Xenakis y met une place importante aux spectateurs, invités à participer activement à la construction du sens de l'ensemble.

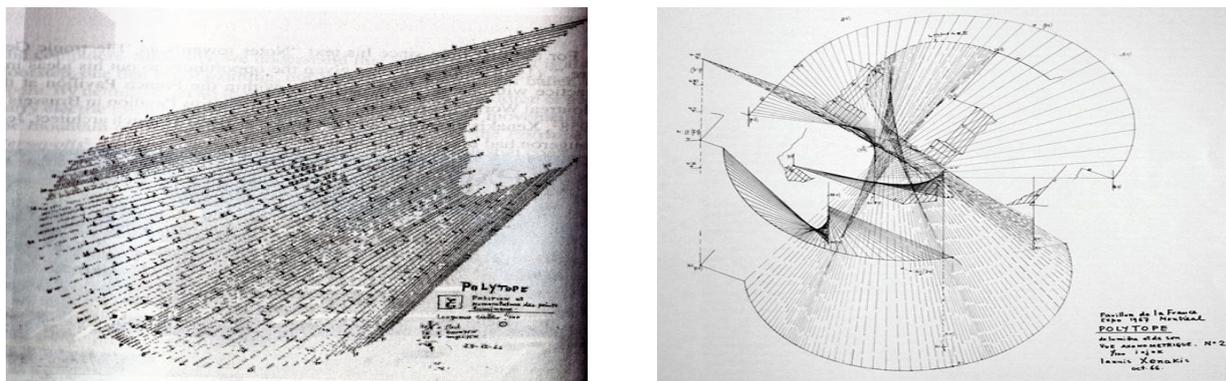


FIGURE 2.1 – Exemple de polytopes réalisé par Iannis Xenakis

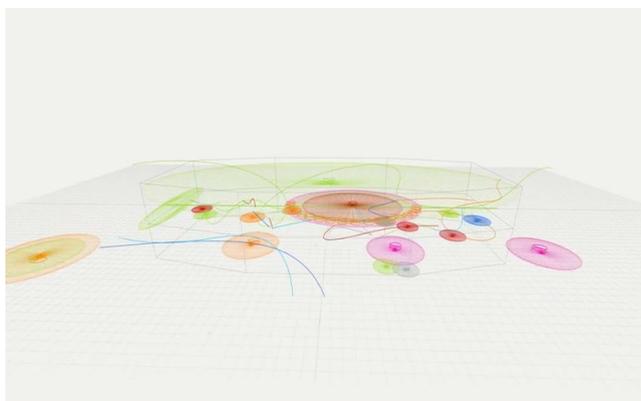
« Dans ces projets, sont greffés sur une architecture ou un site historique donnés différents systèmes cartésiens, composés de points sonores (des haut-parleurs) ou lumineux (des flashes). À partir de ces entités axiomatiques, Xenakis construit des figures et des volumes virtuels en musique ou en lumières. Il entreprend ainsi une démarche de formalisation globale et parallèle dans les différents médias. Les composants de cet ensemble diachronique sont traités chacun indépendamment, la synthèse et l'attribution du sens revenant au spectateur qui en est l'interprète. »<sup>27</sup>

On voit donc que la maîtrise de l'espace du spectacle et de l'espace du spectateur devient de plus en plus importante dans les Polytopes (nous revenons sur ces notions dans les parties suivantes). Xenakis dessinera par exemple le *Diatope*, un pavillon conçu pour l'ouverture du Centre Georges-Pompidou en 1977, qui se veut être un espace nomade vêtu de textile, conçu pour voyager dans le monde entier comme représentant du Centre Georges-Pompidou. Son oeuvre aussi bien musicale qu'architecturale est « une provocation permanente, une invitation à jouer l'espace »<sup>28</sup>.

27. [iannis-xenakis.org](http://iannis-xenakis.org) (lien)

28. *Ibid.*

*Pour ceux qui souhaiteraient écrire ces types d'espaces, il existe Iannix un logiciel développé à la demande du ministère de la culture sous la direction de Thierry Coduys, assistant de Xenakis. Le logiciel se veut être dans une continuité de la pensée de Xenakis dans le dessin de l'espace, notamment du projet Upic (cliquez sur la vidéo ci-dessous pour observer une animation).*



Charles de Meaux, Thierry Coduys, Exposition Universelle de 2012 en Corée du Sud

Renaud Meric analyse deux visions complémentaires dans l'idée qu'expose Xenakis : le point de vue de Xenakis-compositeur et celui de Xenakis-auditeur :

#### **2.2.3.4 Perspective du compositeur**

Dans le premier cas, Xenakis analyse la scène d'un point de vue extérieur, global, il se place au-dessus de la foule, il analyse l'ensemble des interactions temporelles de chaque objet sonore. Il se plaît à comprendre leurs structures, l'analyser. De cette vision de compositeur il s'imagine déjà re-composer cette scène musicalement, choisir les matériaux sonores, leurs interactions. Ainsi le compositeur ne se place plus dans une position où il écrit chaque objet sonore comme une fin en soi. L'objet sonore ne devient alors qu'un matériau pour la création d'une structure plus complexe que le compositeur va venir re-composer par et dans l'espace.

« Le véritable matériau musical n'est plus le son délimité dans une durée mais une série de processus dynamiques spatiaux et temporels évanescents » (MERIC 2012, 267)

#### **2.2.3.5 Perspective de l'auditeur**

La seconde vision, celle de l'auditeur, se trouve quant à elle à l'intérieur de la foule humaine. L'auditeur n'a alors pas accès à la globalité, à toute la complexité de la structure, il se trouve davantage dans une position d'écoute active, de découverte. Il n'a pas accès aux "individus" sonores. Ce dernier ne pourra pas faire l'expérience de la discrétisation des sources que Xenakis semble s'imaginer, quand bien même cette discrétisation semble être une chimère inatteignable. Comme nous l'expliquions précédemment avec l'exemple du "son de voiture" ce son qui peut au premier abord nous sembler être un seul objet sonore est déjà lui-même un son complexe généré par les interactions combinées et entrelacés de tout un amas de sources. Dans l'exemple de la manifestation, chaque personne dans la foule est influencée par les individus qui l'entourent et par sa propre perception de son environnement. C'est un système complexe où l'action d'un seul individu peut créer une réaction dans toute la foule. Faire l'addition de tous les individus séparés ne suffira pas pour recréer cette complexité.

Pierre Schaeffer faisait une critique de ces objets musicaux qu'il appelait "sons excentriques" dans sa typologie des objets sonores en se plaçant justement dans cette vision de l'auditeur :

« S'il arrive en effet qu'un de ces sons figure dans une oeuvre, il risque d'arracher l'attention de l'auditeur à son profit, car trop structuré, trop imprévisible, et en général trop encombrant, remarquable toujours, il s'impose en risquant de détruire toute forme autre que la sienne propre : dans la structure où il s'insère il devient pôle central au lieu de rester simple élément parmi les autres.

Nous avons déjà envisagé les causes possibles de cet excès d'originalité : un excès de facture plus ou moins lié à un excès de variation de masse ; les profils dynamiques et mélodiques seront tortueux, désordonnés. L'excès d'information fait également dire de ces sons qu'ils sont informes : plus exactement, ils n'ont pas de bonne forme, car loin d'être nulle, comme dans les sons homogènes, leur forme submerge la perception par sa complexité et son imprévisibilité. Que représente-t-elle ? D'une façon générale, le récit de l'entretien, et de ses conséquences, dynamiques toujours, mélodiques et harmoniques souvent ; du moins c'est ce que l'oreille lorsqu'elle a suffisamment de temps pour apprécier ce que le façonnier de tels sons a lui-même pris le temps d'y mettre. Dans ce qui suit, nous nous limiterons à des cas où une certaine unité est perceptible dans le son, qui se présente ainsi encore comme un objet sonore. » (SCHAEFFER 2015, p 459)

Pierre Schaeffer est alors dans une position totalement différente de celle de Xenakis. Alors que ce dernier dissocie des points de vue bien différents ; celui du compositeur architecte de la structure et celui de l'auditeur attentif explorant une portion, une perception de celle-ci. Schaeffer quant à lui privilégie l'objet sonore en lui-même et souhaite transmettre à l'auditeur la même représentation que la sienne. En ceci, nous dit Renaud Meric, Pierre Schaeffer fait une erreur ; en s'arrêtant sur la complexité des propriétés de ces sons excentriques il en oublie leur écoute. Ces sons sont tous aussi complexes que notre écoute de ceux-ci. Pierre Schaeffer tombe alors dans une conception traditionnelle de la relation du son à l'écoute : « l'auditeur à la sensation de pouvoir tout saisir, de saisir le son dans sa globalité [...] (II) croit que l'écoute peut correspondre au son. » Ainsi ce ne sont pas les sons qui sont excentriques ou même instables mais bien notre écoute de ceux-ci. N'importe quel son pourrait être décrit comme excentrique en fonction de l'échelle que l'on adopte, comme le montrait précédemment notre exemple de "son de voiture" pouvant soit être considéré comme une entité, un "objet sonore", ou bien un ensemble complexe.

« Toute écoute, attentive, est une immersion dans un complexe sonore mouvant. »<sup>29</sup>

---

29. Renaud Meric, *op. cit.*

## 2.2.4 1959 : *Music im Raum* - Stockhausen & l'égalitarisme des paramètres du son.

Après avoir étudié l'influence du changement du paradigme d'écoute à partir des années 60 et les réflexions que cela nous a amenés à porter sur l'espace et le mouvement. Intéressons-nous désormais à une autre philosophie musicale de la fin des années 50, début des années 60 : l'égalitarisme des paramètres du son. Pour cela intéressons-nous au traité "*Musik im Raum*" ("la musique dans l'espace") de Stockhausen qui nous présente cette philosophie et la relie à une réflexion sur l'espace.

Dans son traité Stockhausen nous expose, après un bref résumé historique, son point de vue sur l'émergence d'oeuvres musicales spatiales dans les années 50. Tout d'abord il nous rappelle que toute composition a toujours été "spatiale" il parle donc ici de l'émergence d'un nouveau rapport à celle-ci (voir chapitre 1). Rappelons que ces exemples n'ont pas été anodins dans la manière classique de composer et que certaines formes très utilisées par la suite proviennent indirectement de cette antiphonie<sup>30</sup> spatiale. Cependant Stockhausen insiste sur la différence de fond existant entre les expériences d'ordre spatial dans l'histoire de la musique occidentale et le contexte de l'après-guerre.

En effet durant les XVI<sup>ème</sup> et XVII<sup>ème</sup> siècles les expérimentations spatiales reposent principalement sur l'antiphonie spatiale, à l'époque Classique sur l'écho Baroque, la reprise et la répétition dans l'espace puis au romantisme à une sorte de musique architecturale, "d'Opéra symphonique", dont Stockhausen dira de cette dernière qu'elle présente le moins de "traits communs avec la situation actuelle". Et donc d'une composition qui reste, pour lui, très "classique" dans son approche, dans le sens où l'espace est utilisé comme cinquième élément d'importance dans la composition (nous y reviendrons plus tard). Après-guerre au contraire la composition spatiale deviendra un élément structurant de l'oeuvre au même niveau que tous les autres paramètres du son, nous explique-t-il.

En effet dans les années 50, il y a dans la philosophie musicale une volonté de mettre tous les paramètres du son sur un pied d'égalité dans la composition. Avant de rentrer dans le détail de cette égalité il nous faut comprendre quelle échelle de valeurs la tradition musicale occidentale a-t-elle mise en place entre ces paramètres. Pour cela Stockhausen propose d'étudier comment chaque paramètre a été plus ou moins développé.

Dans cette perspective en haut de notre hiérarchie nous avons la hauteur du son qui a été la plus différenciée, systématisée du point de vue harmonique et mélodique (différenciation de l'échelle des hauteurs comprenant jusqu'à quatre-vingt-huit degrés); c'est cet élément qui a été porté le plus loin dans la notation musicale et corrélativement dans la facture instrumentale. Ensuite viennent les rapports de durées du point de vue métrique et rythmique, on trouve dans la notation musicale usuelle environ quarante durées sonores. Ensuite le timbre bien moins développé dans la musique instrumentale traditionnelle dont Stockhausen nous dit qu'elle n'a été élevée d'un point de vue théorique seulement au début du XX<sup>ème</sup> siècle à un niveau peut être équivalent à celui de la mélodie. Avant cela le timbre avait majoritairement une fonction "décorative" (les auteurs réarrangeaient leurs pièces pour des combinaisons instrumentales les plus variées) ou bien servaient à soutenir des structures mélodiques ou harmoniques (STOCKHAUSEN 1958). On trouve dans l'orchestre une vingtaine de timbres différents donc vingt manières de changer le timbre d'un son de même hauteur et de même durée

---

30. alternance de deux chœurs

(Stockhausen considère que les mélanges de timbres ne sont pas perçus comme un nouveau timbre mais comme un "intervalle de couleur"). La quatrième dimension sonore est celle de la sonie<sup>31</sup>. Stockhausen nous dit que la sonie s'est surtout développée au XVIII<sup>ième</sup> siècle et est restée plus ou moins identique dans la notation musicale jusqu'au XX<sup>ième</sup> siècle, elle est notée de façon approximative, sans valeur absolue et avec pour seule fonction de soutenir les rapports de hauteurs et de durées (champs harmoniques, phrasés mélodiques, "accentuations" rythmiques), on notait environ six degrés de sonie de pp à ff. Et pour finir le dernier paramètre, l'espace (Lieu du son), c'est le seul qui n'a pas fut peu différencié. Stockhausen nous dit alors que le lieu du son était alors fixe dans la salle de concert : devant l'auditeur, sur l'estrade, et ne jouait aucun rôle dans la composition. On retrouve la même critique que celle exprimée par Luigi Nono, en début de chapitre, sur les salles qui *neutralisent* l'espace (**lien**).

On en arrive donc à cette hiérarchie des propriétés du son dans la musique occidentale composée jusqu'à la fin du XIX<sup>ième</sup> siècle :

1. Hauteur du son (harmonie-mélodie)
2. Durée (métrique-rythmique)
3. Timbre (phonétique)
4. Sonie du son (dynamique)
5. Lieu du son (topique)

Dans les années 50 on veut donc abolir cette hiérarchie, au départ en laissant de côté l'élément spatial nous dit Stockhausen. Il nous explique que cette égalité posera un problème aux compositeurs, si tous les paramètres sont traités avec une valeur égale alors on se retrouve avec une musique "extrêmement homogène du point de vue du mélange sonore et de de la forme", "on tombe ainsi dans un état de flottement : la musique "s'immobilise" (STOCKHAUSEN 1958, p 220). Et l'on se retrouve obligé de valoriser un élément par rapport aux autres pour rompre cet état. Stockhausen nous explique que la solution qui fut trouvée fut de placer des groupes de haut-parleurs ou d'instruments dissociés dans l'espace. Ainsi l'on se retrouvait avec des groupes homogènes dans la forme mais plus dans le mélange et on pouvait apporter de la variation par l'espace. On retrouvera cette pratique dans l'oeuvre *Gesang der Jünglinge* dont Stockhausen dira qu'il voulait "donner forme à la direction des ondes sonores et aux mouvements des sons dans l'espace pour en faire une nouvelle dimension de l'expérience musicale" (STOCKHAUSEN 1958, p 219). Durand R. Begault (DURAND, TREJO et LEONARD 1941) nous explique que cette pièce fut l'un des premiers exemples de pièce électronique avec une exploration méthodique et compositionnelle du contrôle de la distance. Pour cela, Stockhausen en 1955, utilisa une technique s'appuyant sur le ration son direct / son réverbéré.

Stockhausen étaye son idée d'égalité des paramètres du son avec des exemples dans la suite du traité. Nous allons passer cette partie, ceux qui souhaiteraient en savoir plus peuvent le retrouver en annexe (**An-nexe 7**).

---

31. Stockhausen différencie ici la puissance sonore ; unité physique, la phonie ou intensité grandeur physiologique (ce que capte physiologiquement l'oreille) et la sonie grandeur psychologique (ce que l'on entend consciemment)

## 2.2.5 1959 : *Music im Raum* - Souhait de salles adaptées

Au début des années 60 les compositeurs souhaitent de plus en plus écrire l'espace, travailler avec les nouveaux instruments électro-acoustiques. Le problème qui vint donc aux compositeurs fut celui du lieu de représentation. Où faire jouer ces pièces ? De la même manière que les classiques finirent par faire construire des salles dédiées à la symphonie, les compositeurs contemporains allaient devoir réfléchir à qu'elles seraient les caractéristiques de ces nouvelles salles à construire.

Stockhausen proposera ici en 58 un premier voeu de salle idéale : une salle sphérique avec des haut-parleurs sur les contours. Suspendu au milieu ; une plate-forme acoustiquement transparente où se tiendraient les auditeurs. Cette vision se concrétisera en 1970 à l'occasion de l'exposition universelle d'Osaka où Stockhausen fera construire cet auditorium :

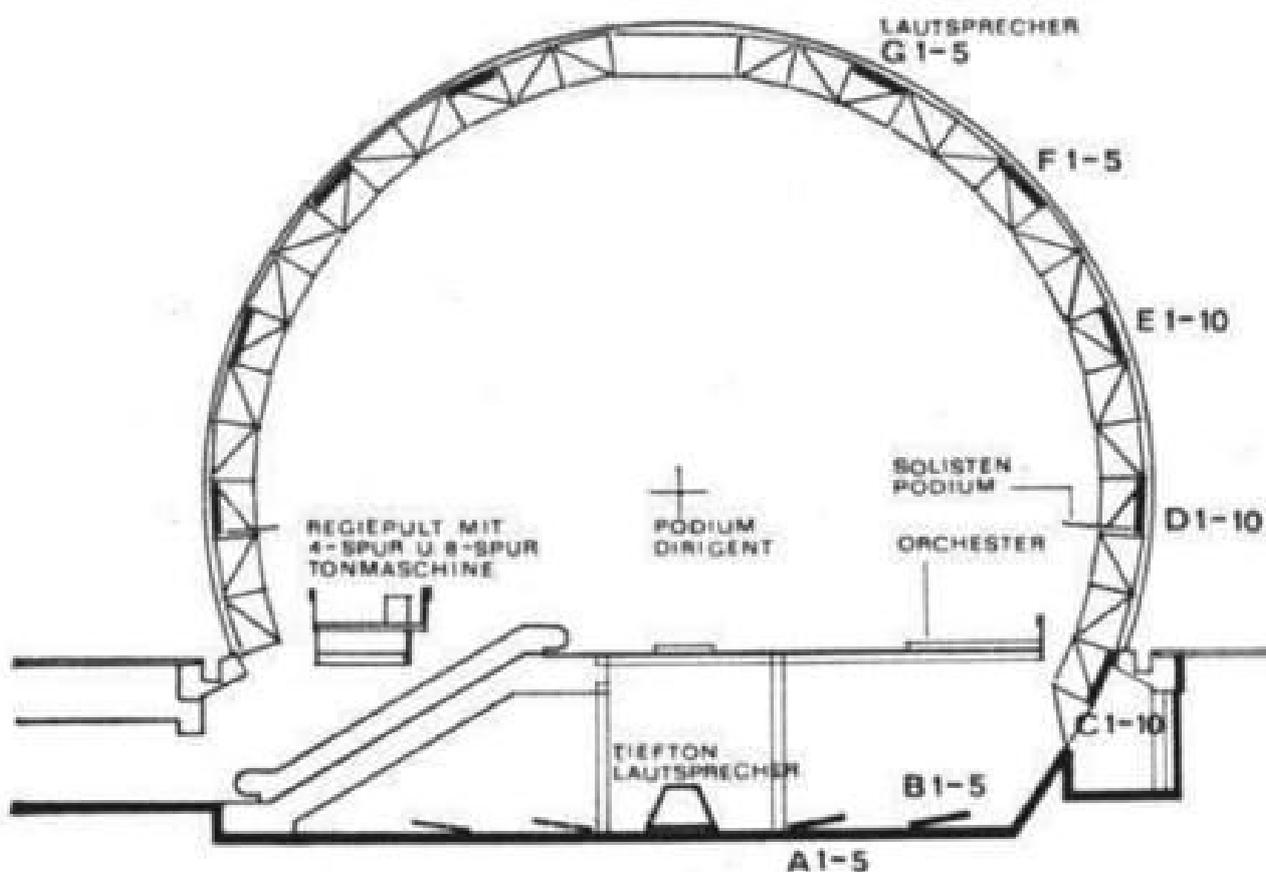


FIGURE 2.2 – Plan de coupe du dôme de l'exposition universelle



World Fair Expo '70 in Osaka, Japan  
(March 14th to September 15th 1970)  
In a spherical auditorium designed by Stockhausen,  
10 instrumentalists  
and singers performed 5 1/2 hours daily for 83 days most of  
Stockhausen's works which had been composed until 1970  
for more than a million listeners.  
Photograph: Stockhausen at the mixing console

FIGURE 2.3 – Photographie de Stockhausen à la table de mixage

Stockhausen souhaiterait que l'on construise de nouvelles salles adaptées aux nouveaux besoins de la musique électro-acoustique dans une perspective d'avenir - en se posant la question de l'évolution de la musique. Il rappelle que la disposition des orchestres et les salles où on les a fait jouer résultent d'un travail de recherche et d'expérimentation des compositeurs classiques et d'une volonté d'avoir des salles adaptées à ce type de composition. En effet les compositeurs classiques n'avaient alors accès qu'aux églises et à quelques cours princières ce qui imposait des contraintes en termes d'effectifs et de genres. Stockhausen propose une liste de conditions que devront remplir ces nouveaux espaces.

### **Cahier des charges de ces salles nouvelles**

1. Espace circulaire ou carré pour pouvoir disposer un orchestre à n'importe quel endroit autour des auditeurs, et/ou au milieu d'eux.
2. Pas d'estrade fixe ; mais un grand nombre de petites estrades mobiles (praticables).
3. Plancher de surface plane.
4. Disposition des sièges modifiable à volonté ; pas de fauteuils fixes.
5. Prises pour haut-parleurs et micros tout autour de la salle, sur les murs et au plafond.
6. Niches dans les murs et/ou blacons à diverses hauteurs pour de petits groupes instrumentaux.
7. Portes qui ne gênent pas une disposition circulaire de groupes orchestraux le long des murs (si possible de nombreuses portes réparties en rayons dans l'espace circulaire).
8. Écho commandé électriquement et pouvant être adapté aux conditions des différentes exécutions.
9. Un studio de prise de son en dehors de la salle pour des diffusions par haut-parleurs et pour des enregistrements.
10. Séparation entre l'éclairage de la salle et les lampes des pupitres transportables.
11. Pas de fauteuils en velours mais des chaises en bois.

On remarque la prise en compte d'éléments techniques (studio, connectiques murales etc.) caractéristique de Stockhausen qui fut le meneur du front de la conversion technologique du métier du compositeur. Ivanka Stoïanova rappelle dans son ouvrage "KARLHEINZ STOCKHAUSEN" (STOIANOVA 1997) qu'à la même époque Boulez qualifiait de "bricoleurs" les pionniers de la musique concrète et électro-acoustique et qu'il n'entamera sa conversion vers l'électronique que vers les années 70 avec la création de l'IRCAM. Elle rajoute que Boulez, Berio, Pousseur, Ligeti ou même Nono n'auront pas le même rapport avec l'électronique que Stockhausen dans leur recherche compositionnelle. Tandis qu'ils choisiront de s'entourer de collaborateurs spécialistes en technologie, Stockhausen sera plus solitaire et plongera lui-même dans les problématiques techniques.

Dans la liste précédente un point attire mon attention : la volonté d'un acoustique variable contrôlée électriquement. Nous détaillerons cet aspect dans le chapitre 3.

*C'est le premier compositeur que nous rencontrons dans notre historique qui souhaite expressément avoir un contrôle direct sur l'acoustique de la salle. Pas seulement en transformant la perception que l'on se fait de celle-ci, par des jeux d'électro-acoustique par exemple, mais bien en transformant la salle en elle-même.*

## 2.3 Étude de pièces marquantes de la musique électro-acoustique

Maintenant que nous avons présenté certaines des philosophies musicales qui ont transformé notre rapport à l'espace au début des années 50 et 60, intéressons-nous aux oeuvres qui ont été composés à la suite de ces réflexions.

François Bayle nous propose ainsi une chronologie des oeuvres marquantes, selon lui, sur l'utilisation de l'espace à partir des années 50, nous rajouterons en gras des oeuvres qu'il nous semblait important de mentionner :

### 2.3.1 Expériences marquantes du *support-espace* selon F. Bayle

années cinquante

- 1951 : Projection spatiale par effet de champ, de Schaeffer-Henry-Poullin. Tenant en main une bobine, l'opérateur, debout sur la scène, effectuait des gestes dans un espace matérialisé par de larges cerceaux croisés. Ces gestes, agissant sur la balance des haut-parleurs, produisaient un mouvement analogique du son dans l'espace de la salle. Ainsi fut mise en relief la *Symphonie pour un homme seul* de Pierre Schaeffer et Pierre Henry lors des premiers concerts de musique concrète au Théâtre de l'Empire et à la salle de l'ancien Conservatoire.
- **1956 : *Gesang der Jünglinge* (Stockhausen)**
- 1958 : Exposition universelle à Bruxelles. Le pavillon Philips, dessiné par Xenakis, présentait le *Poème électronique* de Varèse précédé de *Concret PH* de Iannis Xenakis sur trois voies distribuées sur quinze canaux de quatre cent cinquante haut-parleurs répartis sur les surfaces gauches en voile de béton précontraint.

années soixante

- 1960 : *Kontakte* de Karlheinz Stockhausen, conception quadriphonique des mouvements sonores.
- 1962-1963 : *Tautologos, Hétérozygote* de Luc Ferrari, pour 4 pistes.
- 1966-1967 : *L'Instant mobile* et *Capture éphémère* de Bernard Parmegiani, pour 4 pistes.
- 1967 : Exposition universelle à Montréal. Premier *Polytope* de Xenakis.
- 1967 : *Hymnen* de Karlheinz Stockhausen à Cologne.
- 1967 : Concerts-événements avec *Messe de Liverpool* de Pierre Henry, notamment au Concert couché du SIGMA 3 de Bordeaux.

années soixante-dix

- 1970 : Exposition universelle à Osaka. Auditorium sphérique de Karlheinz Stockhausen, matérialisant un projet décrit théoriquement douze ans auparavant. (**Voir la partie consacrée**)
- 1973 Premier concert du *Gmebaphone*, par le G.M.E.B. (Groupe de musique expérimentale de Bourges).
- 1974 : Premier concert de l'Acousmonium du GRM pour *l'Expérience Acoustique* et la création des *Vibrations Composées* de F. Bayle à l'Espace Cardin, Paris.

années quatre-vingts

- 1980 : Utilisation du système 4X par Pierre Boulez à l'I.R.C.A.M. dans son oeuvre *Répons* pour la projection/transformation du jeu des six solistes. Plus récemment, en 1988, la Matrix 32 en assure

une répartition programmée des mouvements du son dans l'espace.

- 1981 : *Sonic Waters* de Michel Redolfi, écoute en immersion subaquatique, Festival de la Rochelle, premier concert dans une piscine.
- **1984 : *Prometeo* (Luigi Nono, Renzo Piano) église San Lorenzo à Venise**
- 1984 : Léo Kupper propose au festival Ars Electronica de Linz sa *coupole hémisphérique* disposant de cent quatre canaux de diffusion pour un programme permanent d'écoute d'oeuvres ainsi cinématisées.
- 1985 : *Processeur spatial octophonique* mis au point par Serge de Laubier.
- 1986 - Premier dispositif de diffusion musicale à accès gestuel assisté par ordinateur : le système *Sinfonie* proposé par le studio G.R.A.M.E. de Lyon et Pierre-Alain Jaffrenou. En évacuant les potentiomètres, il permet de gérer des « figures de diffusion préparées par le compositeur »
- 1989 : *Espaces Paradoxes*, œuvre de Patrick Ascione en multiphonie spatiale conçue et projetée sur 16 pistes réelles.
- 1990 : *L'Acoustigloo* du G.M.V.L. de Lyon, Bernard Fort et Xavier Garcia, mini-coupole transportable pour l'audition acousmatique mémorisant le mouvement des sons.
- 1991 : Dispositif de *mémorisation cinématique* de Patrick Lenfant au Centre de Recherche et Formation Musicales de Wallonie.

Partant de cette chronologie nous présenterons plus en détails deux oeuvres : *Répons* de Pierre Boulez, et *Prometeo* de Luigi Nono. Ces deux pièces nous permettront de revenir en pratique sur divers éléments de réflexion abordés tout au long de ce mémoire : ces deux pièces ont une relation forte avec l'histoire de la musique et ont tâché de se réappropriier des règles d'écriture du passé dans leurs réflexions contemporaines - ce que nous tâchons de faire pour ce projet. Elles ont aussi utilisé des outils novateurs pour leur époque et les ont intégrés dans leur processus créatif. De plus, *Prometeo* a une composante architecturale très forte et un travail sur la profondeur tandis que Boulez dans *Répons* réfléchi notamment à une écriture générative du mouvement.

### 2.3.2 1981 : Répons (Pierre Boulez)

*Répons* est l'un des chef-d'oeuvres de Pierre Boulez, c'est une pièce de musique mixte<sup>32</sup> qui connaît trois versions en 1981, 1982 et 1984. Répons peut être considéré comme l'oeuvre majeure de Pierre Boulez dans les années 1980. Elle réunit deux entités qu'il a créées : l'IRCAM et l'*Ensemble intercontemporain (EIC)*<sup>33</sup>. Cette oeuvre est aussi l'aboutissement de recherches que Pierre Boulez a effectuées depuis de nombreuses années ; *Poésie pour pouvoir* (1958) ou *...explosante-fixe...* (1971) qui explorent l'assemblage des textures électro-acoustiques et acoustiques, *Figures-Double-Prisme* (1963) et *Rituel* (1974) qui explorent la séparation spatiale des groupes instrumentaux ou encore *Éclat* (1965) pour le jeu sur la résonance des percussions (CÉCILE GILLY, à l'occasion de la représentation de l'oeuvre à la Philharmonie de Paris en 2015 ([lien](#))).

La pièce est écrite pour six solistes et un petit orchestre de 24 musiciens. Les solistes - deux pianos, une harpe, un cymbalum, un vibraphone et un xylophone - entourent le public et leur son capté par des microphones sont transformé en temps réel par un système informatique - le 4X dont nous parlerons ci-dessous - puis diffusé sur des haut-parleurs situés autour du public. L'orchestre lui se trouve au centre et les spectateurs sont assis dans sa direction. L'orchestre et les solistes sont donc séparés spatialement, ce qui rend donc difficile la coordination temporelle des ensembles - comme nous avons pu le constater dans le chapitre 1. Boulez propose une alternative à ce problème : l'orchestre est dirigé par le chef d'orchestre au centre et respecte des *tempi* stricts imposés par le chef, tandis que les solistes ont des *tempi* relatifs et suivent des indications globales donnés par des gestuelles du chef (CÉCILE GILLY, *op. cit.* ([lien](#))).

Effectif instrumental :

- solistes (autour du public) : vibraphone, glockenspiel, harpe, 2 pianos, cymbalum
- orchestre (au centre) : 2 flûte, 2 hautbois, 3 clarinette, 2 basson, 2 cor, 2 trompette, 2 trombone, tuba, 3 violon, 2 alto, 2 violoncelle, contrebasse
- chef d'orchestre (au centre)

Effectif electro-acoustique :

- 6 haut-parleurs, en hauteur, entre chaque solistes.
- Station 4X et régie.

Le titre "répons" fait référence à la musique liturgique médiévale chrétienne, le chant grégorien. L'oeuvre présente de la même manière que le chant responsorial un dialogue entre jeu individuel et jeu collectif. Elle reprend aussi l'idée de prolifération à partir d'un élément simple (comme lorsqu'on développe une polyphonie sur une teneur grégorienne) (BOULEZ et GERZSO 1988).

« À Répons on peut trouver toutes sortes de dialogues : entre les solistes et l'ensemble, entre un seul soliste et les autres solistes, et entre des passages transformés et non transformés. Presque tous les autres aspects de la musique sont également impliqués dans ce jeu de va-et-vient : la hauteur (la fréquence perçue d'un son), le rythme (le motif et la synchronisation des battements), la dynamique (le volume d'un son) et le timbre (la qualité tonale caractéristique du son d'un instrument). Des transformations en temps réel des sons des instruments solistes sont nécessaires pour provoquer nombre de ces oppositions.

32. Mélange d'électronique et d'instruments acoustiques.

33. Fondé par Pierre Boulez en 1976, l'Ensemble intercontemporain (EIC) est une formation instrumentale de 31 musiciens solistes, qui se consacre à l'interprétation et à la diffusion de la musique du vingtième siècle à aujourd'hui. ([Wikipedia](#))

[...]

La forme antiphonale traditionnelle de composition suggère également deux idées supplémentaires qui ont été incorporées dans Répons. Le premier est la notion de déplacement de la musique dans l'espace, puisque le soliste et le chœur sont dans des lieux physiques différents. S'appuyant sur cette notion, les six solistes d'une exécution typique de tonnes sont positionnés à la périphérie de la salle de concert (tout comme six haut-parleurs), tandis que l'ensemble instrumental est placé au centre. (Le public entoure l'ensemble.) » (BOULEZ et GERZSO 1988)

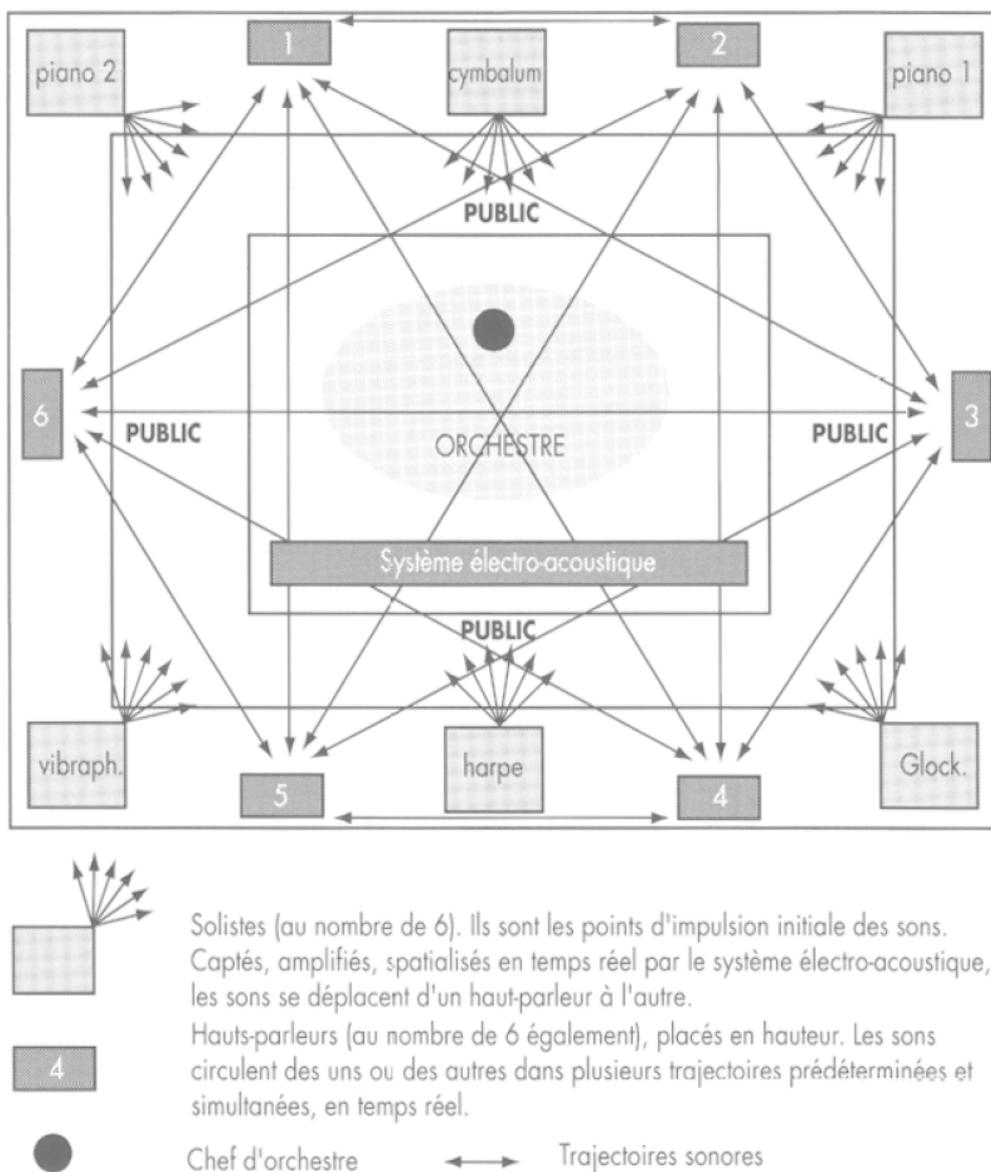


FIGURE 2.4 – Plan de l'installation de Répons de Pierre Boulez pour la première en 1981 au festival de Donaueschingen, schéma de Laurent Grison dans "Espace et Musique : Répons de Boulez" (LAURENT 2000, p 87-89)

### 2.3.2.1 Système 4X

« Il n'y a qu'en France qu'on peut construire une machine pareille » Frank Zappa, ircam.fr

Le système 4X est une machine qui fut développé à l'IRCAM. L'inspiration de ce projet provient de Luciano Berio à la fin des années 1970, alors directeur du département d'électro-acoustique de l'IRCAM à Paris (1974-1980). À cette époque le compositeur s'intéresse particulièrement à la synthèse additive<sup>34</sup>, il considère qu'un son ainsi généré devrait être composé d'au moins 1000 oscillateurs en temps réel pour être intéressant musicalement. Cependant à cette époque Berio ne dispose pas de technologies permettant d'atteindre ce nombre. Faisons un petit rappel des technologies disponibles à l'époque à l'IRCAM : le logiciel *Max* existe déjà mais la bibliothèque *MSP* n'existe pas encore. En effet le logiciel *Max/MSP*, très utilisé encore de nos jours dans les créations de l'IRCAM, est issue de la fusion des deux :

- Max est un logiciel qui permet de faire de gérer des données (*data*) et ds calculs mathématiques, il permettait notamment de contrôler en temps réel les instruments MIDI.
- MSP est une bibliothèque de fonctions de traitement de signaux audio en temps-réel (DSP).

L'association des deux permet de contrôler les données et les signaux audios dans la même interface et en temps réel. La librairie MSP proviendra du travail de Miller Puckette sur *Patcher*, un éditeur de programmation en langage graphique permettant de construire à la volée des traitements sonores appelés *patches*. Cet éditeur donnera naissance à deux logiciels, Max/MSP et Pure Data. Cependant, Miller Puckette finira le développement de *Patcher* autour des années 1988, il n'existe donc pas encore à l'époque de l'écriture de *Répons*.

Berio décidera donc de contacter le physicien Giuseppe Di Giugno pour développer une machine permettant de réaliser son ambition. Laissons Guisepe nous raconter cette rencontre :

#### « SOUVENIR DE LUCIANO BERIO

C'était un soir de novembre 1974. Pendant que je dînais, je reçois un appel : "Je suis Luciano Berio, je voudrais parler avec le professeur Di Giugno." Cet appel téléphonique a radicalement changé ma vie. A cette époque, j'enseignais la physique à l'Université de Naples, menant des recherches sur la physique des particules élémentaires à l'Institut de physique nucléaire de Frascati et au CERN à Genève. Pendant mes loisirs, j'aimais construire des «sons de synthétiseurs numériques» contrôlés par un ordinateur. Luciano le lendemain de cet appel téléphonique est venu me trouver à l'Institut de physique pour écouter ce qu'il était possible de faire avec un ordinateur, il a été stupéfait. Il m'a donné 12 notes et m'a dit de les jouer, de basculer entres elles avec diverses règles. J'ai immédiatement écouté le résultat et je me suis dit : «Pour faire la même chose il m'aurait fallu un mois». Puis, il m'a invité à Rome et j'ai présenté un projet de synthétiseur sonore pour l'IRCAM (alors en conception). À l'époque, le studio de phonologie de Milan disposait de 9 générateurs de sons. Luciano a proposé la construction d'une machine avec 1000 générateurs de sons. C'était une idée visionnaire et pratiquement impossible avec la technologie de l'époque. Je lui ai dit ce que je pensais. Il m'a invité pendant six mois à l'IRCAM et en juin 1975 j'ai fabriqué une machine (4A) capable de produire 256 sons différents en temps réel. Luciano a utilisé cette même machine, réalisant son idée de composer non pas par addition de son, mais - en commençant par une grande masse de sons - en procédant à la soustraction de fréquences... de la même manière que l'on ne fait pas une sculp-

---

34. Création d'un signal par l'addition de signaux sinusoïdaux ou d'harmoniques.

ture en collant beaucoup de morceaux de marbre, mais en enlevant des morceaux d'un grand bloc. Cette idée de déplacer de grandes masses sonores a ensuite été utilisée par de nombreux compositeurs.

Plus tard, j'ai construit une autre machine (4X), capable de produire 2000 sons simultanément et en temps réel. «Temps réel» signifie que si une touche est appuyée vous entendez le son immédiatement. De nombreux compositeurs ont préféré composer en «temps différé» : un ordinateur calcule le son que le compositeur avait prévu, mais dont le son était n'arrivait, selon la complexité, qu'après quelques minutes ou heures. Il n'y avait alors aucun geste. Luciano n'a jamais composé de cette façon, car il disait que la musique venait du cœur et non du cerveau. ensemble lorsque nous avons réalisé l'étude à la Villa Strozzi à Florence, nous l'avons simplement appelée «Temps réel».

De retour en Italie, encore une autre idée révolutionnaire. Luciano, immobile, n'aimait pas les sons qui sortaient d'un certain nombre de haut-parleurs. Il voulait que les sons des différents instruments entre en mouvement selon certaines règles dictées par le compositeur. J'ai donc réalisé, en collaboration avec IRIS Paliano (Institut d'Industrie et de Recherche des Arts du Spectacle), un système appelé «spatializer» qui a permis à Luciano de réaliser ses dernières œuvres dans différents théâtres à travers le monde. La musique électronique aujourd'hui s'est répandue à travers la planète, mais peu savent que de nombreuses applications musicales sont le résultat du «visionnaire» Luciano Berio (avec ma collaboration technologique). C'est un bon exemple à citer quand on parle de l'union ART-SCIENCE. » Giuseppe Di Giugno Paliano, 2013 ([lien](#)), en anglais dans le texte.

À partir de 1975, Giuseppe Di Giugno et les chercheurs de l'IRCAM développent alors plusieurs versions successives de processeurs numériques : 4A le premier prototype, 4B, 4C, pour aboutir en 1981, au très performant système 4X ([ircam.fr](#), ([lien](#))).



FIGURE 2.5 – Station 4X et sa flûte MIDI, Musée de la Musique, Paris

Le 4X est constitué de huit cartes de processeurs et est rattaché à une station hôte et réalise ses calculs indépendamment de celle-ci. Il permet notamment de synthétiser ou de transformer en temps réel le son issu d'instruments traditionnels en réalisant jusque 200 millions d'opérations par seconde. Chacune des huit cartes est dotée de 128 filtres, permettant la genèse de 129 formes d'ondes (Eduthèque philharmonie de Paris : ([lien](#))). Chaque carte peut être programmée séparément et pouvait aussi bien réaliser des analyses sonores (FFT)<sup>35</sup>. Cela lui permettait notamment de réaliser ; de la synthèse additive, soustractive, de la distorsion non linéaire, de la modulation de fréquence, ou de la modulation en anneaux, de la réverbération, des retards, de la transformation de bruits naturels, application de filtres, phasing...(Eduthèque philharmonie de Paris : ([lien](#)))

L'IRCAM a disposé jusqu'au début des années 90, de 4 stations de travail musical 4X, comportant chacune :

- un ordinateur de développement UNIX,
- un ordinateur temps réel muni de périphériques de contrôle,
- un processeur 4X et son système de convertisseurs numériques/analogiques et analogiques/numériques.

Dans les représentations de *Répons* de nos jours le 4X a été remplacé par la Station d'informatique musicale élaborée par Éric Lindemann et son équipe au début des années 1990. Le système 4X a été utilisé tout au long de son histoire Pierre BOULEZ qui en fit la première application dans *Répons* mais aussi Clarence BARLOW, Marc BATTIER, François BAYLE, George BENJAMIN, Denis COHEN, Thierry LANCINO, Cort LIPPE, Tod MACHOVER, Philippe MANOURY, Tristan MURAIL, Ichiro NODAIRA, Emmanuel NUNES, Robert ROWE et Karlheinz STOCKHAUSEN.

### 2.3.2.2 "Matrix 32" pour la spatialisation

Le système 4X avait besoin d'être connecté à une matrice sonore contrôlée électriquement pour retranscrire les trajectoires écrites dans le 4X jusqu'aux amplificateurs des haut-parleurs. Le système « MATRIX 32 » sera donc développé à l'IRCAM dans les années 83-85, par Didier RONCIN et Michel STARKIER, avait pour objectif initial de remplacer le *Hallophone*, système allemand utilisé lors des premières exécutions de *Répons* de Pierre BOULEZ ([ircam.fr](#), nous en reparlerons lorsque nous présenterons le *Prometeo* de Luigi Nono). « Il établit des connexions entre un ensemble d'entrées (les signaux provenant des microphones ou du 4X) et un ensemble de sorties (signaux allant au 4X ou aux enceintes) et spécifie également le niveau des signaux de sortie. Au moyen d'un logiciel écrit par l'un de nous (Gerzso), il peut à tout moment être programmé pour acheminer le son d'un soliste vers, un haut-parleur particulier pour l'amplification. À un autre moment, il peut acheminer le son de chacun de plusieurs solistes vers différentes entrées de module dans le 4X et envoyer les sons transformés à différents haut-parleurs. La matrice 32 peut être reconfigurée en environ un dixième de seconde. » (BOULEZ et GERZSO 1988)

Avec les explications de Laurent Grison (LAURENT 2000) et de Boulez (BOULEZ et GERZSO 1988), on comprends que les trajectoires sont effectuées en faisant des panoramiques d'intensités entre deux enceintes.

---

35. La transformation de Fourier rapide (sigle anglais : FFT ou fast Fourier transform) est un algorithme de calcul de la transformation de Fourier discrète (TFD). ([lien](#))

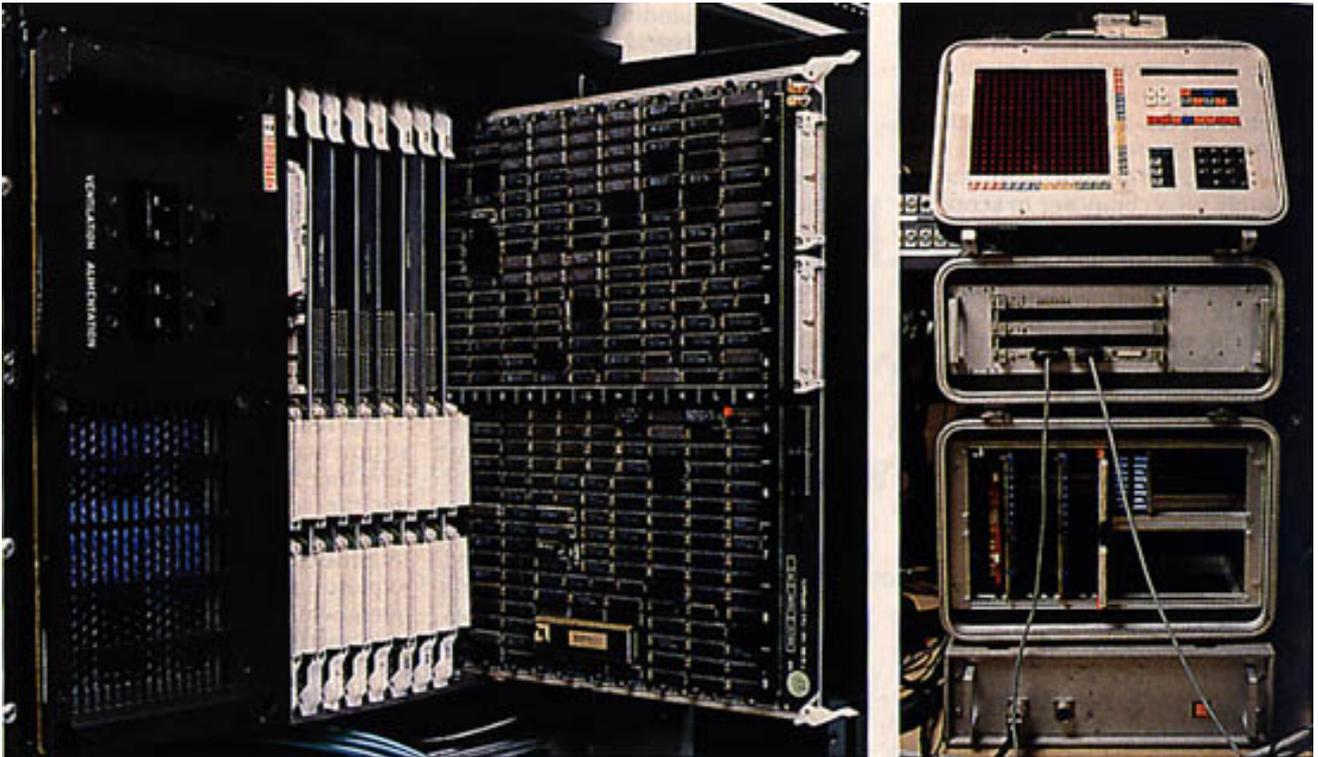


FIGURE 2.6 – A gauche l'intérieur de la station 4X, à droite le "Matrix 32"

« La machine hôte exécute également un système d'exploitation en temps réel et un planificateur d'événements (développé par Miller Puckette, Michel Fingerhut et Robert Rowe), qui indique au 4X quel programme exécuter et quand. Ainsi, au cours d'une performance musicale, un certain nombre de patches différents, dont chacun "reconstruit" essentiellement le 4X en une fraction de seconde, peuvent être chargés au bon moment. La musique exige ce genre de flexibilité. » (BOULEZ et GERZSO 1988)

D'après Jean-Bernard (Jean-Bernad, ([lien](#))) le logiciel écrit par Andrew GERZSO, offrait les fonctions suivantes :

- édition des fichiers de configuration depuis le pupitre
- édition des fichiers de configuration conservés en mémoire secourue, sur disque dur ou sur disquette
- édition des séquences de configuration
- bibliothèque de fonctions courantes (rampes, sinus, cosinus, exponentielle etc.), pouvant être augmentée.

