



HAL
open science

Représentations opératoires pour le traitement spatial du son : une approche de la création musicale et logicielle

Paul Goutmann

► To cite this version:

Paul Goutmann. Représentations opératoires pour le traitement spatial du son : une approche de la création musicale et logicielle. Musique, musicologie et arts de la scène. Université Paris 8 - Vincennes-St Denis, 2024. Français. NNT: . tel-04792914

HAL Id: tel-04792914

<https://theses.hal.science/tel-04792914v1>

Submitted on 20 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

en vue de l'obtention du grade de

Docteur en Esthétique, Sciences et Technologies des Arts,
de l'Université Paris 8 - Vincennes Saint-Denis

Spécialité : **Musique**

Laboratoire Musidanse (EA1572)

École Doctorale Esthétique, Sciences et Technologies des Arts

Présentée et soutenue publiquement le 17 mai 2024
par **Paul GOUTMANN**

Représentations opératoires pour le traitement spatial du son : une approche de la création musicale et logicielle

Directeur ou directrice de Thèse : M. Alain BONARDI et Mme. Anne SÈDES

Devant le jury composé de :

M.	Alain BONARDI	<i>Professeur, Université Paris 8</i>	Directeur
Mme.	Anne SÈDES	<i>Professeure, Université Paris 8</i>	Co-directrice
M.	Gérard ASSAYAG	<i>Directeur de recherche, CNRS - Ircam</i>	Rapporteur
M.	Pierre COUPRIE	<i>Professeur, Université Paris-Saclay</i>	Rapporteur
Mme.	Myriam DESAINTE