### 2.3.2.3 Ecriture de l'espace

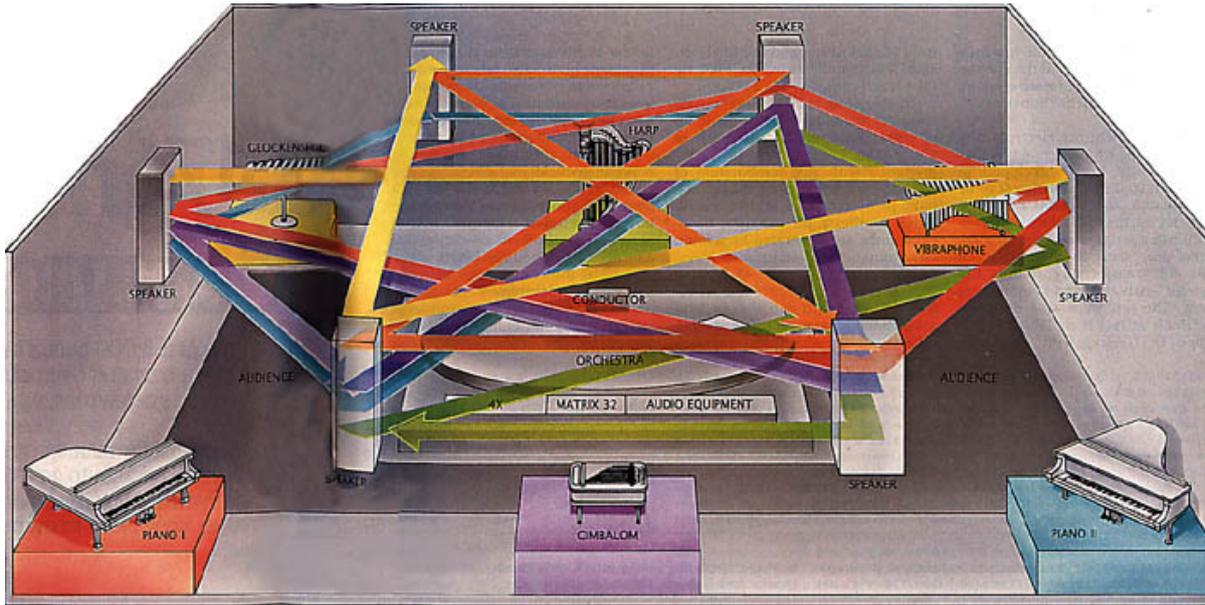


FIGURE 2.7 – Trajectoire des solistes par couleurs et intensités, (BOULEZ et GERZSO 1988)

« La "spatialisation" des sons produits par six solistes instrumentaux à leur entrée simultanée dans Répons, composition de l'un des auteurs (Boulez), consiste à faire circuler chaque son entre quatre haut-parleurs selon un motif représenté par une flèche d'une couleur correspondant à celle de l'instrument du soliste. La vitesse à laquelle un son se déplace dans la salle de spectacle dépend directement de l'intensité du son. Comme les sons des instruments s'éteignent à des rythmes différents, les sons ralentissent à des rythmes différents. Plusieurs techniciens assis à un panneau juste derrière l'ensemble orchestral contrôlent les différents appareils électroniques et audio qui rendent un tel effet possible. » (BOULEZ et GERZSO 1988, en anglais dans le texte ([lien](#)))

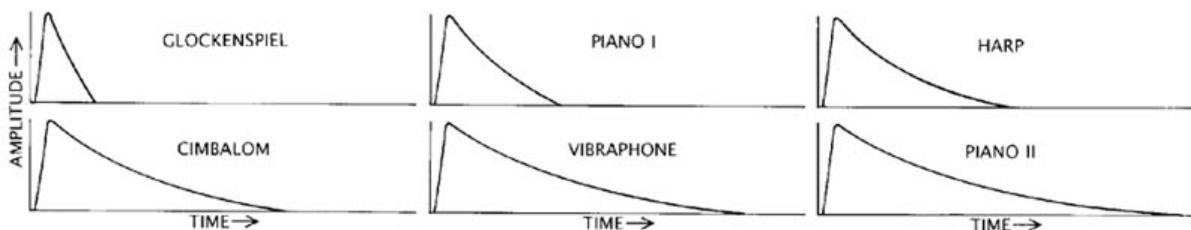


FIGURE 2.8 – Enveloppe sonore des six instruments solistes de Répons, les formes de ces instruments sont similaires : une attaque abrupte, au début, suivie d'une décroissance plus douce, ou fin. La durée d'un déclin dépend à la fois de la hauteur du son et de l'instrument sur lequel il est joué. (BOULEZ et GERZSO 1988)

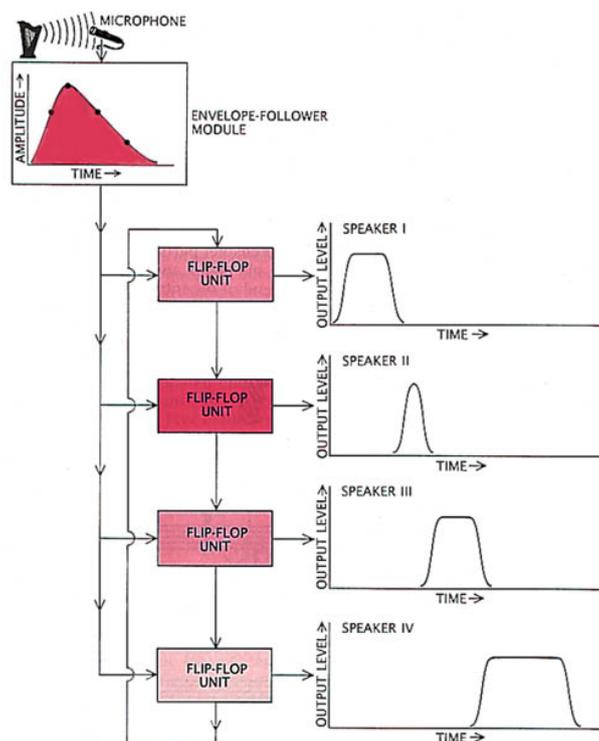


FIGURE 2.9 – (BOULEZ et GERZSO 1988)

« Le programme de spatialisation 4X prend le son capté par un microphone et dirige un module suiveur d'enveloppe, ou sous-programme, pour générer un signal de synchronisation (couleur) dont la fréquence (indiquée par l'intensité de la couleur) change en fonction des changements d'amplitude de l'enveloppe de forme d'onde du son. Le signal de synchronisation sert à son tour d'entrée pour quatre autres modules appelés unités de bascule (FFU), qui contrôlent le niveau du son diffusé par chacun des quatre haut-parleurs. Le signal passe d'un FFU au suivant lorsque l'un est éteint et le suivant est mis en marche. (Un seul FFU peut être activé à un moment donné.) La fréquence du signal détermine combien de temps un FFU particulier reste actif; plus la fréquence est élevée, plus tôt le FFU est désactivé. [...] Le son peut être amené à circuler de manière répétée d'un haut-parleur à l'autre à une vitesse déterminée par son amplitude. Comme le niveau sonore prend un certain temps pour atteindre son niveau maximum et retomber à zéro, il y a un peu de chevauchement entre les haut-parleurs. » (BOULEZ et GERZSO 1988, en anglais dans le texte ([lien](#)))

*La spatialisation est donc créée par les caractéristiques même du son des interprètes solistes. Cela permet de créer une structure complexe, cohérente avec l'intention musicale, en suivant des lois stochastiques et une forme structurale qui n'est pas définie à l'avance<sup>36</sup> - nous retrouvons donc ici des principes similaires à ceux exposés par Xenakis et Nono.*

Boulez nous explique comment il se sert de ce concept pour réinterpréter les règles de compositions liés à l'antiphonie spatiale. Dans le chant responsorial une voix (soliste) est répondue par plusieurs voix (chœur) :

« À la fin de l'introduction, les solistes font une entrée dramatique. Chaque soliste joue à l'unisson avec les autres un court arpège différent : un accord dont les notes composantes sont jouées en séquence de la hauteur la plus basse à la plus haute. La résonance des arpèges sonne alors dans

36. Voir la présentation du *Prometeo* de Nono ci-dessous

toute la salle pendant environ huit secondes, jusqu'à ce que le son se soit pratiquement éteint. Au cours de cet épanouissement, le 4X et le Matrix 32 sont mis en action pour la première fois : ils prennent les sons des accords que les solistes ont construits note par note sur leurs instruments et les déplacent d'un haut-parleur à l'autre. » (BOULEZ et GERZSO 1988, en anglais dans le texte ([lien](#)))

*On a ici un exemple concret de réappropriation d'une règle de composition spatiale du chant grégorien par Boulez pour répondre au problématiques de son temps et à ses propres questionnements. C'est un exemple inspirant pour l'écriture de la pièce de ce mémoire.*

Boulez nous explique qu'il se sert de cette "manoeuvre" pour plusieurs effets ; tout d'abord pour tourner l'attention du centre vers les solistes, puis, de par l'activation du système électro-acoustique vers l'espace. La multiplicité des mouvements n'est ici pas un problème pour Boulez, il nous dit qu'il ne cherche, à ce moment là, pas encore à pouvoir distinguer les trajectoires. « L'effet global met en évidence la relation antiphonale entre le groupe central et les solistes en sensibilisant le public aux dimensions spatiales qui séparent l'ensemble des solistes et qui séparent également les solistes individuels. En effet, on dit que la manoeuvre a «spatialisé» le son. » (BOULEZ et GERZSO 1988).

Étant donné que les boucles de spatialisations sont activés de par l'enveloppe des instruments solistes - qui sont toutes légèrement différentes - et que cette amplitude contrôle aussi la vitesse de déplacement. Alors les rythmes des échos de chaque soliste s'arrêteront et ralentiront à des vitesses différents. « L'impression générale pour l'auditeur est celle d'un seul geste spectaculaire se décomposant lentement en plusieurs parties. De plus, à mesure que l'amplitude globale diminue, l'impression originale de sons se déplaçant rapidement dans la salle est remplacée par une sensation d'immobilité. » (BOULEZ et GERZSO 1988).

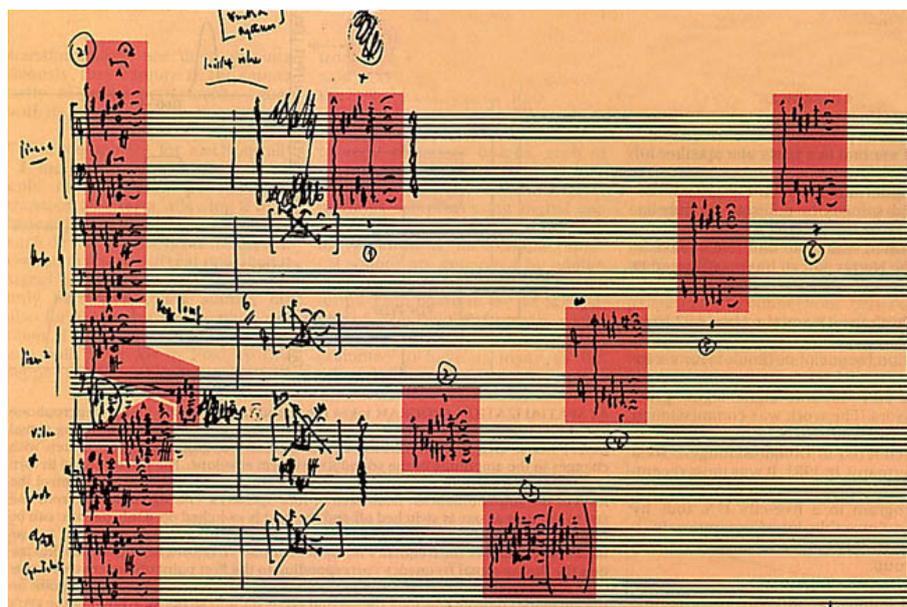
A handwritten musical score on aged paper, featuring five staves. The staves are labeled on the left as 'flute', 'ob', 'clarinet', 'violin', and 'cello'. The score contains dense musical notation with various notes, rests, and dynamic markings. Several sections of the score are highlighted with red rectangular boxes, indicating specific passages. There are also some handwritten annotations in French, such as 'L'œuvre', 'L'œuvre', and 'L'œuvre', and a circled number '21' in the top left corner.

FIGURE 2.10 – Accords joués en arpèges par les solistes pour crée des effets d'antiphonie spatiale s'inspirant du chant responsorial. (BOULEZ et GERZSO 1988)

De la même manière que Boulez nous a proposé un décalage dans le temps et dans l'espace généré par l'enveloppe. Il propose aussi dans *Répons* d'appliquer un décalage fréquentielle. Il en décrit deux principaux, le décalage d'arpèges et le décalage d'accord. Pour les arpèges il viendra répéter des arpèges ou des ensembles d'arpèges transposé en conservant les intervalles entre les notes. Tandis que pour les accords il appliquera une transposition (*pitch*) sur l'ensemble de l'accord ce qui aura pour conséquence de déstructurer les relations harmoniques de l'accord plus il sera transposé.

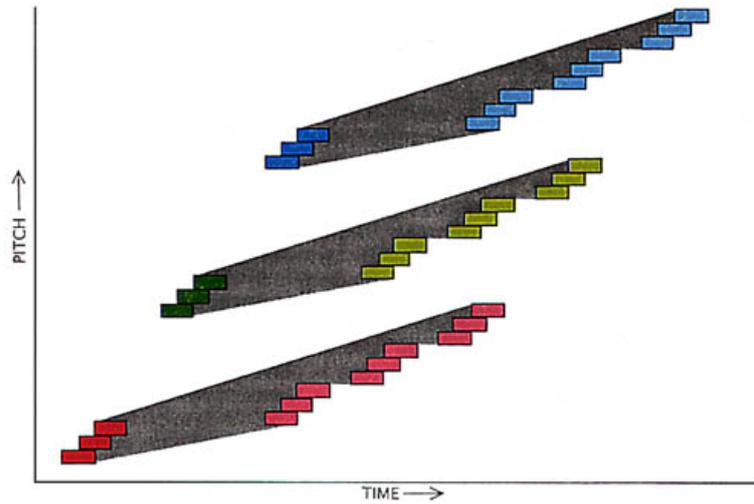


FIGURE 2.11 – Représentation schématique des jeux d'antiphonie spectraux sur des arpèges dans *Répons* de P. Boulez (BOULEZ et GERZSO 1988)

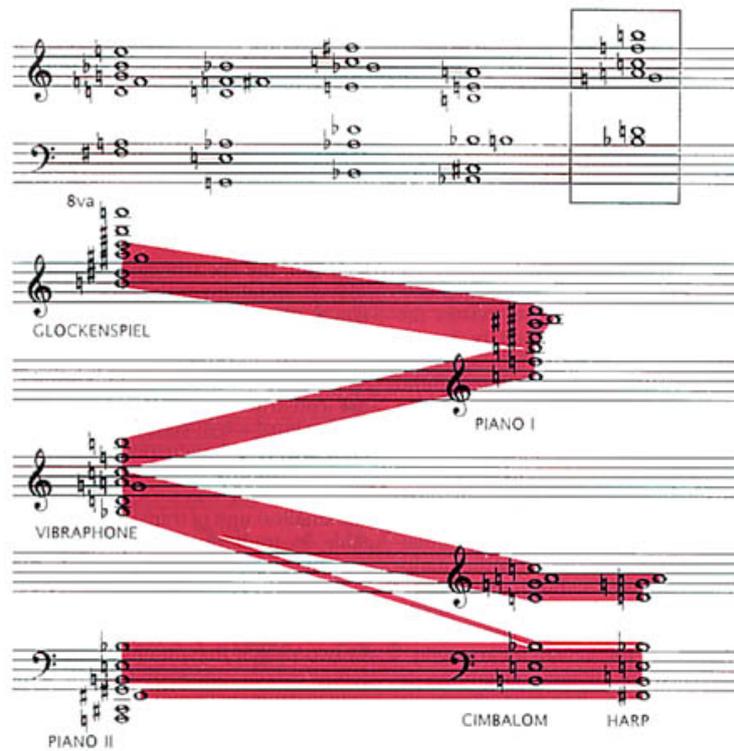


FIGURE 2.12 – Transpositions entre les 5 accords qui constituent la majorité de l'harmonie de *Répons* (BOULEZ et GERZSO 1988)

### 2.3.3 1984 : Prometeo (Luigi Nono, Renzo Piano) église San Lorenzo à Venise

Prometeo est un "opéra" de Luigi Nono basée sur des textes préparés par Massimo Cacciari et tirés de divers auteurs dont Walter Benjamin , Aeschylus et d'autres classiques grecs. Il est composé en collaboration avec l'architecte Renzo Piano. Ici le mot "opéra" n'est pas à prendre au sens usuel mais dans le sens générique de l'italien c'est-à-dire "travail", dans le sens oeuvre d'art. En effet Nono appelait cette pièce une "*tragedia dell'ascolto*" c'est-à-dire une "tragédie de l'écoute". Cette pièce fut écrite entre 1981 et 1984, puis retravaillée en 1985.

Il est composée de 9 cantates ;

1. *Prologo* (Prologue)
2. *Isola Prima* (Première île)
3. *Isola Seconda* (Seconde île)
4. *Interludio Primo* (Premier Interlude)
5. *Tre Voci* (a) (Trois voix [a])
6. *Isola Terza – Quarta – Quinta* (troisième, quatrième et cinquième îles)
7. *Tre Voci* (b) (Trois voix [b])
8. *Interludio Secondo* (Second Interlude)
9. *Stasimo Secondo* (Second Stasimon)<sup>37</sup>

Effectifs musicaux :

- 4 groupes orchestraux de même formation (flûte/piccolo, clarinette, basson, cor, trompette, trombone, 4 violons, alto, violoncelle, contrebasse)
- 5 chanteurs solistes (2 sopranos, 2 altos, 1 tenor)
- 2 narrateurs (un homme et une femme)
- un choeur de 12 chanteurs
- 7 verres
- 6 instruments solistes : flûte basse/ piccolo / flûte en Do, clarinette Contrebasse / clarinette en si bémol / clarinette en mi bémol, trompette / tuba / Euphonium, alto, cello contrebasse
- 2 chefs d'orchestres
- 12 haut-parleurs - alimentés notamment par le système *Halaphon*

La première se fit dans la fameuse église *San Lorenzo* à Venise, dans le cadre de la Biennale de la musique (client de l'oeuvre). La première exécution de la version définitive a eu lieu le 25 septembre 1985 à Milan dans l'usine Ansaldo.

#### 2.3.3.1 Mythe, absence de narration, multiplicité d'un parcours

« Prometeo de Luigi Nono est une expérience inouïe de l'écoute. Somme de sons et de mythes, bibliothèque imaginaire de dieux et de titans, l'oeuvre est un théâtre de notre mémoire, des noms de héros qui la peuplent et des cartes que nous en avons tracées : des strates d'instant musicaux suspendus, gorgés de silences, qui se prolongent l'un l'autre ou s'interrompent à l'occasion. » Festival-automne ([lien](#))

Nono écrit cette pièce dans la continuité de la réflexion que nous avons présenté en début de chapitre ([lien](#)). Il souhaite donc revisiter le mythe prométhéen selon Eschyle, en supprimant toute narration. « Le texte,

<sup>37</sup>. Le *stasimon* est un moment de la tragédie grecque antique dans lequel le chœur, statique dans l'orchestra mais montrant ses émotions, commente et analyse la situation dramatique, grâce à une interruption de l'action. **Wikipedia**

dans certaines sections, n'est plus que trace sur la partition, comme un chant muet, destiné au sentiment le plus intérieur des interprètes. »<sup>38</sup>.

Cette "tragédie de l'écoute" est découpée en "îles" et en interludes. Elle est pensée comme un voyage en mer entre ces îles où il existerait non pas une unique route mais bien une multitude de chemins. Dans l'interview présentée par le festival d'automne (**lien**), Nono nous explique qu'il n'apprécie pas de construire des structures trop fixées à l'avance, il se souvient de ce proverbe.

« Marcheur, il n'y a pas un chemin, le chemin se crée en marchant (*Caminantes, no hay camino, hay que caminar*) »<sup>39</sup>

De la même manière qu'il n'existe pas un unique chemin pour joindre une destination, Prométhée à mesure des voyages prendra la forme d'Ulysse, d'Achille ou de Moïse.

Le musicologue Jürg Stenzl l'analyse ainsi :

« Ce qui était important pour ce "nouveau neuvième" n'était pas d'atteindre un objectif fixé, mais l'incursion dans l'inconnu, le voyage lui-même. Au lieu de voir clairement le Oui et le Non distincts, Nono entre dans le champ du possible, de l'ouverture vers tous les côtés ; bref, une pensée libérée, profondément méfiante à l'égard de toute forme globale et systématique » (STENZEL 1995)

### 2.3.3.2 Genèse de la création d'un "espace musical"

« Une œuvre exemplaire d'un nouveau principe de dissolution de l'espace est l'opéra *Prometeo* de Nono » (DAUTREY 2007)

Nono proposa à l'architecte Renzo Piano de collaborer à la création d'un espace pour cette œuvre particulière. Renzo Piano se remémore cette époque :

« Un espace musical pour *Prometeo*. Je me souviens bien de mon premier contact avec cette idée. C'est Luigi Nono qui m'en parle un jour par téléphone, et me demande si je suis disposé à établir un projet d'"espace musical" pour sa nouvelle œuvre. Il s'agit d'inventer un "espace musical", me répète-t-il, pas d'inventer un décor de scène normal. Tout mon travail pour *Prometeo* est parti de là. » (PIANO 1984, Traduit de l'italien par Héléne Houizot)

Renzo Piano nous explique qu'il comprit tout de suite que la tâche serait difficile.

« Comment se mouvoir donc dans l'invention d'un espace musical inédit ? Les auteurs de *Prometeo* et moi-même nous sommes longuement colletés à ce problème. Pour décider, en fin de compte, de prendre pour point de départ les exigences les plus solides et les plus sûres : celles de la musique » (PIANO 1984, Traduit de l'italien par Héléne Houizot)

Dans la conversation entre Nono, Cacciari et Bertaggia qui se déroule durant cette période de préparation de la pièce, Nono nous présente ses réflexions.

---

38. Festival-automne, Olivier Mille (**lien**)

39. *Prometeo*, tragedia dell'ascolto de Luigi Nono, FESTIVALDAUTOMNE

« **Nono.** Je me trouve actuellement, dans mon travail sur le Prometeo, dans une situation très particulière... On dit du compositeur qu'il écrit la musique parcequ'il l'*entend*, mais il est évident que le compositeur entend toujours sur la base de certaines notions et informations qu'il possède... En ce qui me concerne, je me sens en ce moment comme si ma tête *était* San Lorenzo... J'ai l'impression d'occuper l'espace et les silences de l'église de San Lorenzo - et je m'efforce aussi de me laisser occuper par eux... et en écoutant tout cela, je m'efforce de trouver les sons capables de lire, de révéler cet espace et ces silences : les sons dont seront fait le *Prometeo*.

Je ne sais pas s'il s'agit seulement d'une suggestion. Le fait est qu'aujourd'hui, ma tête ne m'appartient plus, elle vit de ce problème, et l'oeuvre, qui n'existe pas encore, dont les sons, l'écriture, sont absents, vit déjà, *est déjà l'oeuvre que j'écoute!* Je cherche donc avant tout à identifier les différents espaces, parce que là, dans l'église San Lorenzo, il y aura au moins cinq plans acoustiques différents, rendus possibles par la technologie de la live electronics de Freiburg, avec d'infinies possibilités de mutation, de "jeux" - jusqu'à quatre simultanés, avec des vitesses différentes, des dynamiques différentes, des sons, des signaux, des directions différentes... C'est cela que j'ai besoin de comprendre aujourd'hui... pour faire ensuite tout autre chose peut être. » (PHILIPPE ALBERA 1987, p 141)

### 2.3.3.3 L'*Halaphon* de l'EXPERIMENTALSTUDIO des SWR de Freiburg

La technologie de la live electronics de Freiburg dont Nono nous parle fait référence à l'*halaphon* (généralement écrit Halaphone en français) développé par le *Experimentalstudio des SWR*<sup>40</sup>.

Faisons un court historique de cette technologie. En 1970, le critique musical et musicologue Heirich Strobel fait une commande aux deux compositeurs Cristóbal Halffter et Hans Peter Haller. Ils doivent concevoir un système pour contrôler l'électronique de la pièce *Planto por las victimas de la violencia* de Cristóbal Halffter. Ils développent alors l'*halaphon*. La représentation de cette pièce avec l'*halaphon* est considérée comme le premier travail avec un contrôle électronique du son "*surround*" en temps réel (HEUSINGER et RICHARD 2011, p 10). Le projet a été développé en collaboration avec la société *Lawo*, le mot *Halaphon*, provient de la combinaison : "HA" ller et "LA" wo (-PHON).

L'année suivante (1971), le "Studio expérimental de la Fondation Heinrich Strobel de la SWR" est officiellement fondé et transféré au Günterstal State Studio. Hans Peter Haller en devient le premier directeur. De 1971 à 1973 : l'accent est mis sur la musique avec électronique en temps réel. En 1973 la première mondiale de «... explosante-fixe...» de Pierre Boulez est réalisé avec l'*halaphon*. La pièce pour huit instruments et électronique est représentée en direct au Lincoln Center de New York, ce qui rend le studio expérimental soudainement internationalement connu (HEUSINGER et RICHARD 2011, p 10). C'est la première rencontre avec Boulez, les auteurs nous disent qu'il aurait été fasciné par les capacités de contrôle interactif du son. À cette époque l'*halaphon* est capable de réaliser : de la modulation en anneau, des retards, des filtres, de la réverbération artificielle et des trajectoires dans l'espace. Cette rencontre marquera Boulez, il utilisera de nouveau l'*Halaphon* de 1981 à 1984 pour les représentations de *Répons*, en attendant que le "Matrix 32" ne soit développé à l'IRCAM.

En 1980, Luigi Nono commence ses recherches musicales dans le studio, et continuera d'y travailler jusqu'en 1989. L'année suivante Nono devient le conseiller artistique du studio expérimental (HEUSINGER

---

40. Südwestrundfunk (Radio-télédiffuseur de l'Allemagne du Sud-ouest)



FIGURE 2.13 – *Halaphon* développé par Cristóbal Halffter et Hans Peter Haller, en collaboration avec la société *Lawo*.

et RICHARD 2011). En 1984, il utilisera le système de la SWR pour la première mondiale du «Prometeo» de Luigi Nono à Venise le 25 septembre 1984.

#### 2.3.3.4 Espace architectural

Hans Peter Haller nous remémore comment fut choisi l'église *San Lorenzo* pour la première de *Prometeo* (NIELINGER-VAKIL 2015, p 192) : Nono avait eu une intuition avec cette église. Alors qu'ils expérimentaient dans l'église, faisaient des écoutes et des tests d'acoustiques. Nono découvrit un plan montrant que l'église *San Lorenzo* fut utilisé pour de la musique en *cori spezzati*, il sut alors que son intuition était juste.



FIGURE 2.14 – Vue extérieure de l'église *San Lorenzo* de Venise.

L'église *San Lorenzo* a une particularité architecturale : elle est constituée de deux grands volumes séparés par un mur - le mur a deux ouvertures pour le franchir. Ceci crée donc une acoustique assez particulière de salles couplées. Il est décidé de placer le public et les musiciens des deux côtés, créant des perspectives très différentes que l'on se trouve d'un côté ou de l'autre du mur - l'auditeur entendra les musiciens et sons électroniques situés à l'opposé du mur comme provenant d'une autre salle, à travers une fenêtre ou une porte.

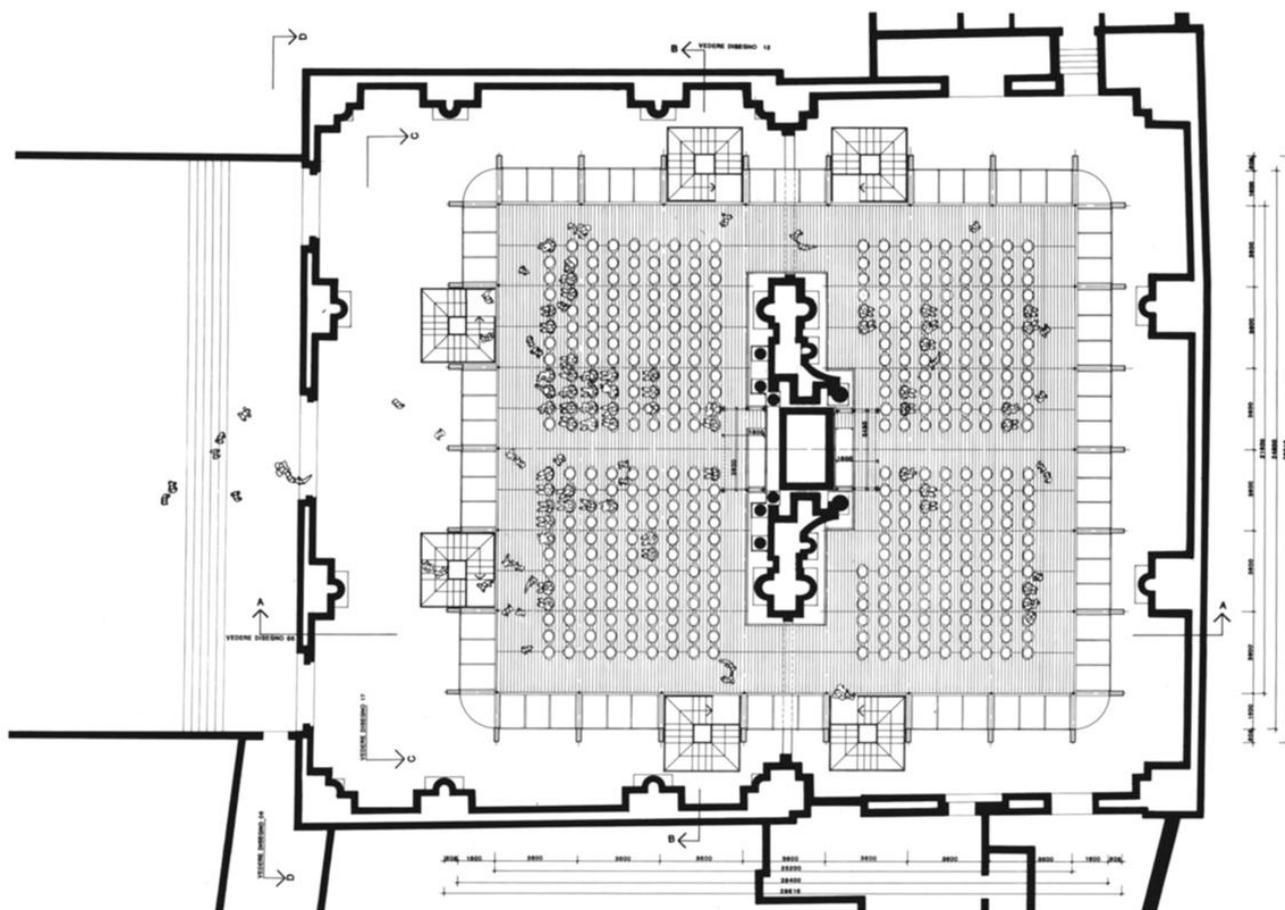


FIGURE 2.15 – Plan de la structure imaginée par Renzo Piano dans l'église *San Lorenzo* pour le *Prometeo* de Luigi Nono, vue du dessus

Cependant, l'architecte Renzo Piano proposa de construire une grande arche en bois dans l'église appelée *struttura* avec pour principe l'imbrication des deux espaces l'un dans l'autre (DAUTREY 2007). Les auditeurs, musiciens et haut-parleurs sont placés sur la structure en bois. Ainsi bien que toujours séparés spatialement par le mur, les vibrations se propagent dans la structure en bois jusque de l'autre côté. De plus, la structure est elle-même placée à 3 m de hauteur au-dessus du sol et vient créer une sorte de "bol" de 7 mètres de hauteur à l'intérieur des deux volumes couplés. Ceci créant donc un deuxième niveau de couplage de salle à la manière de certaines salles philharmoniques comme le KKL de Lucerne ou la Philharmonie de Paris. Ainsi les réflexions tardives d'un côté qui parviendraient à passer sous la structure, suivent le chemin de la conque et ressortent de l'autre côté.

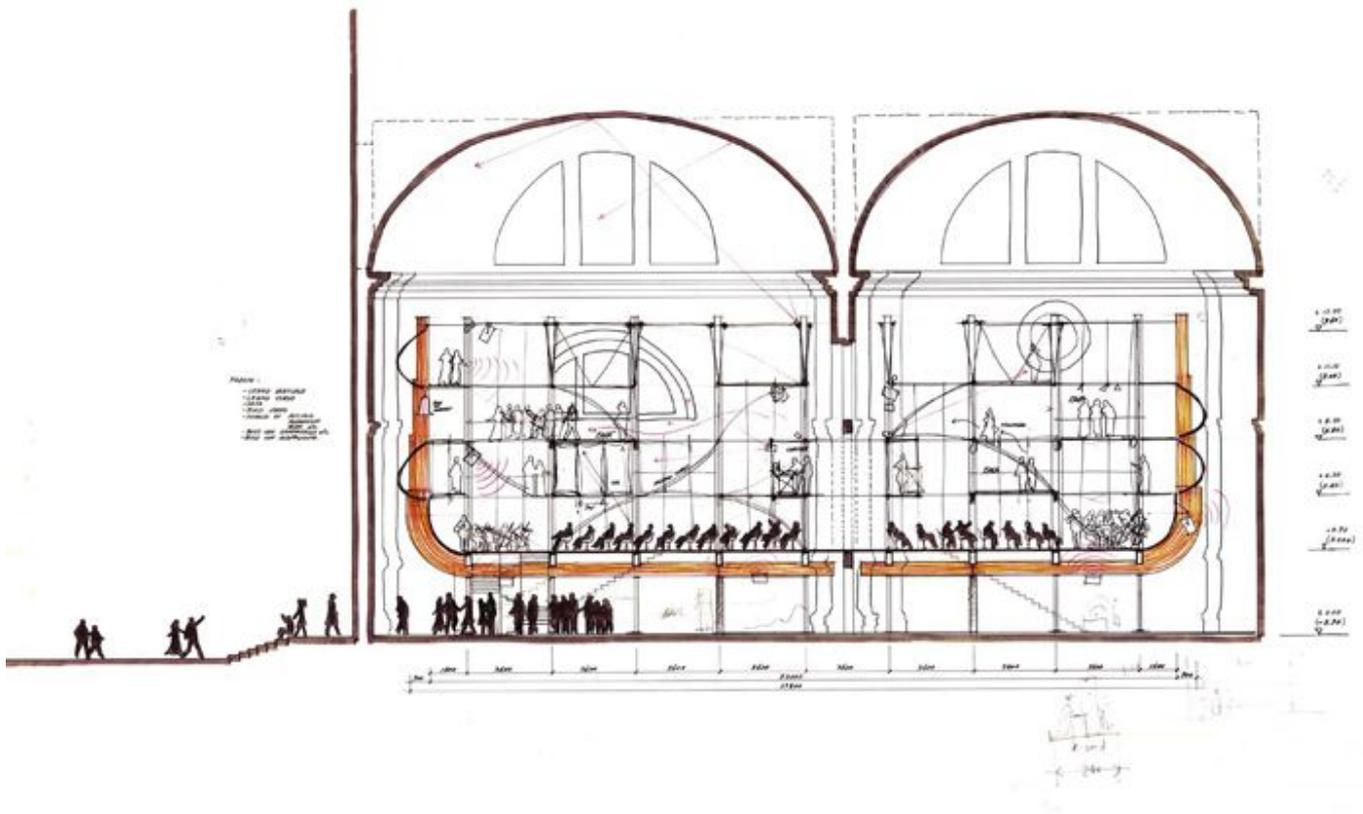


FIGURE 2.16 – Plan de la structure imaginée par Renzo Piano pour le *Prometeo* de Luigi Nono, pour la première dans l'église *San Lorenzo* de Venise

« Les épaisses nervures de bois soutenaient trois étroites passerelles pour les musiciens. Interconnectées par de fines échelles en acier, ces passerelles contournaient l'ensemble de l'espace d'écoute et permettaient aux solistes de passer de l'un à l'autre. [...]

L'acoustique, essentielle pour cette dramaturgie spatiale, a été affinée avec une combinaison de panneaux de contreplaqué droits et courbes. Ces panneaux ont formé la paroi extérieure du dessin, mais pourraient être laissés en place dans l'ordre pour s'ouvrir à l'acoustique résonnante de l'église. Les panneaux variables ont également permis d'adapter la structure à d'autres espaces, tels que le l'ancienne usine Ansaldo à Milan, où elle a été à nouveau installée pour l'exécution de la version finale révisée de *Prometeo* (1985). » (NIELINGER-VAKIL 2015, p 193)

Luigi Nono installa ses haut-parleurs sur cette structure et joua avec son acoustique et ses résonances. Il plaça certains haut-parleurs sous la scène, à l'extérieur ou derrière la conque pour générer du champ diffus. Il sépara spatialement les solistes des enceintes diffusant leur son modifié. Hans Peter Haller raconte dans un cours, que Luigi Nono aurait dit un jour « Il n'y a pas de mauvaises salles de concert, il suffit d'essayer de les connaître, c'est-à-dire d'étudier attentivement leur acoustique naturelle et de concevoir ensuite nos nouveaux espaces sonores électroacoustiques. » ([lien](#)). L'opéra *Prometeo* en est le parfait exemple.



FIGURE 2.17 – Photographie avec public dans l'église *San Lorenzo* de Venise, on observe l'ouverture entre les deux nefs et la régie sonore centrale

Haller nous décrit l'acoustique fascinante de cette installation :

« L'après-midi, répétition avec Ingrid [Ade-Jesemann] et Monika [Bair-Ivenz] (soprano). Premier résultat : le son du piano et des voix pianissimos relativement sèches dans l'espace intérieur (struttura). On peut entendre les sons partout et ils sont faciles à localiser. Deuxième résultat : lorsque les voix deviennent plus fortes, de mezzo-forte à fortissimo, l'espace extérieur de l'église avec sa grande réverbération commence à résonner aussi. Les mouvements sonores sont néanmoins perceptibles dans l'espace intérieur. C'est fascinant - une voix chantée dans un intérieur sec et, en même temps, selon la dynamique, un deuxième espace de résonance est mélangé, en partie par le haut, en partie par le bas et par les côtés, ce qui a pour conséquence des formations sonores entièrement nouvelles » (NIELINGER-VAKIL 2015, p 194)

Renzo Piano précisait que cette arche montée sur plusieurs étages, dans laquelle le public se trouvait installé avec les instrumentistes, fonctionnait comme un immense instrument de musique, du fait du système de résonances qu'elle produisait. (DAUTREY 2007)

*On retrouve donc ici une idée qui nous avait déjà été présentée durant le précédent chapitre. Là où Vitruve pensait l'acoustique comme un instrument, Berlioz lui proposa plutôt que ce soit le couple musiciens-salle qui soit un instrument - où les musiciens seraient l'excitateur et la salle la caisse de résonance. Nono et Renzo Piano vont ici plus loin, la salle est transformée pour devenir cet instrument et ne fait plus qu'un avec la structure, l'ensemble des musiciens et des systèmes électroniques. Le public, de par sa présence dans la conque et son écoute, fait partie intégrante de l'instrument.*

Jehanne DAUTREY analyse ainsi la collaboration de Renzo Piano et Luigi Nono autour d'une réflexion sur l'hétérotopie<sup>41</sup> :

« Ce qui singularise ce dispositif architectural, c'est un nouveau rapport du dedans et du dehors. Avec le principe de l'arche, on n'est ni « dans » l'espace de l'église ni dans l'oubli de cet espace : l'arche, acoustiquement semi-ouverte, organise un filtrage sélectif des sons. De plus, elle nous situe de part et d'autre de la frontière entre deux mondes sonores. En effet, le dispositif de Piano et Nono construit une double diffusion qui dissocie les sources électroacoustiques et les sources naturelles : tandis que les auditeurs sont enveloppés dans l'arche avec les instrumentistes, les haut-parleurs diffusent la musique électroacoustique hors de l'arche, vers les parois de l'église. Dans *Prometeo*, le spectateur n'est donc ni en face de l'espace musical, ni situé en lui : il est de part et d'autre de cet espace, dans le même espace que les instrumentistes, tandis que les sons enregistrés sont diffusés à l'extérieur de cette enveloppe. » (DAUTREY 2007)

Finissons cette section sur l'architecture de *Prometeo* par la fin des vers du "*Verso Prometeo, frammenti di diari*" :

« Écouter la musique.

Non *selon une* possibilité d'écoute.

Mais avec différentes probabilités de transformations en temps réel.

Le nouveau «virtuose» qui écoute les silences en même temps que les différentes mutations acoustiques, programmées ou non, mais qu'il faut toujours savoir et pouvoir moduler en direct, propose la «tragédie de l'écoute».

D'autres perceptions possibles, de l'intérieur, dans les « viscères » non de la scénographie, mais du fantastique instrument musical en bois, créé par Renzo Piano.

Ces bois, ces pierres-espaces de San Lorenzo, infinies respirations. »<sup>42</sup> (NONO 2007, *Vers Prometeo*, Fragments de journaux, p 526)

---

41. L'hétérotopie (du grec *topos*, « lieu », et *hétéro*, « autre » : « lieu autre ») est un concept forgé par Michel Foucault dans une conférence de 1967 intitulée « Des espaces autres ». Il y définit les hétérotopies comme une localisation physique de l'utopie. Ce sont des espaces concrets qui hébergent l'imaginaire. (Wikipedia)

42. Date : 1984. Source : «*Verso Prometeo, frammenti di diari* », in *Verso Prometeo*, sous la direction de Massimo Cacciari, Milan, Ricordi, 1984, p. 7-16.

### 2.3.3.5 Ecriture spatiale Nono - Coro Lontanissimo & Suono Mobile

Bien que Nono retravailla la chorégraphie des sons pour chacune des performances, il existe cependant une base plus ou moins fixée. Il existe presque très peu d'écrits sur l'utilisation de l'électronique de Luigi Nono, la disposition n'est ainsi pas notée sur la partition. Grâce à Carola Nielinger-Vakil dans "*Luigi Nono - A composer in Context*" (NIELINGER-VAKIL 2015, p 235) qui fit un travail de mémoire avec André Richard, assistant de Nono pour la spatialisation après Hans Peter Haller, nous allons pouvoir vous présenter ce travail. Cette base que Nielinger-Vakil appellera les "Piliers de la dramaturgie spatiale", prend sa racine dans la disposition de la *strutturra* de Renzo Piano. Pour les premières expérimentations la pièce utilisait le système 4i, version précédente du 4X, dont l'on trouve toujours la référence dans la partition.

La hauteur de la structure de Renzo Piano monte jusqu'à 10 m de haut pour 3 étages de 2.4 m, le premier étage étant situé à un peu moins de 3 m du sol. Pour Nono, aucune source sonore ne doit être placée à la même hauteur qu'une autre, aussi bien pour les enceintes que les musiciens. Il en résulte une distribution spatiale sur l'ensemble de la structure. Vu du dessus cela donne ceci :

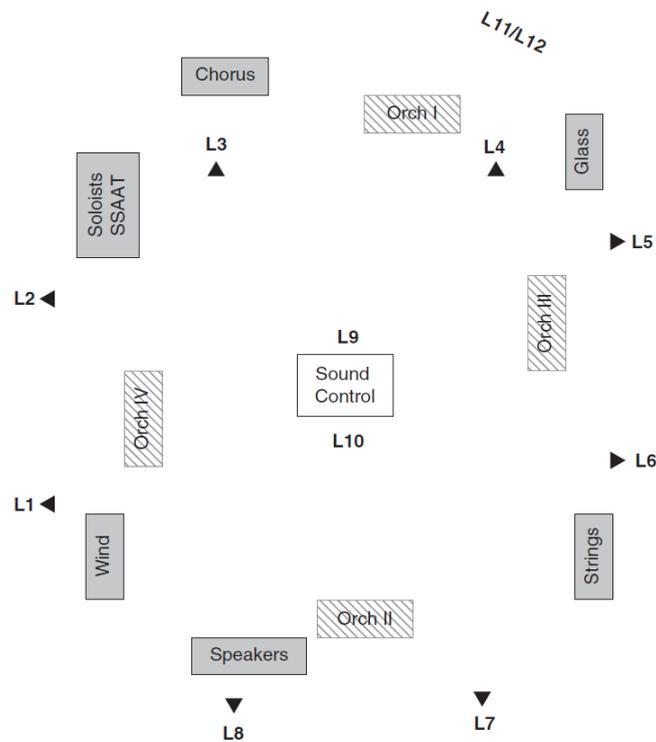


FIGURE 2.18 – *Prometeo*, distribution spatiale des effectifs instrumentaux et des haut-parleurs, (NIELINGER-VAKIL 2015, p 236)

Les 4 orchestres sont donc placés autour du public à différentes hauteurs et forment une base "naturelle" de spatialisation - les orchestres ne subissent pas de transformation électronique (NIELINGER-VAKIL 2015, p 236).

Ensuite, il y a six groupes de solistes : le chœur (12 chanteurs), 5 solistes (SSAAT), deux orateurs, un trio de vent (flûtes [basse, do et piccolo], clarinettes [basse, si b et mi b], trombone-euphonium), un trio à cordes (violoncelle, alto, contrebasse) et trois percussions sur des cloches en verre. Les solistes sont eux aussi répartis en auteur et comme pour le *Répons* de Boulez subissent des traitements électroniques.



« Les distinctions de Nono entre un seul p et sept p sont parfois irréalisables, surtout dans la fourchette supérieure, mais ils ne sont pas spéculatifs ! Au contraire, ils examinent, pour ainsi dire, l'espace intérieur des sons, qui est limité par ce qui est « al limite dell'udibilità », aux limites de l'(in)audible. A ce seuil " ascolta ! » (Écoute !) signifie l'être-rejeté-sur-soi-même.

[...]

La remarque la plus fréquente de Nono - "tout doit être beaucoup plus calme" - n'était pas simplement une demande de dynamique extrême, mais aussi un indice de ce qui était représenté sur un fond derrière le son. tout ce qui sonne n'est qu'un pâle reflet, la silhouette du réel, de l'inconnu, de l'utopique. La musique comme parabole de la grotte. » (DAUTREY 2007)

Haller, dans son cours (**lien**), nous explique que pour la seconde île il prolonge le temps de réverbération à 20 secondes car le pianissimo est encore plus faible que dans le premier mouvement.

*Nono écrit donc des espaces de plus en plus réverbérant à mesure que le son disparaît. C'est une utilisation que j'aurai l'occasion d'expérimenter lors de la présentation de la première partie de ma pièce au festival de la Lange Nacht à Zürich (voir section concernée).*

Haller (**lien**) nous explique qu'il faut bien comprendre que la réverbération artificielle utilisée dans la pièce de Nono ne doit pas être vue seulement comme une "simulation d'acoustique naturelle". Le moteur audio peut en effet produire des temps de réverbération de 100 millisecondes à 200 secondes et un volume de salle allant jusqu'au million de m<sup>3</sup>. De plus, un contrôle temporel et spectral peut être défini. Il s'agit pour lui de nouveaux «espaces sonores» artificiels. Il ne s'agit pas de rajouter de la "réverbération" mais plutôt de créer de nouveaux espaces sonores.

« Le son mobile (*mobile suono*) que Nono cherchait erre entre l'intérieur et l'extérieur. Le «coro lontanissimo» (chœur très éloigné) de Prologo et Isola 1 " est effectivement parti dans des distances irréelles. Pour la première fois, j'ai entendu le changement magiquement soudain de la dynamique extrême au son : inouï et cristallin, lucide jusque dans les profondeurs du carillon de verre et du son Interludio 2 ", musique comme sur la pointe d'un glacier, en danger et gratuite, douloureuse. » (Peter Hirsch, Livret du CD *Luigi Nono - Prometeo, Tragedia dell'ascolto, col legno - contemporary, SWR, 2007* Traduction anglaise: Steven Lindberg, **lien**)

En effet dans les années 80, Luigi Nono développa un concept de base de sa relation à l'espace : *Il Suono Mobile* (Son-Mobile) (BARABAYAR FERNANDEZ et BERMEJO MARTI 2015). Pour Nono le son devait toujours donner l'impression d'être en mouvement. Dans *Prometeo*, il utilisa donc l'*halaphon* pour créer des sons se déplaçant continuellement dans l'espace. De la même manière qu'il ne cherchait pas à écrire un seul chemin entre les îles, il créât de nombreuses trajectoires complexes à l'intérieur et l'extérieur de la structure conçue par Renzo Piano.

Nono: Prometeo

San Lorenzo

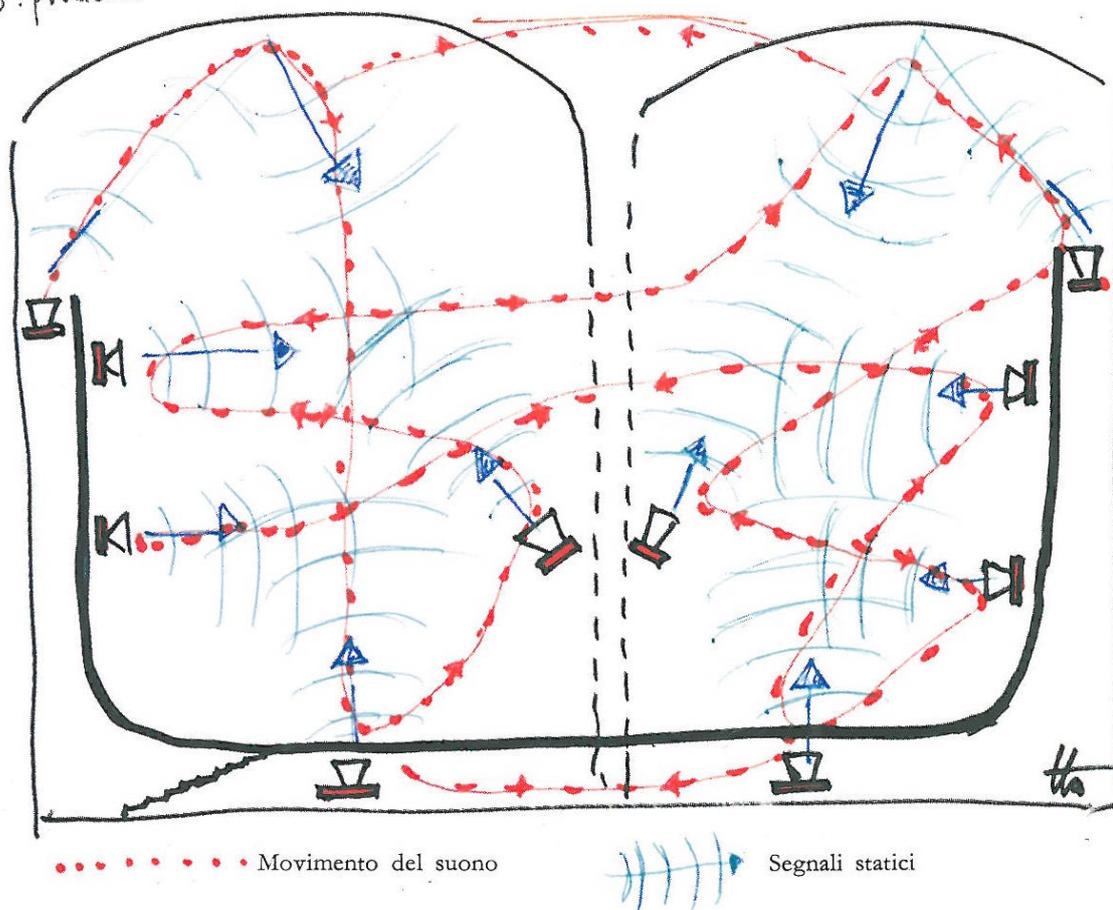


FIGURE 2.20 – Dessins de Luigi Nono, réflexion sur les trajectoires et les positions des enceintes pour *Prometeo* dans l'église *San Lorenzo*, de Venise



### 2.3.4 Technologies objets

Comme nous avons pu le constater dans les deux dernières oeuvres présentés, le développement technologique fut très important dans la création de ces pièces. Nono et Boulez ont du étudiés les systèmes techniques de leur époque pour pouvoir les exploiter au mieux dans leur processus créatif. Haller rapporte les propos de Nono « Nous devons apprendre et étudier l'espace ». Haller rajoute « En vertu de sa déclaration artistique , le compositeur crée son propre espace sonore artificiel pour sa composition , il est donc important que cet espace sonore soit réexploré et redéfini pour chaque nouvelle composition, pour chaque concert en raison des différentes conditions acoustiques. Les compositeurs et les interprètes doivent écouter encore et encore l'espace sonore, apprendre à comprendre l'espace. Les limites géométriques d'une pièce sont données. Le compositeur essaie de créer un espace sonore audible dans ces limites qui peut correspondre à ces limites - il n'est pas obligé de le faire. » (Hans Peter Haller, cours, en allemand dans le texte [lien](#)) Afin de se préparer pour le chapitre suivant et les considération sur la simulation d'acoustique, nous allons revenir ici sur un court état de l'art des technologies de spatialisation de son orienté objets qui existent de nos jours.

Nous prendrons ici une définition assez générale de l'audio orienté objet, tel que présenté par Nicolas Tsingos dans son article "Object Based Audio" (TSINGOS 2018). Tsingos définit un objet sonore - dans cette situation - comme un élément sonore (généralement monophonique) auquel on associe des données véhiculant une intention artistique (notamment la position). Nous Reviendrons sur la technologie la plus simple et la plus ancienne qu'ait la panoramisation stéréophonique, nous explorerons ensuite les systèmes à base de vecteurs, de synthèse de front d'onde ou encore celles liées au Binaural.

#### 2.3.4.1 Panoramisation standard

Le panoramique standard se base sur nos connaissances en psycho-acoustique appliquées au cas de la stéréo et uniquement sur les indices de différences d'intensités (IID) et différences de temps (ITD) (voir Chapitre 1 sur l'écoute humaine). Dans la majorité des applications on désigne par *panoramique* un panoramique d'intensité; on ne prendra alors seulement en compte que le niveau d'envoi d'une source monophonique dans les canaux de gauche et de droite de la stéréo. Un son envoyé au même niveau dans les deux canaux sera perçu au centre, il est important de noter qu'aucun son ne provient du centre, on appelle cette illusion une *source fantôme* en opposition avec une *source réelle* qui correspond à une source sonore projetée par une seule enceinte, dans ce cas l'enceinte de gauche ou de droite. En variant la différence d'intensité on peut donc déplacer cette *source fantôme* sur la ligne entre les deux sources réelles aux extrémités. Il existe diverses équations de différence d'intensité, diverses équations sont présentées en annexe (voir **Annexe 1**). Notons que ces équations sont prévues pour un système de diffusion stéréophonique où les deux enceintes et l'auditeur forment un triangle équilatéral.

*Pourquoi donc n'utiliser que de la différence d'intensité alors que notre écoute se base sur une interaction entre différences de temps et d'intensité ?*

*Tout d'abord historiquement le panoramique d'intensité était électroniquement beaucoup plus facile à implémenter en grand nombre sur une table de mixage. La différence de temps demande quant à elle des délais stéréos de précision (1 ms de différence suffit à basculer une source du centre vers l'extrême droite) difficiles à réaliser avant la numérisation du son. Ensuite le panoramique de temps pourra*

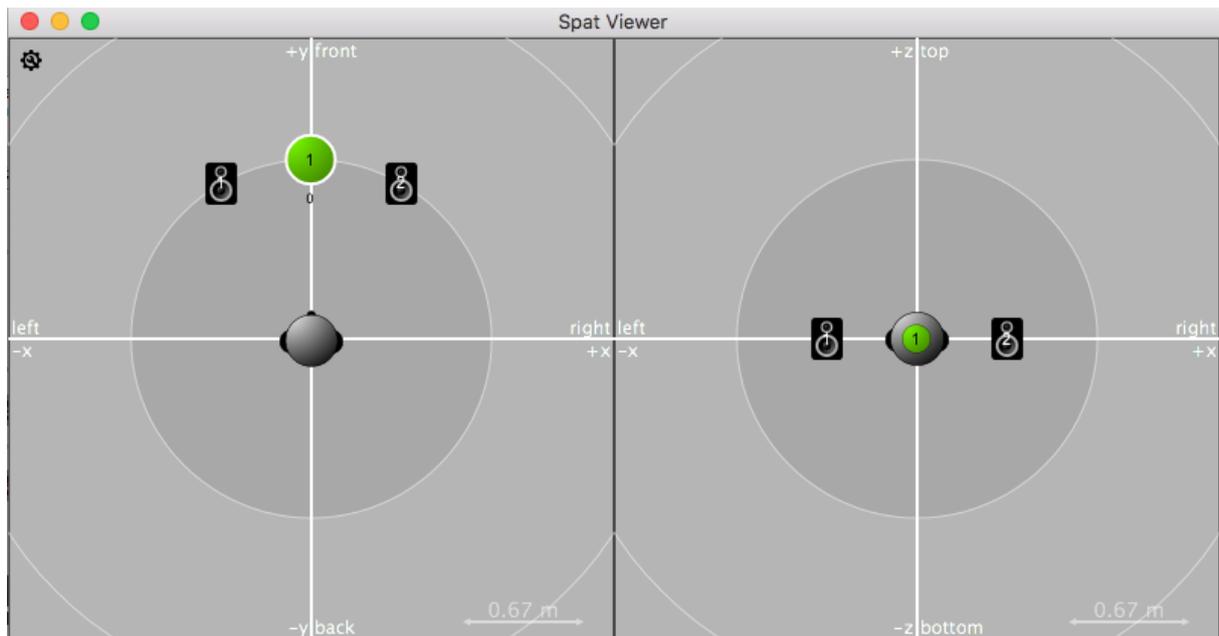


FIGURE 2.22 – Exemple de dispositif stéréophonique, enceintes espacés de 60 degrés (Spat), vue de dessus à gauche et vue de derrière à droite.

entraîner un filtrage en peigne qui va donc colorer le son du fait que les signaux envoyés à gauche et à droite ne sont plus en phase (idem pour l'auditeur situé à équidistance des deux enceintes). On aura ensuite perceptivement deux rendus très différents ; le panoramique d'intensité sera très précis en localisation et en timbre tandis que le panoramique de différence de temps provoquera une coloration et une localisation moins précise, il apportera en revanche une impression de profondeur que n'a pas le premier. Ce dernier intéresse donc certains ingénieurs du son spécialisés dans la musique acoustique pour le positionnement des appoints<sup>43</sup> notamment, car son manque de précision en localisation et sa profondeur permettent de fondre plus facilement ces microphones avec le rendu du système global.

Il n'existe pour le moment que peu de plugins proposant les deux et encore moins proposant un assemblage des deux, notons le plugin *deltapan* de J.L Pecquais s'intéressant à un ratio « intelligent » entre les deux aspects. (Je propose en annexe une implémentation de cette proposition pour un panning KNN.) (**Annexe 4**)

Cependant la différence de temps a un problème majeur : elle est très sensible au mouvement. En effet tout mouvement provoquera un changement dynamique des délais et donc un effet de *pitch*, de *transposition*.

43. Microphones de proximités venant compléter une prise de son global avec un couple par exemple

### 2.3.4.2 Panoramisation sur base de vecteur (VBAP/VBIP/LBAP...)

Avec l'arrivée de systèmes de spatialisation 3D l'envie de mouvements se fera de plus en plus sentir, on retrouvera donc la même problématique que pour les systèmes stéréophoniques, c'est-à-dire un développement majoritaire des systèmes de différences d'intensité en 3D. Qu'est ce donc que ces panoramiques sur base de vecteur? C'est tout simplement une généralisation des panoramiques stéréos sur une puis deux dimensions supplémentaires. En effet on peut considérer le mono comme un système 0D (un point), la stéréo, 1D (une ligne), arrivent donc ensuite le plan et le volume. Il existe différentes méthodes de généralisation d'où le grand nombre de systèmes (VBAP/VBIP/LBAP/...) la plupart réalisent une extension de la ligne en un disque (2D). On applique alors le même principe que pour la stéréo, c'est-à-dire une différence d'intensité entre seulement deux enceintes à la fois mais on ne considère cette fois non plus une ligne entre les enceintes mais un arc de cercle. Pour un système quadraphonique pour effectuer une rotation complète on passera donc d'une source réelle, à une source fantôme entre deux enceintes, à une nouvelle source réelle, etc..

On parle donc de base vecteur parce-qu'on encode la position de la source entre deux enceintes par deux vecteurs correspondants aux niveaux d'envois dans chacune des deux enceintes. Disons ( $HP_1$ ,  $HP_2$ ) ou (0,1) pourrait signifier la source sur l'enceinte à droite et (0.5,0.5) la source entre les deux enceintes).



FIGURE 2.23 – Exemple de dispositif VBAP 2D sur 6 HP, 60 degrés entre chaque enceintes (Spat)

Nous pouvons ensuite généraliser à une dimension supérieure, le cercle devient une sphère (VBAP2D, VBAP3D) on aura alors plus un vecteur à deux coordonnées mais à trois. Les valeurs des trois coordonnées sont donc effectuées par triangulation sur les trois enceintes les plus proches de la source. Un des avantages apportés par ces systèmes a été d'intégrer très rapidement une adaptation à la position des enceintes réelles quand bien même celle-ci ne serait pas sur une sphère parfaite. En effet en 2D il est encore très facile d'appliquer tout simplement le panoramique stéréo sur une quadraphonie par exemple. Mais pour des systèmes plus complexes les imprécisions de positions des enceintes par rapport à une position idéale entraîneraient des dimorphismes de positions ou de vitesse de trajectoires. Cependant il est important de noter que ces systèmes se basent encore sur des principes psycho-acoustique et sur un *sweet spot*<sup>44</sup> central.

44. Position idéale d'écoute, plus on s'éloigne de ce point plus on perd l'impression de localisation

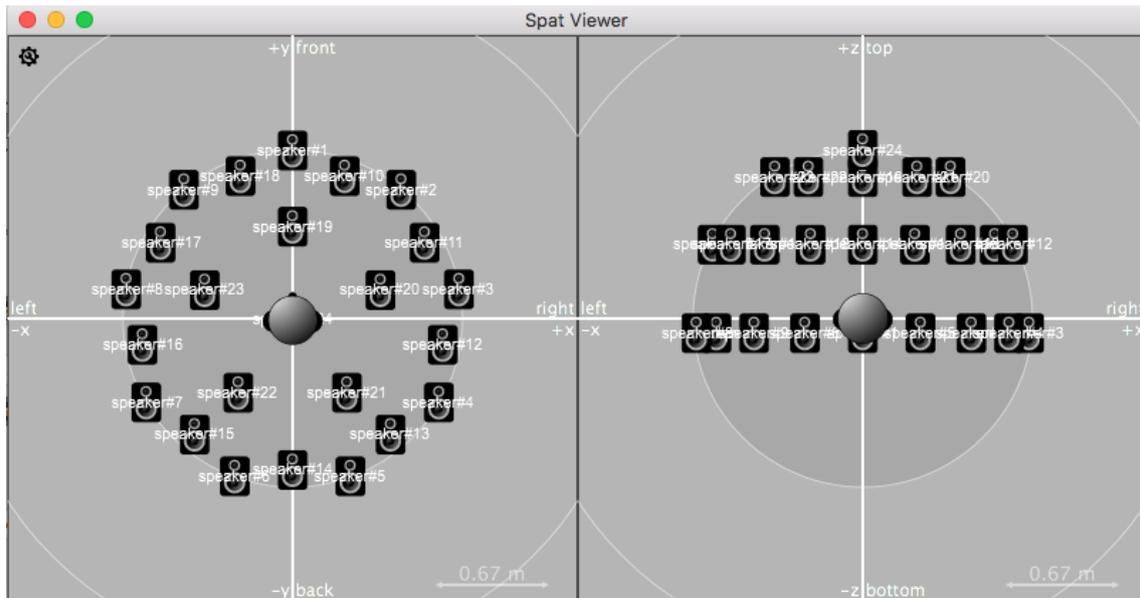


FIGURE 2.24 – Exemple de dispositif VBAP 3D sur 24 HP, disposition du Studio 1 de l'IRCAM (Spat)

Les systèmes de types Layer (LBAP) sont quant à eux des systèmes 2D que l'on va venir placer par tranches (*layers*) dans un environnement 3D. Généralement on s'en servira pour avoir des strates de différentes élévations. Pour gérer l'élévation, une interpolation est appliquée entre les tranches. Prenons l'exemple de la Figure 2.25 ci dessous. Le système LBAP est ici constitué de deux couches 2D horizontales ; une couche noire à 0 degré d'élévation et une couche bleue à 30 degrés d'élévation. Si l'on place la source à 0 degré en élévation alors seule la couche noire est activé et inversement à 30 degrés d'élévation. Entre les deux couches une interpolation est effectuée : à 15 degrés d'élévation les deux systèmes seront alimentés à la moitié de leur puissance maximale.



FIGURE 2.25 – Exemple de dispositif LBAP en deux couches, une à 0 degré d'élévation de 6 enceintes et une à 30 degrés d'élévation de 4 enceintes.

### 2.3.4.3 Synthèse de front d'ondes

### 2.3.4.4 Ambisonique

L'ambisonie est un moyen de prise de son, de traitement et de restitution d'un champ sonore. Nous allons nous intéresser à son décodage et à son emploi à des fins artistiques. Le système ambisonique repose sur une représentation du champ sonore dans le domaine des harmoniques sphériques (3 dimensions) ou circulaires (2 dimensions). Cette représentation consiste en une décomposition de l'espace en une somme pondérée de fonctions spatiales.

*Nous pourrions faire une analogie avec la transformée de Fourier. Là où celle-ci décompose tout son périodique en une somme "d'harmoniques" fréquentielles, la représentation ambisonique elle décompose la sphère (ou le cercle en 2D) en harmoniques spatiales. Là où en fréquence la première harmonique a le double d'oscillation (fréquence double) de la fondamentale et la seconde harmonique le quadruple ( $2^2$ ), on retrouvera un principe similaire pour les ordres des harmoniques sphériques. L'harmonique de rang 0 à un lobe, celles d'ordre 1 deux lobes, celles d'ordres 2 quatre lobes, etc.. A partir de l'ordre 3 cependant le doublement du nombre lobe devient plutôt une limite supérieure, à l'ordre 3 le maximum de lobe est  $2^3 = 8$ . Dans le cas des fréquences nous sommes dans un système à une seule dimension, il n'existe donc qu'une seule harmonique par "ordre". En revanche en ambisonique nous nous retrouvons en deux (2D) ou trois (3D) dimensions. Il y aura alors plus d'une harmonique par ordre, excepté pour le rang 0 qui est la "fondamentale". On aura en 3D pour  $n$  l'ordre  $(n + 1)^2$  harmoniques sphériques et en 2D  $2n + 1$  harmoniques circulaires. On arrive donc rapidement à un grand nombre d'harmoniques<sup>45</sup>*

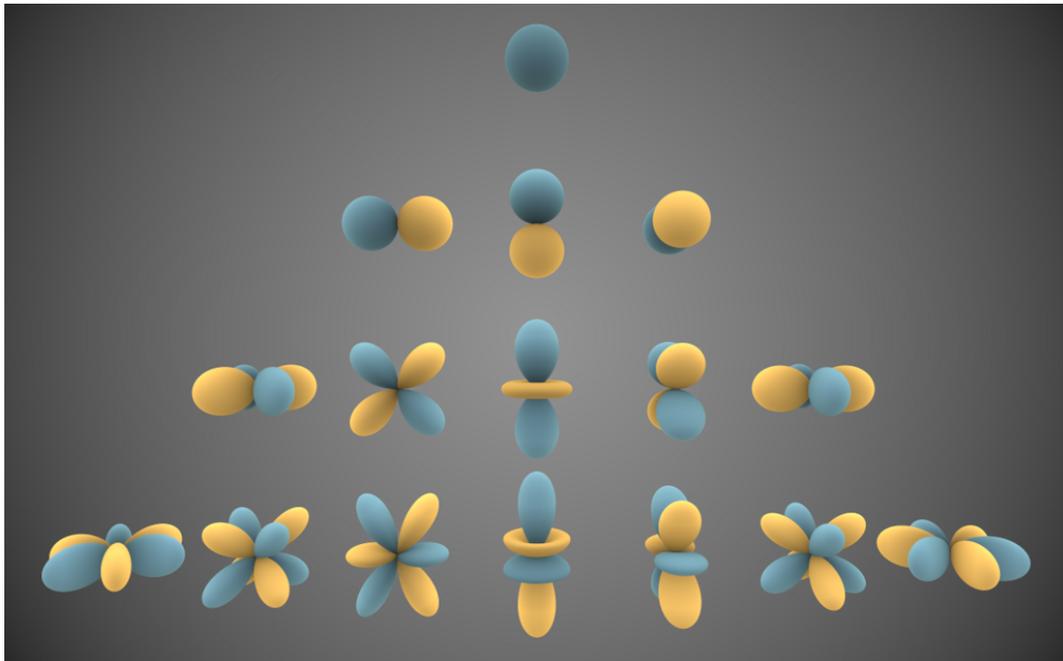


FIGURE 2.26 – Harmoniques sphériques des rangs 0 à 3 (de haut en bas)

45. En 3D, un ordre de décomposition 8 comprendra les 17 composantes de l'ordre 8 ( $2^*8+1 = 17$ ) ainsi que les composantes des ordres précédents soit un total de 81 composantes.

Ces harmoniques sont statiques, lors d'un déplacement seul les coefficients de chaque harmoniques varient.

Pour comprendre comment fonctionne la directivité des de ces harmoniques sphériques et circulaires faisons l'analogie avec les microphones à directivité variable. Ceux-ci fonctionnent avec deux capsules et en faisant seulement des opérations linéaires sur ces deux capsules on arrive à avoir toutes les directivités d'omnidirectionnel à supercardioid ( $a+b$ ,  $a-b$ ,  $a+\frac{1}{2}b$ , etc..) <sup>46</sup>. On additionne ainsi les figures de directivité. Prenons en 2D l'harmonique de rang 0 ( $H_0$ ) et les deux harmoniques de rang 1 c'est à dire suivant les axe x et y ( $H_{1/x}$ ,  $H_{1/y}$ ). L'addition de  $H_0$  et de  $H_{1/y}$  donne une source frontale (dans le sens de y), la soustraction de  $H_0$  et de  $H_{1/y}$  donne une source dans le sens de -y donc vers l'arrière. Même principe avec suivant l'axe X. Pour avoir les valeurs intermédiaires in interpolation entre les coefficients est effectuée (voir vidéo en bas de page).

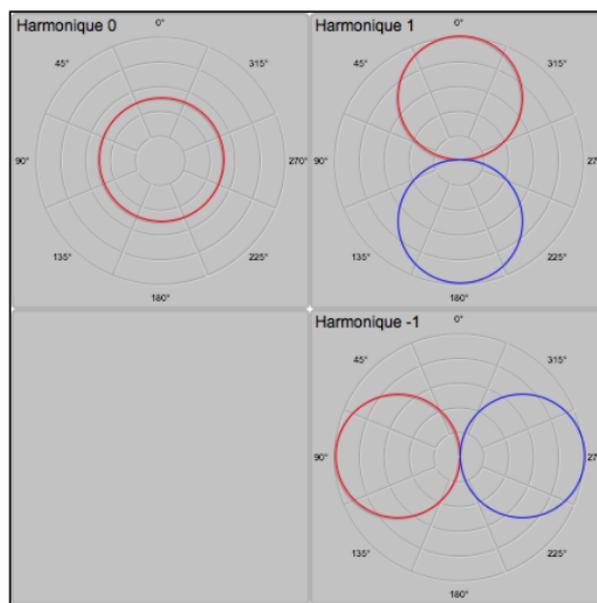


FIGURE 2.27 – Harmoniques circulaires des rangs 0 à 1



46. Généralement ces microphones sont réalisés avec deux capsules cardioides dos à dos.

Ce calcul des coefficients correspond à l'étape de l'encodage ambisonique. Contrairement aux systèmes en base vecteur le son ainsi encodé ne peut pas directement être diffusé sur des haut-parleurs, il doit d'abord passer par une étape de décodage (voir Figure 2.28).

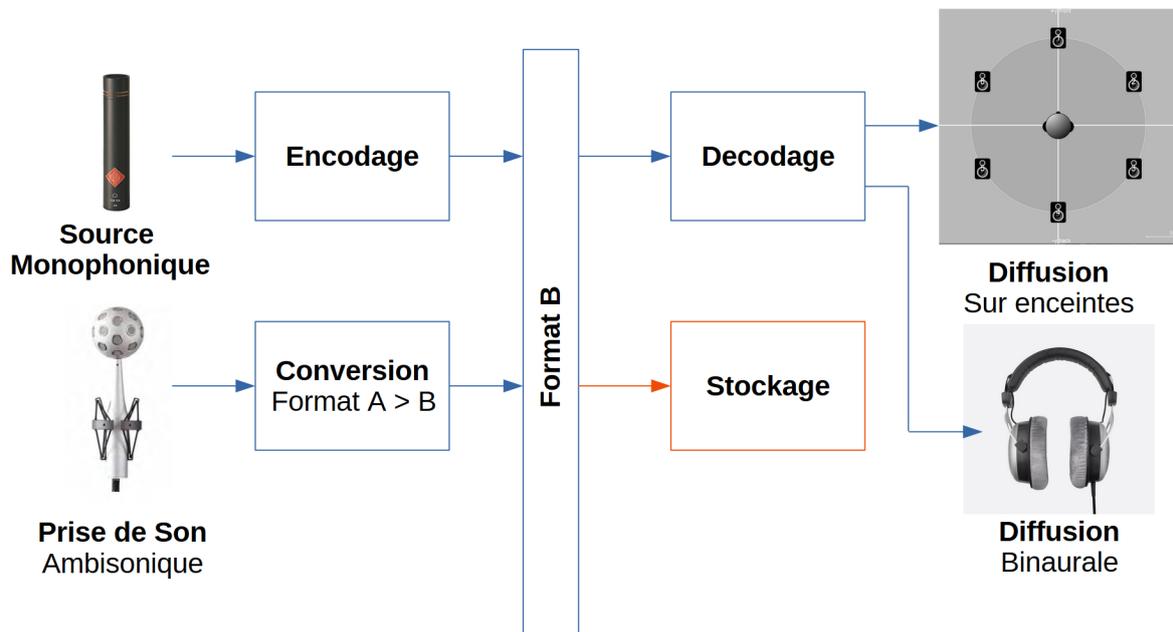


FIGURE 2.28 – Schéma simplifié du chemin du signal en Ambisonie

Des précisions sur les équations qui régissent les harmoniques sphériques sont disponibles en annexe (**Annexe 5**).

Une fois encodé (en format B), nous avons alors un format de représentation du champ sonore sur une sphère (en 3D) ou sur un cercle (en 2D). Nous pouvons nous en servir comme un format de stockage. Plus le champ sonore aura été encodé avec un ordre élevé, plus la restitution de la synthèse de front correspondra à un champ "naturel". Une fois dans ce format nous pouvons le restituer sous différentes formes : tout d'abord sur un nombre de haut-parleurs équivalant à l'ordre d'encodage (rappelons  $(n + 1)^2$  en 3D et  $2n + 1$  en 2D) et dans ce cas la restitution est de même ordre que celle d'encodage. Nous pouvons sinon le restituer sur un nombre inférieur de haut-parleurs, dans ce cas l'ordre de restitution dépendra du nombre de haut-parleurs (pour un ordre 7 en 3D il faut au minimum 64 haut-parleurs, avec 63 haut-parleurs l'ordre de restitution ne sera que de 6). Et pour finir supérieur au nombre minimum. Dans ce cas l'ordre de restitution restera celui de l'encodage. Il peut parfois être intéressant d'avoir légèrement plus d'enceintes que l'ordre d'encodage pour répondre à des problèmes géométriques. L'ordre 1 2D nécessite seulement 3 haut-parleurs, en pratique on en mettra généralement 4 étant donné que nos salles sont rectangulaires. Avoir légèrement plus d'enceintes pourra améliorer l'homogénéité de diffusion mais en aucun cas améliorer la précision, au contraire avoir beaucoup plus d'enceintes que l'ordre d'encodage pourra apporter des artefacts.

Une restitution sur des haut-parleurs nécessite le passage par une matrice de décodage. On entrera alors la position réelle de nos enceintes relativement au point central d'écoute que l'on aura choisi. Une grande précision sera à apporter sur cette étape, une trop grande imprécision sur la position de nos enceintes entraînera une perte de précision, voir des artefacts. Il n'est généralement pas compliqué de déterminer la position au sol du point central. En revanche la position en hauteur de ce point est à bien réfléchir. Si notre public est debout

ou assit on ne souhaitera pas le positionner à la même hauteur. Nous essayons généralement de le placer à une hauteur moyenne estimée de la tête du public. En ce qui concerne les enceintes nous essayerons de les placer sur une sphère ou une demi-sphère en essayant de tracer des triangles équilatéraux entre les différentes couches de haut-parleurs en hauteur.

Une réflexion importante lorsque l'on prépare restitution sur enceinte est celle de l'aire d'écoute. En effet mathématiquement parlant seul au centre de la sphère la restitution sera "valable". Plus on s'en éloigne, plus nous perdrons la localisation des sources. Pour répondre à ce problème il existe des méthodes "d'optimisation" de décomposition qui correspondent à des aires d'écoutes plus ou moins grandes. Les trois plus utilisés sont "direct", "maxRe", "InPhase" et des combinaisons des trois. Direct correspond à aucune optimisation, maxRe correspond à une première optimisation qui va élargir l'air d'écoute en "étalant" les sources, cela aura donc aussi un impact sur la précision des sources en localisation et aura tendance à faire perdre de la précision dans les hautes fréquences. La dernière, Inphase, correspond à un mode où l'on supprime toutes les composantes hors-phases des harmoniques (sphériques et circulaires) lors de la restitution. On se retrouve avec une aire d'écoute plus élargie que pour le maxRe mais avec une perte d'attaque, une coloration assez marquée. Certains algorithmes de spatialisation nous permettront de pouvoir choisir des mélanges d'optimisations avec un *crossover*<sup>47</sup> fréquentiel, ou bien une possibilité d'optimisation différente par groupes de sources.

*Pourquoi donc utiliser l'ambisonique plutôt qu'un système VBAP par exemple qui semble plus simple à mettre en place ? C'est une question qui peut sembler légitimes mais en réalité les deux systèmes ne répondent pas aux mêmes intentions musicales. Alors que le VBAP effectuera un vecteur d'intensité entre trois enceintes, l'ambisonique elle fait une synthèse de front d'onde qui requiert l'ensemble des haut-parleurs. Dans le premier cas toute l'énergie sera concentrée dans une zone et entre trois haut-parleurs, ainsi une source VBAP risquera pas de masquer une source suffisamment éloignée. Cette source (VBAP) aura aussi donc tendance à mieux se dissocier des autres, à être plus "précise". En revanche une source encodée en VBAP aura tendance à fluctuer lorsqu'elle se déplace. En effet si elle se situe au centre des trois enceintes elle aura le timbre et la directivité d'une "source fantôme" alors que si elle se trouve pile sur une enceinte alors elle aura la directivité et le timbre d'une source réelle. En se déplaçant elle fluctuera entre ces états. L'ambisonique, elle, sert à simuler un champ sonore "naturelle", il n'aura pas ces problématiques de fluctuations puisque toutes les enceintes contribuent en permanence à la projection de la source. Le timbre pourra être affecté pour des ordres de restitution petit. Cependant étant donné que le timbre est homogène sur la sphère il pourra être corrigé par une égalisation globale du bus ambisonique. L'ambisonique donnera aussi accès à des traitements particuliers (ondes planes, rotation, focus, traitements sur les harmoniques, etc.) qui pourront être utilisés comme des outils artistiques.*

Plutôt que d'être rendue sur des haut-parleurs, l'ambisonie pourra être décodée sur un casque en binaurale. La méthode la plus rependue sera de passer par des "haut-parleurs virtuelles". Nous commençons par les mêmes étapes que pour une restitution sur haut-parleurs comme expliqué plus haut. Prenons un flux ambisonique encodé à l'ordre 7, nous choisirons donc 64 haut-parleurs. Étant donné que le mode d'écoute final sera le casque nous pouvons choisir la "salle virtuelle" qui nous convient, avec un placement des enceintes sans contraintes "réelles". Prenons pour salle idéale : une sphère parfaite à 1 m de distance autour du point

---

47.

d'écoute (les HRTF sont généralement calculés à cette distance). Sur cette sphère nous plaçons les 64 enceintes de la manière la plus équilibrée possible. Nous effectuons ensuite une décomposition sur ces 64 enceintes - sans optimisation puisqu'avec l'écoute au casque nous serons toujours placés au centre de cette pièce. Cette décomposition faite, nous associons chaque canal à une synthèse binaurale positionnée au même emplacement que celui du haut-parleur virtuel correspondant à ce canal. Ainsi nous avons donc synthétiser en binaural nos 64 haut-parleurs.

*Cette méthode dispose de trois avantages. Premièrement il sera très facile d'effectuer un headtracking. En effet en ambisonie nous pouvons appliquer une rotation à l'ensemble du champ sonore. Ainsi pour effectuer un headtracking binaurale il suffira d'effectuer une rotation du champ ambisonique inverse à la rotation de la tête. Alors les sources sonores ne se déplaceront plus avec la tête lorsque celle-ci tourne. Le second avantage concerne la phase. Dans certains cas, en synthèse binaurale pure, on pourra faire face à des colorations où des jeux de phases liées à un mauvais algorithme d'interpolation entre les positions de mesure - ou alors un trop petit nombre de mesure. Dans notre cas rien ne se déplace dans notre synthèse binaurale. En effet nos haut-parleurs virtuels sont statiques, c'est le champ ambisonique en amont de la décomposition qui tourne. Le dernier avantage est lui aussi lié au caractère statique de notre salle virtuelle. Étant donné que les enceintes virtuelles sont immobiles, la demande en ressource processeur du moteur de synthèse est constante. De plus l'opération de rotation du champ ambisonique demande peu de ressources comparées à la synthèse binaurale. Nous évitons donc d'avoir un pic de demande de ressources processeur à chaque fois que l'auditeur tourne sa tête. Et ainsi pouvoir préparer un système plus stable et pour moins de ressources CPU qu'avec une synthèse binaurale pure.*

#### 2.3.4.5 WFS

La WFS ou Wave Field Synthesis est un modèle de synthèse de front d'onde différent de l'ambisonique. Alors que ce dernier se basait sur la sommation d'harmoniques sphériques ou circulaires, la WFS elle se base notamment sur des calculs de délais visant à reproduire la forme d'un front d'onde. La plupart du temps les enceintes sont placés sur une ligne (ou un arc de cercle).

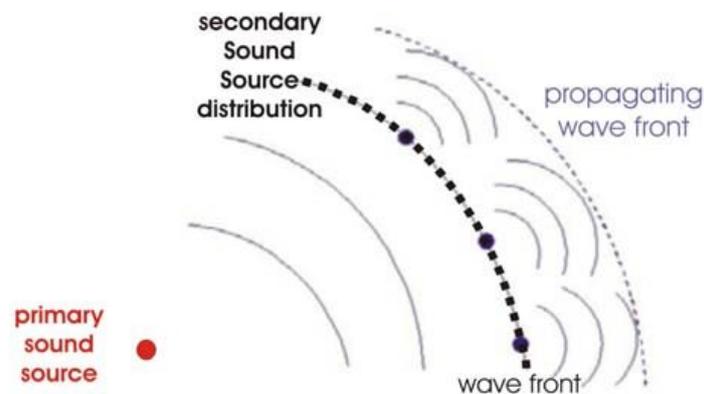


FIGURE 2.29 – Schéma simplifié de la synthèse d'un front d'onde d'une source primaire (virtuelle) par une distribution de sources secondaires (enceintes)

Là où l'ambisonique ne peut donc synthétiser que des objets sur sa sphère (ou un cercle) et donc avec une distance unique correspond au rayon de la sphère ou du cercle. La WFS elle peut reproduire la forme d'onde d'une source sur sa ligne de haut-parleurs, derrière sa ligne jusqu'à l'infini mais aussi devant. Plus la source s'éloignera, plus son front d'onde s'aplatira, une source à l'infini est alors considérée comme une *onde-plane*, nous y reviendrons. Concernant les sources placés devant la ligne, ou sources focussées, celles-ci ne peuvent être positionnés que sur une courte distance devant les enceintes - la distance dépendant de la densité du maillage de haut-parleurs. Il existe de nombreuses contraintes pour ses sources focussées, de manière global l'auditeur ne peut se trouver entre la source focussée et les enceintes. De la même manière qu'en ambisonique un plus grand nombre de haut-parleurs nous permettraient un ordre de restitution plus grand et donc une meilleure précision spatiale. En WFS rajouter des haut-parleurs mais surtout densifier le maillage, c'est-à-dire avoir des enceintes plus rapprochées les unes des autres amélioreront la synthèse du front d'onde. La distance inter haut-parleurs (entre deux haut-parleurs) quantifie la fréquence maximale du rendu "mathématiquement vrai" de la synthèse. L'équation qui régit cette fréquence est :

$$f_A = \frac{c}{2\Delta x \sin \alpha}$$

où  $f$  est la fréquence d'aliasing,  $c$  la célérité du son en  $m.s^{-1}$ ,  $\Delta x$  est la distance entre les centres-acoustiques des haut-parleurs en mètres, et  $\alpha$  l'angle entre l'orientation de la source (sa direction de propagation) et la ligne formée par les haut-parleurs. Pour une source perpendiculaire à la ligne de haut-parleurs on aura  $\alpha = \pi/2$  dans  $\sin \alpha = 1$  ainsi  $f$  est alors :

$$f_A = \frac{c}{2\Delta x}$$

Ce qui est une formulation similaire à la fréquence de Nyquist (lorsque la distance  $\delta x$  vaut  $\lambda$  : longueur d'onde). Pour des enceintes espacées de 17 cm on aura alors notre fréquence d'aliasing autour de 1 kHz.

Au-dessus de cette fréquence, l'aliasing pourra provoquer des colorations ou des noeuds de pression. C'est pourquoi chaque système WFS est équipé de son propre filtre antialiasing, il n'existe cependant pas encore de convention sur la réalisation de ce filtre.

Bien que la WFS n'est pas un *sweet spot* - on reproduit un front d'onde "naturelle" - on aura tout de même une sorte d'aire d'écoute. Notamment aux extrémités de la lignes on pourra avoir certains artefacts, mais aussi certains systèmes de WFS comme celui du Spat nous permet de choisir la distance moyenne d'écoute. Cela aura une influence sur l'angle maximum derrière les enceintes et sur la zone focussée.

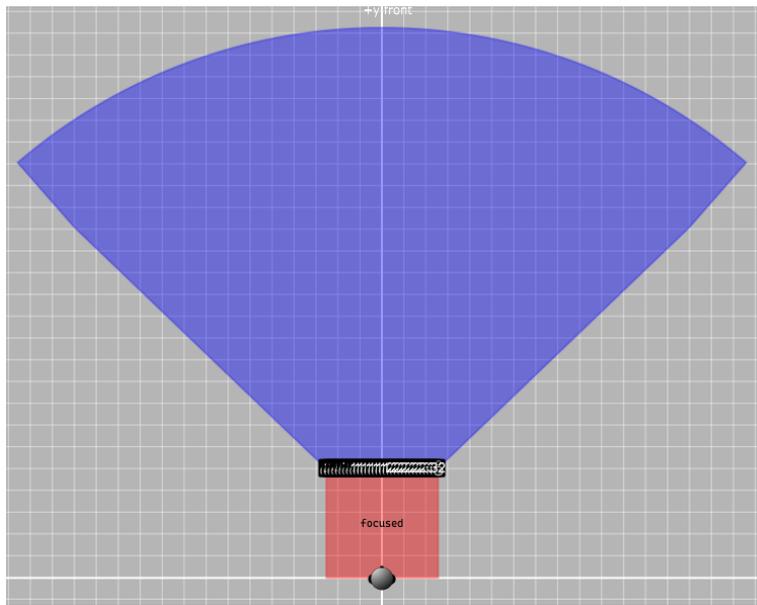


FIGURE 2.30 – Spat WFS Config, choix du nombre de haut-parleurs, de leur distribution, et de la distance optimale d'écoute (ici 5 m), visualisation des aires d'écoutes engendrées par ces choix

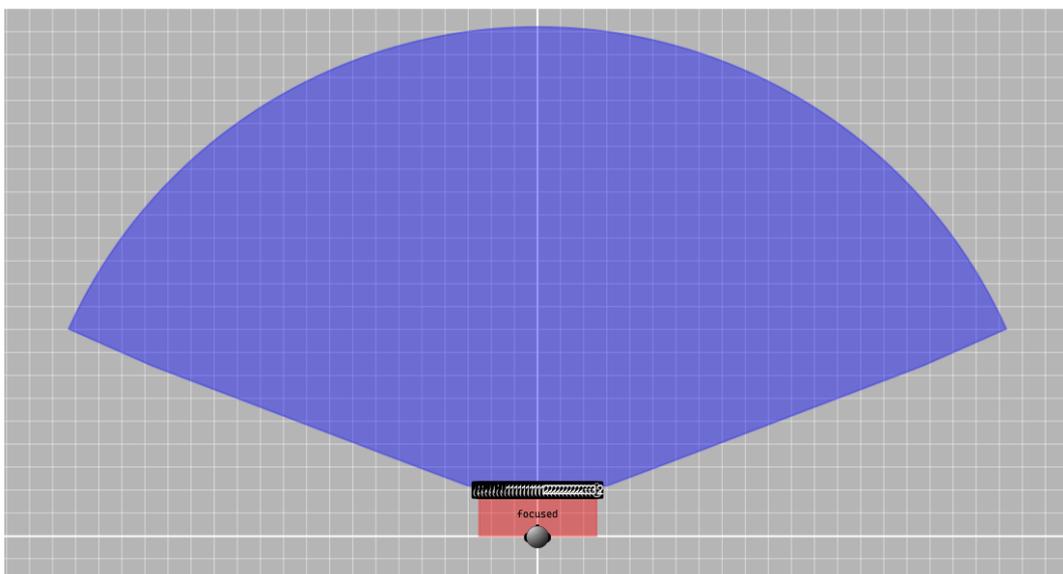


FIGURE 2.31 – Spat WFS Config, choix du nombre de haut-parleurs, de leur distribution, et de la distance optimale d'écoute (ici 2 m), visualisation des aires d'écoutes engendrées par ces choix

Quels utilisations apportent la WFS? Ce système pourra tout d'abord être intéressant pour amplifier une source acoustique sur une scène par exemple. Prenons une source acoustique au centre d'une scène, une ligne de haut-parleur le long de la scène et une source virtuelle - la source amplifiée - placée elle aussi au centre. L'absence de sweet spot créée par la synthèse de front donnera à la quasi-totalité du public une localisation en azimuth de la source virtuelle identique à celle de la source amplifiée. Là ou dans un système stéréo, le public au centre localiserait au centre la source amplifiée, le public à gauche la localiserait à gauche et le public à droite, à droite. Attention tout de même la source sera localisé à la hauteur des enceintes. C'est pourquoi dans certains théâtres on placera une ligne en dessous et au dessus de la scène pour pouvoir gérer la hauteur perçu entre les deux à la manière d'un LBAP. Ensuite c'est le seul système que nous avons présenté jusqu'à présent qui simule réellement la distance et ouvre donc une dramaturgie dans la profondeur. Les sources positionnées à l'infini diffuseront une onde-plane. Le jeu de perspective lié au fait que cette source soit virtuellement à l'infini fera que l'ensemble du public situera relativement cette source de manière identique. Disons que nous plaçons une source à l'infini à 20 degrés sur la gauche, où que je soit dans le public je la localiserait à 20 degrés à gauche - à condition d'être face à la scène. Un peu de la même manière que le soleil ne se déplace pas dans notre référentiel lorsque nous sommes en voiture. Dans le cadre d'une installation cela peut être utilisé pour avoir une voix off qui semblera nous suivre au fur et à mesure de nos déplacements. C'est aussi le seul système qui puisse focaliser des sources devant les enceintes. On a alors l'impression que la source ne provient plus des enceintes. Cependant comme nous l'avions évoqué cette pratique reste très limité et demande un maillage d'enceintes très dense.

#### 2.3.4.6 Binaural

Le "Binaural" (ou audio 3D au casque) consiste en la reproduction au casque d'un contenu binaural (deux oreilles) "naturel" - attention aux deux utilisations du terme, pour différencier les deux termes je mettrai une majuscule lorsque je parlerai du Binaural au sens de "son 3D au casque". Le Binaural dépend majoritairement des critères perceptifs de l'oreille humaine que nous avons détaillé dans le chapitre 1. Je ferai donc ici une présentation rapide du système. Pour effectuer cela il existe deux principales méthodes. La première consiste à faire une prise de son où l'on place deux petits microphones dans les oreilles d'une personne ou d'une tête artificielle pour ensuite le rediffuser au casque. La seconde consiste à effectuer une "synthèse binaurale", on applique un "encodage" à une source monophonique - de la même manière que nous l'avons vu précédemment pour l'ambisonique. Cette synthèse tâchera de simuler les différences interaurales de temps et d'intensités (ITD, IID), ainsi que le filtrage du buste (tête, épaules) - l'ensemble donne une HRTF (Head Related Transfer Function). Pour effectuer cette opération on s'appuiera soit sur des mesures de HRTF faites sur des sujets. On enregistre alors la HRTF du sujet sous une multitude d'angles de diffusions sous la forme d'une *réponse impulsionnelle*<sup>48</sup> - une "empreinte de la tête". On appliquera ensuite au son monophonique que l'on souhaite synthétiser en binaural une opération appelée *convolution*, qui permettra d'appliquer "l'empreinte d'une tête" à ce son, comme si ce son était écouté par cette "empreinte de tête". Le son monophonique sera *convolué* avec les réponses impulsionnelles de l'oreille droite et de l'oreille gauche enregistrées à une position de mesure. Si la position que l'on demande ne fait pas partie des mesures on effectuera une *interpolation* entre plusieurs mesures.

---

48. La réponse impulsionnelle permet la représentation d'un système en fonction de son entrée et de sa sortie uniquement

Une autre méthode de synthèse consiste à modéliser une tête virtuelle, le modèle le plus simple étant une sphère et d'en extrapoler les délais, niveaux et filtrages stéréophoniques à appliquer au signal monophonique. Pour en savoir plus : (ROGINSKA 2018)

### 2.3.4.7 Transaural

Le but du transaural est de donner l'illusion d'un environnement 3D à un unique auditeur avec seulement deux enceintes. L'idée est de diffuser un flux binaural avec deux haut-parleurs. Cependant pour que cela soit possible il faudrait que l'enceinte droite puisse envoyer son signal seulement à l'oreille droite, idem pour l'enceinte gauche. Le phénomène du signal de l'enceinte gauche allant à l'oreille droite s'appelle le "*crosstalk*" (croisement de voix). Pour pouvoir diffuser un flux binaural par haut-parleur il nous faudra donc un "*Crosstalk Cancellation Filter* ou XTC, c'est-à-dire un filtre appliqué au signal stéréo qui fera qu'au point d'écoute de l'auditeur : la somme du signal direct de l'enceinte gauche et du signal de *crosstalk* de la droite produira le signal gauche de notre flux binaural et inversement pour la droite. Ce filtre dépend donc de la position de notre auditeur. Pour que cela fonctionne il faudra tout d'abord que notre auditeur se trouve au centre des deux enceintes mais aussi que le système connaisse sa position exacte ainsi que celle des enceintes - afin de pouvoir calculer le filtre nécessaire. De manière assez contre-intuitive, par rapport à un système stéréophonique standard (triangle équilatéral) rapprocher les enceintes l'une de l'autre et augmenter la distance de l'auditeur aux enceintes auront tendance à améliorer la qualité de rendu. En effet en effectuant ces opération le filtre (XTC) est plus facile à calculer et apporte moins d'artefacts. (CHOUEIRI 2018)

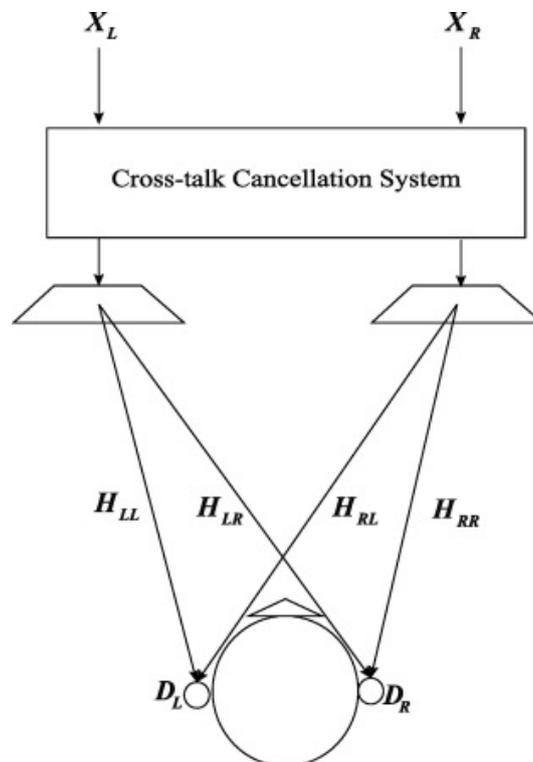


FIGURE 2.32 – Schéma de présentation du fonctionnement du filtre XTC

## 2.4 Conclusion

Les années 50 et 60 ont apporté un bouleversement dans la pensée musicale. D'un point de vue général, à la manière des mouvements sociaux et de la remise en question de certains acquis dans la société de l'époque, les compositeurs remettront en question les dogmes de la musique "classique" : Stockhausen remettra en question la hiérarchie des paramètres du son, Nono la place de l'image et des concepts idéologiques, Schaeffer théoriserà la place du son et de "l'objet-sonore" dans la musique, etc. Tous semblent regretter une standardisation, une "neutralisation de l'espace" des salles de concert : Tandis que Stockhausen souhaitera construire de nouvelles salles adaptées aux besoins actuels et futurs de la musique électro-acoustique, Nono lui s'intéressera aux acoustiques uniques de certains lieux existants.

Une tendance à la volonté d'écrire l'espace se développera de toutes ces réflexions, l'espace devenant un élément de composition à part entière. Cependant il a été nécessaire de repenser l'écoute avant de travailler l'espace. L'écoute est devenue essentielle pour les compositeurs bien que leurs analyses divergent. Tous semblent néanmoins se dissocier d'une philosophie traditionnelle qui considère la musique comme un langage où le son ne serait qu'une étape transitionnelle : où l'écoute avait pour but d'aller chercher au-delà du son pour accéder à un imaginaire, une narration.

Après cette réflexion sur l'écoute il a fallu repenser l'espace et notamment "l'espace musical". Certains compositeurs donneront des définitions, F. Bayle proposera trois espaces liés à sa classification de l'écoute (espace des figures, espace-objet, espace de représentation), le musicologue Makis Solomos proposera plus simplement de parler d'espace-son pour qualifier cet "espace musical", dans l'idée que l'espace et le son ne seraient finalement qu'un seul continuum.

Après avoir pensé l'espace, les compositeurs s'intéresseront plus en profondeur au mouvement et aux espaces dynamiques. Nono théoriserà *Il suono Mobile*, Xenakis l'application de la stochastique au mouvement, il théoriserà ses *Polytopes* comme une superposition d'espaces dynamiques à la fois sonore, architectural, de lumière, etc. Xenakis et Schaeffer auront des avis divergeant sur ces concepts notamment avec une controverse sur le statut d'"objet sonore". Nous avons vu en effet que la simplicité apparente de l'objet sonore cachait en réalité la complexité de sa génération et de son écoute, Renaud Meric nous donnera notamment l'exemple du "son de voiture". Nono imbriquera ces espaces dynamiques dans *Prometeo* à la fois d'un point de vue architectural et d'un point de vue acoustique, électro-acoustique. Il travaillera notamment sur le jeu du lointain et de sa relation aux nuances avec son *Coro lontanissimo* - s'inspirant du *coro spezzato* des vénitiens de la Renaissance. Boulez s'inspirera quant à lui du chant grégorien, notamment du chant responsorial pour la génération de polyphonies complexes, de mouvements dans trois "dimensions" (le temps, l'espace et le timbre). Afin de rendre possibles ces intentions musicales les compositeurs participèrent activement au développement des outils dont ils avaient besoin. Berio fut l'instigateur du développement du 4X par Giuseppe Di Giugno, machine révolutionnaire en terme de traitement du signal, qui amènera à la création du "Matrix 32". Ces deux machines furent développées à l'IRCAM, fondé par Boulez à Paris. En suisse les compositeurs Cristóbal Halffter et Hans Peter Haller fonderont ce qui deviendra l'*experimentalstudio des SWR*. C'est là-bas que sera notamment développé l'*halophon* qui fut utilisé pour les premières mondiales de *Répons* et *Prometeo* - permettant notamment l'écriture et la génération des trajectoires voulues par les compositeurs.

L'exemple des compositeurs précédents nous à montrer l'importance de maîtriser les aspects techniques de nos oeuvres afin de les exploiter en accord avec nos intentions musicales. Afin de préparer le chapitre suivant sur la réalisation du projet de ce mémoire nous avons fait un rapide état de l'art des technologies de spatialisation et de leurs utilisations artistiques. Nous pouvons désormais aborder le cas particulier de la simulation d'acoustique et l'utilisation qui en sera faite dans le cadre de ce projet.

## Chapitre 3

# Réflexion sur le cas particulier des acoustiques variables

### 3.1 Définition des acoustiques variables et de leur simulation

#### 3.1.1 Salles à Acoustique Variable Passive

Concentrons-nous tout d'abord sur les salles sans dispositifs d'amplification. On considère comme une salle à acoustique variable, une salle dont l'on peut faire varier dynamiquement l'acoustique. Généralement déplaçant des matériaux absorbants ou réfléchissants ou en ouvrant un chemin acoustique vers de grands volumes de résonances majoritairement dans l'objectif de changer le temps de réverbération de cette salle. En effet reprenons l'estimation du temps de réverbération proposé par Sabine :

$$T = \frac{V}{A} * 0.161$$

Avec T : le temps de réverbération, V : le volume de la salle et A : L'aire effective d'absorption.

$$A = \sum_i^n \alpha_i * S_i$$

Où A est l'aire effective,  $\alpha$  le coefficient d'absorption et S une surface (en  $m^2$ ). A est donc la somme de surface et de leurs coefficients d'absorptions. Quel est donc ce  $\alpha$  ?

On peut calculer pour chaque matériau sa manière d'absorber, de réfléchir, de transmettre un son incident (voir schéma Figure 3.1). De ces mesures on calcule le coefficient d'absorption  $\alpha$  donné ainsi par :

$$\alpha = \frac{c + d}{a}$$

C'est donc un coefficient compris entre 0 et 1, où 0 serait le coefficient d'un matériau totalement réfléchissant et 1 un matériau totalement absorbant. Pour calculer A, l'aire effective d'absorption, on considérera

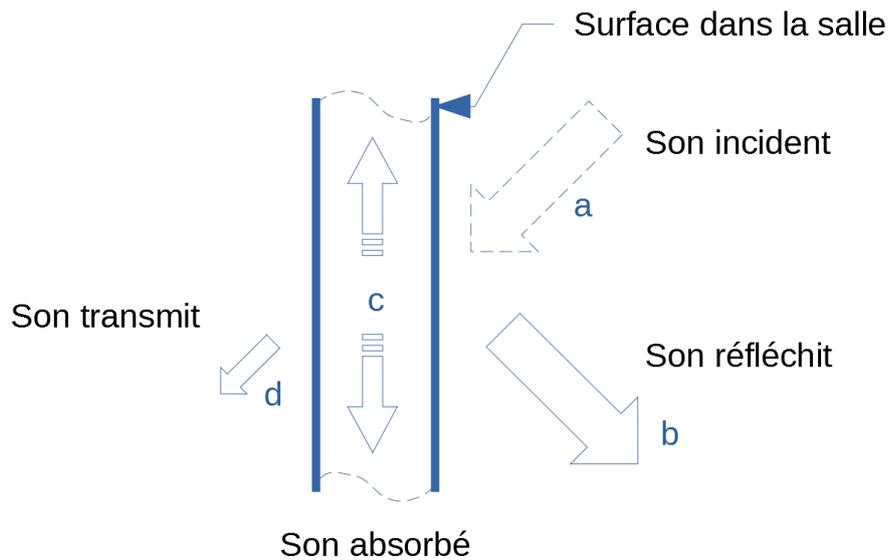


FIGURE 3.1 – Coefficient d'absorption :  $\alpha$ , a : énergie sonore totale incidente, b : énergie sonore réfléchie, c : énergie sonore absorbée, d : énergie sonore transmise

donc chaque surface d'une salle, on associera à chacune d'elles une aire ( $m^2$ ) et un coefficient d'absorption dépendant du matériau, puis on fera la somme des produits  $\alpha * S$ .

Ainsi pour augmenter le temps de réverbération d'une salle, il faudra faire diminuer A. Pour cela on peut rendre la salle moins absorbante (ou plus réfléchissante), on pourra tourner des panneaux réfléchissants, retirer des rideaux absorbants.

Présentons le premier type de salle à acoustique variable par modification du volume :

### 3.1.1.1 Salles à volumes couplés

Prenons en exemple le *KKL* de Lucerne de l'architecte Jean Nouvel et le cabinet d'acoustique Artec. La salle reprend les dimensions de la "boîte à chaussures" moderne couplé à un volume extérieur tout autour de la salle. 50 portes contrôlables électriquement contrôle l'ouverture entre les deux volumes pour ajuster l'acoustique. Ainsi le volume de la salle de concert peut passer de  $6000 \text{ m}^3$  à  $18\,000 \text{ m}^3$ , et le temps de réverbération de la salle peut varier de 3 secondes (ERMANN 2015, LUIZARD 2013, kkl-luzern.ch).



FIGURE 3.2 – Jean Nouvel, Artec, Kultur- und Kongresszentrum (KKL) à Lucerne, Suisse. Les parois latérales sont composées de portes donnant sur un grand volume vide.

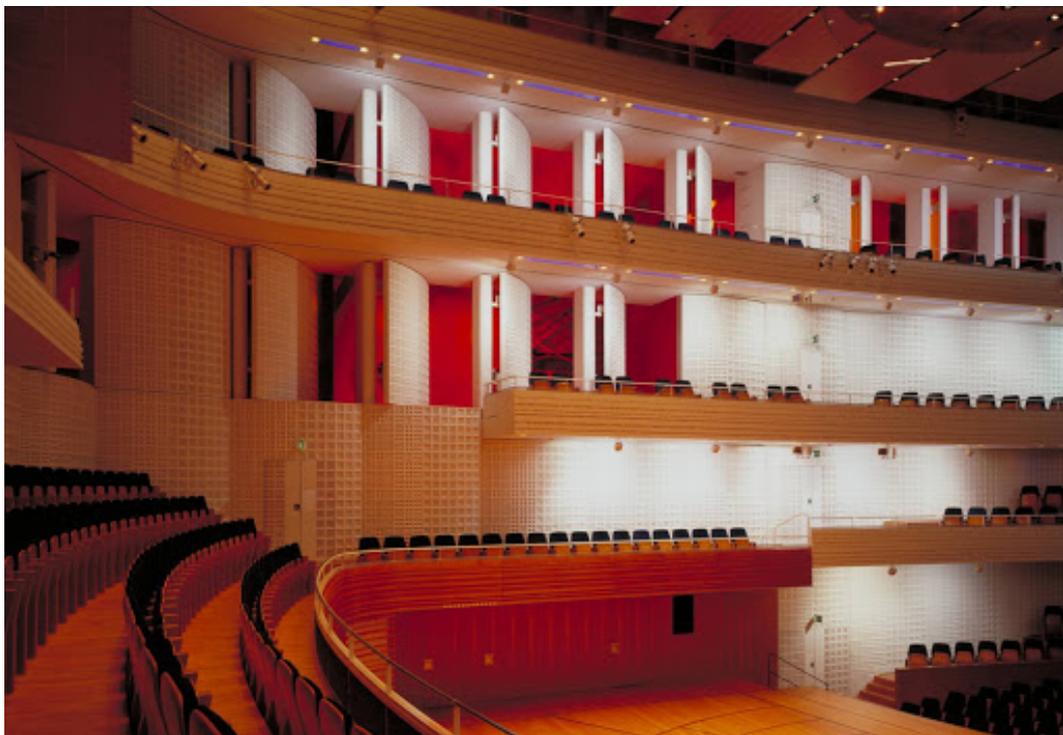


FIGURE 3.3 – Détail des portes commandées électriquement entre la salle principale et la chambre de réverbération dans la salle du KKL à Lucerne en Suisse

Les salles à volumes couplés ne servent pas seulement à transformer le temps de réverbération. En effet ces salles ont une acoustique particulière. Plutôt que d'augmenter le volume une seule salle c'est comme si nous avions deux salles en parallèle - dans cette disposition typique de la salle du KKL avec un des volumes à l'intérieur de l'autre. C'est ce qu'on appelle le *double-sloped decay* ou double pente de déclin. La première correspondant à celle de la salle intérieure (plus petite) et la seconde à la salle extérieure (plus grande). Cette acoustique particulière permet d'obtenir à la fois une bonne clarté (petite salle) et un réverbération tardive juste après (grande salle) (ERMANN 2015).

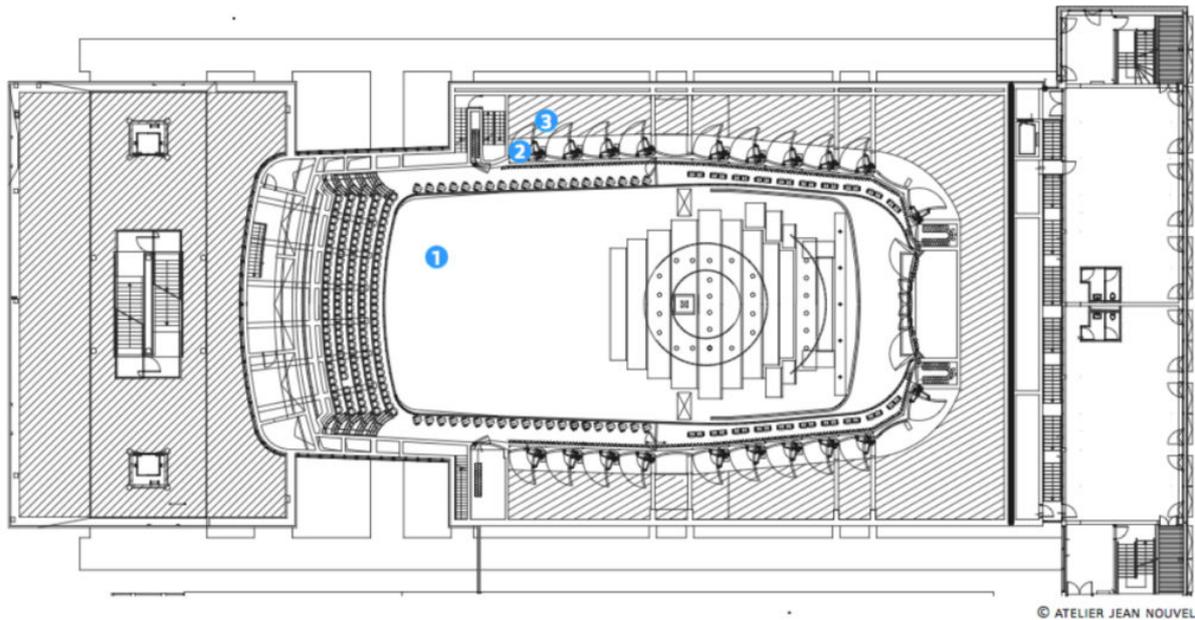


FIGURE 3.4 – Plan vue du dessus de la salle du KKL à Lucerne. 1 : Volume acoustique principal de la salle de concert, 2 : Portes de la chambre de réverbération, 3 : Chambre de réverbération

Cependant l'équilibre nécessaire à cette double pente est très difficile à atteindre. Les salles doivent être connectées tout en étant suffisamment indépendante pour agir comme deux salles l'une au-dessus de l'autre, mais en gardant suffisamment d'ouvertures pour que les réflexions tardives dans le grand volume puissent revenir dans la salle principale avec suffisamment de puissance. Ermann nous dit que sur les dizaines de salles qui existent dans le monde seules quelques-unes arrivent à faire ressentir "la double pente" aux auditeurs (ERMANN 2015). Selon l'auteur l'ouverture entre les deux salles doit se trouver autour de 1% de la surface totale de la salle, à 3% seulement la double pente risque de disparaître et la salle risque de se comporter comme si le volume était totalement ouvert.

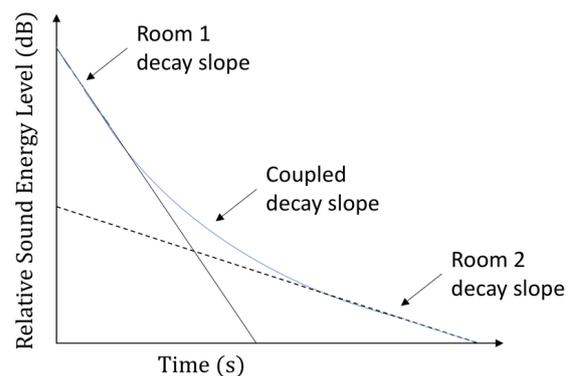


FIGURE 3.5 – Graphique de présentation de la double pente de déclin de la réverbération d'une salle à volumes couplés.

### 3.1.1.2 L'Espro & Expérimentations

L'autre possibilité pour contrôler le temps de réverbération est de modifier les matériaux de la salle. Et pourquoi pas modifier le volume en même temps. Pour cela la salle de concert de l'*Espro* (Espace de Projection) à l'IRCAM - développée par l'acousticien M. Peutz à la demande notamment de Boulez - est l'exemple idéal (PEUTZ 1978).



FIGURE 3.6 – Salle de concert *Espro* de l'IRCAM, murs et périactes mobiles.

C'est une salle presque totalement transformable, les murs, le plafond sont amovibles, peuvent être déplacés, descendus, etc. On peut ainsi créer les formes que l'on souhaite, contrôler le volume. De plus les surfaces des murs sont constituées de *périactes*<sup>1</sup>. Ce sont des formes de triangles pivotants, présentant trois surfaces différentes : une surface absorbante, une surface de réflexion *spéculaire*<sup>2</sup> et une surface diffusante. Les périactes fonctionnent par trois et 171 au total sont disposés dans l'espace (MILLOT 2017). Tout comme le plafond, la position des périactes peut être contrôlée par un système électromécanique. Le plafond notamment peut se situer entre 1.5 m et 10.5 m de hauteur. Ceci crée un volume variable de 558 m<sup>3</sup> à 3906 m<sup>3</sup>. Additionné avec les périactes le temps de réverbération peut passer de 0.4 secondes à 4 secondes.

---

1. Les Périactes sont des éléments de décor originaires du théâtre en Grèce antique. Ce sont des triangles pivotants présents sur les parois (en Grèce sur la *skene*). Sur chaque face du périacte était représenté un décor différent, ici chaque face aura un matériau plus ou moins absorbant

2. Une onde acoustique incidente sur une surface plane, rigide et infinie, est réfléchiée de manière spéculaire (selon la loi de Descartes de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion). Si la surface plane est de taille finie, l'énergie réfléchiée n'est plus concentrée dans une seule direction, mais elle est diffusée ou dispersée (« scattered ») dans plusieurs lobes plus ou moins larges, dont le principal entoure la direction spéculaire

Cette salle particulière amena l'IRCAM à développer un système impressionnant de diffusion. Thibaut Carpentier et Markus Noisternig conçurent ainsi un système WFS à haute densité entourant la salle combinée avec un dôme ambisonique d'ordre supérieur. Le système comprend 280 enceintes pour la WFS et 75 pour le dôme ambisonique (ordre 7 - 3D). Dans l'idée d'ouvrir le plus de possibilités de création aux artistes, combiné avec les avantages acoustiques de la salle. Le système de 280 enceintes pouvait aussi être utilisé pour de la HOA<sup>3</sup> de très haut ordre (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017, NOISTERNIG, CARPENTIER et WARUSFEL 2012).

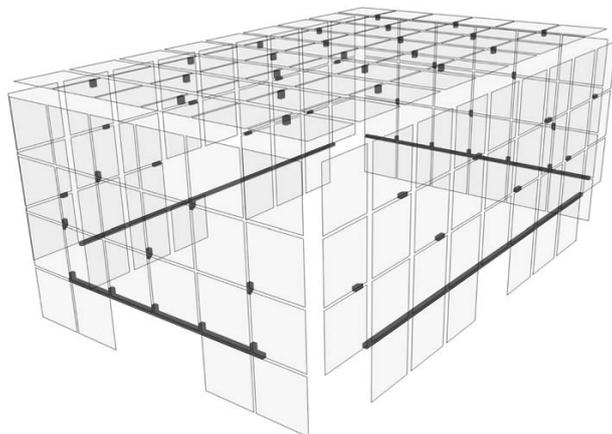


FIGURE 3.7 – Placement des 280 enceintes en WFS et du dôme de 75 enceintes dans l'*Espro* de l'IRCAM en 2017

Pour la WFS, l'espacement entre les enceintes est de 16 cm, on retrouve donc une fréquence d'aliasing autour de 1 kHz (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017). Pour le dôme HOA3D, la salle est un cube alors que nous avons dit précédemment que les enceintes devraient être placées sur une sphère. Cela aura tendance à déformer l'espace perçu, une source diffusée dans le coin de la salle paraîtra plus éloignée qu'une source au centre d'un mur - alors que l'ambisonique restitue un front d'onde de rayon constant. Les chercheurs calculent donc une projection virtuelle sur une sphère dans la matrice de décodage.

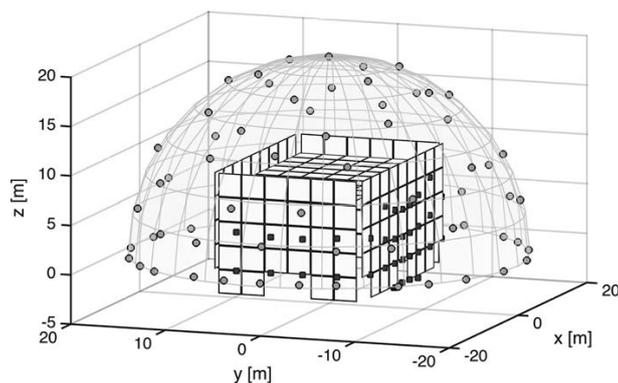


FIGURE 3.8 – Projection des enceintes réelles sur une sphère virtuelle pour calculer les délais et gains à appliquer à chaque enceinte pour compenser la forme cubique de la salle.

*Nous aurons à nous inspirer de cette expérience lorsqu'il s'agira de dimensionner notre propre dôme ambisonique.*

## 3.2 Parcours d'expérimentations, la genèse d'une idée musicale

Markus Noisternig, Thibaut Carpentier et Olivier Warusfel invitèrent les compositeurs et artistes sonores Natasha Barrett et Rama Gottfried en 2012 afin qu'ils expérimentent dans l'*Espro* sur l'utilisation de technologies de compositions spatiales innovantes. Natasha Barrett explora les utilisation pratique et perceptive de la HOA sur une pièce purement acousmatique. Rama Gottfried s'intéressa quant à lui aux détournements d'utilisation des traitements du signal de la HOA et de la WFS pour des pièces électro-acoustiques temporelles (NOISTERNIG, CARPENTIER et WARUSFEL 2012, CARPENTIER, BARRETT et al. 2017). Nous allons ici pouvoir suivre les réflexions et expérimentations de deux compositeurs reconnus sur la création d'espaces sonores par des méthodes artistiques innovantes. Le but de cette partie n'est donc pas uniquement de présenter les méthodes innovantes que proposent les deux compositeurs mais aussi et surtout de suivre le cheminement de la création de nouvelles idées musicales. Ceci nous permettra de comparer leurs méthodes et de s'en inspirer pour la création de la pièce de ce mémoire. L'idée est aussi de présenter d'autres méthodes pour créer des "espaces musicaux" que la simulation d'acoustique que nous allons présenter ci-dessous - dans une perspective de mélanger les approches dans la pièce de ce mémoire.

### 3.2.1 Natasha Barrett : Espace tangible et Hyperréalité

Natasha Barrett explique qu'elle souhaitait effectuer un travail sur une perception accrue de la distance et de clarté spatiale dans un système HOA en se basant sur des prises de sons de paysages sonores (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017). Elle s'intéresse aux espaces "tangibles" et aux mouvements dynamiques des espaces réels, tout comme BAYLE elle s'intéresse à l'influence des référents sonore sur notre perception de l'espace (BAYLE 1993, voir chapitre 2 Espèces d'espace). D'un point de vue plus technique elle travaillera dans cette pièce sur ; l'immersion, la séparation spatiale, les trajectoires d'objets en mouvement, la projection de paysages sonores "réels" dans l'"espace musical", la pérennité de l'oeuvre dans d'autres dispositifs que celui de l'*Espro* (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017).

Elle synthétise sa recherche en 4 points :

1. *L'image sonore* : Est ce qu'une grande précision spatiale change notre manière de composer les images sonores.
2. *L'aire d'écoute* : voir chap 2 sur les optimisations en ambisonique ([lien](#))
3. *Near-Field*<sup>4</sup> HOA compensée<sup>5</sup> ou Near-Field Compensated HOA s'affranchit de l'hypothèse des ondes planes en ambisonique et permet de synthétiser des fronts d'ondes circulaires et donc la distance des sources.
4. *La fidélité spatiale de l'enregistrement HOA à différents ordres* : A-t-on une meilleure représentation de l'espace avec un enregistrement d'ordre plus élevé, qu'est-ce que cela implique sur leur utilisation dans la composition.

Nous passerons la dernière section pour ne pas rentrer dans des considérations trop techniques sur la gestion des flux audios.

---

4. Champ proche : une source est considérée en champ proche lorsque son front d'onde s'apparente à un front circulaire  
5. le NFC-HOA

Pour ses expériences Natasha Barrett monta jusqu'au 9<sup>ième</sup> ordre HOA3D et jusqu'au 12<sup>ième</sup> ordre en HOA2D. Pour la spatialisation elle utilisa les objets *spat.oper* en association avec *spat.spat~* de la bibliothèque *Spat* de l'IRCAM dans le logiciel Max. Ces objets en plus de contrôler la spatialisation - l'ambisonique notamment - intègrent une corrélation avec des composantes psychoacoustiques : atténuation liée à la distance, rapport son direct / son réverbéré, atténuation des aigus, etc. Dans le cadre du NFC-HOA, une prise en compte des sources en proximité avait été mise en place pour se sentir "à l'intérieur" de la source (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017).

### 3.2.1.1 Expériences "images sonores"

Natasha Barrett choisit d'utiliser une simulation d'acoustique de type réponse-impulsionnelle 3D - dont nous discuterons plus bas - en plus des capacités d'acoustiques variables de l'*Espro*. Pour ses expériences elle choisit deux types de sources sonores ; la voix (nous avons vu son importance dans la relation à l'espace dans le chapitre 1), et les percussions qui permettent d'exciter toute la bande passante sur un très court laps de temps et ainsi de pouvoir entendre la résonance de la pièce (nous présenterons notre propre interprétation de ce phénomène plus tard dans la partie consacrée au projet de ce mémoire). Par divers processus de transformations des sons Barrett s'intéresse à la création de ces espaces dynamiques. Elle nous présente deux types d'"objets". Tout d'abord un jeu sur la vitesse de déplacement : l'idée du "flou de mouvement", elle utilisera pour cela une simulation d'effet doppler ainsi qu'un contrôle du "spread"<sup>6</sup> par la vitesse. Ensuite Barrett présente trois approches innovantes pour créer des "images sonores", des nuages de sons à partir du concept de décorrélation<sup>7</sup> (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017) :

1. En décorrélant des signaux on peut donner l'impression que la largeur d'une source augmente. En HOA Natasha Barrett fait donc de multiples copies d'une source dont elle décorrèlera chaque copie. En contrôlant le facteur de décorrélation on peut élargir ou contracter le nuage de points.
2. Barrett utilisera le même principe mais cette fois avec des microphones. Elle enregistrera des sources acoustiques avec plusieurs microphones, les distances et différences de directivités et d'orientation entre les microphones créent de multiples décorrélations d'une même source sonore.
3. Une troisième méthode consiste à appliquer une synthèse granulaire<sup>8</sup> à une source sonore et à spatialiser les différents grains. Natasha Barrett nous explique que ceci peut donner une impression d'espace, d'acoustique.

### 3.2.1.2 Expériences aire d'écoute

Dans la salle de l'*Espro* et afin d'avoir une aire d'écoute étendue les paramètres d'optimisations de décodage qui fonctionnèrent le mieux furent un mélange *In-Phase*, *maxRe* avec une fréquence de coupure entre les deux entre 200 et 400 Hz. Ainsi les composantes graves se retrouvent sur une grande aire d'écoute, "immersives", tandis que les composantes plus aiguës gardent une certaine précision tout en améliorant la répartition dans l'espace. Il est bon de rappeler qu'utiliser un mode *maxRe* fera diminuer la précision spatiale. Ainsi les

6. Opération sur l'algorithme de spatialisation qui consiste à agrandir la largeur d'une source en "floutant" ses contours.

7. La décorrélation consiste à diminuer fortement la cohérence de phase entre deux signaux afin que ces sources ne soient plus corrélées. Cette décorrélation peut être effectuée par des délais, gains, filtrages ou encore rotations de phases.

8. La synthèse granulaire est une technique de synthèse sonore consistant en la création d'un signal sonore complexe en combinant des grains, c'est-à-dire des échantillons sonores de l'ordre de la milliseconde (10 à 100 ms) ([Wikipedia](#))

composantes au-dessus de 400 Hz encodés à l'ordre 9 mais avec une optimisation *maxRe* seront perçues - du point de vue précision spatiale - plutôt comme des sources d'ordre 7 ou 8 mais avec une meilleure aire d'écoute.

*Lors de la réalisation du projet Lullaby expérience de Pascal Dusapin au Festival Manifeste 2019, nous<sup>9</sup> avons utilisé une autre méthode préliminaire à l'optimisation pour augmenter l'aire d'écoute. En général, lorsque nous montons un dôme ambisonique, nous dirigeons l'ensemble des enceintes du dôme vers un point central (voir chapitre précédent, section sur l'ambisonique). Cette fois-ci nous avons dirigé les enceintes non plus vers un point mais vers une sphère d'un mètre de rayon. La direction de chaque enceinte dirigée de façon à être tangente à cette sphère. Cette opération permet d'augmenter l'aire d'écoute et de moins avoir besoin d'utiliser des méthodes d'optimisation plus tard.*

### 3.2.1.3 NFC-HOA ?

Natasha Barrett tire trois conclusions de l'utilisation de la NFC-HOA

1. Les sources focalisées en HOA2D à l'ordre 12 dans l'*Espro* donnent des résultats très différenciés entre les auditeurs, certains se sentent à l'intérieur du son, tandis que d'autres ont une impression de rapprochement. L'image sonore est moins stable à l'intérieur du cercle des enceintes qu'à l'extérieur.
2. Le système NFC-HOA est lourd à mettre en place et ne permet plus une indépendance totale des systèmes d'encodage et de décodage.
3. En studio (ordre 4 en proximité) on ne ressentait plus aucune différence entre HOA et NFC-HOA.

### 3.2.1.4 Composition de *Hidden Values*

Comme nous l'expliquions en début de section, bien que cette pièce soit acousmatique, Natasha Barrett choisit deux interprètes pour les parties vocales et percussives : une soprano (Evdokija Danajloska) et un percussionniste (Gilles Durot). Pour enregistrer chaque source sonore Natasha utilisa en simultanée un *Eigenmike* (microphone ambisonique d'ordre 4), un microphone *Soundfield* (microphone ambisonique d'ordre 1) et des microphones cardioïdes et omnidirectionnels à différentes distances. Tout ceci permet de créer les différents effets et "espaces" présentés au-dessus.

Natasha Barrett explique que le décodage du microphone d'ordre 1 sur les 75 haut-parleurs de l'*Espro* créait trop d'artefacts (voir chapitre précédent sur le décodage ambisonique). Elle utilisa donc un mélange de techniques non-linéaires pour extraire certaines données de l'ambisonique d'ordre 1 (méthode *Harpex*, *beam forming*) afin de re-spatialiser en ordre 7 ces sources extraites, au-dessus de l'ambisonique d'ordre 1. Elle y implémenta aussi des prises monophoniques spatialisées et se servit de l'*Eigenmike* pour créer la "base spatiale" de l'ensemble (une méthode similaire sera présentée plus bas). Grâce aux différents plans ainsi créés Natasha Barrett avait un contrôle précis sur notre perception de la distance et des profondeurs.

Pour créer des "espaces musicaux" Natasha Barrett utilisa donc différentes approches : une première basée sur des nuages de points décorrélés obtenus de différentes manières. L'utilisation en simultanées de différents systèmes d'enregistrements en utilisant notamment comme base l'*Eigenmike* (HOA d'ordre 4). Concernant la gestion de cet espace, au vu de la grande aire d'écoute de l'*Espro* et de la densité de haut-parleurs, une optimisation *In-phase*, *maxRe* lui a paru idéale. Les capacités de focalisations en NFC-HOA se sont trouvées être

---

9. L'équipe technique sonore du festival, mes directeurs de mémoire Thierry Coduys, Markus Noisternig et moi-même.

bien moindre que ce que permettait la WFS dans le même dispositif, le NFC-HOA donnait des résultats très différenciés entre les auditeurs et la sensation n'était pas reproductible dans de plus petits studios à des ordres moins élevés.

Observons à présent comment Rama Gottfried - dans les mêmes conditions et avec le même système - a suivi une recherche très différente.

### 3.2.2 Rama Gottfried : Lutherie numérique

Rama Gottfried s'intéresse à la manière de faire ressortir l'empreinte d'un système, par quelles excitations, artéfacts? « De la même manière que l'intervalle produit lorsque l'on sursouffle (*overblow*) dans la clarinette, ou l'*aliasing*<sup>10</sup> de Nyquist dans la synthèse FM numérique, les artéfacts d'un système sont son empreinte unique (CARPENTIER, BARRETT et al. 2017, CASCONI 2000 »). Gottfried souhaite donc explorer les possibilités de la WFS et de la HOA comme des "instruments" au travers des détournements de leur traitement du signal.

#### 3.2.2.1 Détournement de la WFS : le "*Focus delay*"

Suivons l'invention d'un nouvel effet compositionnel étape par étape : comme nous avons pu le présenter dans le chapitre précédent, la WFS est formée par le jeu de lignes de délais afin de reconstruire la forme du front d'onde d'une source virtuelle ou "source primaire". Gottfried expérimenta la multiplication des valeurs de ces délais pour les rendre audibles en tant que "vagues" de sons - il les fit atteindre jusque 10 secondes de délai entre le début et la fin de la "vague". Ensuite il décida de fournir à ce système des sons provenant d'une synthèse granulaire, créant une "vague de timbre" le long du mur de haut-parleurs. Il expérimenta ensuite sur le placement de cette source granulaire. Une source virtuelle placée derrière les haut-parleurs entraînera une ligne de délais partant de la position de la source vers les extrémités du mur, tandis qu'une source focalisée partira de l'extérieur vers la source - une sorte "d'inversion temporelle" du filtre WFS est effectuée pour focaliser une source. Il expérimenta ensuite sur ces sources focalisées. Il testa la remise soudaine des délais à leurs valeurs originales, au milieu de la "vague". Du fait des jeux de délais augmentés, la source paraît moins focalisée. Lorsqu'il réactive les délais originaux, cela a pour effet de faire "sauter en avant" la source : il appelle ce phénomène un "*focus delay*".

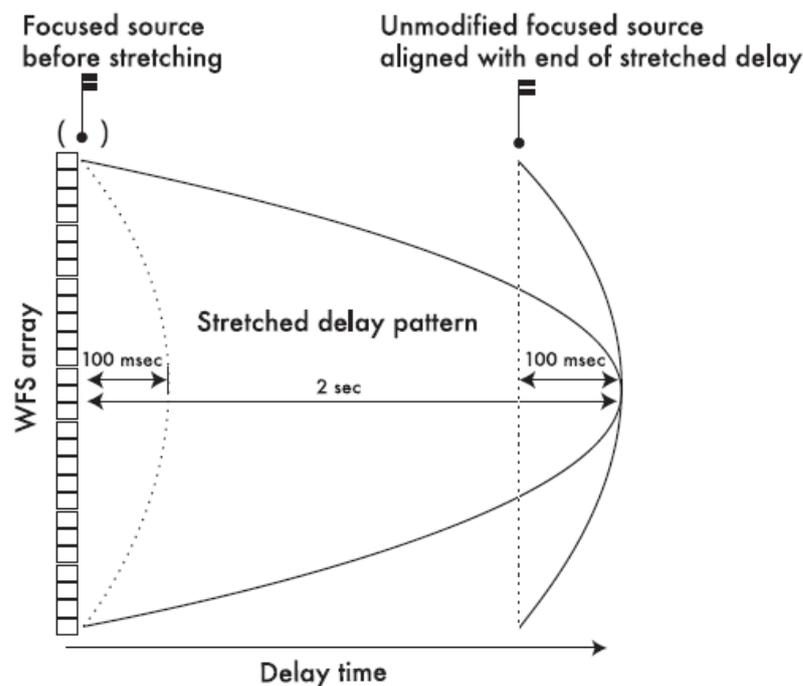


FIGURE 3.9 – La technique "focus delay" combinant des délais WFS amplifiés puis remis à l'échelle originale

10. L'aliasing désigne toutes les formes de repliement de spectre, notamment ceux liés à l'échantillonnage du signal

### 3.2.2.2 Détournement de la HOA3D :

Pour détourner l'ambisonique, qui joue sur les harmoniques spatiales, il décida de jouer sur le timbre. Ainsi il utilisa des banques de filtres résonants superposés (*gammatone filters*) qui fonctionnent de manière similaire à l'organe de Corti présenté dans le chapitre 1. Il spatialisa ensuite différemment chaque bande de fréquence en ambisonique à des ordres bas et appliqua des vitesses de rotations différentes à chacune de ces bandes. Le son est ainsi séparé à la fois en termes de timbre et d'espace mais se reconstruit au centre au point d'écoute (une approche similaire sera discutée plus bas).

Un autre détournement de l'ambisonique que proposa Gottfried fut d'utiliser des images pour gérer la distribution de l'énergie sur la sphère ambisonique. L'image est représentée de manière simplifiée sur une carte en deux dimensions, cette carte est une projection d'un globe sur un plan, à la manière dont les cartes du monde 2D sont représentées. Une fois l'image projetée sur le globe on s'en sert de valeur de gain pour contrôler la distribution de l'énergie sur la sphère, disons noir vaut un gain de 0 et blanc un gain de 1. Tout ce qui est blanc est inchangé, tout ce qui est noir disparaît, et les nuances de gris impliquent une atténuation de ces zones.

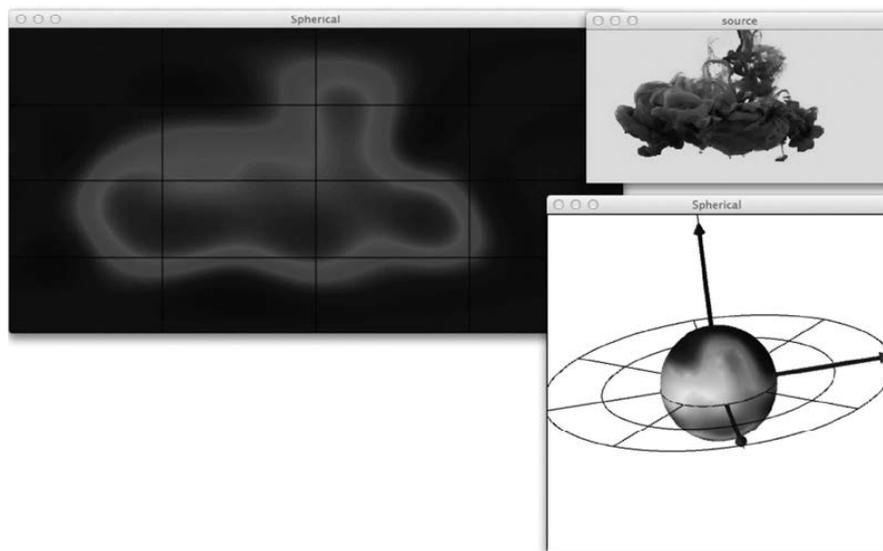


FIGURE 3.10 – Représentation sphérique d'une image pour contrôler la distribution d'énergie sur un ambisonique d'ordre 3

### 3.2.2.3 Groupes de sources et leurs relations

Gottfried propose ici de mélanger les formes immersives présentées au-dessus dans ses expérimentations sur l'ambisonique avec des sources HOA d'ordre élevé très précises. Il utilise lui aussi le modèle perceptif du *spat.oper* mais cette fois avec le modèle d'acoustique intégré au *spat.spat~*. Il s'intéresse notamment à l'utilisation de la directivité dans ce modèle - une source en direction de l'auditeur aura une ratio son direct/ son réverbéré en faveur du son direct, si la source se tourne petit à petit alors le son direct s'atténuera puis les premières réflexions pour finalement valoriser les réflexions tardives (nous auront une présentation plus poussée du fonctionnement de ces deux objets par la suite). Il crée ainsi des "groupes de points" sonores qui sont dirigés vers leur centre. Ainsi lorsque ce groupe est à l'extérieur de la sphère l'auditeur recevra majoritairement des réflexions tardives mais si l'auditeur se place au centre alors l'ensemble des sources pointeront vers lui et il découvrira leurs sons

directs. On pourrait dire que ce groupe de points est une sorte de métaphore de l'entrée dans une pièce - on en entend seulement la rumeur depuis l'extérieur puis en entrant dans cette pièce on découvre les sources qui produisent ces sons.

Gottfried proposa aussi un système de "groupes de sons" en WFS. Il expérimenta tout d'abord son propre système de positionnement puis finit par utiliser l'algorithme de "boids" (REYNOLDS 1987)<sup>11</sup> - nous utiliseront nous aussi cet algorithme plus tard nous le présenterons à cette occasion. Une fois les positions générées les interactions entre les "oiseaux" sonores contrôlent les valeurs de délais WFS présentées plus tôt associées avec des filtres par bandes. Créant ainsi une sorte de "mer" de la composition de toutes ses "vagues" de WFS.

#### 3.2.2.4 Espace de Timbre et Timbres d'espaces

Avec son travail sur ces créations "d'instruments" de traitement du signal, Gottfried fait une critique très intéressante sur ces systèmes :

« Dans le processus d'un développement "instrumental" basé sur les techniques de rendu spatial, il est apparu comme une évidence que la programmation nécessaire pour travailler avec un HDLA (*high-density loudspeaker array*) a pour effet secondaire de séparer les composantes spatiales des autres paramètres du son. Ceci est problématique, car la morphologie d'un son en lui-même a une forte influence sur notre perception spatiale, cependant cette séparation des concepts permet aussi une réflexion nouvelle sur la relation du son à l'espace. » (Rama Gottfried, CARPENTIER, BARRETT et al. 2017, p 16, en anglais dans le texte)

L'auteur nous dit qu'après avoir été influencé par les réflexions de David Wessel (1979), David Huron (1989) et Gary Kendall (2007) sur des représentations, des relations entre le timbre et l'espace, il essaya de trouver les relations présentes dans son oeuvre *Fluorescence*. Il nous explique ainsi qu'il découvrit des affinités particulières entre le son de violoncelle sur lequel il travaillait et certains processus spatiaux :

« J'ai remarqué que des mouvements circulaires à l'archet (fluctuant entre bruit et note) s'accordait bien avec la technique en bas-ordre ambisonique présentée plus tôt, puisque les deux textures ont un haut degré de synchronisation et une variance qui se déplace lentement à la manière de ce que Huron appelle le "semblant de mouvement". De l'autre côté, les sons plus bruyants, plus "granulaires" s'accordent mieux avec l'approche des "boids", les deux textures ont un faible degré de synchronicité et de semblant de mouvement. » (Rama Gottfried, CARPENTIER, BARRETT et al. 2017, p 17, en anglais dans le texte)

L'ensemble des traitements proposés par Gottfried sont très lourds en termes de charge CPU<sup>12</sup>. Ayant près de 600 sources à spatialiser il eut besoin de 5 serveurs pour faire tourner l'ensemble des processus. Notamment à cause d'une limitation du logiciel Max/MSP qui ne peut s'adresser qu'à un seul coeur de processeur pour les rendus audios. Gottfried contourna ce problème en utilisant une astuce pour ouvrir plusieurs instances du même logiciel et ainsi avoir accès à un parallélisme. Nous discuterons plus en détail de ces considérations lorsqu'il s'agira d'optimiser notre propre moteur de rendu.

---

11. Algorithme de simulation de vol de nuées d'oiseaux

12. La demande en ressources du processeur parfois exprimée en pourcentage.

### 3.2.3 Acoustique active & Simulation d'acoustique

Nous avons vu dans la partie précédente comment il était possible de modifier l'acoustique d'un lieu en jouant seulement sur sa géométrie, son volume, les matériaux utilisés. Nous aborderons ici les méthodes d'acoustique variable cette fois à l'aide de systèmes électroacoustiques de projection du son. Nous partirons ici du présupposé que la pièce réelle dans laquelle se situe un tel dispositif est la plus mate possible et la plus homogène, idéalement une *chambre anéchoïque*<sup>13</sup>. En effet les systèmes actifs permettant de transformer une acoustique dans une salle ayant déjà une certaine acoustique seraient beaucoup trop complexes pour être abordés ici.

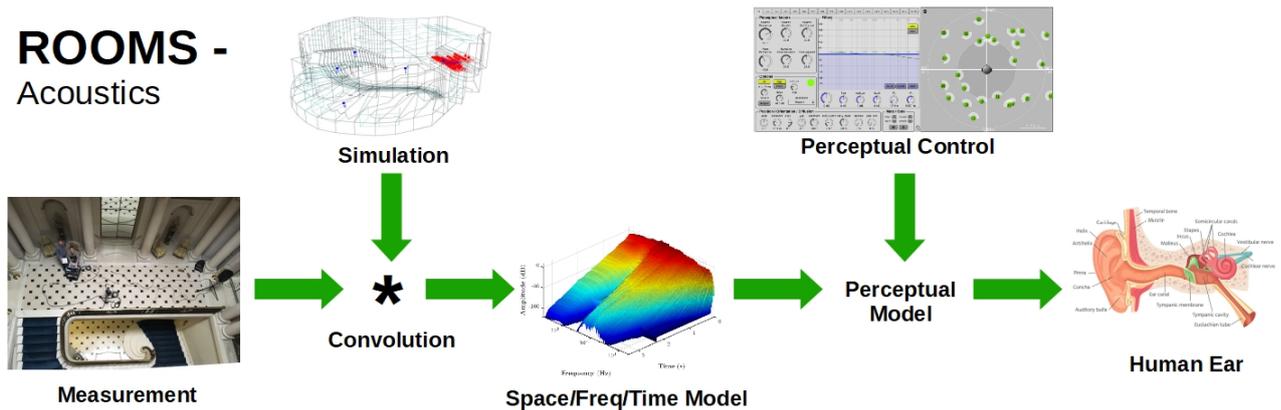


FIGURE 3.11 – Schéma d'une simulation d'acoustique de la mesure ou du modèle mathématique jusqu'à l'oreille humaine.

#### 3.2.3.1 Méthode par Réponse Impulsionnelle

Présentons ici une version simplifiée d'une telle simulation d'acoustique. Il existe majoritairement deux "points de départ" : une mesure dans une salle réelle ou bien une "mesure" dans une salle virtuelle (à l'aide de logiciels tel qu'*Odeon* par exemple).

Dans une salle réelle nous aurons besoin d'un système multi-microphonique qui permet une représentation de l'espace en trois dimensions. La plupart du temps il s'agit d'un microphone ambisonique tel que l'*Eigenmike* (32 ou 64 capsules) qui permet une mesure en ambisonique d'ordre 4 ou 7. Ce microphone a notamment été utilisé pour la bibliothèque DRIR<sup>14</sup> de l'IRCAM (NOISTERNIG, KLEIN et MARCO BERZBORN 2016). Cependant il est aussi possible d'utiliser des systèmes microphoniques plus traditionnels, la NHK<sup>15</sup> réalise ainsi des mesures avec des systèmes microphoniques éparses pour son système 22.2<sup>16</sup>, j'ai notamment eu l'occasion d'assister à une mesure dans l'Opéra Garnier avec ce système. De cette mesure nous pouvons extraire une réponse impulsionnelle en 3D, une "empreinte" de notre salle.

13. Une chambre anéchoïque (ou « chambre sourde ») est une salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques.

14. Directional room impulse response ou réponse impulsionnelle directive de salle

15. Nippon hōsō kyōkai, littéralement "compagnie de diffusion du Japon"

16. 22 canaux de diffusions spatialisés et deux canaux de basses fréquences

Dans une salle virtuelle le principe sera le même, on cherchera aussi la plupart du temps à générer une réponse impulsionnelle 3D. Pour cela les logiciels se basent généralement sur un modèle de rayons, on projette un grand nombre de "rayons acoustiques" à partir d'une source sonore et on calcule son trajet dans l'espace. Le modèle des rayons acoustiques est une simplification d'un problème acoustique où l'on considère une onde sonore comme un rayon qui se déplace dans une direction. Au lieu de suivre un front d'onde en trois dimensions et ses réflexions complexes, on suivra une multitude de rayons en faisant l'hypothèse qu'avec une infinité de rayons on arriverait à une solution identique. Généralement ce modèle est valide pour des fréquences pour lesquelles le nombre de Helmholtz est grand :

$$H_e = \frac{L_c}{\lambda}$$

Où  $H_e$  : Nombre de Helmholtz,  $L_c$  : Longueur caractéristique (ordre de grandeur des dimensions de notre salle),  $\lambda$  longueur d'onde. En effet lorsque  $\lambda$  est du même ordre de grandeur qu'un obstacle alors un phénomène de diffraction qui n'est pas pris en compte dans le modèle des rayons entre en jeu. Ce modèle est donc limité en bande passante<sup>17</sup> : dans les graves car il ne prend pas en compte les phénomènes d'ondes stationnaires et dans les aigus car il ne prend pas en compte les phénomènes de diffraction.

Dans cette simulation de rayons, à chaque surface rencontrée par un rayon on estime l'atténuation et le filtrage engendré sur l'onde réfléchi. Les ondes qui atteignent ensuite un microphone virtuel sont enregistrés pour former une réponse impulsionnelle.

La plupart du temps cette réponse impulsionnelle est mise sous un format ambisonique d'ordre plus ou moins élevé dépendant du microphone ou de la précision du moteur de modélisation. Cette réponse impulsionnelle nous donne donc accès à une représentation spatiale, temporelle et fréquentielle.

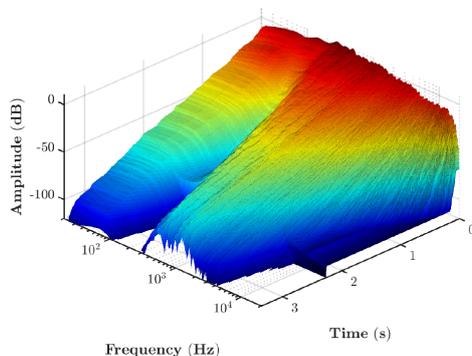


FIGURE 3.12 – Schéma dit de *waterfall* qui permet une représentation en trois dimensions. Ici le temps, la fréquence et l'amplitude.

Désormais en convoluant ce son avec une source monophonique on pourra restituer la réponse de la salle mesurée à cette excitation en trois dimensions. Cependant à la sortie de cette convolution on aura donc la réponse de la salle entière : à la fois le son direct, les premières réflexions et réflexions denses ainsi que la réflexion tardive.

17. L bande passante d'un système est l'intervalle de fréquences dans lequel l'affaiblissement du signal est inférieur à une valeur spécifiée, généralement -3 dB

Pour aborder la prochaine réflexion faisons d'abord un rapide point sur une réponse impulsionnelle de salle monophonique :

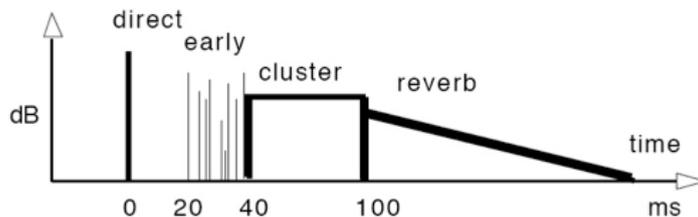


FIGURE 3.13 – Classement des réflexions d'une réponse impulsionnelle

Sur le schéma présenté ci-dessus le premier pic correspond au son direct, étant donné que nous parlons ici d'une réponse impulsionnelle - c'est-à-dire la réponse du système à une impulsion - le son direct est ici une impulsion. Le temps devant le son direct représente ici le temps de parcours du son direct de l'émetteur jusqu'au récepteur. Après un autre laps de temps apparaissent d'autres réflexions éparses que l'on appelle premières réflexions (*early reflections*) ce sont généralement celles qui auront été réfléchies sur une voire deux parois avant d'atteindre le récepteur (réflexions de premier et second ordre) - le sol, un objet en proximité de l'émetteur ou de l'auditeur. Le temps entre le son direct et les premières réflexions est appelé le pré-délai. Après les premières réflexions arrivent les réflexions denses (*cluster*) celles-ci correspondent généralement aux dimensions de la salle, plus la salle sera petite plus elles seront denses. Ces réflexions sont tellement rapprochées qu'il devient difficile de les distinguer. Ensuite viennent les réflexions tardives ou "queue de réverbération" (*late*) qui constituent le champ diffus - nous en reparlerons lorsqu'il s'agira de les simuler. Alors que durant les réflexions denses le niveau a tendance à suivre un plateau, les réflexions tardives elles s'éteignent progressivement à force de se dissiper par propagation ou par absorption des différents matériaux. Elles suivent une pente relativement linéaire qui nous permet d'évaluer le  $TR_{30}$  ou  $TR_{60}$  (temps pour lequel le niveau du champ réverbéré baisse de 30 ou 60 dB).

Lorsque nous obtenons une réponse impulsionnelle de salle et que nous la convoluons à une source monophonique la sortie de cette opération est alors l'ensemble de ses paramètres (*direct*, *early*, *cluster*, *late*) dans le même signal audio. Dans une production stéréophonique traditionnelle on souhaitera généralement effectuer un envoi auxiliaire de notre son direct vers une "reverb" et ainsi gérer avec deux *faders*<sup>18</sup> l'équilibre entre le son direct et le son réverbéré. On ne souhaite donc pas que le son direct soit aussi dans notre canal de sortie de notre réverbération. Les logiciels comme *Altiverb* qui proposent des algorithmes de réverbération sur base de réponses impulsionnelles doivent donc couper le son direct de leur réponse impulsionnelle. Cela se réalise en tronquant le fichier audio de la réponse impulsionnelle - généralement au début de la première réflexion. Ainsi on fait à la fois disparaître le son direct de la convolution et on peut gérer avec un délai le temps de pré-délai de notre réverb. L'autre opération importante à faire sur une réponse impulsionnelle est d'appliquer une *noise-gate*<sup>19</sup>. En effet lorsque nous enregistrons une réponse impulsionnelle nous devons déterminer à quel moment la réponse de la salle est terminée. Or dans une salle réelle il existe toujours un bruit de fond, la réponse impulsionnelle serait donc infinie si l'on attendait qu'il n'y ait plus de son. Généralement il est donc décidé de

18. Un fader (une tirette en français) est un potentiomètre de commande rectiligne réglant le niveau d'un signal électronique. Il se trouve principalement sur les tranches de console de mixage. ([Wikipedia](#))

19. Traitement qui vient couper le bruit de fond

couper la fin de la réponse impulsionnelle à la rencontre entre la pente de la queue de réverbération et du bruit de fond de la salle. Nous avons fait ici un exemple monophonique mais le principe reste le même pour des réponses impulsionnelles avec plus de microphones - il faudra tout de même faire attention à la cohérence de phase des traitements entre les réponses.

### 3.2.3.2 Les facteurs perceptifs

Nous avons désormais une empreinte de salle tridimensionnelle, dont nous avons extrait le son direct et coupé le bruit de fond. Nous pourrions nous arrêter ici : si nous envoyons un son monophonique dans notre moteur de convolution nous obtenons bien la réponse de cette salle à l'excitation de ce son. Mais cette stratégie est assez limitée. Nous ne pouvons par exemple pas contrôler de manière différenciée les niveaux des premières réflexions, des réflexions denses et des réflexions tardives. Or nous avons montré plus haut avec l'exemple de la directivité de la source qu'avoir un contrôle de ces paramètres pouvait donner des résultats perceptifs très intéressants. Nous avons d'ailleurs à notre disposition l'objet *spat.oper* qui nous fournira les informations de gains de chacun de ces paramètres. Une solution serait alors de découper la réponse impulsionnelle en trois zones (*early*, *cluster*, *late*) et de les convoluer séparément afin de pouvoir gérer les niveaux, les filtres de chacun. Nous arrivons très vite à un problème majeur. Prenons en exemple la librairie DRIR de l'IRCAM (NOISTERNIG, KLEIN et MARCO BERZBORN 2016). Les réponses impulsionnelles ont été enregistrées avec 32 capsules microphoniques qui deviennent 25 canaux une fois l'encodage ambisonique d'ordre 4 effectué. Pour faire cette simulation d'acoustique nous réalisons donc 25 convolutions en simultanées avec un *buffer*<sup>20</sup> de la taille du temps de réverbération de la salle à simuler. Faire cette opération demanderait donc de passer à 75 *buffers* en parallèles pour une seule source monophonique - en gardant en mémoire que les *buffers* des réflexions tardives pourront aller jusque 480 000 échantillons (10 secondes) pour certaines salles. Or la convolution est un calcul très gourmand en ressources pour l'ordinateur, on arrivera donc très rapidement aux limites de nos capacités en temps réel. Étudions quelles sont les options qui s'offrent alors à nous.

### 3.2.3.3 Les méthodes hybrides

Étant donnée que dans les trois groupes les *early* et *cluster* ne durent finalement que quelques centaines de millisecondes, tandis que les réflexions tardives peuvent durer des secondes ou dizaines de secondes, on chercha à optimiser majoritairement ce dernier point. Écoutons la présentation du problème présenté par l'équipe acoustique de l'IRCAM à l'occasion de la présentation de leur moteur hybride (CARPENTIER, NOISTERNIG et WARUSFEL 2014) :

« (Parlant de la méthode par réponse impulsionnelle :) Le coût en ressource informatique dépend directement de la longueur de la réponse impulsionnelle à traiter. Ceci peut devenir un problème lorsque l'on cherche à recréer la réverbération de grandes salles de concert ou d'opéras, où la taille de ces IR est typiquement de l'ordre de quelques secondes.

Une étude sur les logiciels et matériels de réverbération basés sur la convolution actuellement disponibles montre que le contrôle est en général limité à seulement quelques paramètres. Typiquement le ratio *early* / *reverb* (*cluster* et *late*) peut être ajusté par des gains sur les bandes temporelles de la réponse impulsionnelle. Souvent on peut aussi changer le temps de réverbération, en plus ou

---

20. Mémoire tampon de l'ordinateur, en audio elle correspond à un nombre d'échantillons.

en moins, notamment en effectuant un rééchantillonnage sur l'IR ou en appliquant un gain négatif exponentiel sur la queue de réverbération. Des méthodes plus avancées de traitement des IR entraînent généralement des artefacts qui rendent le résultat "artificiel" (*unnatural*) ou déplaisant sur les réflexions tardives. Ceci limite grandement nos possibilités de transformation des réponses impulsionnelles avec nos moyens actuels de convolution. » (CARPENTIER, NOISTERNIG et WARUSFEL 2014, p 2, en anglais dans le texte)

De plus les informations de localisation des sources sont majoritairement présentes dans les *early* et *cluster*, les réflexions tardives participeront majoritairement au champ diffus - qui n'est donc pas dirigé, et est homogène. Certaines salles n'ont pas un champ diffus homogène elles sont dites *anisotropiques*. Les auteurs proposent donc de remplacer les réflexions tardives de la convolution par une réverbération FDN (Feedback Delay Network). C'est un système rétroactif, à chaque boucle on appliquera un délai, un filtre et une randomisation des entrées et sorties. Cela permet ainsi une décorrélation s'intensifiant au fur et à mesure que la queue de réverbération s'atténue.

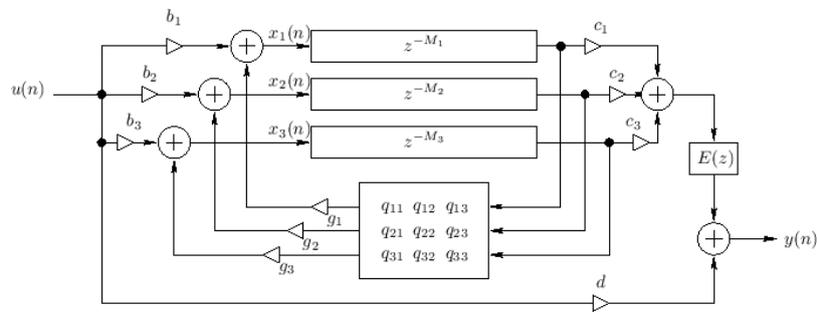


FIGURE 3.14 – Feedback Delay Network (FDN) : structure proposée pour une réverbération artificiel par Jot (JOT et CHAIGNE 1991).

Ils découpent donc la queue de réverbération de l'IR, l'analysent et calculent les paramètres de la FDN pour simuler la même évolution dans les trois dimensions (amplitude, fréquences, temps) de l'EDR (Energy Decay Relief). L'hypothèse de départ de cette proposition était que les réflexions tardives étaient tellement denses que l'on ne les percevait plus que comme un bruit large bande filtré décroissant. Si l'on analyse dans toutes les directions ce bruit filtré et qu'on le reproduit alors il ne devrait pas y avoir de changement perceptif audible.

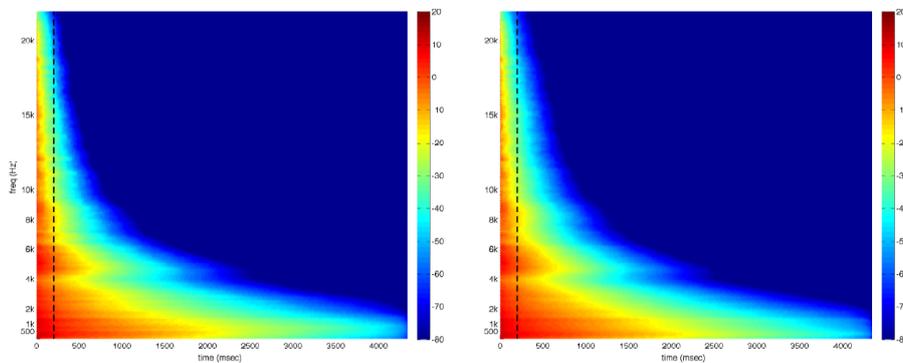


FIGURE 3.15 – EDR (en dB) des IR de l'original à gauche et de l'hybride à droite. La ligne pointillée représente la transition entre l'IR et le FDN,  $t = t_{mix}$ .

Ils proposent donc cette première implémentation :

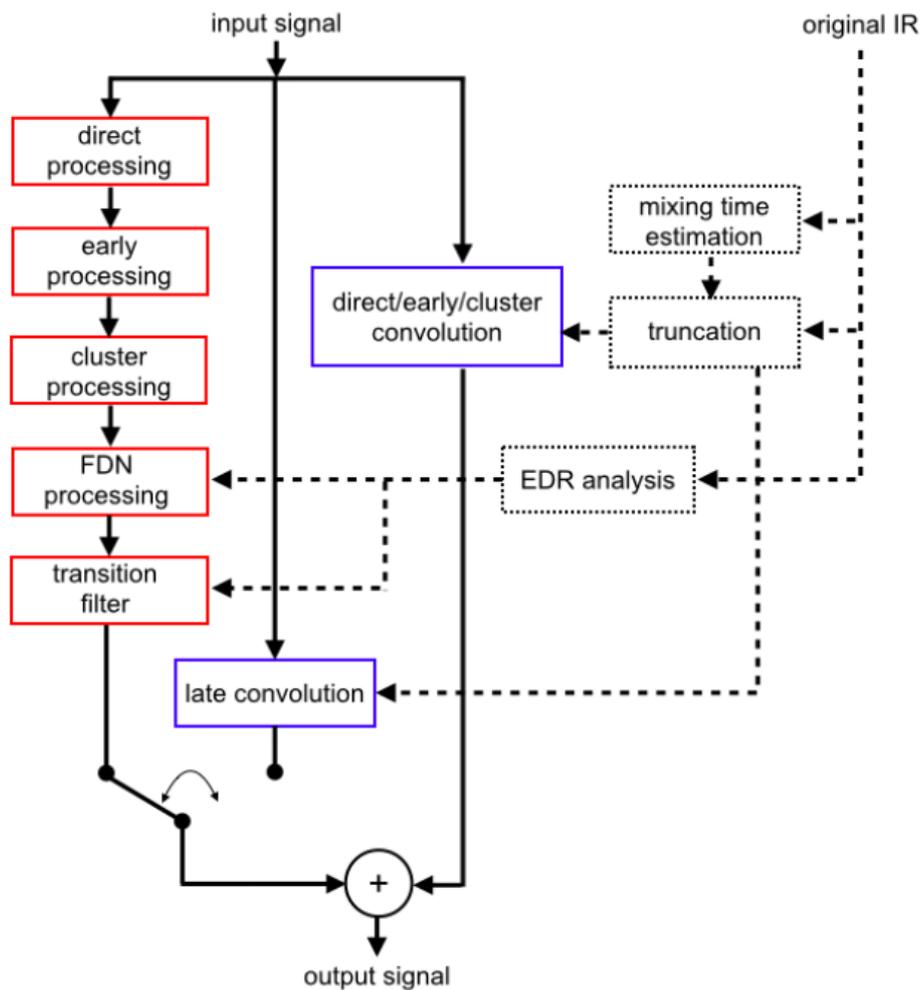


FIGURE 3.16 – Structure du processeur de réverbération hybride. Les lignes pointillées représentent les opérations *offline* (hors-ligne, pas en temps réel).

En bleu ce sont donc les sections de convolution, on voit que l'on a séparé les *direct/early/cluster* du *late* et on peut activer un commutateur entre la *late* et la simulation par le FDN. Nous voyons en pointillés les opérations qui se font hors-ligne, l'analyse des IR, la troncature, etc. En rouge nous apercevons qu'il y a plus d'éléments que seulement le FDN. En effet celui-ci simule exclusivement les réflexions tardives, il doit donc être alimenté par les réflexions du cluster. La solution proposée ici est donc de partir du signal d'entrée, de le faire passer dans les trois blocs de la librairie *Spat* dédiés à cet effet : le *spat.source~*, le *spat.early~* et le *spat.cluster~*, et ensuite d'alimenter la sortie du *spat.cluster~* dans le *spat.reverb~* - qui est le bloc de traitement du FDN.

Cependant, comme nous l'avons dit dans la section précédente, nous voudrions pouvoir utiliser les paramètres perceptifs du *spat.oper*. Il nous faudra donc un contrôle plus précis des différents groupes. Ils proposent ainsi une seconde implémentation qui prend en compte ces paramètres :

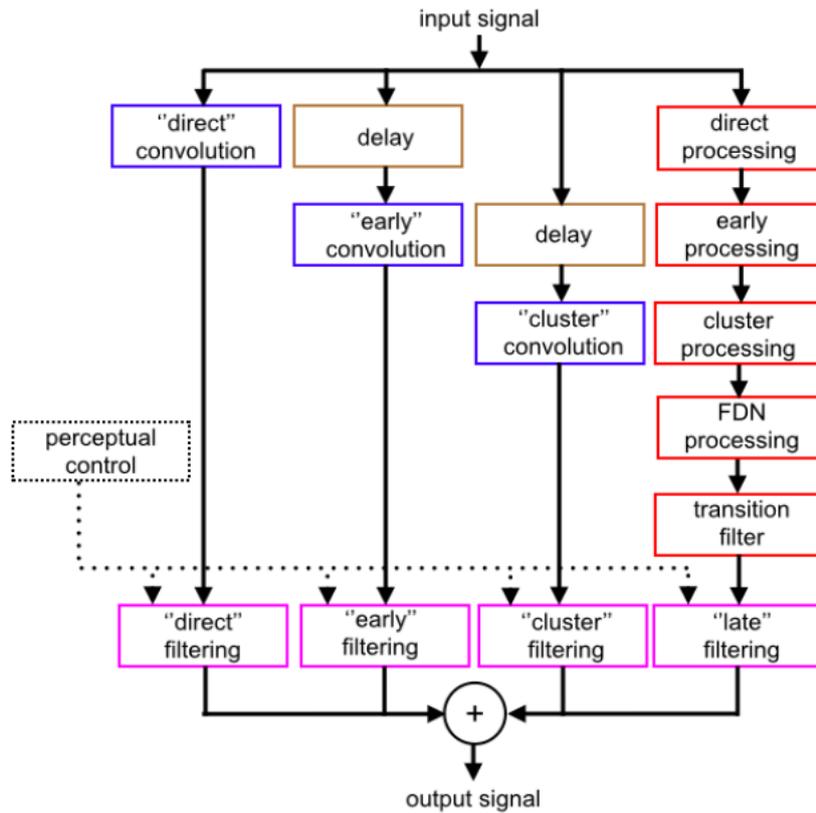


FIGURE 3.17 – Structure du traitement du signal de la réverbération hybride avec des contrôles perceptifs. En bleu les convolutions, en rouge la réverbération paramétrique. Les délais en marron assurent l’alignement temporel des différents segments, les blocs en magenta correspondent aux filtres trois bandes contrôlés par le modèle perceptif.

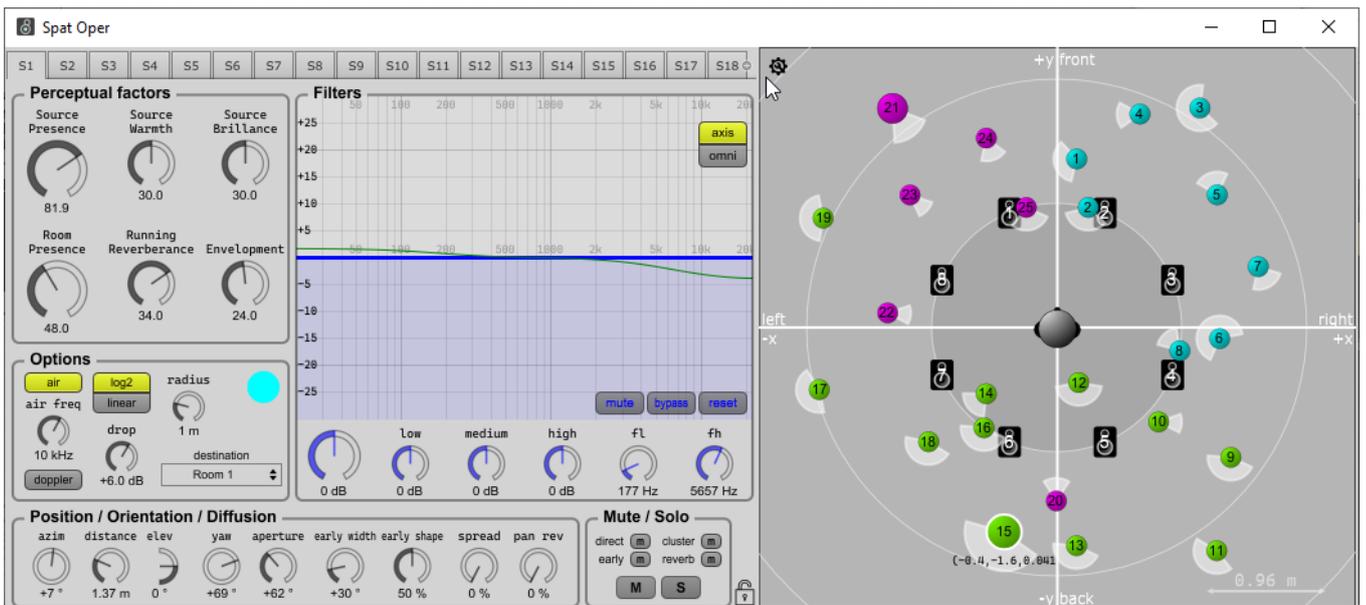


FIGURE 3.18 – Interface de contrôle du *spat.oper*

N’oublions pas une problématique : une réponse impulsionnelle est diffusée depuis un seul point d’émission pour un seul point d’écoute, il n’y a donc pas de possibilité de mouvement. Pour la bibliothèque DRIR l’idée fut donc de prendre un certain nombre de points d’émissions autour d’un point de réception dans l’objectif de pouvoir placer la source autour (NOISTERNIG, KLEIN et MARCO BERZBORN 2016). En revanche il n’y a pas de possibilité de le faire dynamiquement. En effet on pourrait penser faire une interpolation entre les positions comme nous avons pu le présenter pour la synthèse binaurale dans le chapitre précédent. Mais l’entreprise s’avèrent plus difficile avec 25 ou 32 canaux (après ou avant encodage), de plus nous n’avons pas encore de bibliothèque DRIR avec une discrétisation aussi dense que pour les HRTF. Étant donné que nous encodons en ambisonique notre réponse impulsionnelle, il est possible d’appliquer une rotation au champ sonore. La méthode hybride apporte ici un intérêt. En effet pour une convolution d’une IR complète appliquer une rotation - sur l’ensemble de la salle - donnera plus l’impression que l’on tourne la salle entière plutôt que la source. Là où avec la réverbération hybride on peut décider de ne faire tourner que le son direct et les premières réflexions et garder les *cluster* et *late* fixe. Ainsi on déplace la source (direct) et ses premières réflexions, mais la salle (*cluster*, *late*) elle reste immobile. On pourra donc lier les déplacements d’une source dans le *spat.oper* aux différents éléments de la réverbération et notamment les coordonnées en (azimuth, élévation, distance) à un *spat.hoa.rotate* en sortie des convolutions. On pourra ainsi appliquer des rotations et simuler la distance par le contrôle des paramètres perceptifs. Cependant les premières réflexions et réflexions denses restent inchangées, nous n’avons pas de contrôle dessus. Nous pourrions éventuellement effectuer un rééchantillonnage pour gérer la densité des réflexions. Nous sommes également limités aux salles que nous avons enregistrées.

### 3.2.3.4 Modélisation dynamique et interactive

Tournons-nous à nouveau vers la modélisation. Comme nous l’avons vu précédemment la méthode par réponse impulsionnelle a certaines limitations, nous avons vu avec la méthode hybride comment l’utilisation d’outils paramétriques permettait une plus grande flexibilité. Intéressons-nous pour cela à une approche de modélisation paramétrique avec le projet *EVERTims*. L’idée est donc de modéliser une salle, placer des sources et des auditeurs dedans, et simuler en temps réel la réponse de cette salle à ces sources depuis le point d’écoute de l’auditeur. Une des particularités d’*EVERTims* est qu’il effectue cette opération en temps-réel et propose une interaction avec l’environnement en pseudo-temps-réel. Le logiciel permet donc de déplacer l’auditeur ou les sources, transformer l’espace pendant que l’on écoute son résultat. Le programme se base sur trois entités : un éditeur graphique de la scène, un modélisateur d’acoustique de salle et un moteur de rendu spatial d’*auralisation*<sup>21</sup>.

En premier lieu l’interface graphique se trouve désormais dans le logiciel *Blender* qui permet donc à l’utilisateur de modéliser n’importe quelle forme de salle. Il est ensuite relié au modélisateur acoustique via un *add-on*<sup>22</sup> en *OSC*<sup>23</sup> dans *Blender*. Cet *add-on* permet à la fois de renseigner au modélisateur les positions des objets et des formes, mais aussi les matériaux des surfaces. Grâce à ces informations il va modéliser la réponse de la salle à l’excitation d’une source à un certain point d’écoute. Pour cela le programme utilise une technologie de

21. L’auralisation est le processus de rendre audible, par de la modélisation physique ou mathématique, l’environnement sonore d’une source dans un espace, à une certaine position.

22. Extension d’un programme informatique qui lui apporte de nouvelles fonctionnalités.

23. L’Open Sound Control est un format de transmission de données entre ordinateurs, synthétiseurs, robots ou tout autre matériel ou logiciel compatible, conçu pour le contrôle en temps réel.

ray-tracing<sup>24</sup> basée sur un algorithme de beam-forming<sup>25</sup> spécialisé notamment dans l'estimation des premières réflexions spéculaire (DAVID POIRIER-QUINOT 2017).

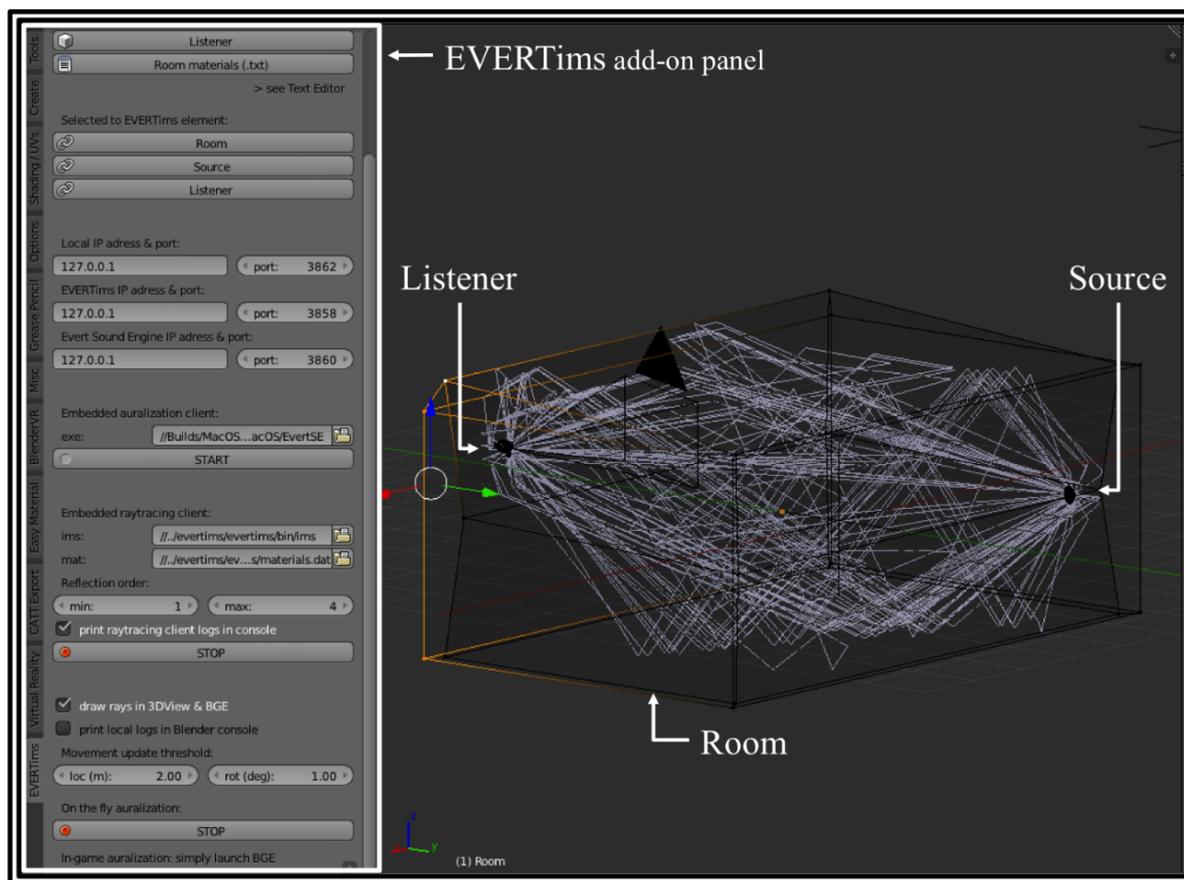


FIGURE 3.19 – Interface Blender durant une auralisation avec EVERTims. Visualisation des chemins de réflexions grâce au mode *debug*. (DAVID POIRIER-QUINOT 2017, p 4)

Les positions des réflexions ainsi que leurs atténuations, délais et filtres sont calculées et envoyées au moteur de rendu d'auralisation. Celui-ci fera appliquer à ses algorithmes de spatialisation les paramètres calculés précédemment (gains, délais, filtres etc.) et distribuera un flux audio soit en binaural pour le monitoring soit en ambisonique pour une reproduction dans une salle.

*Ce système contrairement au précédent permet de créer des salles de toutes formes, qui n'existent pas forcément. Elles peuvent donc être un atout artistique majeur pour un compositeur qui souhaite écrire son espace. De plus, les capacités d'interactions le rendent compatible avec d'autres médias (VR<sup>26</sup>, jeux, etc.) et permettent des rendus impossibles par des mesures. On pourra notamment transformer l'espace en temps réel, entendre l'influence de l'ouverture d'une porte sur une salle résonante, déplacer les murs, faire un *morphing*<sup>27</sup> d'une salle vers une autre. La possibilité de pouvoir se déplacer dans l'espace est aussi extrêmement intéressante, elle permet une visite d'un lieu plus qu'une "simple" projection. Dans le cadre du projet de ce mémoire cette idée pourra s'avérer très*

24. Le ray tracing (« lancer de rayons » en français) est une technique de calcul géométrique par ordinateur, utilisée notamment pour le rendu en synthèse d'image ou pour des études de systèmes optiques ou acoustiques.

25. Le Beamforming aussi appelé filtrage spatial, formation de faisceaux ou formation de voies est une technique de traitement du signal utilisée dans les réseaux d'antennes et de capteurs pour l'émission ou la réception directionnelle de signaux. **Wikipedia**

26. Virtual Reality

27. Transformation continue d'une forme en une autre.

intéressante, étant donné que nous chercherons à proposer un voyage au travers des acoustiques.

Nous ne rentrerons volontairement pas plus en profondeur dans la réalisation technique de ce projet étant donné qu'il inspirera grandement la construction et l'architecture de notre propre moteur de rendu. Nous aurons donc le temps de rentrer plus en détail dans les considérations techniques à ce moment-là.

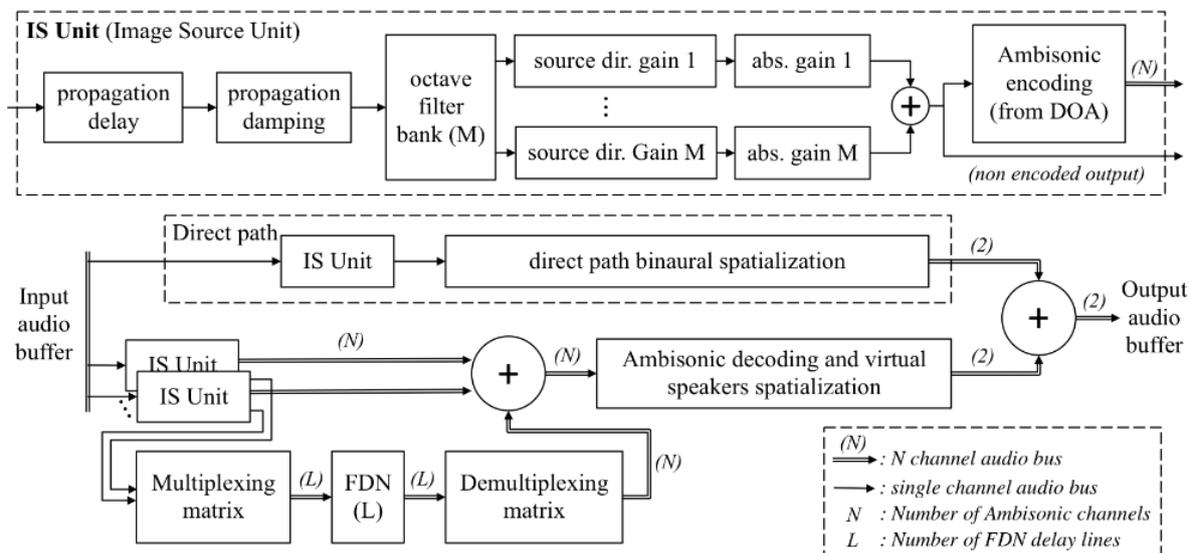


FIGURE 3.20 – Architecture générale du moteur d'auralisation (DAVID POIRIER-QUINOT 2017, p 5)

### 3.2.4 Critères perceptifs de l'impression spatiale

Avant de rentrer dans la partie pratique de ce projet faisons un rapide rappel de certains critères qualitatifs de l'impression spatiale. Comme nous l'expliquerons plus en détail nous développeront un modèle acoustique dit "perceptif", ces critères pourront nous être utiles pour concevoir nos acoustique et non pas pour les appliquer à celles-ci. Notre questionnement devient donc le suivant : comment pouvons-nous nous inspirer de critères acoustiques perceptifs afin de modéliser un espace sonore ?

#### 3.2.4.1 Critère de latéralité

**Définition :** « On dit qu'il y a une bonne *impression spatiale* de la salle si l'auditeur à l'impression de "baigner" dans le son de l'espace (respectivement s'il a l'impression de l'écouter comme "à travers une petite fenêtre") » (FISCHETTI 2004)

On mesure cette *impression spatiale* par le rapport entre l'énergie réverbérée arrivant à l'auditeur provenant des côtés de la salle, parallèlement à l'axe du conduit auditif, on l'appelle *énergie réverbérée latérale*. On compare cette énergie à l'énergie totale.

On a ainsi le *coefficient d'efficacité latérale (Lateral Efficiency)* :

$$LE(\div) = \frac{\text{énergie réverbérée latérale de 25 à 80ms}}{\text{énergie réverbérée totale de 0 à 80ms}}$$

Pour mesurer l'énergie latérale on utilise un microphone bidirectionnel et un microphone omnidirectionnel pour

l'énergie totale, les deux microphones sont co-incidents. Exemple de valeurs 10 % pour une salle de 50 m de large, 40 % pour une salle de 15 m de large.

Fischetti nous explique que pour avoir une bonne impression spatiale il faut qu'il y ait une grande proportion de réflexions sur les parois latérales, qui doivent donc être réfléchissantes tout en évitant des ondes stationnaires. Les réflexions provenant du plafond auront quant à elle tendance à masquer cet effet.

### 3.2.4.2 Critère de largeur de source

La *largeur apparente de source* sera majoritairement due aux premières réflexions latérales dans les basses fréquences ( $f < 500$  Hz) (FISCHETTI 2004).

### 3.2.4.3 Distance apparente

**Définition :** « On appelle *distance apparente*, ou *intimité*, l'éloignement subjectif de la source sonore. » (FISCHETTI 2004).

La distance apparente est inversement proportionnelle au rapport  $Dir/Rev = \frac{son\ direct}{son\ réverbéré}$ . On aura la sensation que la source s'éloigne si l'on diminue le niveau du son direct ou augmente le son réverbéré. À noter qu'une partie des premières réflexions aura tendance à être perçue avec le son direct. Augmenter certaines premières réflexions, par exemple avec des réflecteurs au plafond, pourra alors rapprocher la source (FISCHETTI 2004).

Pour résumer en cinq points et par ordre d'importance les critères perceptifs de la distance apparente :

1. Niveau son direct (référence d'écoute)
2. Rapport Dir/Rev
3. Spectre (absorption de l'air)
4. Rapport ITD / IID (notamment en dynamique)

En ce qui concerne l'inter-corrélation binaurale, un son direct aura une inter-corrélation binaurale forte tandis qu'un son réverbéré en aura une faible. Dans une acoustique, une source sonore avec une inter-corrélation forte aura donc tendance à être perçue comme un son proche et inversement.

*Pour la création d'un moteur de simulation d'acoustique algorithmique il sera alors important de décorrélérer de plus en plus les réflexions à mesure qu'elles deviennent tardives. C'est ce qui se passe par exemple dans le FDN de l'objet spat5.reverb-que nous avons présenté plus tôt.*

#### 3.2.4.4 Volume apparent d'une salle

**Définition :** « On appelle *volume apparent* la sensation d'être situé dans une salle de plus ou moins grand volume. »

Comme pour la *distance apparente* il ne faut pas confondre le *volume apparent* (sensation) du volume réel de la salle. Ce volume apparent est principalement lié à la densité des réflexions dans la réponse impulsionnelle. Plus les réflexions sont denses plus l'auditeur aura l'impression d'être placé dans une petite salle.

*Attention cependant. Dans le cas du moteur d'acoustique du Spat par exemple il est conseillé d'augmenter la densité (le nombre de bus interne) pour les longs temps de réverbérations. Sinon l'on se trouve avec des réflexions trop espacés pour garder une bonne sensation d'espace (par défaut le spat à 8 bus internes, on peut le passer à 16 pour des acoustiques de types églises).*

### 3.2.5 Inspirations préliminaires pour l'acoustique variable

#### 3.2.5.1 Enjeux des acoustiques variables dans la composition

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, si les compositeurs ont souvent dû s'adapter à l'acoustique des lieux dans lesquels ils se représentaient, cette contrainte permit aussi des développements compositionnels innovants. Dans le chapitre 2 nous avons pu voir comment l'émergence de l'électroacoustique a permis aux compositeurs de jouer avec l'espace, de superposer des espaces sur ces acoustiques. Néanmoins, cette approche relève toujours d'une certaine adaptation à une acoustique réelle. D'une certaine manière le pari des acoustiques variables est de composer ces acoustiques, dans le sens de faire le choix préliminaire de celles-ci. En effet les acoustiques variables ne marquent pas la naissance de la composition des espaces comme nous avons pu le montrer tout au long de ce mémoire.

Dans le cadre de ce projet je m'intéresserai même à savoir si je peux écrire *pour* une acoustique, de matière métaphorique il s'agit de donner à l'acoustique le rôle d'un interprète.

#### 3.2.5.2 Lieux Perdus Augustin Muller et Pedro Garcia Velasquez

Un des éléments déclencheurs de la volonté de réaliser ce projet fut la présentation des travaux des compositeurs Augustin Muller et Pedro Garcia Velasquez en studio à l'IRCAM. Ils participèrent à l'enregistrement de DRIR pour l'IRCAM sous différents formats (HOA, Binaural, Stéréo) pour leur projet *Lieux perdus*. Ils s'intéressaient notamment à l'enregistrement de réponses impulsionnelles d'acoustiques particulières - d'acoustique anisotropiques<sup>28</sup>. Ils ont donc enregistré de nombreux lieux étonnants, des gares, des escaliers, des poulaillers, des châteaux d'eau (Vous pouvez écouter certaines de ces réponses impulsionnelles en stéréo sur leur site [[lien](#)]). Les sensations d'acoustiques lors de la projection de ces lieux étaient saisissantes. Ce qui m'intéresse aussi dans ce projet est l'enregistrement d'ambiance sonores en trois dimensions aux mêmes positions que celles des enregistrements des réponses impulsionnelles. Cela m'a permis de constater la transformation de notre perception

---

28. L'anisotropie est la propriété d'être dépendant de la direction. Quelque chose d'anisotrope pourra présenter différentes caractéristiques selon son orientation, dans le cadre de l'acoustique il qualifie les salles dans le champ diffus n'est pas homogène mais orienté.

de l'espace par l'utilisation de référents sonores.

### 3.2.5.3 Encantadas - Olga Neuwirth

Dans une démarche similaire la pièce *Encantadas* d'Olga Neuwirth est intéressante. Nous avons présenté plus tôt les travaux de Natasha Barrett et Rama Gottfried sur la réalisation "d'espaces musicaux" par des procédés innovants. Étudions comment Olga Neuwirth utilise elle aussi des réponses impulsives afin de rendre hommage au travail de Luigi Nono.

« Marquée par Prometeo et par Venise où elle a longuement travaillé, Olga Neuwirth s'est emparée de l'acoustique de San Lorenzo, un lieu aujourd'hui désaffecté, pour sa propre création : analysé et intégré à l'électronique, cet espace est désormais la scène virtuelle où se joue *Le Encantadas*.

La traversée maritime de Neuwirth s'inspire par ailleurs d'une nouvelle de Herman Melville, qui fit des Galapagos, terres volcaniques et désolées, ses îles enchantées, lieu de la puissance de la nature et de la finitude du monde. Pas de texte ni de livret ici, mais une dissémination des musiciens en « îlots » dans la salle de concert. L'archipel lointain se reflète dans la lagune vénitienne, et la symbolique d'une fiction dans la perception d'un espace singulier. » (ircam.fr)

Retraçons rapidement la genèse de ce projet : la compositrice était restée captivée par la représentation du *Prometeo* de Luigi Nono dans l'église *San Lorenzo* alors qu'elle était jeune. Elle se remémorait cette acoustique, ce lieu. Cependant l'église tomba en ruine et restera fermée jusqu'à peu. Lorsque Olga Neuwirth apprit la réouverture de l'église elle s'empressa d'y retourner, de réentendre ce lieu qu'elle ne pouvait jusqu'à maintenant que se remémorer. Bien que l'église était tombée en ruine, l'acoustique elle n'avait pas changée nous raconte la compositrice. À défaut de sauver l'église elle souhaita sauver son acoustique. Elle demanda donc à Markus Noisternig, ingénieur du son et chercheur en Acoustique notamment, d'enregistrer cette acoustique. Il se trouve que Markus Noisternig travaillait justement sur des réponses impulsives de salles enregistrées par "spherical array microphone" - comme l'*Eigenmike* que nous avons présenté. Il enregistre donc des réponses impulsives à ordre élevé dans l'église, étant particulièrement intéressé par l'enregistrement de la manière dont se déplace la résonance dans l'église. En effet comme nous avons eu l'occasion de la présenter sur la partie concernant le *Prometeo*, l'église est constituée de deux nefs, ayant chacune un dôme, connectées seulement par deux ouvertures. Les dômes ayant tendance à créer une focalisation de la réverbération en hauteur et donc de faire "monter" les réflexions tardives. Les deux salles couplées créaient des effets de "rebonds" d'une salle à l'autre. L'ensemble de ces éléments produit un phénomène tout à fait particulier : les réflexions tardives dans l'église effectuent une spirale entre les deux salles qui se propage vers les dômes. Ce qui était fascinant fut que "l'empreinte" de la salle reproduisait cet effet. Les sons envoyés dans cette salle virtuelle se déplacent dans l'église.

Étant aussi fascinée par les technologies Olga Neuwirth nous explique qu'elle développa un discours dans cette pièce sur la confusion entre le réel et le virtuel (**lien**). Tout comme les premières technologies de réverbérations artificielles - qui apparaissent dans les années 80 pour finalement, recréer, préserver le réel (l'acoustique de *San Lorenzo*) - elle utilise la voix artificielle *Vocaloid* qui est notamment utilisée par la pop star virtuelle Hatsune Miku.

Dans cette pièce chaque île a un monde acoustique très différent. Elle s'inspire d'un ouvrage de Herman

Melville, *The Encantadas*, dans lequel chaque île a un concept sociologique si différent des autres que l'auteur en change de style d'écriture.

Chaque île est le théâtre d'un jeu entre les instruments réels et virtuels, les acoustiques réelles et virtuelles. Les instruments deviennent synthèses, la guitare électrique finit par faire "jouer" une voix, les paysages sonores réels de la lagune de Venise sont mélangés aux paysages artificiels. L'auditeur en perd ses repères, il finit par ne plus savoir qu'elle est l'acoustique réelle du lieu dans lequel il se trouve. Toutes les matières sonores sont écrits ensemble afin de former un tout multiforme.

L'interview donnée à l'occasion de la représentation de la pièce à la cité de la musique, après une première à Donaueschingen, est ainsi très éclairante ([lien](#)). Elle montre comment un travail d'adaptation avec la nouvelle acoustique a été effectuée. À la manière de Nono, l'espace se transforme, s'adapte à chaque représentation. La cité de la musique était en effet plus résonante, là où Donaueschingen avait une acoustique extrêmement sèche. Les dynamiques furent réécrites, les équilibres changés afin de réussir à restituer l'acoustique l'impression de *San Lorenzo* ici aussi.

Cette pièce est donc une bonne introduction à la présentation de l'écriture de la pièce de ce projet. Elle nous présente à la fois un parcours à travers les acoustiques, une manière de travailler dynamiquement entre acoustiques réelles et virtuelles et une réappropriation innovante et réfléchie de l'histoire de la musique spatiale qui a marquée la compositrice.



FIGURE 3.21 – Répétition de *Encantadas* à la cité de la musique avec l'Ensemble intercontemporain, la régie se situe au centre de la salle

### 3.3 Partie Pratique - Réalisation

Nous allons donc présenter ici une pièce mixte avec un travail particulier sur la composition de l'espace et la simulation d'acoustique. Je présente ici le synopsis de cette pièce et ferai ensuite le détail des choix artistiques qui ont menés à ce projet.

A la manière de Natasha Barrett cette réflexion se portera sur 4 points :

1. *Le travail de la profondeur en ambisonique* : Quels outils psychoacoustiques utiliser, une combinaison avec de la WFS sera-t-elle intéressante ?
2. *Écriture des acoustiques anisotropiques* : A la manière de l'église San Lorenzo, je m'intéresse notamment à l'écriture dans une acoustique qui déplace les réflexions tardives.
3. *La simulation d'acoustique comme un outil artistique* : peut-on détourner les outils d'acoustiques pour en faire un instrument. Peut-on écrire pour une acoustique comme pour un interprète ?
4. *la création "d'espaces musicaux" par contrôle des groupes de sources* : A la manière de Natasha Barrett je m'intéresse à l'utilisation de groupes de sources sonores à la frontière entre l'objet sonore et l'espace.

#### 3.3.1 Synopsis

L'auditeur est présent dans une salle dans le noir, il ne distingue pas l'espace qui l'entoure, il attend. Des multitudes de sons lointains, à la limite de l'audible, l'entourent, le forçant à tendre l'oreille. Il ne parvient pas à les reconnaître. Soudain un son brusque, en avant des autres, émerge, révèle une structure et disparaît dans les échos de celle-ci. L'auditeur a le temps de compter quelques échos avant que cet éclat ne reprenne, celui-ci semble s'accorder au rythme de la résonance. Comme intrigué par l'auditeur, il s'approche lentement, l'observe de tous les angles. Le son devient plus reconnaissable, semble se fixer dans une certaine direction. Un voile noir s'entrouvre et nous fait découvrir le guide de notre voyage. Armé de sa flûte la plus puissante et la plus grave il nous a appelé et attiré jusqu'à lui. Alors qu'il franchit le dernier pas le séparant de notre cocon, il fait sonner son appel caractéristique. Une salle entourant l'auditeur "s'illumine" des longues résonances issues de cet appel. Les échos deviennent acoustiques et nous font découvrir un point de fuite au-dessus de nous vers lequel la résonance semble vouloir s'échapper. Cet espace pourtant présent dès le début de notre errance nous était jusqu'alors inaccessible. On n'aurait su le voir, ou plutôt l'entendre.

Cette flûte au son pourtant si adapté à couvrir de longues distances ne semble plus convenir à cet espace intimiste. L'effet, si surprenant à l'entrée de la salle, n'a plus l'air de vouloir s'exprimer. Le son semble être trop lourd pour pouvoir s'élever. Le guide, souhaitant nous présenter ce qui se trouve au sommet de cette structure, s'équipe d'instruments moins imposants si bien qu'il conquiert petit à petit l'écart qui nous sépare de celui-ci.

Une fois au sommet la structure s'effondre brusquement et le silence de la résonance de sa chute nous empêche de bouger. L'acoustique semble alors répondre à notre guide et après un bref échange entre eux nous fait découvrir un florilège d'espaces impossibles mais pourtant bien réels. Le guide l'accompagne dans cette fugue improvisée s'éloignant petit à petit des auditeurs. Alors qu'on les entend, s'atténuant au loin, l'auditeur semble reconnaître une sonorité familière. Ce sont les bourdonnements qui nous étaient autrefois presque inaudibles.

Ils semblent palpiter au rythme d'une respiration d'abord haletante puis se calmant. Les palpitations s'arrêtent et l'auditeur se retrouve à son point de départ.

### **3.3.2 Choix de l'instrumentarium**

#### **3.3.2.1 Électro-acoustique ou musique mixte**

Nous souhaitons travailler l'impression d'acoustique et bien que tout cela puisse être réalisé en électro-acoustique, l'avantage de travailler avec un musicien ou une source sonore en direct aidera à donner une matérialité à cet espace. L'auditeur fait ainsi lui-même l'expérience du lien de cause à effet entre la source et son acoustique. L'idéal serait de pouvoir enregistrer aussi le public afin qu'il soit inclus dans cet espace. Cependant cette opération est difficile à réaliser, il faut contrôler la boucle de retour avec le système de diffusion pour que la réaction de la salle ne soit pas elle-même enregistrée et rediffusée, sans oublier un potentiel *larsen* qui peut arriver assez facilement lorsque l'on joue avec des acoustiques à fortes résonances dans les basses fréquences. Nous réglons généralement ce problème avec le(s) musicien(s) en mettant les microphones en proximité afin de limiter au maximum l'influence de la salle, cette solution serait coûteuse à mettre en place pour un public. Cela nous permet d'aborder un autre problème, comme nous l'expliquait Luigi Nono dans le chapitre précédent : les sons révèlent l'espace et l'espace recompose les sons. Nous aurons donc une impression d'espace convaincante lorsque le musicien jouera mais une absence d'espace dans les silences dès que la queue de réverbération aura fini de s'éteindre. Il est alors possible d'utiliser des sons d'ambiance, en multicanal ou non, pré-enregistrées ou *live*. Ils peuvent être soit seulement activé en dessous d'un certain niveau des musiciens (pour ne pas brouiller l'écoute par exemple) ou bien activé en permanence.

Nous écrivons alors pour un ou plusieurs musiciens afin d'avoir une simulation et projection en direct de l'acoustique dans l'objectif de pouvoir jouer entre les acoustiques réelles et artificielles à la manière de Olga Neuwirth.

#### **3.3.2.2 Ensemble ou soliste**

Cette pièce sera aussi bien une étude de la relation entre le musicien et l'espace qu'entre le compositeur et l'espace. Elle sera écrite pour un interprète seul sur scène. Cependant la pièce sera pensée comme un duo entre un musicien et un espace. J'écrirai donc une partition pour le musicien et une partition logicielle pour l'acoustique. Nous essayerons de penser l'acoustique comme un interprète. Cette partie sera en partie manipulée par moi-même en direct.

#### **3.3.2.3 Voix ou flûte : La voix candidat idéal ?**

La voix est un concurrent très fort, comme nous l'avons vu tout au long de ce mémoire elle est à la base des premières mélodies, des premières expérimentations acoustiques, par la voix parlée ou la voix chantée. La voix permet un registre de hauteurs, de timbres, de modes de jeux presque infinis, elle permet aussi de donner du sens par le langage et des émotions par le ton, les intonations, le chant. De plus la voix est le premier instrument de tout musicien, et on entend souvent qu'il est impossible de jouer un "trait" si l'on n'est pas d'abord capable de le chanter.

Cependant la voix apporte aussi tout un bagage culturel : si nous commençons à écrire des phrases ou même seulement des mots nous risquons de créer une iconographie, de faire sortir le public de l'espace dans lequel nous souhaitons qu'il voyage. Nous risquons ainsi de le faire se concentrer sur le sens, sur *l'au-delà* du son et ainsi retrouver les mêmes problématiques de *l'écoute traditionnelle* évoquées par Cacciari dans son entretien avec Luigi Nono. C'est pour cette même raison que dans mon travail avec German Toro-Perez<sup>29</sup> nous avons essayé d'éviter la facilité de la mélodie ; celle-ci crée un temps de la narration, de la phrase musicale, on s'intéresse alors aux intervalles entre chaque note, leurs intentions et l'on n'écoute plus la matérialité de ceux-ci, encore moins leur espace.

La flûte a par ailleurs un répertoire très fort dans la musique contemporaine, avec beaucoup de travaux sûr de nouveaux modes de jeux, nous pouvons atteindre un ambitus extrême entre le piccolo et ses fondamentales montant jusqu'à 4500 Hz et la flûte basse descendant à 100 Hz<sup>30</sup>, permettant de faire résonner tout le spectre des acoustiques. Ces nouveaux modes de jeux ouvrent par ailleurs de nouvelles possibilités tel que le chant-flûte qui consiste à chanter dans la flûte tout en continuant de souffler dedans. Les plus habitués pourront alors parler tout en jouant, avoir une polyphonie entre la mélodie chantée et celle jouée à la flûte. Mon choix se porte donc sur la flûte, il se trouve d'ailleurs que j'ai dans ma famille plusieurs fûtistes professionnels dont ma mère et mon frère, Clément Zanni. C'est ce dernier qui performera cette pièce.

### 3.3.3 Choix des Technologies : Acoustique réelle ou simulation

J'ai pour cette pièce deux possibilités : soit jouer avec l'acoustique mise à ma disposition et travailler l'espace en permanente rétroaction avec l'écoute à la manière de Luigi Nono, soit essayer d'écrire le plus possible à la fois l'espace et l'interprétation à la manière de Iannis Xenakis. Pour cette pièce, bien que la réponse sera plutôt un mélange des deux approches, je me tournerai davantage vers la seconde solution - celle de Xenakis - pour différentes raisons. Une première, pragmatique : nous ne savons pas encore au moment de l'écriture où sera jouée cette pièce. Elle ne pourra donc pas être écrite dans l'acoustique de celle-ci et bénéficier du processus d'écoute associé. Comme le disait Nono, par ce processus la pièce devient ainsi indissociable du lieu dans lequel elle est jouée, nous ne pourrions donc pas appliquer cette méthodologie si le lieu de représentation n'est pas fixé à l'avance. Je suis de plus intéressé par l'écriture d'une forme de duo entre l'interprète et l'espace, la méthode *Xenakienne* convient bien à cela. Elle me permet de plus de créer une acoustique en dehors du lieu réel de diffusion et ainsi de créer ce voyage entre les acoustiques que je souhaite. Il suffira ensuite pour la diffusion de bien faire attention à choisir une pièce suffisamment mate - ou d'utiliser des absorbants acoustiques pour la contrôler. Je suis parti sur un modèle de simulation dit de "synthèse", je ne me base donc sur aucun enregistrement d'empreinte de salle. Il me faut donc écrire des positions pour chacune des réflexions de cette acoustique. Bien que cette approche puisse être fastidieuse si l'on ne dispose pas d'outils pour contrôler tous ses points, elle se révèle très intéressante pour en détourner les codes. Le simulateur d'acoustique peut alors devenir un instrument de jeu à part entière.

---

29. German Toro-Perez fut mon professeur de composition à la Haute École des Arts de Zürich, Zürcher Hochschule der Künste (Haute École des Arts de Zürich) (ZHdK), et m'a accompagné dans l'écriture de la première partie de cette pièce.

30. Notons les flûtes contrebasses et sous-contrebasses, très rares. La première mesure 2 m et descendant jusqu'à 50 Hz et la seconde 5 m descendant plus bas encore.

## 3.4 Composition de la partition pour flûte

### 3.4.1 Expérimentation avec le musicien pour valider les intentions

Avant de commencer à travailler sur cette pièce je souhaitais découvrir plus en profondeur le répertoire déjà existant, expérimenter avec le musicien sur des premiers effets acoustiques et musicaux et essayer de trouver des synesthésies. Pour cela, nous avons eu la possibilité de réserver une semaine de résidence dans le studio 1 de l'IRCAM avec Clément Zanni. J'ai alors approfondi mes connaissances sur les fondamentaux du moteurs d'acoustique du *Spat*. J'ai pu avec l'aide de Markus Noisternig développer un premier prototype "*perceptif*" à tester.

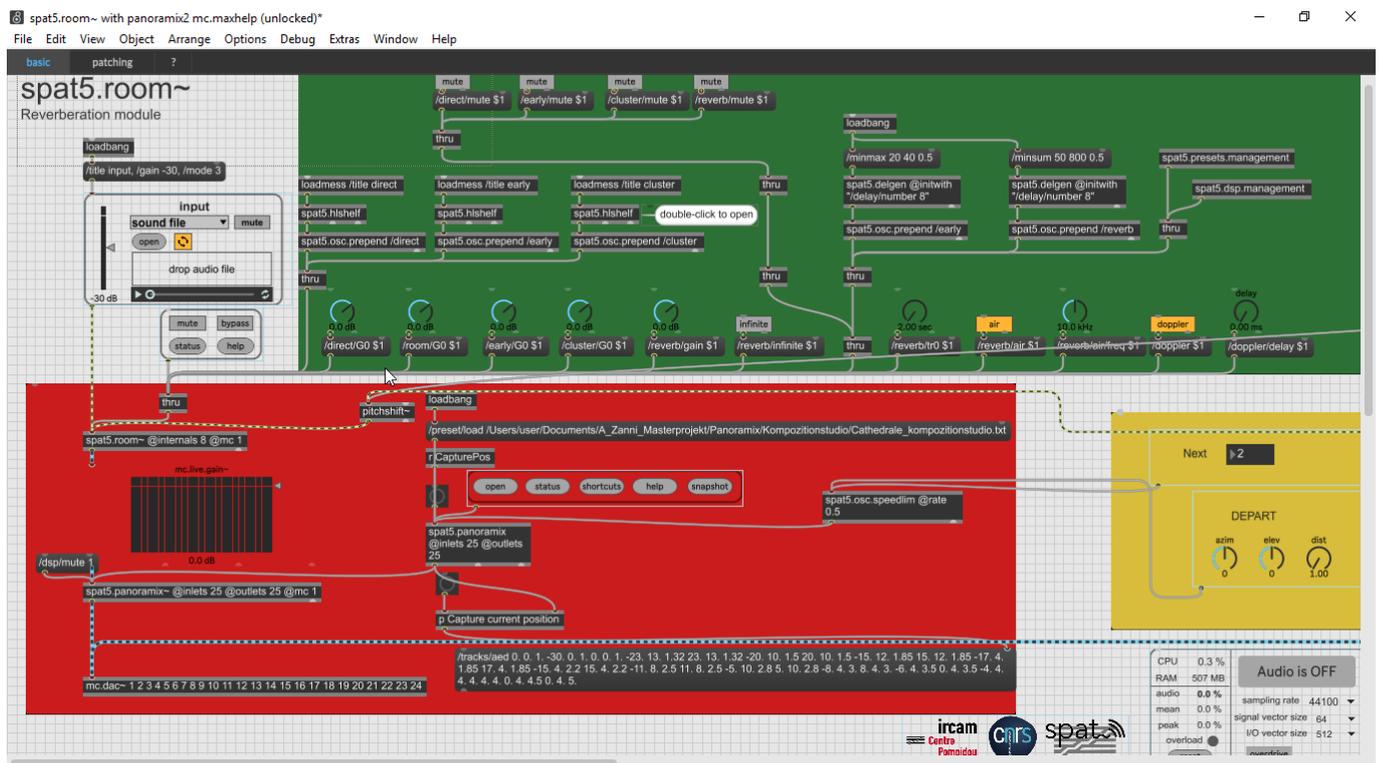


FIGURE 3.22 – Prototype de simulation perceptif d'acoustique

Dans cette première approche nous utilisons *spat5.room~* qui permet à partir d'une source mono-phonique de générer des premières réflexions, denses puis tardives et ensuite de les spatialiser avec *panoramix~*.

Cette méthode a deux inconvénients majeurs :

- L'objet *spat5.room~* génère des réflexions avec des délais qui ne correspondent pas au placement dans l'espace de ces réflexions (puisque le panning est appliqué en aval).
- Cette méthode est assez contraignante lorsque l'on veut avoir plusieurs sources monophoniques.

Une fois l'interprète sur les lieux nous avons commencé par enregistrer plusieurs pièces de répertoire afin de les analyser et de s'en servir de banc de test. Cela nous a par ailleurs permis de faire des premiers tests de choix de placements et de type de systèmes microphoniques (microphones statiques, directivité, sur pied ou sur l'instrument, etc..). Nous avons notamment enregistré *Vox Balaenae* de George Crumb, *Pesci* de Pascal Dusapin.

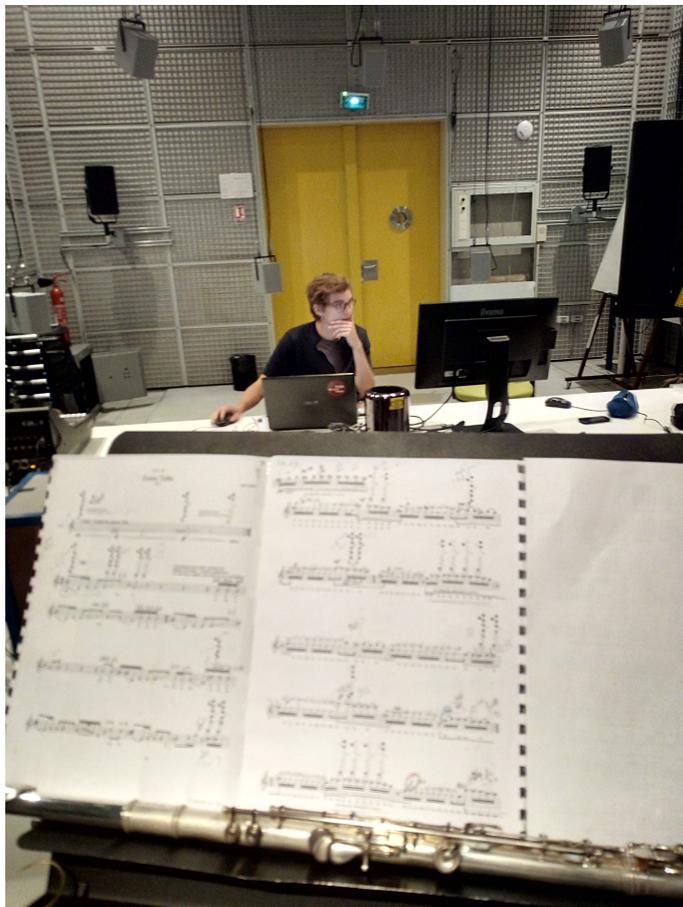


FIGURE 3.23 – Session d'expérimentation avec l'interprète dans le studio 1 de l'IRCAM

Nous avons ensuite enregistré des éléments sonores séparés, des modes de jeux qui me permettront de constituer une petite banque de sons pour faire des essais lorsque je serai à Zürich (jet whistle, chant flûte, etc..).

Nous avons fini la semaine par des périodes d'improvisation entre acoustique et flûte, de re-recording, de déplacement dans l'espace. Nous étions intéressés par l'étude de l'influence du mouvement d'une source sur son improvisation, nous avons testé des trajectoires circulaires à vitesse constante, des déplacements discontinus sur des rythmes imposés. Nous étions aussi intéressés par l'influence du placement du musicien dans l'espace d'écoute sur la perception de l'auditeur. En effet, puisque nous avons une source directe (le musicien) et une acoustique simulée projetée, si par exemple le musicien se trouve à l'opposé de sa position dans la simulation d'acoustique alors nous nous trouvons dans une situation de double image (réelle et simulée). Après différents tests nous trouvons notamment que positionner le musicien au centre pour une source en perpétuelle rotation pouvait permettre de moyenniser cette double image, à l'opposé placer le musicien sur le bord de la sphère créait une asymétrie forte entre la zone où la simulation est "derrière" le musicien et quand elle est à l'opposé. Cependant cette dernière situation est intéressante acoustiquement pour faire vivre une sorte de "double acoustique" du

musicien.



FIGURE 3.24 – Vue de la session d’enregistrement dans la station *Reaper*

### 3.4.2 Recherche sur les techniques de jeux et de composition contemporaines

Pour ce projet de mémoire j’ai réalisé un échange entre mon école (ENS Louis Lumière) et la Haute École des Arts de Zürich (ZHdK). J’ai donc suivi durant un semestre une formation de Master en composition Électroacoustique. Les premières recherches sur la composition pour flûte, sur les intentions pour ma pièce ont été réalisées à Zürich sous la direction de mon professeur de composition German Toro-Perez. Nous avons pris la décision de restreindre la durée de l’oeuvre à 5 minutes environ et une pièce en trois actes : une entrée, découverte de l’espace et déplacement de celui-ci avec le musicien, une seconde phase "*immersive*" où le spectateur se retrouve au centre de tous les changements et finalement un dernier espace où l’on jouerait sur la déconstruction de cet espace, et l’utilisation de l’acoustique comme un instrument d’interprétation.

Pour mes recherches sur l’écriture de la flûte contemporaine je me suis majoritairement appuyé sur ;

- les livres de Carin Levine *The Techniques of Playing Flute Vol 1&2* qui sont très complets, le premier se concentre sur la flute en Do et le second sur les autres flûtes.
- Un livre de Robert Dick "*Neuer klang durch neu technik*".
- le site de Matthias Ziegler, professeur de flûte et spécialiste du contemporain à la ZHdK. (**Lien : site fluteXpansion**)

L’objectif était tout d’abord d’apprendre les différents modes de jeux, techniques de la flûte contemporaine et d’en savoir plus sur leurs écritures. Nous présenterons ci-dessous certains de ces modes de jeux, leur écriture et les intérêts qui m’ont poussé à les utiliser.

Je fus notamment très intéressé par le *jet whistle* qui correspond à une sorte de mélange entre un *sweep* et un *dirac*. Qui a l’avantage d’exciter une large bande fréquence sur un court laps de temps avec beaucoup de puissance tout en donnant un beaucoup de contrôles sur l’interprétation. En positionnant les lèvres différemment sur l’embouchure, dessus ou autour, on produit des *jet whistle* très différents. On peut avoir avec cet effet une

grande gamme de variation de dynamique et de timbre, idéale pour exciter une acoustique. La position par rapport au microphone était aussi très importante pour cet effet. Nous avons travaillé avec une flûtiste à Zürich sur ces différents modes de jeu.

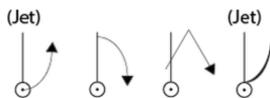


FIGURE 3.25 – Notation de Jet Whistle, FuteXpansions

Un autre effet qui a retenu mon attention durant mes expérimentations à l'IRCAM est le chant-flûte (explicité plus haut), et notamment son utilisation dans la pièce *Vox Balaenae* de George Crumb (([lien](#))).



FIGURE 3.26 – Notation de Chant-Flûte, FuteXpansions

Les multiphoniques sont des effets qui permettent aussi à la flûte de jouer des accords. Elles consistent en des doigtés précis entre deux notes. Avec une gestion précise du flux d'air on arrive alors à faire résonner plusieurs notes en même temps dans la flûte. Le livre de Carin Levine recense ainsi près de 50 pages de doigtés de multiphoniques. En restant sur un même accord et changeant seulement la pression du souffle on arrive à "se déplacer" dans l'accord, à faire entrer plus ou moins en résonance certaines notes.

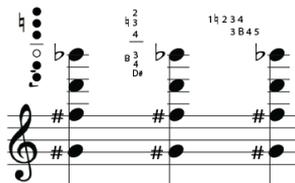


FIGURE 3.27 – Notation de multiphoniques, FuteXpansions

Les sons éoliens sont des sons où l'on contrôlera le rapport souffle/note. Nous pourrions ainsi dans un même doigté débiter d'un souffle venteux et finir sur une note précise. Ils s'écrivent généralement avec un losange, dans ma partition je rajouterai un cercle plus ou moins plein au-dessus de la partition pour quantifier le rapport entre son et souffle.

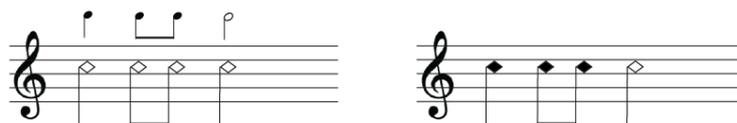


FIGURE 3.28 – Notation de sons éoliens, FuteXpansions

Je fus intéressé par l'utilisation du glissando dans la pièce *Pesci* de Pascal Dusapin. À travers les expériences avec l'interprète, nous avons préféré cet effet sur la flûte basse. Nous verrons par la suite comment nous associerons ce son à des formes spatiales à la manière de Rama Gottfried.



FIGURE 3.29 – Notation de glissandos, FuteXpansions

Le *Flutter Tongue* est un son complexe, tout comme le son éolien il a une variation entre un bruit large bande et une note, cependant il rajoute à cela une composante rythmique. Ce son est produit avec un doigté de note classique. On viendra faire vibrer à une fréquence précise la langue pendant le souffle. Pour imaginer ce son, il se trouve dans une sorte de mélange entre une note pure et un ronronnement de "moteur" ou de "turbine", cadencé par la fréquence de vibration.



FIGURE 3.30 – Notation de glissandos, FuteXpansions

Les percussions de clefs (*keys clicks*). Pour cela l'idée est très simple, percuter du doigt une clef de manière à ce qu'elle crée une percussion en résonant dans la flûte. Il existe plusieurs manières d'amener cet effet : taper et garder le doigt sur la clef pour créer une percussion sourde ou au contraire relâcher dès la percussion pour créer plus de résonance. Nous avons vu comment certains effets pouvait donner de la polyphonie à la flûte, cette effet permettra d'écrire un rythme au-dessus d'une mélodie.

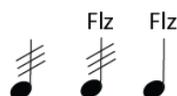


FIGURE 3.31 – Notation d'un *flutter tongue*, FuteXpansions

Pour finir, dans la présentation des effets principaux qui se trouveront dans la pièce de ce mémoire présentons le *tongue ram*. Il s'agit d'une note percussive créée par un coup de langue rapide. Elle permet avec les *key clicks* d'avoir différents niveaux de jeux entre les notes pures et les percussions.

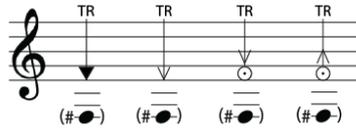


FIGURE 3.32 – Notation de *tongue ram*, FuteXpansions

En effet il est important de comprendre que ces effets ne sont pas indépendants, ils peuvent être assemblés, variés. Un des meilleurs exemple de cette utilisation est l'écriture de Pascal Dusapin dans ses pièces acoustiques pour flûte. Les effets sont toujours finement amenés par des transitions, un suivi de la note dans toute sa longueur aussi bien dans le timbre la dynamique, l'effet, etc.

### 3.4.3 Écriture d'une première partie et retour avec l'interprète

La première partie correspond dans mon synopsis à l'appel du guide, venant du loin et se rapprochant petit à petit. Le guide répète son appel qui se transforme au fur et à mesure qu'il s'approche. La forme de cette partie est donc une sorte de thème et variation où le thème est un pattern très simple : il part d'un son éolien (de la masse lointaine presque inaudible), émerge en crescendo, sort de la masse, créant une tension qui se relâche en un instant dans un *jet whistle*. Ce *jet whistle* fait résonner l'acoustique et la révèle. Des échos disparaissent au lointain. La répétition de pattern est rythmé par la durée des échos et donc de l'impulsion précédente. Le flûtiste reprend lorsqu'il n'entend plus l'écho, s'il joue plus ou moins fort le jet whistle précédent ou si la durée de réverbération varie alors le temps entre les patterns aussi. De nouvelles idées musicales apparaissent au fur et à mesure, et se répètent en se répondant.

« Répétez une fois, après quoi vous pouvez poursuivre »<sup>31</sup>, DEBUSSY

Plusieurs appels semblent ainsi se répondre sans jamais se conclure dans une forme qui pourrait s'apparenter à une version très simplifiée d'une fugue pour un seul interprète. Durant cette partie l'acoustique reste uniquement "causale", dans le sens où elle répond à une cause, c'est-à-dire qu'elle ne fait que réagir à l'excitation du flûtiste. Plus tard l'acoustique prendra son autonomie. Cette partie utilise aussi des effets ; de glissandi, de *tongue ram*, de *flutter tongue*, de *key clicks*, d'harmoniques et de multiphoniques. Alors que l'ambitus de cette première partie reste restreint à moins d'une octave, l'apparition d'harmoniques et multiphoniques à la fin ouvre soudain le registre et annonce le passage au second mouvement.

31. Debussy, cité par Franck Martin

FIGURE 3.33 – Pages 1 et 2 de la partition pour flûte de la première partie

FIGURE 3.34 – pages 3 et 4 de la partition pour flûte de la première partie

## 3.4.4 Choix des parties

### 3.4.4.1 Profondeur : Le couloir



FIGURE 3.35 – Représentation des positions des réflexions du couloir lorsque le guide se trouve à la limite de la seconde pièce. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives

Le couloir apporte un jeu sur la profondeur et les échos, ce serait le premier espace de la pièce qui commencerait dans une situation acousmatique, le flûtiste absent. Afin de mettre le public dans une situation d'écoute active de l'espace.

D'un point de vue musical, je veux utiliser l'idée de réponse impulsionnelle qui permet de rendre sensible l'espace. Le flûtiste joue donc un motif répétitif de sons soufflés se finissant par un « dirac musical » (ici un jet whistle : souffle fort et appuyé faisant résonner la flûte).

À chaque répétition, la prémisses se transforme petit à petit en son pur, avec crescendo. Durant la résonance de l'acoustique le flûtiste fait quelques pas dans le « couloir ». Dernière répétition : le flûtiste est à l'entrée de la seconde salle, il se fait timide et avance régulièrement et doucement pendant que l'acoustique se transforme.

D'un point de vue de la spatialisation, au départ lorsque le guide reste dans une situation la position du couloir diffusée se déplacera. À la manière des résonances dans les grottes de la préhistoire, cela orientera l'auditeur vers des directions. Lorsque le guide s'approchera la position du couloir projeté se stabilisera pour finir par correspondre à la position réelle du guide.

### 3.4.4.2 Englobement : La cathédrale

Je m'intéresse à l'archétype de la cathédrale notamment pour l'impression d'élévation que l'on y trouve, grâce à la coupole. Plus les réflexions sont tardives plus elles s'élèvent. C'est un espace qui fonctionne d'autant mieux si le musicien est présent dans l'espace, d'où l'intérêt ici de le placer en seconde position, lorsque le guide rentre dans la salle. Pour cet espace j'ai envie de travailler sur 3 paramètres ; l'élévation, l'accumulation (idée de remplir l'espace, idée d'« immersion »), et la voix (par l'utilisation du chant-flûte). Ceci dans l'idée de jouer sur les associations culturelles lié à cet espace. Pour le moment je n'essaye pas d'utiliser le caractère sacré. Un autre

défi de cet espace est d'écrire pour une acoustique "orientée". Là où le couloir travaillait dans la propagation dans la profondeur, la cathédrale travaillera sur la propagation en hauteur.

La composition pour cet espace est minimale et répétitive avec des pauses afin de mettre en avant la polyphonie virtuelle de ce lieu. Cette partie sera donc le commencement de l'écriture en deux voix (flûte et acoustique). Je pense à donner des trajectoires à des thèmes bouclés pour donner un aspect « organique » à cet espace.

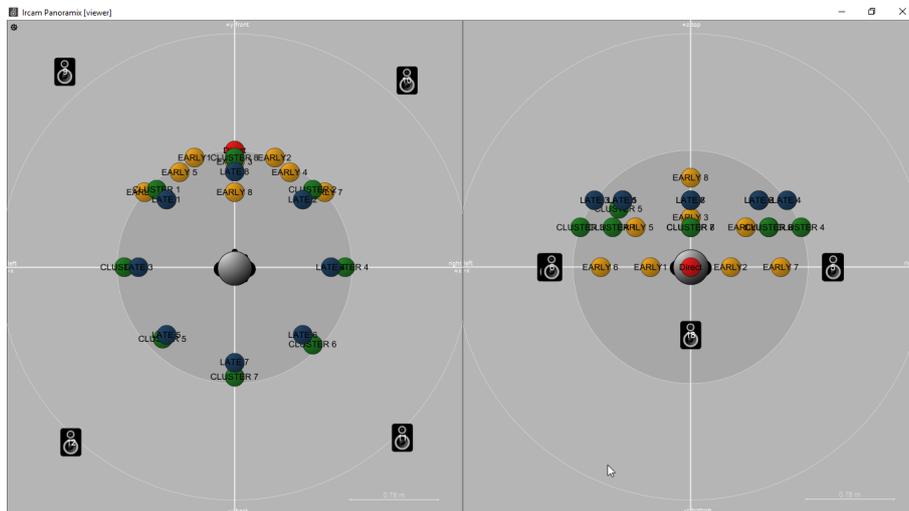


FIGURE 3.36 – Représentation des positions des réflexions de la cathédrale, le guide est ici frontal au bord de la salle, plus les réflexions sont tardives plus elles s'élèvent. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives

### 3.4.4.3 Espace final de jeu

Une spirale :

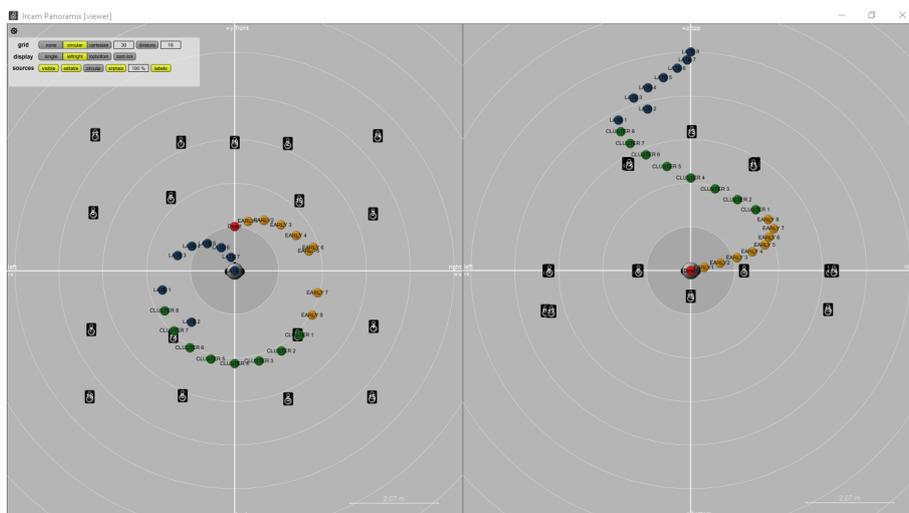


FIGURE 3.37 – Représentation des positions des réflexions de la spirale à la manière de l'église *San Lorenzo*. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives

Dans cet espace, l'idée est de déconstruire l'acoustique en ces éléments propres (ici son direct, réflexions précoces/denses/tardives) et tenter de faire entendre ses différents éléments. Ce serait donc un espace qui jouerait aussi sur les trajectoires. Je m'intéresse notamment à la forme de la spirale, inspiré par l'église *San Lorenzo*. J'ai donc conçu un algorithme me permettant de placer les éléments de mon acoustique sur une spirale, contrôler sa trajectoire en temps réel. Au début de la spirale se situe le son direct, et à la fin la dernière réflexion tardive. Ainsi en suivant la trajectoire sur cette courbe le son disparaît dans la réverbération, il se "meurt".

Pour cet espace, je cherche à trouver des effets qui viendraient accentuer la perception de la décomposition. Au vu de mes expérimentations il semblerait que les sons « mourants » fonctionnent bien ; ainsi la combinaison de cette trajectoire spatiale et de glissandi vers les graves fonctionne très bien. Notamment en créant un synchronisme entre la vitesse des trajectoires et des glissandi. Je développerai pour cela un paramètre me permettant de gérer la vitesse sur ces trajectoires.

Une autre utilisation intéressante de la spirale serait peut-être sur la distance en jouant sur les points de départ et d'arrivée ou en mouvement en utilisant l'effet doppler comme outil d'interprétation. En effet la spirale peut créer diverses impressions d'espaces. Des grands mouvements dans la distances créeront des effets de *pitchs* avec l'effet doppler, une spirale faisant plusieurs révolutions finira par être perçu de nouveau comme un acoustique. Ainsi en gérant le nombre de révolutions on pourra passer d'un phénomène de trajectoire à un phénomène d'acoustique.



FIGURE 3.38 – Représentation des positions des réflexions de la spirale, destruction de l'impression de trajectoire par plusieurs révolutions. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives

#### 3.4.4.4 Transition entre les espaces

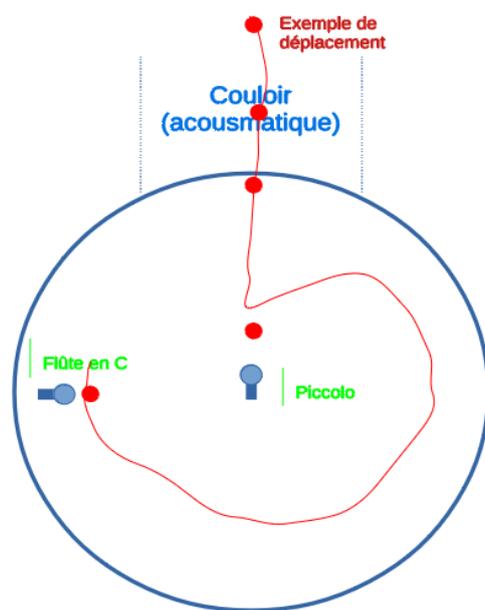


FIGURE 3.39 – Première proposition de déplacement dans la zone d'écoute

Ici une représentation d'une première proposition du parcours du guide dans l'espace de représentation. Le public se trouve dans la sphère, à l'intérieur du dôme ambisonique, le "cocon".

## 3.5 Composition logicielle

### 3.5.1 Choix du logiciel et des bibliothèques

Pour travailler sur ce projet, pour lequel les expérimentations seront nombreuses, j'ai besoin d'un langage qui m'est familier, qui correspond à mes habitudes d'ingénierie du son en termes de traitement du signal et qui est suffisamment flexible pour permettre rapidement des transformations. Une version sous un langage plus performant peut être envisagée plus tard une fois que la forme sera stabilisée. J'avais alors deux possibilités, les logiciels Pure Data et Max/MSP présentés plus tôt dans ce mémoire dans la section consacrée à *Répons* de Boulez. Les deux logiciels sont des environnements haut-niveaux<sup>32</sup> de programmation graphique par blocs logiques, mais sont tous deux basés sur du C++. Ils permettent tous deux à la fois des traitements de données, de flux audios et vidéos. Pure Data à l'avantage d'être Open-source, et donc un accès au code C++, une plus grande pérennité dans le temps tandis que Max est propriétaire mais est appuyé par un financement de développement important qui le rend plus à jour techniquement que Pure Data. Les dernières mises à jour de Max (version 8) ont notamment amené une gestion de bus multicanaux demandés depuis longtemps par la communauté utilisant des algorithmes de spatialisation. En effet en ambisonique d'ordre 7 par exemple chaque boîte de traitement doit être relié avec la suivante par 64 canaux monophoniques. Là où un bus multicanal 64 canaux n'a besoin que d'une seule liaison. Ceci change drastiquement la flexibilité de programmation. De plus

32.

Max/MSP héberge de nombreuses bibliothèques dédiées à la spatialisation mises à jour régulièrement. Notamment le *Spat* de l'IRCAM, les *ICST'tools* ou encore la bibliothèque HOA de la MSH. Max a de plus trois bibliothèques devenues très importantes pour les compositeurs ; les bibliothèques *Bach*, *Cage* et *Dada*, dont nous auront l'occasion de reparler plus tard.

### 3.5.2 Première approche perceptive très simplifiée

Lors de mes premières expérimentations au Studio 1 de l'IRCAM, j'ai utilisé l'objet *spat.room~* qui me permet de construire à partir d'une source mono des réflexions proches, denses et tardives et ensuite de les spatialiser comme je le souhaite dans panoramix (console virtuelle de spatialisation) et ainsi obtenir des simulations « perpectives » d'espaces acoustiques. Nous avons décidé avec Markus Noisternig de qualifier cette approche de "perceptive" car elle ne se base pas sur une modélisation de salle, nous créons des "effets" de salles en positionnant directement les positions des sources, leurs filtrages, délais, gains. Avec cette méthode on pourra aussi bien reproduire des impressions d'espaces "réalistes" en imitant la manière dont une cathédrale, un couloir va placer, atténuer, etc. les réflexions. Nous pouvons également créer des effets sonores complexes, comme nous avons pu le montrer avec la spirale.

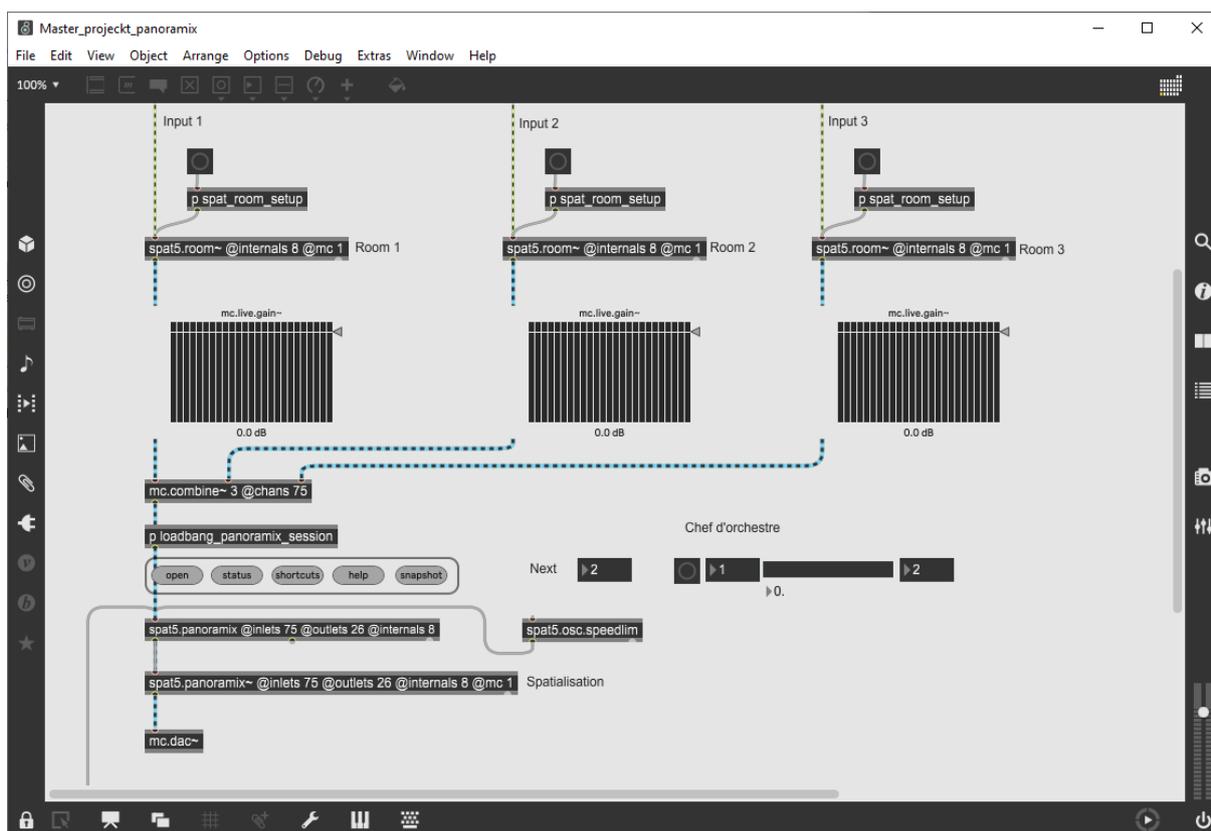


FIGURE 3.40 – Première implémentation pour 3 sources avec *Spat5.room~*

Comme nous l'avons présenté dans la partie consacrée aux expérimentations en studio à l'IRCAM, cette approche a des limites qui nous amèneront à développer plus tard une approche plus complexe.

N'étant alors pas encore sûr de développer une approche totalement paramétrique j'ai aussi fait des expériences avec la bibliothèque DRIR de l'IRCAM. Je souhaite notamment voir quels sont les traitements sur les IR 3D à ma disposition. J'utilise alors l'objet *spat.conv* qui me permet de convoluer un signal monophonique

avec l’empreinte d’une salle, des réponses impulsionnelles en trois dimensions, puis de faire des traitements sur ces réponses : inversion temporelle, rotation (spat.hoa.rotate ), projection/ déformation vers une zone (spat5.hoa.warp : vers les pôles, l’équateur ou à l’avant), focus (spat5.hoa.focus : sélection d’une zone dans l’espace ambisonique). Les traitements de rotations de projections déformations ou encore focus ne me permettent rien que je ne puisse faire sur une réverbération paramétrique. L’inversion temporelle quant à elle n’est pas imitable avec une autre approche car basée sur l’inversion d’une réponse impulsionnelle. Cependant je n’utiliserai pas cette méthode comme base de ma pièce, je m’en servirai peut-être pour des effets ponctuels.

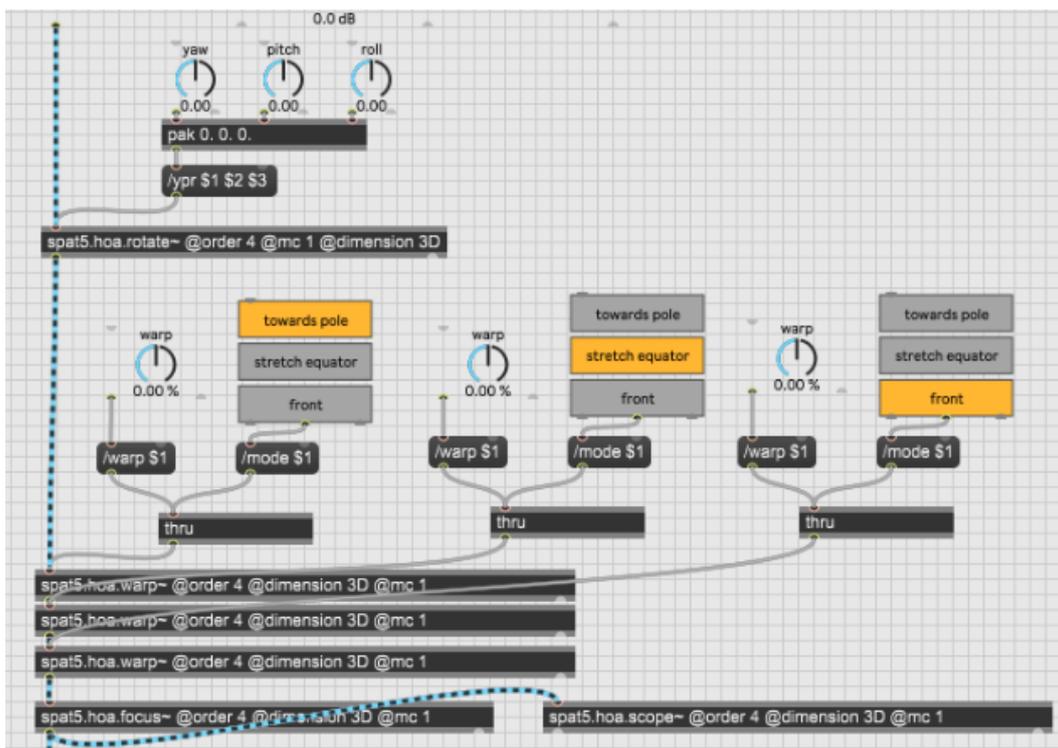
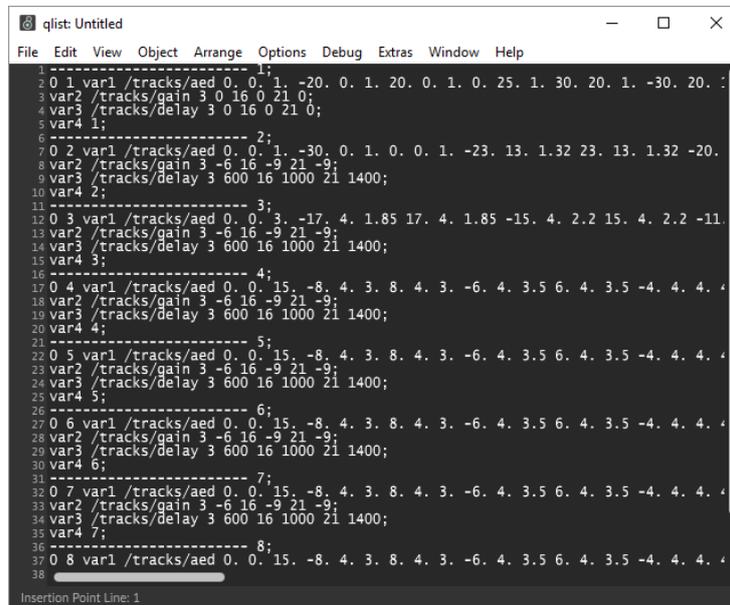


FIGURE 3.41 – Traitements ambisoniques appliqués à des aux réverbération basées sur des réponses impulsionnelles

### 3.5.3 Création d'un conducteur

Cette première approche nécessite la spatialisation de 25 sources virtuelles par objet sonore que l'on souhaite placer dans une acoustique. En termes de données il faut donc gérer leurs positions dans l'espace, leurs délais, leurs atténuations, leurs filtrages. Il devient très rapidement impossible de contrôler l'ensemble de ces paramètres sans l'aide d'algorithmes. Je commence donc le développement d'un conducteur, qui aura pour but de suivre la partition et d'envoyer en fonction des mesures les paramètres adaptés à chaque élément.



```
qlist: Untitled
File Edit View Object Arrange Options Debug Extras Window Help
1;
2 0 1 var1 /tracks/aed 0. 0. 1. -20. 0. 1. 20. 0. 1. 0. 25. 1. 30. 20. 1. -30. 20. ;
3 var2 /tracks/gain 3 0 16 0 21 0;
4 var3 /tracks/delay 3 0 16 0 21 0;
5 var4 1;
6 ----- 2;
7 0 2 var1 /tracks/aed 0. 0. 1. -30. 0. 1. 0. 0. 1. -23. 13. 1.32 23. 13. 1.32 -20.
8 var2 /tracks/gain 3 -6 16 -9 21 -9;
9 var3 /tracks/delay 3 600 16 1000 21 1400;
10 var4 2;
11 ----- 3;
12 0 3 var1 /tracks/aed 0. 0. 3. -17. 4. 1.85 17. 4. 1.85 -15. 4. 2.2 15. 4. 2.2 -11.
13 var2 /tracks/gain 3 -6 16 -9 21 -9;
14 var3 /tracks/delay 3 600 16 1000 21 1400;
15 var4 3;
16 ----- 4;
17 0 4 var1 /tracks/aed 0. 0. 15. -8. 4. 3. 8. 4. 3. -6. 4. 3.5 6. 4. 3.5 -4. 4. 4.
18 var2 /tracks/gain 3 -6 16 -9 21 -9;
19 var3 /tracks/delay 3 600 16 1000 21 1400;
20 var4 4;
21 ----- 5;
22 0 5 var1 /tracks/aed 0. 0. 15. -8. 4. 3. 8. 4. 3. -6. 4. 3.5 6. 4. 3.5 -4. 4. 4.
23 var2 /tracks/gain 3 -6 16 -9 21 -9;
24 var3 /tracks/delay 3 600 16 1000 21 1400;
25 var4 5;
26 ----- 6;
27 0 6 var1 /tracks/aed 0. 0. 15. -8. 4. 3. 8. 4. 3. -6. 4. 3.5 6. 4. 3.5 -4. 4. 4.
28 var2 /tracks/gain 3 -6 16 -9 21 -9;
29 var3 /tracks/delay 3 600 16 1000 21 1400;
30 var4 6;
31 ----- 7;
32 0 7 var1 /tracks/aed 0. 0. 15. -8. 4. 3. 8. 4. 3. -6. 4. 3.5 6. 4. 3.5 -4. 4. 4.
33 var2 /tracks/gain 3 -6 16 -9 21 -9;
34 var3 /tracks/delay 3 600 16 1000 21 1400;
35 var4 7;
36 ----- 8;
37 0 8 var1 /tracks/aed 0. 0. 15. -8. 4. 3. 8. 4. 3. -6. 4. 3.5 6. 4. 3.5 -4. 4. 4.
38
```

FIGURE 3.42 – Utilisation de Qlist pour écrire et lancer les cues.

Pour cela j'utilise Qlist pour sauvegarder les différentes configurations de positions, de gains, de délais et j'utilise l'objet *list-interpolate* de la librairie CNMAT<sup>33</sup> pour faire des transitions linéaires entre les deux dernières listes de positions chargées. Ainsi les transitions ne sont pas abruptes et je peux contrôler au *fader* la transition d'une acoustique à une autre. Cela me permet de faire une sorte de *morphisme* entre différentes salles.

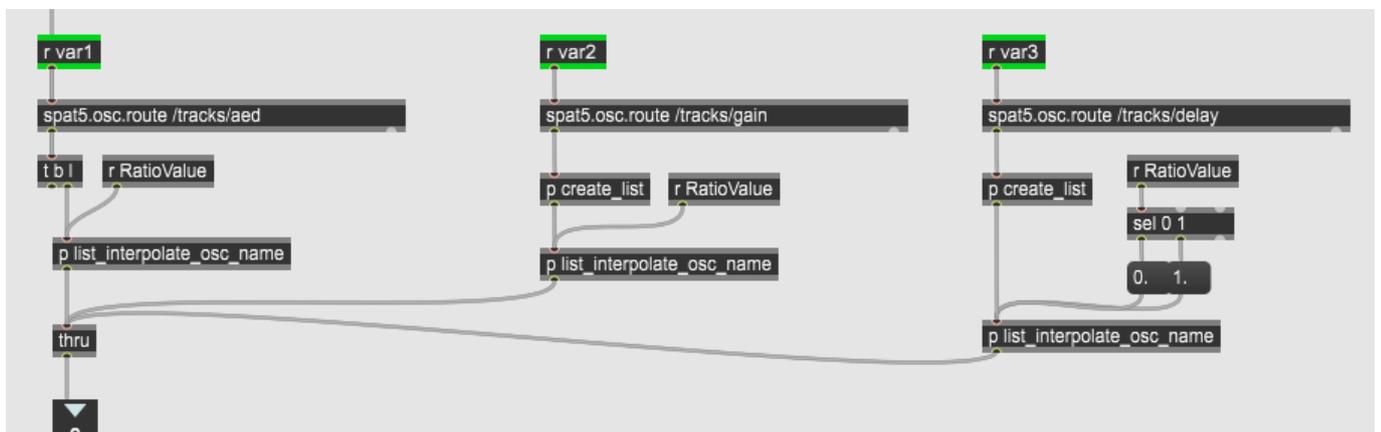


FIGURE 3.43 – Utilisation de list-interpolate du CNMAT

33. Center for New Music and Audio Technologies : c'est un centre de recherche pluridisciplinaire du département de musique de l'université de Berkeley en Californie

Grâce aux possibilités de routage d'informations du format de communication OSC je distribue les informations de la *Qlist* aux différents objets. Les informations de positions iront au *spat.pan~*, les informations de retards au *spat.delay~*, etc.

### 3.5.4 Seconde approche perceptive et séparation des fonctions

#### 3.5.4.1 Présentation du projet à la Lange Nacht

Fin décembre 2019 s'organisait à la ZHdK le festival de la *Lange Nacht* (Longue Nuit), un festival dédié aux musiciens et compositeurs du conservatoire mettant en avant la musique électroacoustique et contemporaine. Ce fut donc l'occasion de faire une présentation du travail de la pièce de ce mémoire. J'ai ainsi pu faire écouter au public présent dans la salle ambisonique (ordre 4) de l'université, un enregistrement de la première partie avec rendu de l'acoustique. J'ai ensuite pu leur présenter la création de la pièce et notamment la création du système de simulation d'acoustique. Nous avons pu écouter ensemble la réaction de différentes salles simulées à l'excitation de ma voix.



FIGURE 3.44 – Salle de concert ambisonique d'ordre 4 de la ZHdK, acoustique variable à l'aide de rideaux absorbant qui peuvent être tendus sur les quatre faces.

Profitons de l'évocation de cet événement pour présenter en profondeur le fonctionnement de la seconde approche de rendu d'acoustique. Comme nous l'avons présenté plus tôt, une acoustique est constituée de quatre groupes d'objets sonores, le son direct et les premières réflexions, réflexions denses, réflexions tardives. Une implémentation dans une réverbération algorithmique en stéréo est présentée ci-dessous avec l'*Ircamverb* (Figure 3.45).

Chaque position est alors localisée entre deux extrêmes : l'enceinte gauche et l'enceinte droite. Dans notre approche nous spatialisons en trois dimensions, d'une source sonore nous faisons une première division entre un son direct qui va être spatialiser, traiter, et la création de premières réflexions à partir de celui-ci.

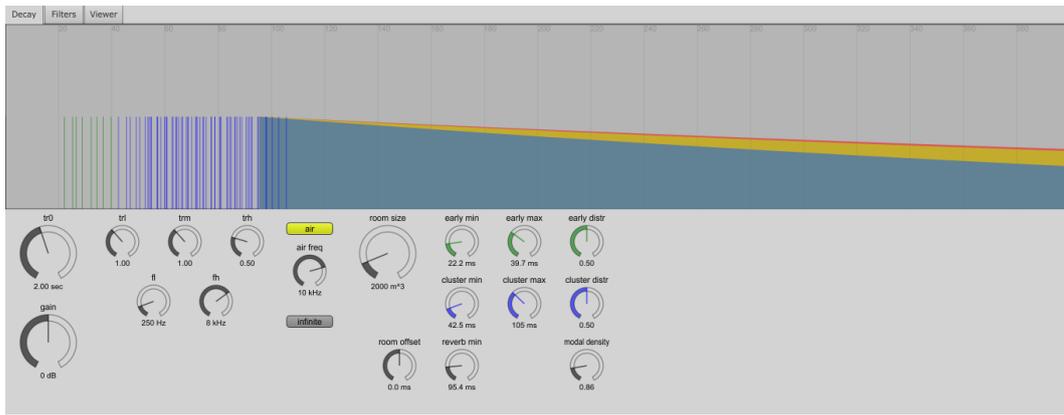


FIGURE 3.45 – Exemple d'implémentation stéréophonique avec *ircamverb*

Elles seront elles aussi retardées, filtrées, atténuées puis spatialisées en fonction de positions dans l'espace déterminées. Ces premières réflexions iront alimenter un générateur de réflexions denses (*cluster*) qui suivent ensuite des traitements similaires. Pour finir ces dernières sont envoyés dans un FDN (ici *spat.reverb~*) qui suit les mêmes traitements (voir Figure 3.46)

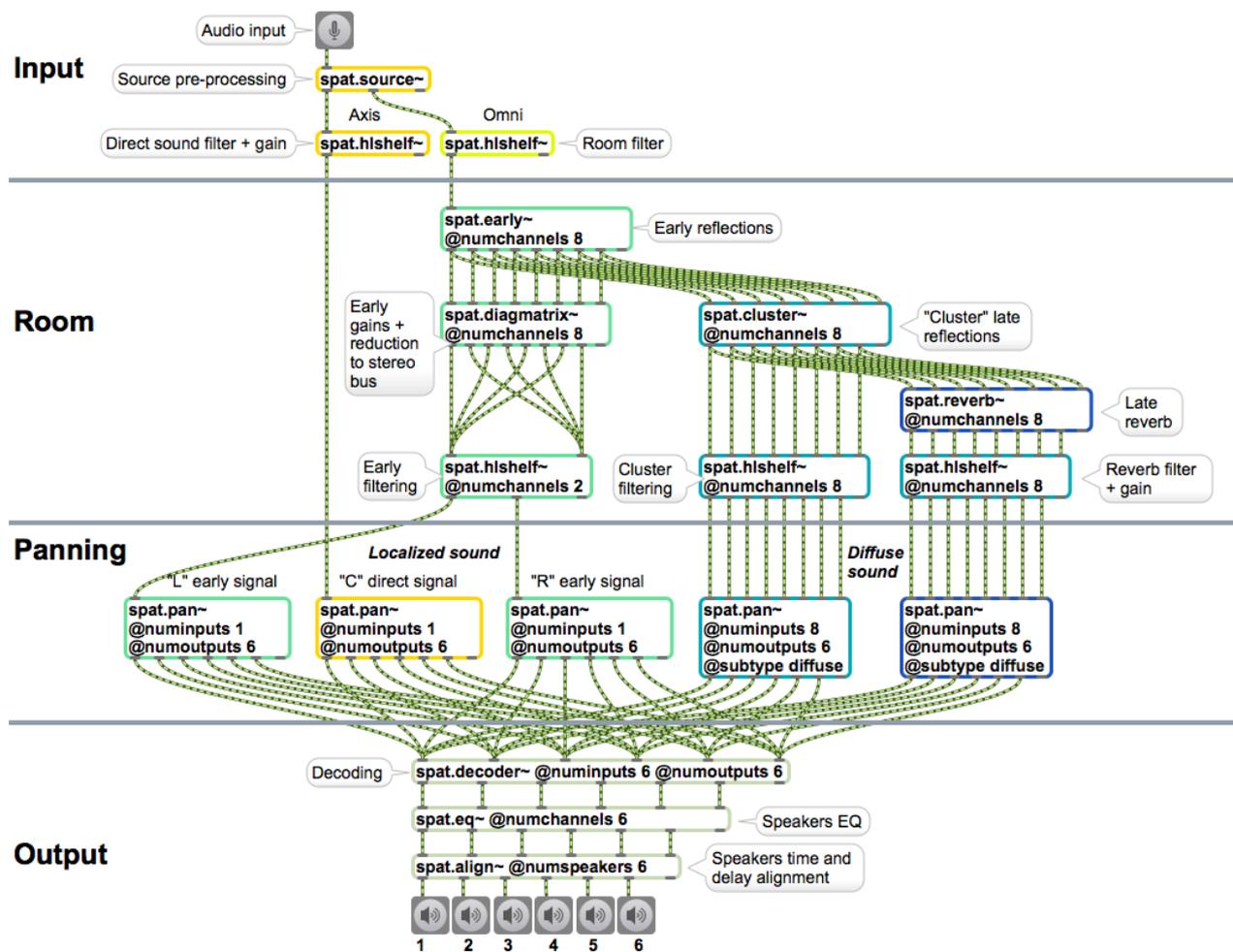


FIGURE 3.46 – Schéma simplifié d'implémentation 3D, le système n'est ici représenté que pour une seule source, avec 8 canaux de bus internes (8 early, 8 cluster, 8 late). Certains traitements ne sont ici pas représentés tel que les retards, l'atténuation des cluster et late, etc. ne sont pas représenté ni les signaux de contrôle des données.

Exemple de positions de réflexions pour une cathédrale : Rouge : son direct, orange : premières réflexions, vert : cluster, bleu : réflexions tardives

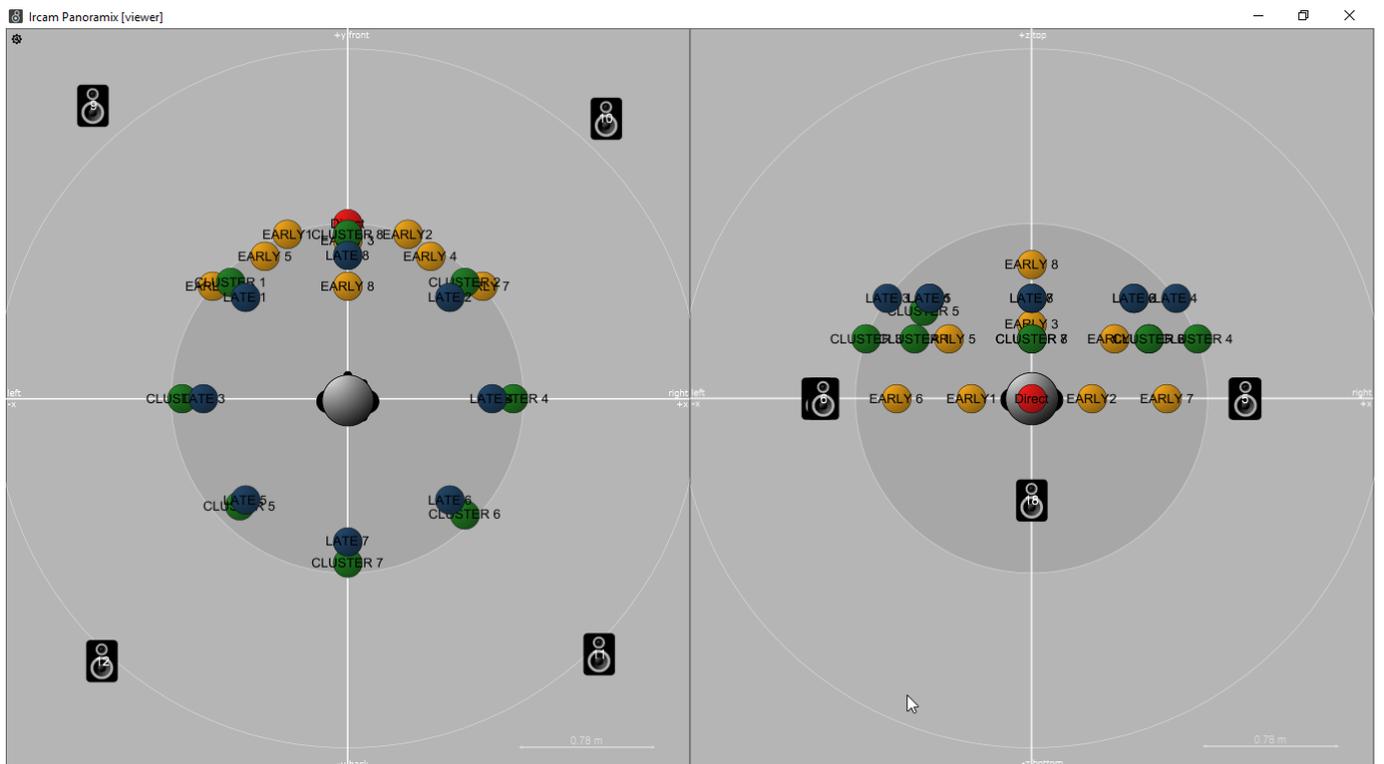


FIGURE 3.47 – Vue du Spat5.viewer, à gauche : vue du dessus, à droite : vue de derrière. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives

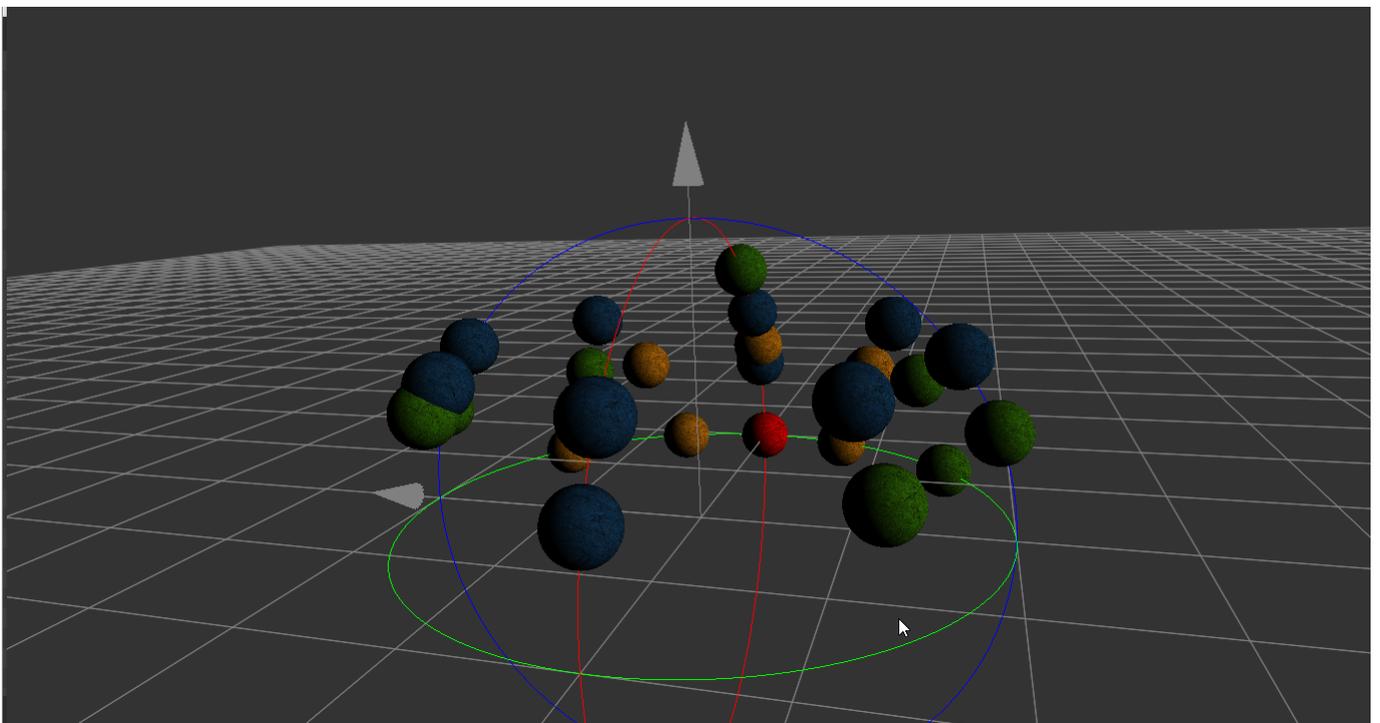


FIGURE 3.48 – Vue en 3D des sources dans l'espace. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives

### 3.5.4.2 Implémentation dans Max

L'implémentation proposée ici dans Max a été inspiré du tutoriel de la librairie Spat4 "Patching Spat" réalisé par Rama Gottfried et Markus Noisternig. Ci-dessous un exemple avec trois sources sonores. Cette fois les trois sources sont envoyées dans un modèle "d'image-source". C'est à l'intérieur de ce patch que s'effectuent l'ensemble des opérations de traitements du signal. En sortie nous avons trois flux ambisoniques ; son direct, early-cluster, late. On peut alors régler l'équilibre entre chaque ensemble. Les trois flux sont ensuite sommés. Des traitements sur l'ensemble du flux peuvent être appliqués (ici le focus). Pour finir le flux ambisonique est envoyé dans un patch s'occupant de la décomposition, soit sur enceinte, soit en binaural. Nous voyons que nous pouvons notamment gérer la position des haut-parleurs (*p speakerpositions*) ou activer des optimisations (ici *None*, c'est-à-dire optimisation "direct").

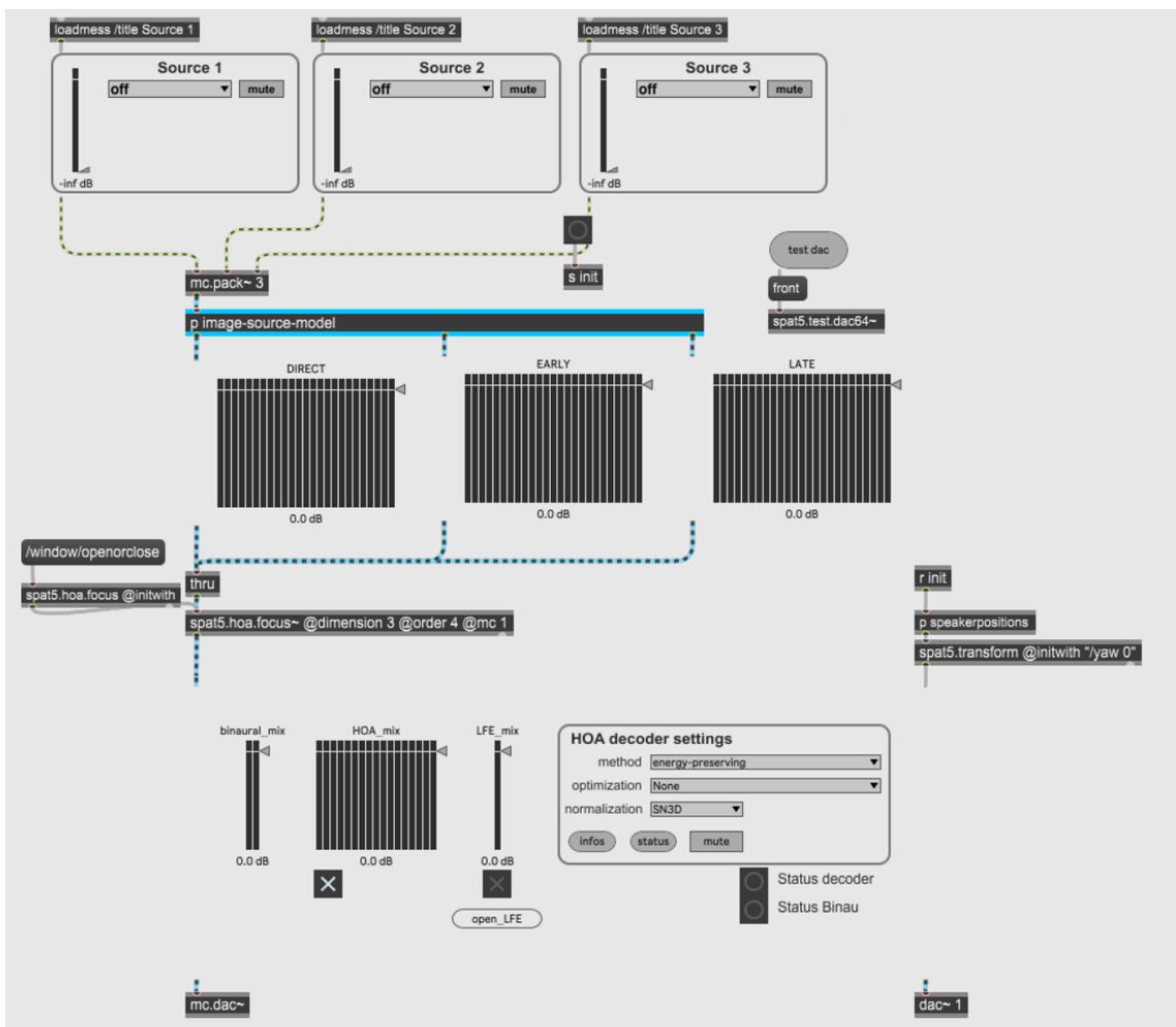


FIGURE 3.49 – Deuxième approche sur la base du tutoriel de la banque Spat4 "Patching Spat", vue principale

Ci-dessous la vue intérieure du modèle d'image source. Les sources sont envoyées dans un *patch mc.poly~* qui permet de faire des calculs audio en utilisant du parallélisme (*multithreading*). En sortie de ce *patch* sortent les trois grands ensembles (ici avec les *mc.receive~*). L'ensemble des données sont ici contrôlées via le canal "*r img-msgs*" et sont propagées via OSC.

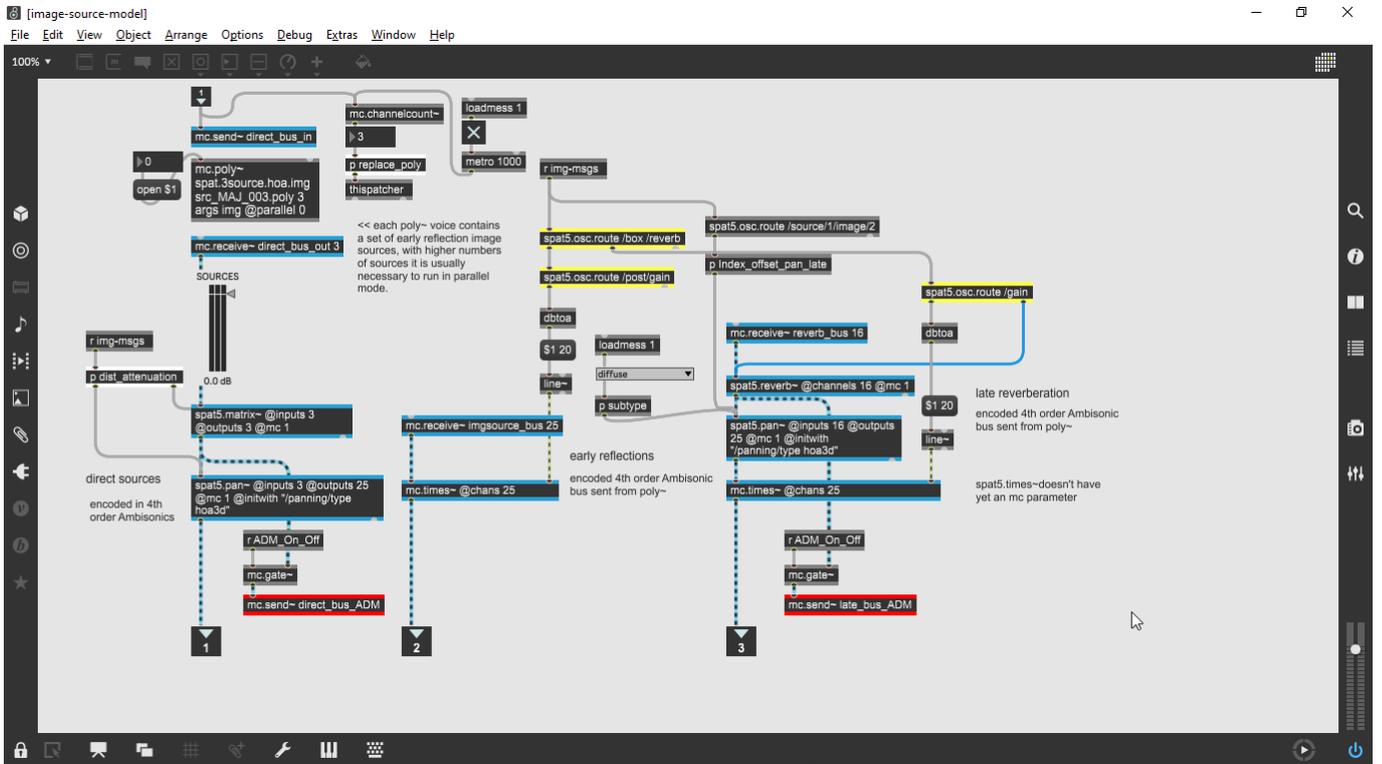


FIGURE 3.50 – Vue à l'intérieur du modèle d'image source. Deuxième approche sur la base du tutoriel de la banque Spat4 "Patching Spat"

### 3.5.5 Hans Tutschku : *Remembering from Japan*

En Janvier 2020, le compositeur Hans Tutschku fit une résidence au laboratoire de recherche sonore de la ZHdK - l'ICST - à l'occasion de la représentation de sa pièce *pressure – divided* pour violoncelle et électronique temps réel. J'ai beaucoup apprécié la qualité sonore de sa pièce et je me suis rendu à une conférence qu'il réalisait sur le sujet des différentes formes de polyphonies dans une écriture de l'espace. Il abordait au cours de cette conférence beaucoup de sujets évoqués dans ce mémoire. Nous avons discuté après la conférence, je lui demandais des conseils pour la réalisation de la pièce de ce mémoire et il me proposa amicalement de la lui présenter. J'ai donc pu lui montrer mes premiers écrits pour flûte ainsi que le travail d'acoustique que je développais à côté. Il fut très intéressé par mon projet, il travaillait sur la suite de sa pièce *Remembering Japan* et se trouvait dans des réflexions similaires. Nous avons donc passé le reste de sa semaine de résidence à travailler ensemble sur le développement d'outils pour nos deux pièces.

Pour sa pièce *Remembering Japan*, Hans Tutschku avait enregistré des ambiances stéréophoniques au Japon durant 6 mois. Dans la première partie de sa pièce acousmatique il avait re-composé ces ambiances dans un système multicanal point à point et souhaitait pour la suite aborder une approche objet. Deux principaux traitements l'intéressait :

1. La création de nuages de sons à partir des deux signaux des ambiances. Là où Natasha Barrett avait pour cela travaillé sur la décorrélation des sources, Tutschku lui utilisait un programme d'intelligence artificielle qui divisait les deux canaux en 16 canaux. L'intelligence artificielle (IA) essayait de repérer dans les sons des groupes, et divisait ainsi chaque canal en 8 canaux qui, s'ils étaient recombinaés, formaient à nouveau le signal original. Ainsi une ambiance qui aurait parmi différents éléments sonores un *rumble* basse fréquence, et des cris d'enfants aurait pu voir ces entités divisées en deux groupes distincts par l'intelligence artificielle. Cependant nous ne pouvions jamais savoir à l'avance comment l'IA allait définir ces groupes.
2. Une fois ces groupes effectués Hans Tutschku travaillait sur la mise en espace de ces sons via des algorithmes de *boids*. Il avait ainsi constitué deux "*flocs*" (deux nuées) de huit oiseaux avec l'algorithme de la librairie *Dada* dans Max et souhaitait les placer dans des acoustiques.

Notre travail commun fut donc d'arriver à créer 16 salles indépendantes dans lesquelles nous pourrions placer les "oiseaux" sonores. Pour cela nous partîmes de la seconde approche de ma simulation d'acoustique pour construire une troisième approche plus complexe. En effet jusqu'à maintenant notre approche n'était pas interactive, dans le sens où nous ne pouvions pas déplacer une source et entendre la réaction de l'acoustique : je devais envoyer la position de chaque source via le conducteur *Qlist* présenté plus tôt. Cette troisième approche est donc constituée de 3 programmes dans une structure similaire à celle du projet *EVERTims* ; une interface graphique de contrôle, un programme de modélisation de l'acoustique et un moteur d'auralisation.

### 3.5.5.1 Une interface de contrôle



FIGURE 3.51 – Interface de contrôle du simulateur d'acoustique "perceptif", en haut à gauche la position des "oiseaux", à sa droite les contrôles de l'algorithme de *boids*, tout à droite un contrôle du décalage du centre des nuées d'oiseaux, en dessous les potentiomètres rotatifs et faders de contrôle de l'acoustique (temps de réverbération, équilibre des groupes, etc.)

Ce premier programme est l'interface utilisateur principale, on y trouve la position des oiseaux, le contrôle de l'algorithme de *boids*, des contrôles de l'acoustique comme le temps de réverbération, les niveaux des différents groupes, la position en élévation des oiseaux, le contrôle de l'anisotropie de l'acoustique. Nous décidons de séparer la gestion des données et la gestion de l'audio sur deux ordinateurs distincts qui communiquent en OSC. Sur le premier ordinateur on trouve donc l'interface graphique et le modélisateur d'acoustique.

### 3.5.5.2 Un modélisateur d'acoustique

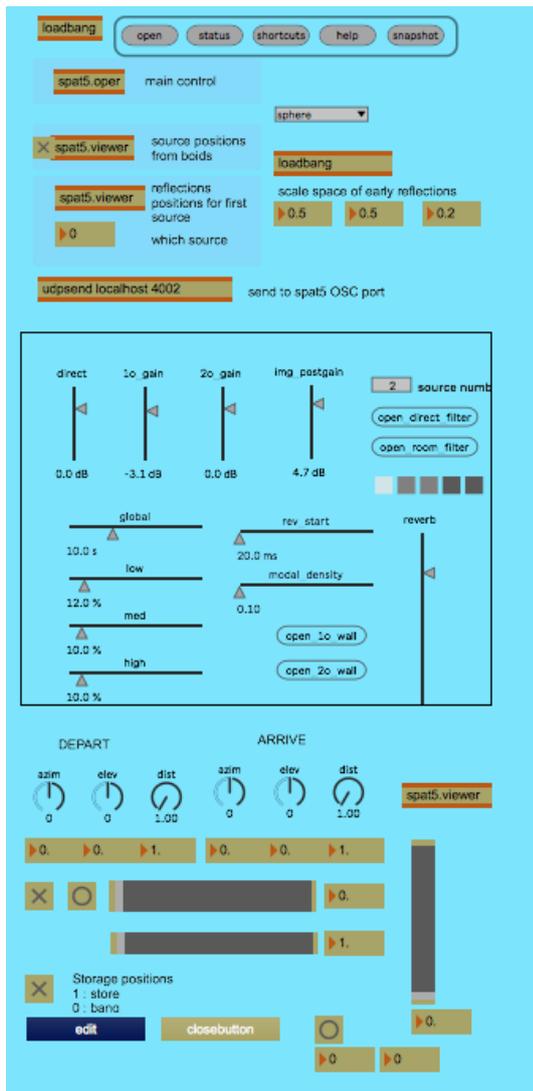


FIGURE 3.52 – Interface du modélisateur, on peut gérer ici des paramètres plus précis de l'acoustique comme le temps de réverbération par bande de fréquence. Contrôler les formes des premières réflexions, générer les spirales.

Le second programme est l'équivalent de l'algorithme de ray-tracing de EVERTims mais pour une approche "perceptive". En effet nous voulions que l'acoustique puissent réagir au déplacement des oiseaux, le modélisateur reçoit donc les 16 positions des oiseaux et va générer les données de 16 premières réflexions par oiseaux (soit 256 premières réflexions). Il générera leurs positions, leurs délais et atténuations de propagation. Cela générera des nuages de points autour du son direct. Les premières réflexions pourront notamment former une sphère, une demi-sphère, un couloir ou encore une spirale autour de la position du son direct. Pour visualiser ces formes voir la Figure 3.54 qui représentent les positions des premières réflexions dans les quatre modes cités. La position de la source de référence est celle de la source 1 de la Figure 3.53.

Ce programme utilisera le modèle perceptif du *spat.oper*, que nous avons déjà présenté plus haut. Les 16 sources directes lorsqu'elles se déplaceront, impliqueront des modifications de timbre, de niveaux aux différents éléments de leur acoustiques respectives (direct, early, cluster, late).

Le *spat.oper* n'est cependant pas connecté à l'objet *spat.spat~*, qui est le moteur de spatialisation qui lui est normalement associé. Nous transmettons à la place les paramètres perceptifs générés par le *spat.oper* directement à notre propre moteur d'auralisation.

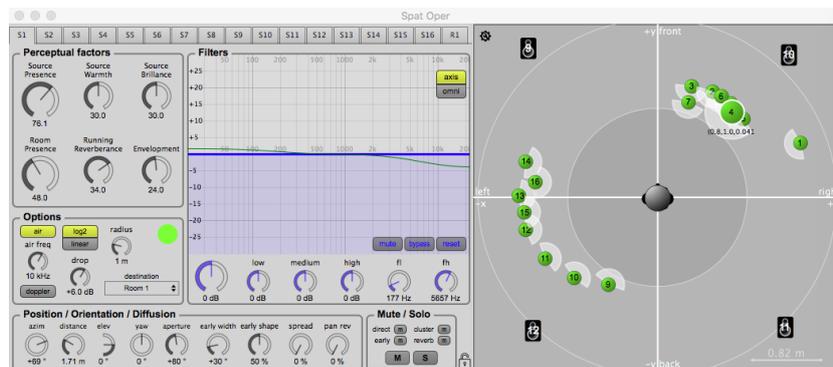


FIGURE 3.53 – Exemple de position des deux nuées d'oiseaux dans le *spat.oper*

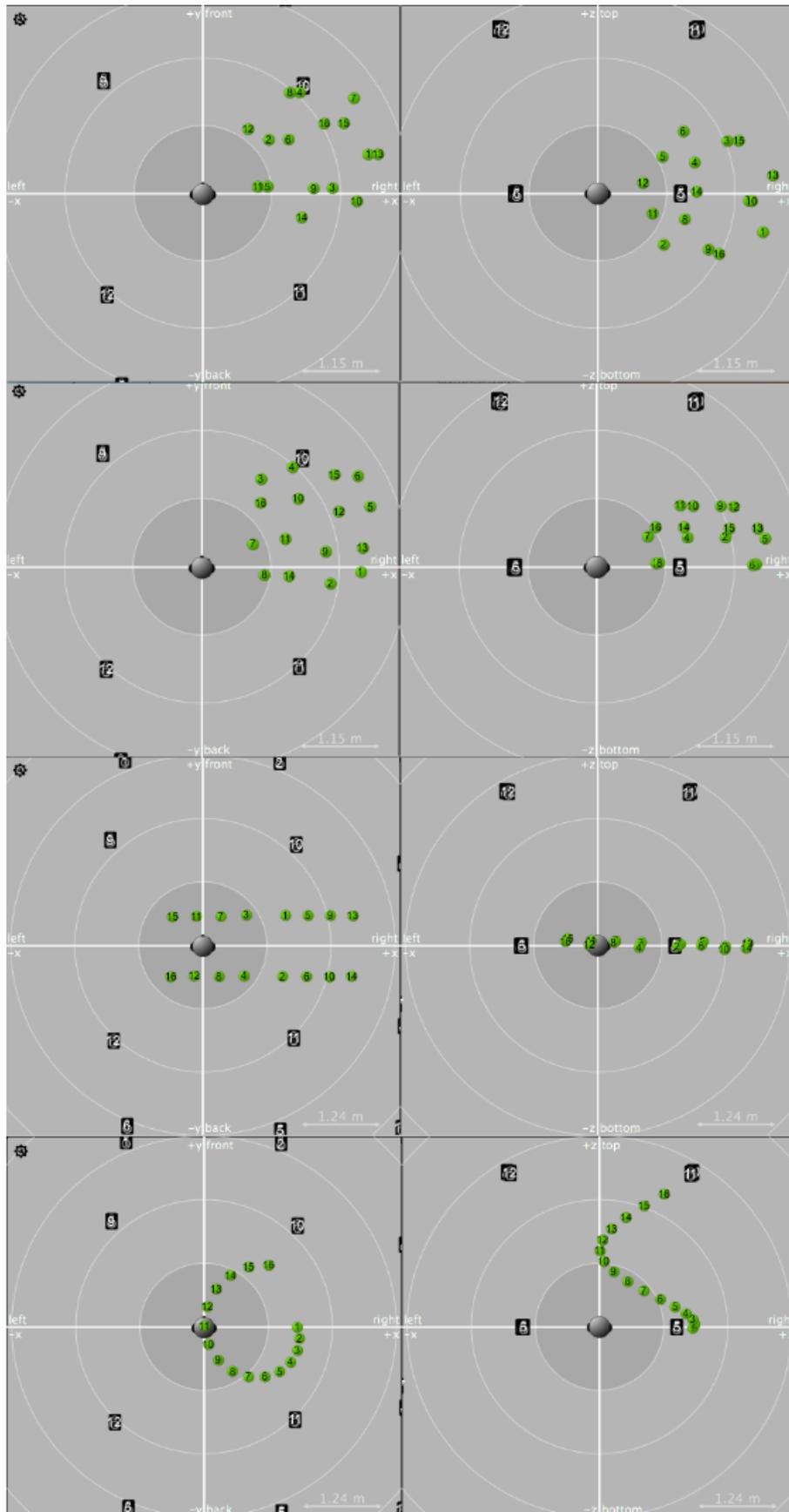


FIGURE 3.54 – Positions des premières réflexions de la source 1 de la Figure 3.53 suivant différentes formes. De haut en bas : modèle de sphère, de demi-sphère, de couloir, de spirale.

### 3.5.5.3 Un moteur d'auralisation

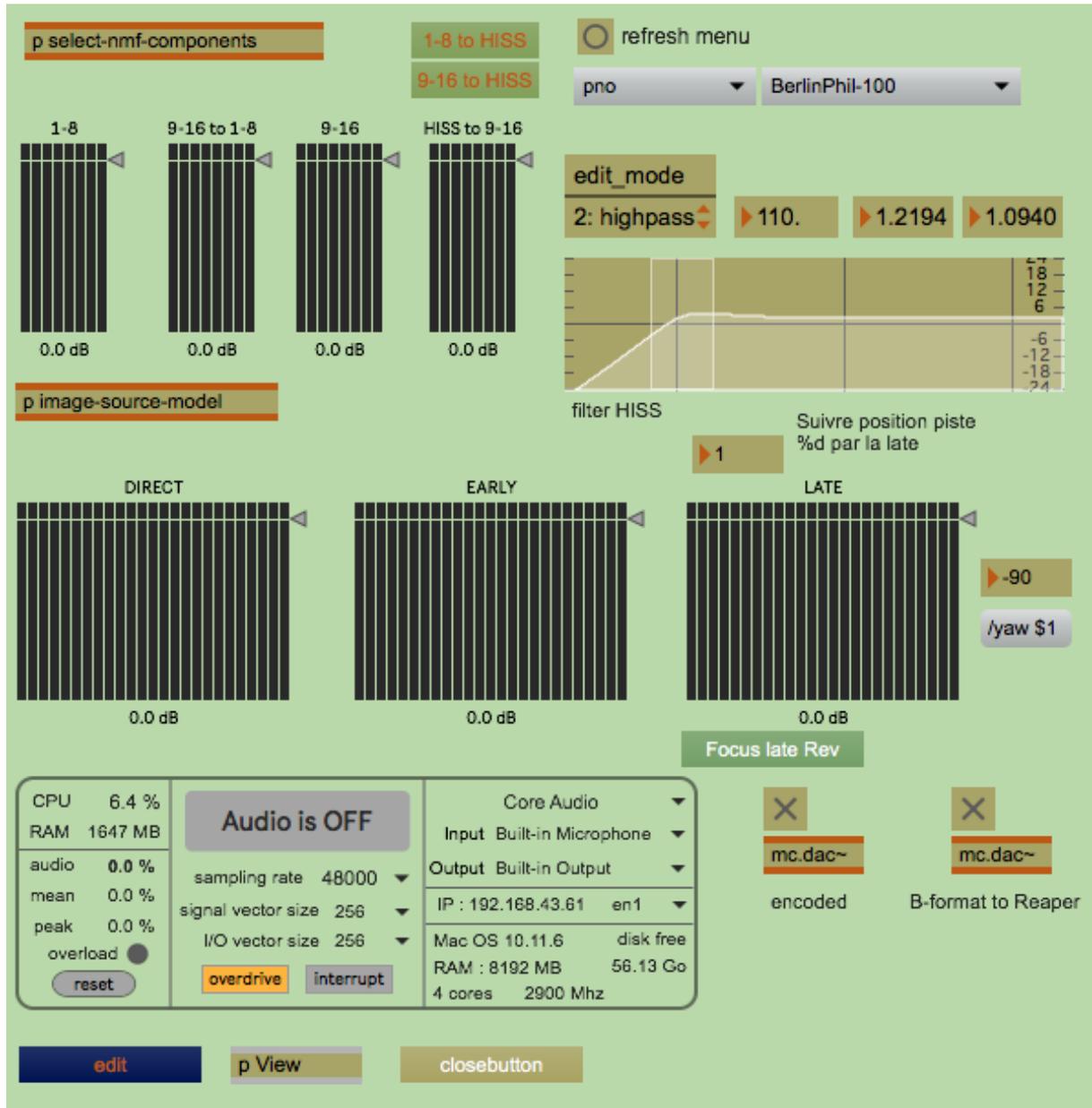


FIGURE 3.55 – Vue en mode représentation du moteur d'auralisation.

Le principal changement dans le moteur d'auralisation est le nombre de sources traitées, passant de 3 sons directs à 16. Il y a désormais plus de 300 réflexions à spatialiser (304 précisément). Pour cela le *mc.poly~* n'a non plus 3 instances mais 16. Nous utilisons pour le moteur d'auralisation un ordinateur avec un processeur i9 qui contient 24 coeurs. Cela nous permet de paralléliser chaque acoustique sur un coeur différent. Les premières réflexions des 16 "oiseaux" sont, pour le moment, mises en commun avant d'être envoyées vers le FDN. Deux instances de réverbération tardives tournent en parallèle : une spatialisant un champ diffus homogène et une seconde où les réflexions tardives sont positionnées autour du barycentre des deux nuées d'oiseaux. Ainsi en effectuant un ratio entre les deux nous pouvons gérer l'anisotropie de notre espace. Lorsque ce paramètre est à 0, le champ diffus est totalement homogène. Lorsqu'il est à 1 le champ diffus est orienté vers la position du barycentre des deux nuées. Nous avons implémenté une autre méthode pour orienter le champ diffus qui donne

des résultats perceptifs différents : un algorithme de *beam forming* (*spat.hoa.focus~*) est placé en sortie de la réverbération diffuse et permet de sélectionner des zones du champ diffus.

## **3.6 Composition Scénographique**

Les parties ci-dessous seront complétées une fois la représentation de la partie pratique réalisée. L'écriture de cette pièce n'est pas encore terminée et nous ne savons pour le moment pas encore où la représentation pourra avoir lieu. Trois possibilités d'espaces s'offrent à nous : un studio ambisonique à l'IRCAM, un studio ambisonique à la MSH ou le studio ambisonique de la société *Euphonia*.

Une représentation à la *Muse en circuit* avait été organisée pour Juin. Le confinement a malheureusement annulé cette représentation. Un dossier technique avait été réalisé pour cet espace, il sera joint au mail délivrant ce premier rendu du mémoire.

### **3.6.1 La muse en Circuit**

### **3.6.2 Choix de Lumières**

### **3.6.3 Décors**

## **3.7 Production**

### **3.7.1 Préparation Matériel & Montage**

### **3.7.2 Calage système et modifications**

### **3.7.3 Optimisations à la salle**

### **3.7.4 Répétition**

### **3.7.5 Concert**

## **3.8 Retours & Expérience**

### **3.8.1 Retours personnels**

### **3.8.2 Retours du public**

### **3.8.3 Perspectives ?**

## Chapitre 4

## Conclusion

# Annexes

# Annexe 1

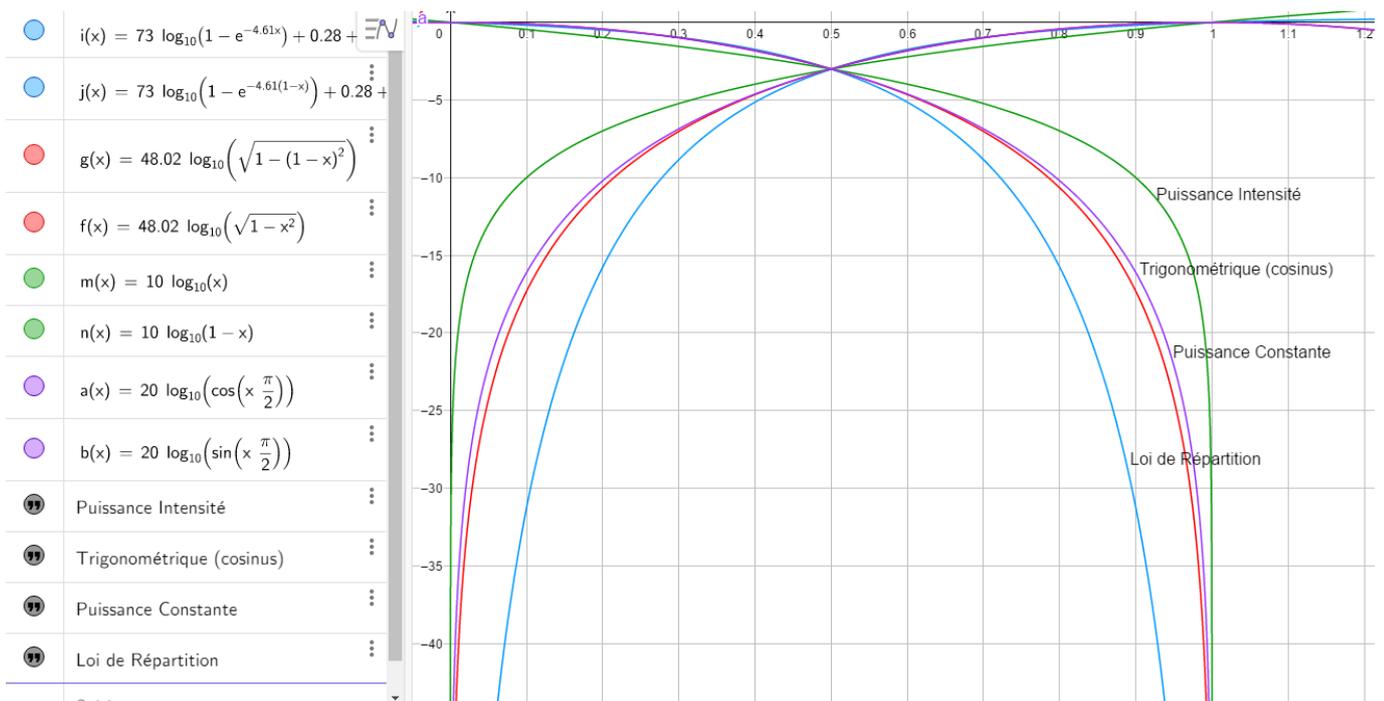


FIGURE 4.1 – Lois de panoramisation stéréophonique en différence d'intensité

[Retour à la lecture](#)

# Annexe 2

**L'oreille externe** est constituée du pavillon, de la conque et du conduit auditif. Le pavillon joue à la fois un rôle d'amplification, d'adaptation d'impédance et de focalisation du son. Le diagramme de directivité de notre oreille s'apparente à un hypo-cardioïde. De part sa forme le pavillon réalise un filtrage spectral en fonction de la position de la source qui aide à localiser l'avant de l'arrière, le haut du bas - accentuation des hautes fréquences par exemple.

La conque a un effet d'amplification et résonnera autour de 5000 Hz et le conduit auditif quant à lui sert à conduire l'onde sonore jusqu'au tympan. Comme tout tube avec une embouchure bouchée il aura tendance à être résonnant à la fréquence  $f = c/(4 * L)$ , 3400 Hz en moyenne ( $L = 25$  mm en moyenne) qui correspond d'ailleurs à la zone de meilleur perception de l'oreille humaine. Ce qui rend l'être humain particulièrement sensible à la bande 2-5 kHz qui se trouve être directement reliée à la perception de la parole.

**L'oreille moyenne** réalise une conversion de l'onde acoustique en une vibration mécanique. Le tympan reçoit l'onde acoustique, en se déformant il déplace le marteau qui vient "taper" le bloc enclume étrier. Le bloc oreille externe, oreille moyenne fonctionne donc comme une sorte de phonographe où le pavillon serait l'oreille externe et le système membrane aiguille serait l'oreille moyenne. Les osselets (marteau, enclume, étrier) ont aussi pour rôle d'effectuer l'adaptation d'impédance avec le milieu liquide de l'oreille interne; l'étrier transmet la vibration mécanique au milieu liquide de la cochlée au travers de la fenêtre ovale. La trompe d'eustache

permet de réguler la pression statique du côté de l'oreille moyenne. L'objectif étant que la pression soit la même que dans le conduit auditif afin que le tympan soit à la position de repos lorsqu'il n'y a pas d'ondes sonores. L'oreille moyenne a aussi un rôle de protection de l'oreille interne grâce au "réflexe stapédien", le muscle stapédien s'active et bloque l'osselet lorsqu'un son est jugé trop fort par le tronc cérébral via une boucle de rétroaction.

Ci dessous une représentation de l'influence spectrale des oreilles externes et moyennes.

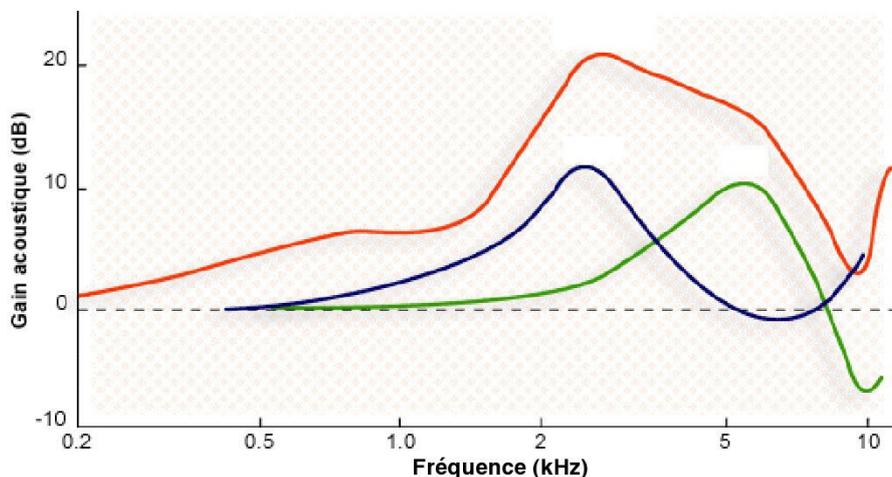


FIGURE 4.2 – Fonction de transfert de l'oreille moyenne et externe

La courbe en bleu représente l'amplification due au conduit auditif (maximum autour de 2500 Hz), la courbe en vert l'amplification due au pavillon et à la conque (maximum autour de 5000 Hz), et la courbe en rouge est l'amplification totale due à l'oreille externe et moyenne. On peut constater que l'essentiel de la sensibilité auditive s'explique grâce aux phénomènes d'amplifications de l'oreille externe, puisque la courbe rouge est très proche de la somme des courbes bleues et vertes. Le reste provient de phénomènes dans l'oreille moyenne et interne.

**Retour à la lecture**

**Link : Cours de l'université du mans**

## Annexe 3

**Suite oreille interne.**

Entre les deux liquides règne une tension électrique qui constitue une source de courant, faisant du limaçon (cochlée) une pile bioélectrique qui fournit l'énergie électrique nécessaire à la réception et à la retransmission des stimuli. La membrane basilaire (MB) est connectée à la membrane tectorale (MT), celle-ci assure plusieurs rôles critiques dans l'audition en plus de la liaison avec la MB : elle sert de support à l'onde de propagation, et aide à la gestion temporelle des boucles de rétroaction de la cochlée (RICHARDSON, LUKASHKIN et RUSSEL 2008). Le stimuli acoustique provoque la propagation d'une onde dans le fluide qui va venir déplacer les cellules ciliées, et ainsi permettre l'encodage de la fréquence, l'amplitude et la phase du stimuli.

Retour à la lecture

## Annexe 5

Les harmoniques sphériques sont des fonctions qui vérifient l'équation de Laplace, c'est-à-dire que leur laplacien est nul.

$$(\Delta f)(x) = 0$$

Le laplacien est l'opérateur qui relie la description statique d'un champ aux effets dynamiques dans l'espace et le temps. Il est l'extension en trois dimensions de ce qu'est la dérivée seconde en une dimension, c'est à dire que la somme de l'accélération suivant les trois axes est nulle. On se place dans un système en coordonnées sphériques. C'est-à-dire que chaque point est défini par :

- $r$ , sa distance au centre.
- $\theta$ , l'angle représentant la longitude
- $\psi$ , l'angle zénital représentant la colatitude

Dans le cas des harmoniques circulaires, l'angle zénital n'est pas pris en compte puisque l'on travaille dans un plan.

En coordonnées sphériques les solutions de l'équation de propagation des ondes peuvent être exprimées à partir des fonctions de Bessel et des harmoniques sphériques. On a ainsi :

$$p(r, \theta, \psi, k) = \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) j_m^m j_m(kr) \sum B_{mn}^{\sigma} Y_{mn}^{\sigma}(\theta_r, \psi_r)$$

avec  $j_m(kr)$  les fonctions de Bessel sphériques et  $Y_{mn}^{\sigma}$  les harmoniques sphériques.

Pour des raisons de communications et d'échanges entre chercheurs, concepteurs et utilisateurs il a été nécessaire de mettre en place différents formats de l'ambisonie qu'il est nécessaire de comprendre et que nous allons vous détailler ici.

**A-Format :** C'est le format de captation du champ sonore en ambisonie d'ordre 1, format standard des microphones dit « ambisoniques ». Ces microphones enregistrent donc 4 signaux nécessaires pour avoir accès aux signaux des harmoniques sphériques de rang 0 et de rang 1. Théoriquement il faudrait au même point une capsule omni-directionnel et trois capsules bi-directionnels formant un repère orthonormé ce qui n'est pas réalisable. En pratique les constructeurs utiliseront par exemple 4 capsules cardioïdes non coïncidentes placées sur les coins d'un cube, ce qui explique le besoin d'avoir un format intermédiaire dédié à l'enregistrement que l'on devra transformer en format ambisonique classique, appelé format B (voir ci-dessous). Il existe 2 types de format A qui dépendent du placement des 4 capsules sur le cube :

- Type I pour les microphones de type Soundfield et Core-Sound
- Type II pour les microphones de type DPA-4

**B-Format :**

Le format B est le nom du format classique de l'ambisonique en harmoniques sphériques et circulaires. Nous traiterons ci-dessous le cas de la transformation d'un A-format Type I vers le B-format. Pour au final avoir une prise de son en harmoniques sphériques de rang 1 nous cherchons à avoir 4 signaux :

- W : la Puissance qui correspond à l'harmonique de rang 0, équivalent à une capsule omnidirectionnelle
- X,Y,Z : pression selon les axes x,y,z qui correspondent aux trois harmoniques de rangs 1, équivalents à des capsules bi-directionnelles selon les trois axes.

Pour une prise de son en Type I la disposition des quatre capsules cardioïde sur les coins d'un cube est ainsi :

1. : FUL (Front Up Left)
2. : FDR (Front Down Right)
3. : BDL (Bottom Down Left)
4. : BUR (Bottom Up Right)

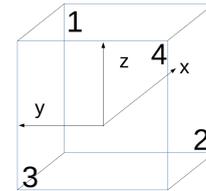


FIGURE 4.3 – Position des capsules et des axes dans un cube

Pour s'approcher des signaux W,X,Y,Z on pourra, en première approche, appliquer les traitements suivant.

- $W' = 1+2+3+4$  → simulation du signal omnidirectionnel en sommant les 4 cardioïdes.
- $X' = 1+2-3-4$  → simulation d'un bi-directionnel suivant x, on somme les deux signaux cardioïdes de l'avant suivant x et on soustrait ceux de l'arrière de la même manière pour les autres axes :  $Y' = 1-2+3-4$   $Z' = 1-2-3+4$

Ensuite pour avoir les canaux W,X,Y,Z il va falloir appliqué des filtres et gains aux signaux  $W',X',Y',Z'$  en fonction des caractéristiques spatiales du microphone. Ex :  $F_w$  fonction de transfert  $W' * F_w = W$

$$F_W = \frac{1 + j\omega r/c - \frac{1}{3}(\omega r/c)^2}{1 + \frac{1}{3}j\omega r/c}$$

$F_{x,y,z}$  fonction de transfert à appliqués aux signaux  $X',Y',Z'$  pour obtenir X,Y,Z.

$$F_{XYZ} = \sqrt{6} \frac{1 + \frac{1}{3}j\omega r/c - \frac{1}{3}(\omega r/c)^2}{1 + \frac{1}{3}j\omega r/c}$$

**Retour à la lecture**

## Annexe 6

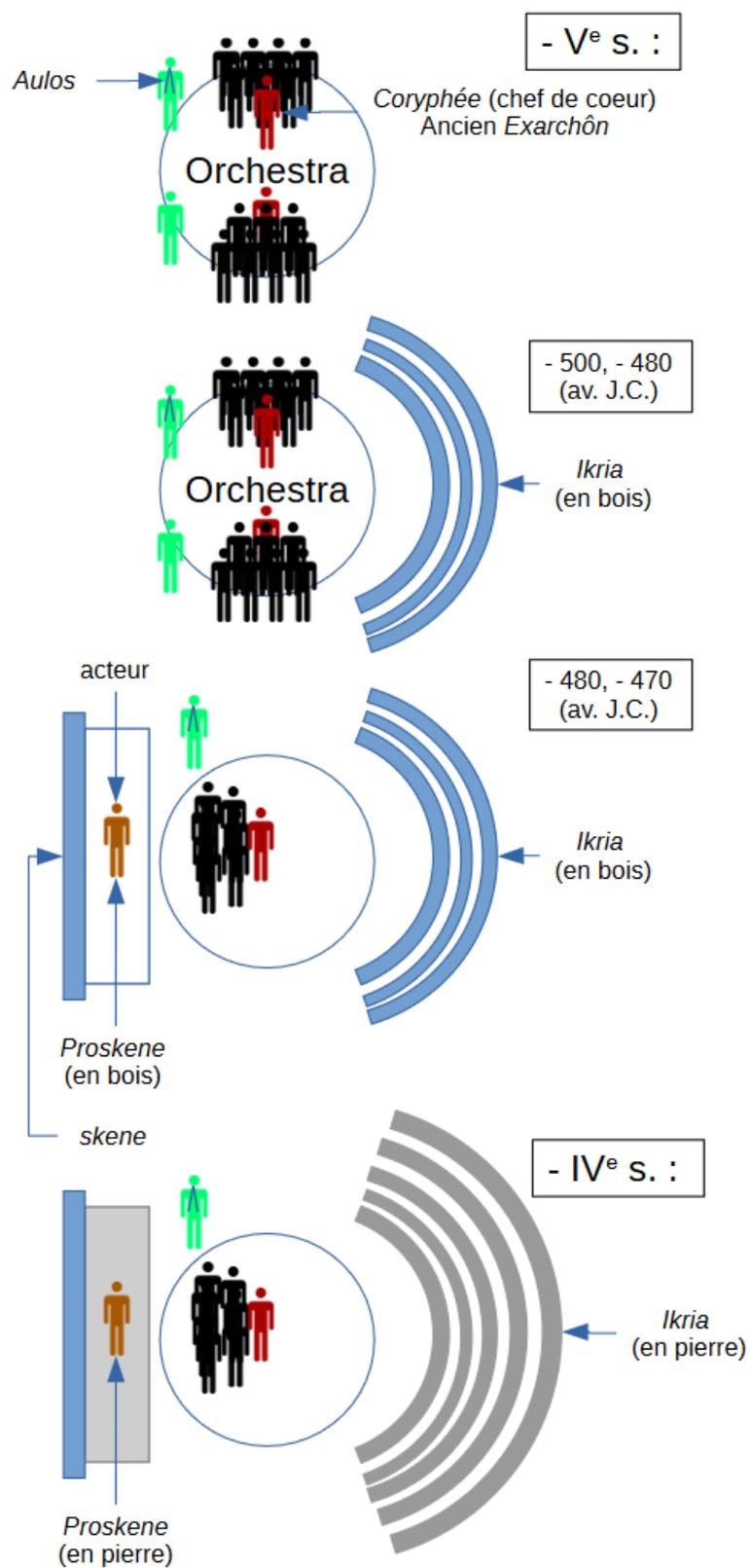


FIGURE 4.4 – Schéma des étapes de l'invention du théâtre à Athènes

Retour à la lecture

# Annexe 7

Revenons à notre égalité entre les paramètres du son. Pour Stockhausen, pour que celle-ci soit mise en pratique il faut que l'on puisse avoir la même discrimination sur tous les éléments et par la même occasion de pouvoir tous les exprimer de manière absolue. Le compositeur nous propose de parcourir chacun des paramètres à l'aide d'un exemple. Il choisit un rapport 3 :1. Si l'on veut avoir l'égalité alors on doit pouvoir exprimer ce rapport sur les 5 paramètres. Sachant que notre notation musicale jusqu'alors mettait en avant les hauteurs et le rythme il faudra sûrement inventer de nouvelles notations.

- Tout d'abord la Hauteur ; le rapport 3 :1 correspond à longueur d'onde trois fois plus petite donc à une quinte plus une octave au dessus.
- La durée ; un tiers de la durée précédente, par exemple le rapport entre une noire pointée et une croche. Cela implique un bon choix de métrique et de tempo, car pour le moment tous les intervalles de durées sont écrits relativement à ces deux caractéristiques. Pour une valeur de métrique et de tempo donnés on se retrouve avec une valeur absolue. Une autre possibilité serait de d'écrire 1s et 1/3s par exemple.
- Le timbre ; Le rapport de 3 :1 est difficile à appliquer au timbre puisque celui-ci n'est pas une échelle unidimensionnelle. Stockhausen interprète ce rapport 3 :1 sur le timbre comme une transposition de tout le timbre d'une octave et une quinte comme pour la fréquence. Ceci est cependant impossible pour un instrument acoustique, nous dit Stockhausen, nous n'avons pas la même liberté d'interprétation du timbre que de la fréquence. Si une guitare a une résonance autour de 80 Hz de fait de la géométrie de sa caisse de résonance, alors cette résonance ne sera pas transposée en fonction de la note jouée. On en vient à la nécessité d'une amplification et d'utilisation d'électronique pour la musique instrumentale.
- La dynamique (sonie). Tout comme pour la durée, dans la notation classique la dynamique s'écrit sur une échelle relatif mais cette fois sans référence. Un rapport de 3 :1 devient alors un rapport de 10 dB. Étant donné les intervalles utilisées dans la notation classique correspondent en moyenne à un intervalle de 6dB, nous dit Stockhausen. Une première approche pourrait être d'imposer disons un pianissimo à pp = 70 dB à 1 mètre ainsi : pp = 70 ; p = 76 ; mp = 82 mf = 88 ; f = 94 ; ff = 100 . Ce qui demanderait déjà aux interprètes de prendre l'habitude de connaître son niveau absolu de jeu et de travailler la régularité de ses intervalles. Néanmoins malgré cela on se retrouve avec un échantillonnage de seulement 6 niveaux et donc très loin de la discrimination des hauteurs, notre interval de 10 dB n'est alors pas représenté. Certains ont ainsi pensé à rajouter des ppp ou fff mais cela n'est pas envisageable si l'on veut atteindre 80 degrés. Pour la musique électronique le problème a été résolu depuis le départ puisque l'on utilise l'échelle en décibel et que l'on a donc sous un fader en générale des valeurs continues de -inf à +12 dBu. Une proposition pour le musicien serait d'écrire les valeurs absolues au dB près.
- Finalement l'espace : Tout reste à faire puisque pour le moment il n'a pas été formalisé. Stockhausen propose ci-dessous un formalisme sur un cercle (voir Figure ci dessous).

**Retour à la lecture**

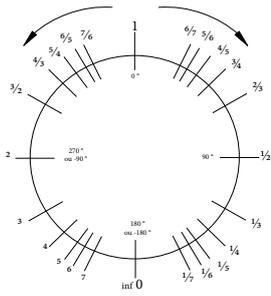


FIGURE 4.5 – Formalisme de l'espace sur un cercle ar  
Stockhausen

# Bibliographie Complète

- [1] Peter ABLINGER. *Annäherung Texte.Werktexte.Textwerke*. MUSIKTEXTE, 2016.
- [2] Moreno ANDREATTA. « From music to mathematics and backwards: introducing algebra, topology and category theory into computational musicology ». In : *Imagine Math - Mathematics and Culture* 6 (2006), p. 77-88.
- [3] James R. ANTHONY. *French Baroque Music (from Beaujoyeux to Rameau)*. Amadeus Press, 1997.
- [4] Denis ARNOLD. « The Significance of "Cori Spezzati" ». In : *Music & Letters* 40 (1959), p. 4-14.
- [5] Hope BAGENAL. « Musical taste and concert hall design ». In : *Proceeding of the Royal Musical Association* (1951).
- [6] A. BARABAYAR FERNANDEZ et C. BERMEJO MARTI. « Three Representations of Space Perception ». In : *Constelaciones* 3 (2015), p. 203-226.
- [7] François BAYLE. *musique acousmatique - propositions . . . positions*. INA-GRM, 1993.
- [8] Hector BERLIOZ. « Mémoires ». In : (1870).
- [9] A. BIELER. *Liturgie et architecture. Le temple des chrétiens*. Labor et Fides, 1961.
- [10] Peter BLOOM. *The Life of Berlioz*. Musical Lives, 1998.
- [11] D. BONSI et al. « Acoustic and Audience Response Analyses of Eleven Venetian Churches ». In : *Acoustics in Practices* (2013), p. 39-52.
- [12] Braxton BOREN. « History of 3D Sound ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 40-62.
- [13] Braxton B. BOREN. « A method for acoustic modeling of past soundscapes ». In : *Acoustics of Ancient Theatres Conferences* (2011).
- [14] Braxton B. BOREN. « Acoustic simulation of renaissance Venetian Churches ». In : *Acoustics in Practice* (2013).
- [15] BOTTE et al. *Psychoacoustique et perception auditive*. INSERM, 1988.
- [16] Pierre BOULEZ. *Répons*. Donaueschingen Festival, 1981.
- [17] Pierre BOULEZ et Andrew GERZSO. « Computers in Music ». In : *Scientific American* 258 (1988).  
URL : <http://articles.ircam.fr/textes/Boulez88c/>.
- [18] H. BRANT. « Space as an essential aspect of musical composition ». In : *Contemporary composers on Contemporary Music* (1978), p. 223-242.

- [19] Amber E. BRODERICK. « Grande Messe des morts : Hector Berlioz's Romantic interpretation of the roman catholic requiem tradition ». In : (2012).
- [20] J.P. BURKHOLDER, D. J. GROUT et C.V. PALISCA. *A History of Western Music*. W. W. Norton & Company, 2006.
- [21] John CAGE. *Experimental Music*. 1957.
- [22] Eugène CARDINE. « Vue d'ensemble sur le chant grégorien ». In : *Études grégoriennes*, 16 (1977), p. 31.
- [23] Thibaut CARPENTIER, Natasha BARRETT et al. « Holophonic Sound in IRCAM's Concert Hall: Technological and Aesthetic Practices ». In : *Computer Music Journal* 40 (2017), p. 14-34.
- [24] Thibaut CARPENTIER, Markus NOISTERNIG et Olivier WARUSFEL. « 17th International Conference on Digital Audio Effects - DAFx-14 ». In : *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 17 (2014), p. 93-100. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01107075/document>.
- [25] Mary J. CARRUTHERS. *Machina memorialis*. Bibliothèque des Histoires, Paris, Gallimard, 2002.
- [26] K. CASCONI. « The Aesthetics of Failure: 'Post-Digital' Tendencies in Contemporary Computer Music ». In : *Computer Music Journal* 24 (2000), p. 12-18.
- [27] Michèle CASTELLENGO, Benoit FABRE et Eric VIVIE. « Etude acoustique pour la position d'un nouvel orgue à Notre-Dames de Paris ». In : *Laboratoire d'Acoustique Musicale* (1987).
- [28] Jacques CHAILLEY et Norbert DUFOURCQ. « La musique polyphonique et la suprémtie française, des origines à la fin du XVIe siècle ». In : *La musique des origines à nos jours* (1946).
- [29] Michel CHION. *Le promeneur écoutant*. Plume/Sacem, 1993.
- [30] Edgar CHOUEIRI. « Binaural Audio Through Loudspeakers ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 124-179.
- [31] K. CHOURMOUZIADOU et J. KANG. « Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres ». In : *Applied Acoustics* 69 (2008).
- [32] Jean-Marc CHOUVEL et Makis SOLOMOS. *L'ESPACE : MUSIQUE / PHILOSOPHIE*. Harmattant, 1998.
- [33] Pierre CITRON. *Couperin, « Solfèges »*. Paris, Le Seuil, 1956.
- [34] François COUPERIN. *L'art de toucher le clavecin*. Paris, Oeuvre second, Nouvelle édition, 1716.
- [35] François COUPERIN. *Les goûts-réünis ou Nouveaux concerts*. A Paris chez l'auteur, au coin de la rue Neuve des Bons Enfants, proche la place des Victoires, le sieur Boivin à la Règle d'or, rue St Honoré, vis à vis la ruë des Bourdonnois. Avec privilège du Roy, 1724.
- [36] Jehanne DAUTREY. « Une hétérotopie musicale : la collaboration entre Renzo Piano et Luigi Nono sur Prometeo ». In : *Rue Descartes* 56 (2007), p. 8-20.
- [37] Markus NOISTERNIG DAVID POIRIER-QUINOT Brian KATEZ. « EVERTims: Open source framework for real-time auralization in architectural acoustics and virtual reality. ». In : *20th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-17)* 20 (2017). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01712896/document>.

- [38] Antoine DE LERIS. *Sentiment d'un harmoniphile sur différents ouvrages de musique*. Amsterdam/Paris:Jombert, 1756.
- [39] Michel DE MONTECLAIR. *Principes de musique divisez en quatre parties*. Paris, 1736.
- [40] Nico F. DECLERCQ et Cindy S. A. DEKEYSER. « Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidaurus: Seat rows responsible for the marvelous acoustics ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 121 (2007).
- [41] Victor DESARNAULDS et Antonio P. O. CARVALHO. « Analysis of reverberation time values in churches according to country and architectural style ». In : *8th International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong, China* (2001).
- [42] Daniel DESHAYS. *Pour une écriture du son*. Le journal des Arts, 2008.
- [43] Margarita DIAZ-ANDREU et Carlos García BENITO. « Acoustics and Levantine rock art: auditory perceptions in La Valltorta Gorge ». In : *Journal of Archaeological Science* 39 (2012), p. 3591-3599.
- [44] Matthew MC-DONALD. *Silent Narration? Elements of Narrative in Ives's The Unanswered Question*. 19th-Century Music, 2004, p. 270-271.
- [45] Benoît DRATWICKI. *Les Concerts de la reine*. Cahiers Philidor 39, éditions du centre de musique baroque de versailles, 2012.
- [46] Begault DURAND, R. TREJO et J. LEONARD. « 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia ». In : *The Musical Quarterly* 27 (1941), p. 433-455.
- [47] Pascal DUSAPIN. *Lullaby Exprience*. @104 paris, festival ManiFest 2019, 2019.
- [48] Michael ERMANN. *Architechural acoustics illustrated*. Wiley, 2015.
- [49] W. E. FEDDERSEN et al. « Localization of high frequency tones ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 29 (1957), p. 988-991.
- [50] Antonio FISCHETTI. *Initiation à l'acoustique*. Belin-sup, 2004.
- [51] G. JR. KIDD et al. « Release from masking due to spatial separation of sources in the identification of nonspeech auditory patterns ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 104 (1998).
- [52] Perdro GARCIA-VELASQUEZ et Augustin MULLER. *Lieux perdus*. <https://www.lieuxperdus.com>, 2019.
- [53] Stefano GERVASONI. *Altra Voce, Voci Invisibili*. 2018.
- [54] Guillaume GROSS. « Chanter en polyphonie à Notre-Dame de Paris sous le règne de Philippe Auguste : un art de la magnificence ». In : *Revue historique* 68 (2006), p. 609-634.
- [55] D. J. GROUT et V. PALISCA. *A History of Western Music*. W. W. Norton & Co, 2014.
- [56] Antoine GUERBER. *Paris experts Paris / École de Notre-Dame, 1170-1240*. 2005.
- [57] Maria Anna HANNEY. *Space and Spatialization in Contemporary Music*. McGill University, Montreal, 1994.
- [58] Maria Anna HARLEY. « An American in Space: Henry Brant's "Spatial Music" ». In : *American Music* 15 (1997), p. 70-92.

- [59] Thomas HARMON. « The Performance of Mozart's Church Sonatas ». In : *Music & Letters* 27 (1941), p. 433-455.
- [60] Jonathan HARVEY. « Spatialisation as a compositional tool ». In : *Les Presses de l'Université de Montréal, À musique contemporaine, supports contemporains?* 16.3 (2006).
- [61] Franck Ekeberg HENRIKSEN. *Space in Electroacoustic Music: Composition, Performance and Perception of Musical Space*. City University, 2002.
- [62] Detlef HEUSINGER et André RICHARD. *EXPERIMENTALSTUDIO des SWR 1971 – 2011*. SÜDWESTRUNDFUNK, 2011. URL : <https://www.swr.de/-/id=8126662/property=download/nid=17055498/9p2ykm/40-jahre-exp-brosch.pdf>.
- [63] E. HINTERMAIER. *The Missa Salisburgensis*. The Musical Times, 1975.
- [64] Paul M. HOFMAN, J. G. A. VAN RISWICK et A. John. VAN OPSTAL. « Relearning sound localization with new ears ». In : *Nature Neuroscience* (1998), p. 417-421.
- [65] Peter HOLMAN. *Mystery Man. Peter Holman Celebrates the 350th Anniversary of the Birth of Heinrich Biber*. The Musical Times, 1994.
- [66] Jacques-Martin HOTTETERRE. *Premier Livre de pièces pour la flûte - traversière, et autres instruments*. Paris, Oeuvre second, Nouvelle édition, 1715.
- [67] Deborah HOWARD et Laura MORETTI. *Sound and Space in Renaissance Venice*. Yale University Press, 2010.
- [68] Michel HUGLO. « Les débuts de la polyphonie à Paris : les premiers organa parisiens ». In : *Forum Musicologicum III* (1982), p. 93-163.
- [69] Michel HUGLO. « Observations sur les origines de l'Ecole de Notre-Dame ». In : *Aspects de la Musique Liturgique au Moyen Âge* (1991), p. 151-158.
- [70] Robert J. JAHN, Paul DEVEREUX et Michael IBISON. « Acoustic resonances of assorted ancient structures ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* (1996).
- [71] J. M. JOT et A. CHAIGNE. « Digital delay networks for designing artificial reverberators ». In : *Audio Engineering Society Convention* (1991).
- [72] Brian KANE. *Sound unseen - acousmatic sound in theory and practice*. Oxford University Press, 2014.
- [73] A. J. KING et A. R. PALMER. « Cells responsive to free-field auditory stimuli in guinea-pig superior colliculus: distribution and response properties. » In : *The Journal of Physiology* 81 (1983), p. 342-361.
- [74] Denis LAUNEY. *La musique religieuse en France du Concile de Trente à 1804*. Paris, Société française de musicologie / Éditions Klincksieck, 1993.
- [75] Grison LAURENT. « Espace et musique : Répons de Boulez ». In : *Espace géographique* 29 (2000), p. 87-89.
- [76] Daniel LIBESKIND. *Between the Lines*. Jewish Museum.
- [77] D. LUBMAN et D. H. KISER. *The history of western civilisation told through the acoustics of its worship spaces*. Proceeding of the 17th International Congress on Acoustic, Rome, Italy, 2001.

- [78] Paul LUIZARD. *Les espaces couplés : comportement, conception et perception dans un contexte de salle de spectacle*. Acoustique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2013. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00874238/document>.
- [79] Renaud MERIC. « Appréhender l'espace sonore : L'écoute entre perception et imagination ». In : *L'Harmattan* (2012).
- [80] Jürgen MEYER. *Acoustics and the Performance of Music - Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. Fifth edition, Modern Acoustics et Signal processing, Springer, 2009.
- [81] Pierre MILLOT. *L'espace de projection : 40 ans après, quel bilan ?* Architecture, aménagement. Mémoire, ENSA Nantes, 2017. URL : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01712715/document>.
- [82] Laura MORETTI. *Architectural spaces for music : Jacopo Sansovino and Adrian Willaert at St Mark's*. Cambridge University Press, 2004.
- [83] NAVARRO, SENDRA et MUNOZ. « The Western Latin church as a place for music an preaching: An acoustic assessment ». In : *Applied Acoustics* (2009).
- [84] Carola NIELINGER-VAKIL. *Luigi Nono: A Composer in Context*. Music since 1900. Cambridge University Press, 2015. ISBN : 9780521845342.
- [85] Gerhard NIERHAUS. *Algorithmic Composition*. Springer, 2009.
- [86] Markus NOISTERNIG, Thibaut CARPENTIER et Olivier WARUSFEL. « Espro 2.0: Implementation of a Surrounding 350-Loudspeaker Array for Sound Field Reproduction ». In : *Proceedings of the AES UK Conference: Spatial Audio in Today's 3D World* (2012). URL : [www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18121](http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18121).
- [87] Markus NOISTERNIG, Johannes KLEIN et Olivier WARUSFEL MARCO BERZBORN Arnaud RECHER. « High-Resolution MIMO DRIR Measurements in an Opera Hall ». In : *42nd Annual German Congress on Acoustics (DAGA) 21* (2016), p. 25-34. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01465366/document>.
- [88] Luigi NONO. *Écrits*. Genève : Éditions Contrechamps, 2007.
- [89] Luigi NONO et Renzo PIANO. *Prometeo*. de San Lorenzo, Venise, Italie, 1983.
- [90] Jean-François PAILLARD. *La musique française classique*. Paris, Presses Universitaires de France, coll. "Que sais-je?", 1960.
- [91] Bénédicte PALAZZO-BERTHOLON et Jean-Christophe VALIERE. « Les vases dits « acoustiques » dans les églises médiévales : un programme d'étude interdisciplinaire ». In : (2007).
- [92] R. D. PATTERSON et al. « An efficient auditory filterbank based on the gammatone function ». In : *A meeting of the IOC Speech Group on Auditory Modelling at RSRE 2* (1988).
- [93] Jean-Loup PECQUAIS. *Proposition d'une alternative au potentiomètre de panoramique*. École nationale supérieure Louis-Lumière, 2019.
- [94] Antoine PECQUEUR. *les espaces de la musique - Architecture des salles de concert et des opéras*. Parenthèses Philharmonie de Paris, 2015.

- [95] V. M. A. PEUTZ. « The Variable Acoustics of the 'Espace de projection' of IRCAM (Paris) ». In : *Proceedings of the 59th AES Convention* (1978). URL : <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3044>.
- [96] Luigi NONO PHILIPPE ALBERA E JABES. *Festival d'Automne à Paris 1987 - Luigi Nono*. Paris, Contrechamps ; Festival d'Automne à Paris, 1987.
- [97] Renzo PIANO. *Verso prometeo*. Ricordi/Biennale de Venise, 1984.
- [98] Jean Joachim QUANTZ. *Essai d'une méthode pour apprendre à jouer de la flûte traversière avec plusieurs remarques pour servir au bon goût dans la musique le tout éclairci par des exemples et par 24 tailles douces*. Berlin, Frédéric CHRETIEN, 1752.
- [99] J.P RAUSCHECKER et B. TIAN. « Mechanisms and streams for processing of "what" and "where" in auditory cortex. » In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 22 (2000), p. 24-97.
- [100] John William Strutt RAYLEIGH. « XII: On our perception of sound direction. » In : *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (1907), p. 214-232.
- [101] Erich REIMER. « Édition du traité de Jean de Garlande : Johannes de Garlandia : De mensurabili musica, vol 2 ». In : (1972), p. 94-97.
- [102] C. W. REYNOLDS. « Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model ». In : *ACM SIG-GRAPH Computer Graphics* 21 (1987), p. 25-34.
- [103] I. REZKNIKOFF. *Sound resonances on prehistoric times : A study of Paleolithic painted caves and rocks*. Paris, 2008.
- [104] Iegor REZNIKOFF. « La dimension sonore des grottes paléolithiques et des rochers à peintures ». In : *L'art pléistocène dans le monde* (2012), p. 49.
- [105] G. P. RICHARDSON, A. N. LUKASHKIN et RUSSEL. « The tectorial membrane : One slice of a complex cochlear sandwich ». In : *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery* 16 (2008), p. 458.
- [106] Marianna RITCHEY. « Echoes of the Guillotine: Berlioz and the French Fantastic ». In : *19th-Century Music* 34 (2010), p. 168-185.
- [107] Agnieszka ROGINSKA. « Binaural Audio Through Headphones ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 88-123.
- [108] Agnieszka ROGINSKA et Paul GELUSO. *Immersive Sound - The art and science of binaural and multichannel audio*. AES, 2018.
- [109] L. M. ROMANSKI et P. S. GOLDMAN-RAKIC. « An auditory domain in primate prefrontal cortex. » In : *Nature Neuroscience* 5 (2002).
- [110] Karl August ROSENTHAL et Arthur MENDEL. « Mozart's Sacramental Litanies and Their Forerunners ». In : *The Musical Quarterly* 27 (1941), p. 433-455.
- [111] Edward H. ROSNER. « Le Magnus liber organi de Notre-Dame de Paris. Les quadrupla et les tripla parisiens, » in : *Revue historique* 1 (1993).

- [112] Michel RUSQUET. *Trois siècles de musique instrumentale : un parcours découverte : le temps de Bach*. musicologie.org, 2018.
- [113] Tomas SARACCENO. *Algo R(h)i(y)thms*. Exposition On Air au Palais de Tokyo, 2018.
- [114] Pierre SCHAEFFER. *Traité des objets musicaux*. 1966. Paris, Seuil, 2015.
- [115] Jean-Claude SCHMITT. *La raison des gestes dans l'Occident médiéval*. Paris, Gallimard, 1990.
- [116] Israel W. SLOTKI. « Antiphony in Ancient Hebrew Poetry ». In : *The Jewish Quarterly Review* 26 (1936), p. 199-219.
- [117] Makis SOLOMOS. « L'ESPACE-SON ». In : *L'espace: musique, philosophie* 39 (1998), p. 211-224.
- [118] Thomas SPOKER et al. « Wafe Field Synthesis ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 311-332.
- [119] Jürg STENZEL. *Tragédie de l'écoute*. Notes introductives à EMI, 1995.
- [120] Karlheinz STOCKHAUSEN. *Gesang der Jünglinge im Feuerofen*. Westdeutscher Rundfunk Studio, 1955.
- [121] Karlheinz STOCKHAUSEN. *Musik im Raum*. Stockhausen texte, 1958.
- [122] Karlheinz STOCKHAUSEN. *Expo '70*. Exposition Universelle d'Osaka, 1970.
- [123] Ivanka STOIANOVA. *KARLHEINZ STOCKHAUSEN Je suis les sons..*. Beanchesne, 1997.
- [124] J. B. THIBAUT. « Principes du chant grégorien : Origine byzantine de sa notation ». In : *Échos d'Orient* 19, n117 (1920), p. 11-21.
- [125] Nicolas TSINGOS. « Object-Based Audio ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 244-275.
- [126] Edgar VARESE, Iannis XENAKIS et LE CORBUSIER. *Poèmes Electronique*. Le Pavillon Philips, Brussels World's Fair, 1958.
- [127] VITRUVÉ. *De architectura*. 15.
- [128] Elizabeth M WENZEL, Durand R. BEGAULT et Martine GODFROY-COOPER. « Perception of Spatial Sound ». In : *Immersi Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 5-39.
- [129] Craig WRIGHT. « Music and Ceremony at Notre-Dame de Paris, 500-1500 ». In : (1989), 239-243 et 369-370.
- [130] Iannis XENAKIS. *Musiques formelles: nouveaux principes formels de composition musicale*. La Revue Musicale, Paris, 1963.
- [131] Iannis XENAKIS. « Musiques stochastiques libres ». In : *Musiques formelles* (1963), p. 19.
- [132] Frances YATES. « L'art de la mémoire ». In : (1975).
- [133] Hendrik ZIEGLER. *Consolidation de l'État à l'époque baroque par le truchement de la peinture : France et Pays-Bas septentrionaux*. Bulletin du Centre de recherche du château de Versailles, 2018.
- [134] R. ZVONAR. « A history of spatial music ». In : *19th-Century Music* 34 (2006), p. 168-185.

## Livres et Articles Scientifiques

- [2] Moreno ANDREATTA. « From music to mathematics and backwards: introducing algebra, topology and category theory into computational musicology ». In : *Imagine Math - Mathematics and Culture* 6 (2006), p. 77-88.
- [3] James R. ANTHONY. *French Baroque Music (from Beaujoyeux to Rameau)*. Amadeus Press, 1997.
- [4] Denis ARNOLD. « The Significance of "Cori Spezzati" ». In : *Music & Letters* 40 (1959), p. 4-14.
- [5] Hope BAGENAL. « Musical taste and concert hall design ». In : *Proceeding of the Royal Musical Association* (1951).
- [6] A. BARABAYAR FERNANDEZ et C. BERMEJO MARTI. « Three Representations of Space Perception ». In : *Constelaciones* 3 (2015), p. 203-226.
- [9] A. BIELER. *Liturgie et architecture. Le temple des chrétiens*. Labor et Fides, 1961.
- [10] Peter BLOOM. *The Life of Berlioz*. Musical Lives, 1998.
- [11] D. BONSI et al. « Acoustic and Audience Response Analyses of Eleven Venetian Churches ». In : *Acoustics in Practices* (2013), p. 39-52.
- [12] Braxton BOREN. « History of 3D Sound ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 40-62.
- [13] Braxton B. BOREN. « A method for acoustic modeling of past soundscapes ». In : *Acoustics of Ancient Theatres Conferences* (2011).
- [14] Braxton B. BOREN. « Acoustic simulation of renaissance Venetian Churches ». In : *Acoustics in Practice* (2013).
- [15] BOTTE et al. *Psychoacoustique et perception auditive*. INSERM, 1988.
- [17] Pierre BOULEZ et Andrew GERZSO. « Computers in Music ». In : *Scientific American* 258 (1988).  
URL : <http://articles.ircam.fr/textes/Boulez88c/>.
- [18] H. BRANT. « Space as an essential aspect of musical composition ». In : *Contemporary composers on Contemporary Music* (1978), p. 223-242.
- [19] Amber E. BRODERICK. « Grande Messe des morts : Hector Berlioz's Romantic interpretation of the roman catholic requiem tradition ». In : (2012).
- [20] J.P. BURKHOLDER, D. J. GROUT et C.V. PALISCA. *A History of Western Music*. W. W. Norton & Company, 2006.
- [21] John CAGE. *Experimental Music*. 1957.
- [22] Eugène CARDINE. « Vue d'ensemble sur le chant grégorien ». In : *Études grégoriennes*, 16 (1977), p. 31.
- [23] Thibaut CARPENTIER, Natasha BARRETT et al. « Holophonic Sound in IRCAM's Concert Hall: Technological and Aesthetic Practices ». In : *Computer Music Journal* 40 (2017), p. 14-34.
- [24] Thibaut CARPENTIER, Markus NOISTERNIG et Olivier WARUSFEL. « 17th International Conference on Digital Audio Effects - DAFx-14 ». In : *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 17 (2014), p. 93-100. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01107075/document>.

- [25] Mary J. CARRUTHERS. *Machina memorialis*. Bibliothèque des Histoires, Paris, Gallimard, 2002.
- [26] K. CASCONI. « The Aesthetics of Failure: ‘Post-Digital’ Tendencies in Contemporary Computer Music ». In : *Computer Music Journal* 24 (2000), p. 12-18.
- [27] Michèle CASTELLENGO, Benoit FABRE et Eric VIVIE. « Etude acoustique pour la position d’un nouvel orgue à Notre-Dames de Paris ». In : *Laboratoire d’Acoustique Musicale* (1987).
- [28] Jacques CHAILLEY et Norbert DUFOURCQ. « La musique polyphonique et la suprématie française, des origines à la fin du XVIe siècle ». In : *La musique des origines à nos jours* (1946).
- [29] Michel CHION. *Le promeneur écoutant*. Plume/Sacem, 1993.
- [30] Edgar CHOUEIRI. « Binaural Audio Through Loudspeakers ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 124-179.
- [31] K. CHOURMOUZIADOU et J. KANG. « Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres ». In : *Applied Acoustics* 69 (2008).
- [32] Pierre CITRON. *Couperin, « Solfèges »*. Paris, Le Seuil, 1956.
- [33] François COUPERIN. *L’art de toucher le clavecin*. Paris, Oeuvre second, Nouvelle édition, 1716.
- [34] Jehanne DAUTREY. « Une hétérotopie musicale : la collaboration entre Renzo Piano et Luigi Nono sur Prometeo ». In : *Rue Descartes* 56 (2007), p. 8-20.
- [35] Markus NOISTERNIG DAVID POIRIER-QUINOT Brian KATEZ. « EVERTimes: Open source framework for real-time auralization in architectural acoustics and virtual reality. » In : *20th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-17)* 20 (2017). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01712896/document>.
- [36] Antoine DE LERIS. *Sentiment d’un harmoniphile sur différents ouvrages de musique*. Amsterdam/Paris:Jombert, 1756.
- [37] Michel DE MONTECLAIR. *Principes de musique divisee en quatre parties*. Paris, 1736.
- [38] Nico F. DECLERCQ et Cindy S. A. DEKEYSER. « Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidauros: Seat rows responsible for the marvelous acoustics ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 121 (2007).
- [39] Victor DESARNAULDS et Antonio P. O. CARVALHO. « Analysis of reverberation time values in churches according to country and architectural style ». In : *8th International Congress on Sound and Vibration, Hong Kong, China* (2001).
- [40] Margarita DIAZ-ANDREU et Carlos García BENITO. « Acoustics and Levantine rock art: auditory perceptions in La Valltorta Gorge ». In : *Journal of Archaeological Science* 39 (2012), p. 3591-3599.
- [41] Matthew MC-DONALD. *Silent Narration? Elements of Narrative in Ives’s The Unanswered Question*. 19th-Century Music, 2004, p. 270-271.
- [42] Benoît DRATWICKI. *Les Concerts de la reine*. Cahiers Philidor 39, éditions du centre de musique baroque de versailles, 2012.
- [43] Begault DURAND, R. TREJO et J. LEONARD. « 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia ». In : *The Musical Quarterly* 27 (1941), p. 433-455.

- [48] Michael ERMANN. *Architectural acoustics illustrated*. Wiley, 2015.
- [49] W. E. FEDDERSEN et al. « Localization of high frequency tones ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 29 (1957), p. 988-991.
- [50] Antonio FISCHETTI. *Initiation à l'acoustique*. Belin-sup, 2004.
- [51] G. JR. KIDD et al. « Release from masking due to spatial separation of sources in the identification of nonspeech auditory patterns ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 104 (1998).
- [54] Guillaume GROSS. « Chanter en polyphonie à Notre-Dame de Paris sous le règne de Philippe Auguste : un art de la magnificence ». In : *Revue historique* 68 (2006), p. 609-634.
- [55] D. J. GROUT et V. PALISCA. *A History of Western Music*. W. W. Norton & Co, 2014.
- [56] Antoine GUERBER. *Paris experts Paris / École de Notre-Dame, 1170-1240*. 2005.
- [57] Maria Anna HANNEY. *Space and Spatialization in Contemporary Music*. McGill University, Montreal, 1994.
- [58] Maria Anna HARLEY. « An American in Space: Henry Brant's "Spatial Music" ». In : *American Music* 15 (1997), p. 70-92.
- [59] Thomas HARMON. « The Performance of Mozart's Church Sonatas ». In : *Music & Letters* 27 (1941), p. 433-455.
- [63] E. HINTERMAIER. *The Missa Salisburgensis*. The Musical Times, 1975.
- [64] Paul M. HOFMAN, J. G. A. VAN RISWICK et A. John. VAN OPSTAL. « Relearning sound localization with new ears ». In : *Nature Neuroscience* (1998), p. 417-421.
- [65] Peter HOLMAN. *Mystery Man. Peter Holman Celebrates the 350th Anniversary of the Birth of Heinrich Biber*. The Musical Times, 1994.
- [66] Jacques-Martin HOTTETERRE. *Premier Livre de pièces pour la flûte - traversière, et autres instruments*. Paris, Oeuvre second, Nouvelle édition, 1715.
- [67] Deborah HOWARD et Laura MORETTI. *Sound and Space in Renaissance Venice*. Yale University Press, 2010.
- [68] Michel HUGLO. « Les débuts de la polyphonie à Paris : les premiers organa parisiens ». In : *Forum Musicologicum III* (1982), p. 93-163.
- [69] Michel HUGLO. « Observations sur les origines de l'École de Notre-Dame ». In : *Aspects de la Musique Liturgique au Moyen Âge* (1991), p. 151-158.
- [70] Robert J. JAHN, Paul DEVEREUX et Michael IBISON. « Acoustic resonances of assorted ancient structures ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* (1996).
- [71] J. M. JOT et A. CHAIGNE. « Digital delay networks for designing artificial reverberators ». In : *Audio Engineering Society Convention* (1991).
- [72] Brian KANE. *Sound unseen - acousmatic sound in theory and practice*. Oxford University Press, 2014.
- [73] A. J. KING et A. R. PALMER. « Cells responsive to free-field auditory stimuli in guinea-pig superior colliculus: distribution and response properties. » In : *The Journal of Physiology* 81 (1983), p. 342-361.

- [74] Denis LAUNEY. *La musique religieuse en France du Concile de Trente à 1804*. Paris, Société française de musicologie / Éditions Klincksieck, 1993.
- [75] Grison LAURENT. « Espace et musique : Répons de Boulez ». In : *Espace géographique* 29 (2000), p. 87-89.
- [77] D. LUBMAN et D. H. KISER. *The history of western civilisation told through the acoustics of its worship spaces*. Proceeding of the 17th International Congress on Acoustic, Rome, Italy, 2001.
- [79] Renaud MERIC. « Appréhender l'espace sonore : L'écoute entre perception et imagination ». In : *L'Harmonisant* (2012).
- [80] Jürgen MEYER. *Acoustics and the Performance of Music - Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. Fifth edition, Modern Acoustics et Signal processing, Springer, 2009.
- [82] Laura MORETTI. *Architectural spaces for music : Jacopo Sansovino and Adrian Willaert at St Mark's*. Cambridge University Press, 2004.
- [83] NAVARRO, SENDRA et MUNOZ. « The Western Latin church as a place for music an preaching: An acoustic assessment ». In : *Applied Acoustics* (2009).
- [86] Markus NOISTERNIG, Thibaut CARPENTIER et Olivier WARUSFEL. « Espro 2.0: Implementation of a Surrounding 350-Loudspeaker Array for Sound Field Reproduction ». In : *Proceedings of the AES UK Conference: Spatial Audio in Today's 3D World* (2012). URL : [www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18121](http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18121).
- [87] Markus NOISTERNIG, Johannes KLEIN et Olivier WARUSFEL MARCO BERZBORN Arnaud RECHER. « High-Resolution MIMO DRIR Measurements in an Opera Hall ». In : *42nd Annual German Congress on Acoustics (DAGA) 21* (2016), p. 25-34. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01465366/document>.
- [90] Jean-François PAILLARD. *La musique française classique*. Paris, Presses Universitaires de France, coll. "Que sais-je?", 1960.
- [91] Bénédicte PALAZZO-BERTHOLON et Jean-Christophe VALIERE. « Les vases dits « acoustiques » dans les églises médiévales : un programme d'étude interdisciplinaire ». In : (2007).
- [92] R. D. PATTERSON et al. « An efficient auditory filterbank based on the gammatone function ». In : *A meeting of the IOC Speech Group on Auditory Modelling at RSRE 2* (1988).
- [93] Jean-Loup PECQUAIS. *Proposition d'une alternative au potentiomètre de panoramique*. École nationale supérieure Louis-Lumière, 2019.
- [94] Antoine PECQUEUR. *les espaces de la musique - Architecture des salles de concert et des opéras*. Parenthèses Philharmonie de Paris, 2015.
- [95] V. M. A. PEUTZ. « The Variable Acoustics of the 'Espace de projection' of IRCAM (Paris) ». In : *Proceedings of the 59th AES Convention* (1978). URL : <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3044>.
- [97] Renzo PIANO. *Verso prometeo*. Ricordi/Biennale de Venise, 1984.

- [98] Jean Joachim QUANTZ. *Essai d'une méthode pour apprendre à jouer de la flûte traversière avec plusieurs remarques pour servir au bon goût dans la musique le tout éclairci par des exemples et pat 24 tailles douces*. Berlin, Frédéric CHRETIEN, 1752.
- [99] J.P RAUSCHECKER et B. TIAN. « Mechanisms and streams for processing of "what" and "where" in auditory cortex. » In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 22 (2000), p. 24-97.
- [100] John William Strutt RAYLEIGH. « XII: On our perception of sound direction. » In : *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (1907), p. 214-232.
- [101] Erich REIMER. « Édition du traité de Jean de Garlande : Johannes de Garlandia : De mensurabili musica, vol 2 ». In : (1972), p. 94-97.
- [102] C. W. REYNOLDS. « Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model ». In : *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 21 (1987), p. 25-34.
- [103] I. REZKNIKOFF. *Sound resonances on prehistoric times : A study of Paleolithic painted caves and rocks*. Paris, 2008.
- [104] Iegor REZNIKOFF. « La dimension sonore des grottes paléolithiques et des rochers à peintures ». In : *L'art pléistocène dans le monde* (2012), p. 49.
- [105] G. P. RICHARDSON, A. N. LUKASHKIN et RUSSEL. « The tectorial membrane : One slice of a complex cochlear sandwich ». In : *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery* 16 (2008), p. 458.
- [106] Marianna RITCHEY. « Echoes of the Guillotine: Berlioz and the French Fantastic ». In : *19th-Century Music* 34 (2010), p. 168-185.
- [107] Agnieszka ROGINSKA. « Binaural Audio Through Headphones ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 88-123.
- [108] Agnieszka ROGINSKA et Paul GELUSO. *Immersive Sound - The art and science of binaural and multichannel audio*. AES, 2018.
- [109] L. M. ROMANSKI et P. S. GOLDMAN-RAKIC. « An auditory domain in primate prefrontal cortex. » In : *Nature Neuroscience* 5 (2002).
- [110] Karl August ROSENTHAL et Arthur MENDEL. « Mozart's Sacramental Litanies and Their Forerunners ». In : *The Musical Quarterly* 27 (1941), p. 433-455.
- [111] Edward H. ROSNER. « Le Magnus liber organi de Notre-Dame de Paris. Les quadrupla et les tripla parisiens, » in : *Revue historique* 1 (1993).
- [112] Michel RUSQUET. *Trois siècles de musique instrumentale : un parcours découverte : le temps de Bach*. musicologie.org, 2018.
- [115] Jean-Claude SCHMITT. *La raison des gestes dans l'Occident médiéval*. Paris, Gallimard, 1990.
- [116] Israel W. SLOTKI. « Antiphony in Ancient Hebrew Poetry ». In : *The Jewish Quarterly Review* 26 (1936), p. 199-219.
- [117] Makis SOLOMOS. « L'ESPACE-SON ». In : *L'espace: musique, philosophie* 39 (1998), p. 211-224.

- [118] Thomas SPOKER et al. « Wafe Field Synthesis ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 311-332.
- [119] Jürg STENZEL. *Tragédie de l'écoute*. Notes introductives à EMI, 1995.
- [123] Ivanka STOIANOVA. *KARLHEINZ STOCKHAUSEN Je suis les sons..*. Beauchesne, 1997.
- [124] J. B. THIBAUT. « Principes du chant grégorien : Origine byzantine de sa notation ». In : *Échos d'Orient* 19, n117 (1920), p. 11-21.
- [125] Nicolas TSINGOS. « Object-Based Audio ». In : *Immersive Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 244-275.
- [127] VITRUVÉ. *De architectura*. 15.
- [128] Elizabeth M WENZEL, Durand R. BEGAULT et Martine GODFROY-COOPER. « Perception of Spatial Sound ». In : *Immersi Sound - the art and science of binaural and multi-channel audio* (2018), p. 5-39.
- [129] Craig WRIGHT. « Music and Ceremony at Notre-Dame de Paris, 500-1500 ». In : (1989), 239-243 et 369-370.
- [132] Frances YATES. « L'art de la mémoire ». In : (1975).
- [133] Hendrik ZIEGLER. *Consolidation de l'État à l'époque baroque par le truchement de la peinture : France et Pays-Bas septentrionaux*. Bulletin du Centre de recherche du château de Versailles, 2018.
- [134] R. ZVONAR. « A history of spatial music ». In : *19th-Century Music* 34 (2006), p. 168-185.

## Références artistiques

- [16] Pierre BOULEZ. *Répons*. Donaueschingen Festival, 1981.
- [47] Pascal DUSAPIN. *Lullaby Exprience*. @104 paris, festival ManiFest 2019, 2019.
- [52] Perdro GARCIA-VELASQUEZ et Augustin MULLER. *Lieux perdus*. <https://www.lieuxperdus.com>, 2019.
- [53] Stefano GERVASONI. *Altra Voce, Voci Invisibili*. 2018.
- [76] Daniel LIBESKIND. *Between the Lines*. Jewish Museum.
- [89] Luigi NONO et Renzo PIANO. *Prometeo*. de San Lorenzo, Venise, Italie, 1983.
- [113] Tomas SARACCENO. *Algo R(h)i(y)thms*. Exposition On Air au Palais de Tokyo, 2018.
- [120] Karlheinz STOCKHAUSEN. *Gesang der Jünglinge im Feuerofen*. Westdeutscher Rundfunk Studio, 1955.
- [122] Karlheinz STOCKHAUSEN. *Expo '70*. Exposition Universelle d'Osaka, 1970.
- [126] Edgar VARESE, Iannis XENAXIS et LE CORBUSIER. *Poèmes Electronique*. Le Pavillon Philips, Brussels World's Fair, 1958.

## Réflexions d'artistes

- [1] Peter ABLINGER. *Annäherung Texte.Werktexte.Textwerke*. MUSIKTEXTE, 2016.
- [2] Moreno ANDREATTA. « From music to mathematics and backwards: introducing algebra, topology and category theory into computational musicology ». In : *Imagine Math - Mathematics and Culture* 6 (2006), p. 77-88.
- [7] François BAYLE. *musique acousmatique - propositions . . . positions*. INA-GRM, 1993.
- [8] Hector BERLIOZ. « Mémoires ». In : (1870).
- [32] Jean-Marc CHOUVEL et Makis SOLOMOS. *L'ESPACE : MUSIQUE / PHILOSOPHIE*. Harmattant, 1998.
- [35] François COUPERIN. *Les goûts-réunis ou Nouveaux concerts*. A Paris chez l'auteur, au coin de la rue Neuve des Bons Enfants, proche la place des Victoires, le sieur Boivin à la Règle d'or, rue St Honoré, vis à vis la ruë des Bourdonnois. Avec privilège du Roy, 1724.
- [42] Daniel DESHAYS. *Pour une écriture du son*. Le journal des Arts, 2008.
- [60] Jonathan HARVEY. « Spatialisation as a compositional tool ». In : *Les Presses de l'Université de Montréal, À musique contemporaine, supports contemporains?* 16.3 (2006).
- [85] Gerhard NIERHAUS. *Algorithmic Composition*. Springer, 2009.
- [121] Karlheinz STOCKHAUSEN. *Musik im Raum*. Stockhausen texte, 1958.
- [130] Iannis XENAKIS. *Musiques formelles: nouveaux principes formels de composition musicale*. La Revue Musicale, Paris, 1963.
- [131] Iannis XENAKIS. « Musiques stochastiques libres ». In : *Musiques formelles* (1963), p. 19.

# Glossaire

- acousmatique** Est dit acousmatique un son que l'on entend sans voir la cause qui le produit. 1, 2, 17, 60, 73, 81, 82, 95, 140, 171
- aliasing** L'aliasing désigne toutes les formes de repliement de spectre, notamment ceux liés à l'échantillonnage du signal. 144
- ambisonique** Algorithme de spatialisation de synthèse de front d'onde qui se base sur les harmoniques sphériques ou circulaires. 123, 125–128, 130, 139, 140, 176
- anisotropique** L'anisotropie est la propriété d'être dépendant de la direction. Quelque chose d'anisotrope pourra présenter différentes caractéristiques selon son orientation, dans le cadre de l'acoustique il qualifie les salles dans le champ diffus n'est pas homogène mais orienté. 151, 158
- anéchoïque** Une chambre anéchoïque (ou « chambre sourde ») est une salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques. 147
- aulos** Instrument antique grec à deux tuyaux et à anche double. 19
- auralisation** L'auralisation est le processus de rendre audible, par de la modélisation physique ou mathématique, l'environnement sonore d'une source dans un espace, à une certaine position. 154
- beam-forming** Le Beamforming aussi appelé filtrage spatial, formation de faisceaux ou formation de voies est une technique de traitement du signal utilisée dans les réseaux d'antennes et de capteurs pour l'émission ou la réception directionnelle de signaux. 155
- dirac** La distribution de Dirac, aussi appelée par abus de langage fonction de Dirac, introduite par Paul Dirac, peut être informellement considérée comme une fonction qui prend une « valeur » infinie en 0, et la valeur zéro partout ailleurs, et dont l'intégrale sur l'ensemble des réels est égale à 1. 171
- kinesthésique** qui concerne la sensation de mouvement des parties du corps. 11
- monophonique** Qui n'a qu'un seul canal (audio). 9, 85, 119, 130, 131
- omnidirectionnel** Qui a les mêmes capacités dans toutes les directions. 8
- pattern** Forme, modèle. Figure, construction donnant une représentation simplifiée et fonctionnelle d'un objet, d'un mouvement, d'un processus. 7
- psychoacoustique** La psychoacoustique est la branche de la psychophysique qui étudie les rapports entre les perceptions auditives de l'être humain et les sons qui parviennent à ses oreilles. 4, 66, 141

**périacte** Les Périactes sont des éléments de décors originaires du théâtre en Grèce antique. Ce sont des triangles pivotant présents sur les parois (en grèce sur la *skene*). Sur chaque face du périacte est représenté un décor ou un matériau différent. 138, 219

**quadriphonique** Qui a quatre canaux (audios). 94, 121

**ray-tracing** Le ray tracing (« lancer de rayons » en français) est une technique de calcul géométrique par ordinateur, utilisée notamment pour le rendu en synthèse d'image ou pour des études de systèmes optiques ou acoustiques. 155

**réverbération** Phénomène de persistance du son lorsque sa source a cessé d'émettre, dû à une réflexion des ondes sonores qui reviennent aux oreilles de l'auditeur avec un certain retard. 2, 8, 14, 15, 17, 20, 22, 27, 30, 31, 37, 41, 53, 57, 58, 60, 67, 68, 71, 77, 100, 108, 112, 115, 116, 118, 134–138, 151, 162, 217–219

**somesthésique** Rassemble les sens de la pression, de la chaleur et de la douleur. 11

**spatialisation** La spatialisation sonore est l'action de placer une source sonore dans l'espace ou de donner l'illusion de cette localisation. 2, 3, 6, 7, 12, 14, 65–67, 81, 102–104, 114, 119, 121, 126, 133, 175

**spread** Opération sur l'algorithme de spatialisation qui consiste à agrandir la largeur d'une source en "floutant" ses contours. 141

**spéculaire** Une onde acoustique incidente sur une surface plane, rigide et infinie, est réfléchiée de manière spéculaire (selon la loi de Descartes de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion). Si la surface plane est de taille finie, l'énergie réfléchiée n'est plus concentrée dans une seule direction, mais elle est diffusée ou dispersée (« scattered ») dans plusieurs lobes plus ou moins larges, dont le principal entoure la direction spéculaire. 138, 155

**subwoofer** Haut-parleur destiné à la reproduction des fréquences sonores les plus basses du spectre audio. 8

**timbre** Qualité spécifique d'un son, indépendante de la hauteur, de la durée et de l'intensité, résultant essentiellement du concours des harmoniques qui accompagnent la note fondamentale jouée. 7, 10, 43, 45, 49, 63, 65, 67, 82, 89, 90, 96, 120, 126, 132, 162

**tonotopique** Organisation spatiale en fonction de la fréquence. 8, 9, 12

**topographique** Représentation sur un plan des formes, du relief d'un lieu. 9

# Acronymes

- 2D** Deux Dimensions. 121–125, 141, 142, 219
- 3D** Trois Dimensions. 4, 6, 8, 14, 83, 121–123, 125, 130, 131, 139, 141, 219
- AC** Cortex Auditif. 12
- CICM** Centre de recherche Informatique et Création Musicale. 3
- CNMAT** Center for New Music and Audio Technologies. 177
- CPU** Central Processing Unit. 146
- DRIR** Directional Room Impulse Response. 147, 150, 154, 175
- EDR** Energy Decay Relief. 151, 220
- EIC** Ensemble intercontemporain. 96
- FDN** Feedback Delay Network. 151, 152, 157
- FM** Modulation de Fréquence. 144
- HOA** High Order Ambisonic (Ambisonique de d’Ordre Élevé. 14, 139–142
- HRTF** Head Related Transfer Function. 5, 127, 130, 154
- IC** Colliculus Inférieur. 9, 10
- ICST** Institute for Computer Music and Sound Technology. 183
- IID** Interaural Intensity Difference. 4, 6, 9, 10, 69, 119, 130
- IRCAM** Institut de Recherche et Coordination Acoustique Musique. 3, 93, 96, 98–100, 108, 122, 132, 138, 139, 141, 147, 150, 158, 167, 175, 219
- ITD** Interaural Time Difference. 4–6, 9, 10, 69, 119, 130
- KNN** K Nearest Neighbors. 6
- LBAP** Layer Based Amplitude Panning. 121, 122, 130, 219
- LL** Lemnisque Latéral. 9
- MB** Membrane Basilaire. 8
- MGC** Corps Genouillé Médian. 10, 12

**MSH** Maison des Sciences de l'Homme. 3, 175

**NCD** Noyau Cochléaire Dorsal. 9

**NCV** Noyau Cochléaire Ventral. 9

**NFC** Near Field Compensated. 140–142

**NHK** Nippon Hōsō Kyōkai, littéralement "compagnie de diffusion du Japon". 147

**OSC** Open Sound Control. 154, 178, 182

**SC** Colliculus Supérieur. 10

**SOC** Complexe Olivaire Supérieur. 9

**SWR** Südwestrundfunk (Radio-télédiffuseur de l'Allemagne du Sud-ouest). 108, 132

**VBAP** Vector Based Amplitude Panning. 14, 121, 122, 126, 219

**VBIP** Vector Based Intensity Panning. 121

**WFS** Wave Field Synthesis (Synthèse de Front d'Onde). 7, 127, 128, 130, 140, 144

**ZHdK** Zürcher Hochschule der Künste (Haute École des Arts de Zürich). 163, 166, 183

# Table des figures

1.1	Simulation à partir d'un modèle de tête sphérique . . . . .	5
1.2	Physiologie de l'oreille humaine . . . . .	7
1.3	Schéma fonctionnel simplifié du noyau cochléaire jusqu'au colliculus inférieur . . . . .	10
1.4	Schéma fonctionnel simplifié du colliculus inférieur jusqu'au cortex auditif . . . . .	11
1.5	Schéma fonctionnel simplifié du cortex auditif au lobe frontal . . . . .	13
1.6	Grotte d'Arcy-sur-Cure, Salle des Vagues, dans la partie la plus résonante, Mammouth diamanté.(Collection La Varende, photo M. Girard.) . . . . .	16
1.7	Galerie de Lascaux II, @crédit DAN COURTICE . . . . .	18
1.8	Lascaux IV . . . . .	18
1.9	Représentation de banquet sur vase, joueuse de <i>aulos</i> , Grèce antique . . . . .	19
1.10	Le son direct seul (en haut), puis ajouté aux réflexions sur l' <i>orchestra</i> et sur la <i>skene</i> (en bas), théâtre de Priène . . . . .	21
1.11	Source sur le <i>proskenion</i> d'Epidaure (en haut), puis sur l' <i>orchestra</i> (en bas), on note que la réflexion sur la <i>skene</i> n'atteint plus le public, théâtre d'Epidaure . . . . .	21
1.12	Positionnement de résonateurs de Helmholtz dans un théâtre antique . . . . .	22
1.13	Plan du théâtre de Dionysos, adossé à l'acropole, le temple ( <i>skene</i> ) devant l'ensemble, capacité de 17 000 places . . . . .	24
1.14	À Doura Europos, plans de la plus ancienne église chrétienne connue (la <i>domus ecclesiae</i> de Doura Europos) et d'une synagogue voisine, III <sup>ème</sup> siècle ap. J.C. . . . .	25
1.15	Basiliques Saint-Jean-de-Latran, Saint-Pierre du Vatican, Saint-Paul-hors-les-Murs, bâties au IV <sup>e</sup> siècle à la demande de l'empereur Constantin . . . . .	26
1.16	Cantatorium de Saint-Gall, manuscrit complet le plus ancien et considéré comme un chef-d'oeuvre de l'époque . . . . .	28
1.17	Exemple d'écriture de chant grégorien en quatre lignes . . . . .	29
1.18	Exemple de neumes . . . . .	29
1.19	Église romane <i>Sante Prassede</i> de Rome construite en 822 . . . . .	30
1.20	Nombre d'églises (n) et volumes (Vm) moyens par styles et pays, étude de Desarnaulds et Carv-holo. CH : Suisse, D : Allemagne, P : Portugal, YU : Serbie . . . . .	30

1.21	Nef principale de la cathédrale Notre-Dames de Paris construite entre 1163 et 1345 . . . . .	33
1.22	Points d'émissions pour l'étude acoustique de Michèle Castellengo, Benoit Fabre et Eric Vivie réalisée en 1978 . . . . .	37
1.23	Second <i>Magnus Liber Organi</i> de la cathédrale de Paris, écrit par Pérotin, reprenant celui écrit par Léonin . . . . .	40
1.24	Exemple de quadrupla du <i>Magnus Liber Organi</i> de 1250, notation mesurée . . . . .	40
1.25	Place Saint-Marc à Venise, 1740-1750 Musée d'Art contemporain de Rolandseck . . . . .	42
1.26	Intérieur de la basilique Saint-Marc . . . . .	43
1.27	Antonio Visentini (1688-1782), Vue du sanctuaire, représentation des pergoli de Sansovino, images prise de <i>la Iconografia della Ducal Basilica dell'Evangelista Marco</i> . . . . .	44
1.28	Présentation de la notation des clefs par Mr de Monteclair, <i>Principes de musique</i> , 1736, p9 . . .	48
1.29	Présentation de la notation des durées par Mr de Monteclair, <i>Principes de musique</i> , 1736, p25 . .	48
1.30	Présentation de la notation des valeurs pointées par Mr de Monteclair, <i>Principes de musique</i> , 1736, p29 . . . . .	49
1.31	Teatro Olimpico de Vincence, construit par Andre Palladio à partir de 1580. . . . .	50
1.32	Teatro Olimpico de Vincence, perspective en profondeur . . . . .	51
1.33	<i>Teatro Bibiena</i> dans <i>l'Accademia degli Invaghiti</i> à Mantova, construction baroque à partir de 1767 à la place de l'ancien théâtre où Monteverdi aurait représenté la première de son <i>Orfeo</i> . . .	52
1.34	Estampe d'A. Provost : salle des Maréchaux au palais des Tuileries. Installation et Prestation de Serment des Grands Corps de l'État (le 29 mars 1852), BNF . . . . .	55
1.35	Peinture d'Eugène-Emmanuel Viollet-Le-Duc : <i>Banquet des Dames dans la salle du spectacle des Tuileries</i> , salle des machines, 1835, Musée du Louvre . . . . .	56
1.36	Evolution du temps de réverbération (normalisé sur un volume de 5000m <sup>3</sup> ) suivant les styles et pays, CH : Suisse, D : Allemagne, P : Pologne, Y : Yougoslavie, All : moyenne sur l'ensemble des états de l'étude . . . . .	57
1.37	Analyse spectrale des $T_R$ suivant les styles architecturaux, les valeurs sont normalisés sur la bande fréquence entre 500 Hz et 1 kHz . . . . .	58
1.38	Deux salles de concert londoniennes emblématiques de la fin du XVIII <sup>ième</sup> siècle . . . . .	61
1.39	Johann Carl Friedrich Dauthe, salle de concert de la Altes Gewandhaus, Leipzig, construite en 1781, <i>aquarelle sur plume</i> , 1894 . . . . .	61
1.40	La chapelle des invalides où fut représentée la première de la <i>Grande messe des morts</i> . . . . .	63
1.41	Francis Fowke et Henry Scott, Royal Albert Hall, Londres, 1871, <i>Ouverture du Royal Albert Hall par la reine Victoria en 1871, artiste inconnu</i> . . . . .	64
1.42	McKim, Mead , White et Sabine, <i>Boston's Symphony Hall</i> (1900) . . . . .	68
1.43	Hans Scharoun, Grande salle de la Philharmonie de Berlin (1963), 2440 places. . . . .	69
2.1	Exemple de polytopes réalisé par Iannis Xenakis . . . . .	86

2.2	Plan de coupe du dôme de l'exposition universelle . . . . .	91
2.3	Photographie de Stockhausen à la table de mixage . . . . .	92
2.4	Plan de l'installation de Répons de Pierre Boulez pour la première en 1981 au festival de Donaueschingen, schéma de Laurent Grison dans " <i>Espace et Musique : Répons de Boulez</i> " (LAURENT 2000, p 87-89) . . . . .	97
2.5	Station 4X et sa flûte MIDI, Musée de la Musique, Paris . . . . .	99
2.6	A gauche l'intérieur de la station 4X, à droite le "Matrix 32" . . . . .	101
2.7	Trajectoire des solistes par couleurs et intensités, (BOULEZ et GERZSO 1988) . . . . .	102
2.8	Enveloppe sonore des six instruments solistes de <i>Répons</i> , les formes de ces instruments sont similaires : une attaque abrupte, au début, suivie d'une décroissance plus douce, ou fin. La durée d'un déclin dépend à la fois de la hauteur du son et de l'instrument sur lequel il est joué. (BOULEZ et GERZSO 1988) . . . . .	102
2.9	(BOULEZ et GERZSO 1988) . . . . .	103
2.10	Accords joués en arpèges par les solistes pour crée des effets d'antiphonie spatiale s'inspirant du chant responsorial. (BOULEZ et GERZSO 1988) . . . . .	104
2.11	Représentation schématique des jeux d'antiphonie spectraux sur des arpèges dans <i>Répons</i> de P. Boulez (BOULEZ et GERZSO 1988) . . . . .	105
2.12	Transpositions entres les 5 accords qui constituent la majorité de l'harmonie de <i>Répons</i> (BOULEZ et GERZSO 1988) . . . . .	105
2.13	<i>Halaphon</i> développé par Cristóbal Halffter et Hans Peter Haller, en collaboration avec la société <i>Lawo</i> . . . . .	109
2.14	Vue extérieur de l'église <i>San Lorenzo</i> de Venise. . . . .	109
2.15	Plan de la structure imaginée par Renzo Piano dans l'église <i>San Lorenzo</i> pour le <i>Prometeo</i> de Luigi Nono, vue du dessus . . . . .	110
2.16	Plan de la structure imaginée par Renzo Piano pour le <i>Prometeo</i> de Luigi Nono, pour la première dans l'église <i>San Lorenzo</i> de Venise . . . . .	111
2.17	Photographie avec public dans l'église <i>San Lorenzo</i> de Venice, on observe l'ouverture entre les deux nefs et la régie sonore centrale . . . . .	112
2.18	<i>Prometeo</i> , distribution spatiale des effectifs instrumentaux et des haut-parleurs, (NIELINGER-VAKIL 2015, p 236) . . . . .	114
2.19	Exemple de <i>Coro Lontanissimo</i> , dans la partition de <i>Prometeo</i> . . . . .	115
2.20	Dessins de Luigi Nono, réflexion sur les trajectoires et les positions des enceintes pour <i>Prometeo</i> dans l'église <i>San Lorenzo</i> , de Venise . . . . .	117
2.21	Schéma des mouvements sonores de <i>Prometeo</i> , seconde île , durant un <i>Coro Lontanissimo</i> , 20 secondes de temps de réverbération, (NIELINGER-VAKIL 2015, p 261) . . . . .	118
2.22	Exemple de dispositif stéréophonique, enceintes espacés de 60 degrés (Spat), vue de dessus à gauche et vue de derrière à droite. . . . .	120

2.23	Exemple de dispositif VBAP 2D sur 6 HP, 60 degrés entre chaque enceintes (Spat) . . . . .	121
2.24	Exemple de dispositif VBAP 3D sur 24 HP, disposition du Studio 1 de l'IRCAM (Spat) . . . . .	122
2.25	Exemple de dispositif LBAP en deux couches, une à 0 degré d'élévation de 6 enceintes et une à 30 degrés d'élévation de 4 enceintes. . . . .	122
2.26	Harmoniques sphériques des rangs 0 à 3 (de haut en bas) . . . . .	123
2.27	Harmoniques circulaires des rangs 0 à 1 . . . . .	124
2.28	Schéma simplifié du chemin du signal en Ambisonie . . . . .	125
2.29	Schéma simplifié de la synthèse d'un front d'onde d'une source primaire (virtuelle) par une distribution de sources secondaire (enceintes) . . . . .	127
2.30	Spat WFS Config, choix du nombre de haut-parleurs, de leur distribution, et de la distance optimale d'écoute (ici 5 m), visualisation des aires d'écoutes engendrées par ces choix . . . . .	129
2.31	Spat WFS Config, choix du nombre de haut-parleurs, de leur distribution, et de la distance optimale d'écoute (ici 2 m), visualisation des aires d'écoutes engendrées par ces choix . . . . .	129
2.32	Schéma de présentation du fonctionnement du filtre XTC . . . . .	131
3.1	Coefficient d'absorption : $\alpha$ , a : énergie sonore totale incidente, b : énergie sonore réfléchie, c : énergie sonore absorbée, d : énergie sonore transmise . . . . .	135
3.2	Jean Nouvel, Artec, Kultur- und Kongresszentrum (KKL) à Lucerne, Suisse. Les parois latérales sont composées de portes donnant sur un grand volume vide. . . . .	136
3.3	Détail des portes commandées électriquement entre la salle principale et la chambre de réverbération dans la salle du KKL à Lucerne en Suisse . . . . .	136
3.4	Plan vue du dessus de la salle du KKL à Lucerne. 1 : Volume acoustique principal de la salle de concert, 2 : Portes de la chambre de réverbération, 3 : Chambre de réverbération . . . . .	137
3.5	Graphique de présentation de la double pente de déclin de la réverbération d'une salle à volumes couplés. . . . .	137
3.6	Salle de concert <i>Espro</i> de l'IRCAM, murs et périactes mobiles. . . . .	138
3.7	Placement des 280 enceintes en WFS et du dôme de 75 enceintes dans l' <i>Espro</i> de l'IRCAM en 2017	139
3.8	Projection des enceintes réelles sur une sphère virtuelle pour calculer les délais et gains à appliquer à chaque enceinte pour compenser la forme cubique de la salle. . . . .	139
3.9	La technique "focus delay" combinant des délais WFS amplifiés puis remis à l'échelle originale . . . . .	144
3.10	Représentation sphérique d'une image pour contrôler la distribution d'énergie sur un ambisonique d'ordre 3 . . . . .	145
3.11	Schéma d'une simulation d'acoustique de la mesure ou du modèle mathématique jusqu'à l'oreille humaine. . . . .	147
3.12	Schéma dit de <i>waterfall</i> qui permet une représentation en trois dimensions. Ici le temps, la fréquence et l'amplitude. . . . .	148
3.13	Classement des réflexions d'une réponse impulsionnelle . . . . .	149

3.14	Feedback Delay Network (FDN) : structure proposée pour une réverbération artificiel par Jot (JOT et CHAIGNE 1991).	151
3.15	EDR (en dB) des IR de l'original à gauche et de l'hybride à droite. La ligne pointillée représente la transition entre l'IR et le FDN, $t = t_{mix}$ .	151
3.16	Structure du processeur de réverbération hybride. Les lignes pointillées représentent les opérations <i>offline</i> (hors-ligne, pas en temps réel).	152
3.17	Structure du traitement du signal de la réverbération hybride avec des contrôles perceptifs. En bleu les convolutions, en rouge la réverbération paramétrique. Les délais en marron assurent l'alignement temporel des différents segments, les blocs en magenta correspondent aux filtres trois bandes contrôlés par le modèle perceptif.	153
3.18	Interface de contrôle du <i>spat.oper</i>	153
3.19	Interface Blender durant une auralisation avec EVERTims. Visualisation des chemins de réflexions grâce au mode <i>debug</i> .(DAVID POIRIER-QUINOT 2017, p 4)	155
3.20	Architecture générale du moteur d'auralisation (DAVID POIRIER-QUINOT 2017, p 5)	156
3.21	Répétition de <i>Encantadas</i> à la cité de la musique avec l'Ensemble intercontemporain, la régie se situe au centre de la salle	160
3.22	Prototype de simulation perceptive d'acoustique	164
3.23	Session d'expérimentation avec l'interprète dans le studio 1 de l'IRCAM	165
3.24	Vue de la session d'enregistrement dans la station <i>Reaper</i>	166
3.25	Notation de Jet Whistle, FuteXpansions	167
3.26	Notation de Chant-Flûte, FuteXpansions	167
3.27	Notation de multiphoniques, FuteXpansions	167
3.28	Notation de sons éoliens, FuteXpansions	168
3.29	Notation de glissandos, FuteXpansions	168
3.30	Notation de glissandos, FuteXpansions	168
3.31	Notation d'un <i>flutter tongue</i> , FuteXpansions	168
3.32	Notation de <i>tongue ram</i> , FuteXpansions	169
3.33	Pages 1 et 2 de la partition pour flûte de la première partie	170
3.34	pages 3 et 4 de la partition pour flûte de la première partie	170
3.35	Représentation des positions des réflexions du couloir lorsque le guide se trouve à la limite de la seconde pièce. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives	171
3.36	Représentation des positions des réflexions de la cathédrale, le guide est ici frontal au bord de la salle, plus les réflexions sont tardives plus elles s'élèvent. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives	172

3.37	Représentation des positions des réflexions de la spirale à la manière de l'église <i>San Lorenzo</i> . En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives . . . . .	172
3.38	Représentation des positions des réflexions de la spirale, destruction de l'impression de trajectoire par plusieurs révolutions. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives . . . . .	173
3.39	Première proposition de déplacement dans la zone d'écoute . . . . .	174
3.40	Première implémentation pour 3 sources avec <i>Spat5.room~</i> . . . . .	175
3.41	Traitements ambisoniques appliqués à des aux réverbération basées sur des réponses impulsionnelles	176
3.42	Utilisation de <i>Qlist</i> pour écrire et lancer les cues. . . . .	177
3.43	Utilisation de <i>list-interpolate</i> du CNMAT . . . . .	177
3.44	Salle de concert ambisonique d'ordre 4 de la ZHdK, acoustique variable à l'aide de rideaux absorbant qui peuvent être tendus sur les quatre faces. . . . .	178
3.45	Exemple d'implémentation stéréophonique avec <i>ircamverb</i> . . . . .	179
3.46	Schéma simplifié d'implémentation 3D, le système n'est ici représenté que pour une seule source, avec 8 canaux de bus internes (8 early, 8 cluster, 8 late). Certains traitements ne sont ici pas représentés tel que les retards, l'atténuation des cluster et late, etc. ne sont pas représenté ni les signaux de contrôle des données. . . . .	179
3.47	Vue du <i>Spat5.viewer</i> , à gauche : vue du dessus, à droite : vue de derrière. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives .	180
3.48	Vue en 3D des sources dans l'espace. En rouge le son direct, en orange les premières réflexions, en vert les réflexions denses et en bleu les réflexions tardives . . . . .	180
3.49	Deuxième approche sur la base du tutoriel de la banque <i>Spat4</i> "Patching <i>Spat</i> ", vue principale .	181
3.50	Vue à l'intérieur du modèle d'image source. Deuxième approche sur la base du tutoriel de la banque <i>Spat4</i> "Patching <i>Spat</i> " . . . . .	182
3.51	Interface de contrôle du simulateur d'acoustique "perceptif", en haut à gauche la position des "oiseaux", à sa droite les contrôles de l'algorithme de <i>boids</i> , tout à droite un contrôle du décalage du centre des nuées d'oiseaux, en dessous les potentiomètres rotatifs et faders de contrôle de l'acoustique (temps de réverbération, équilibre des groupes, etc.) . . . . .	184
3.52	Interface du modélisateur, on peut gérer ici des paramètres plus précis de l'acoustique comme le temps de réverbération par bande de fréquence. Contrôler les formes des premières réflexions, générer les spirales. . . . .	185
3.53	Exemple de position des deux nuées d'oiseaux dans le <i>spat.oper</i> . . . . .	185
3.54	Positions des premières réflexions de la source 1 de la Figure 3.53 suivant différentes formes. De haut en bas : modèle de sphère, de demi-sphère, de couloir, de spirale. . . . .	186
3.55	Vue en mode représentation du moteur d'auralisation. . . . .	187
4.1	Lois de panoramisation stéréophonique en différence d'intensité . . . . .	191

4.2	Fonction de transfert de l'oreille moyenne et externe . . . . .	192
4.3	Position des capsules et des axes dans un cube . . . . .	194
4.4	Schéma des étapes de l'invention du théâtre à Athènes . . . . .	195
4.5	Formalisme de l'espace sur un cercle ar Stockhausen . . . . .	197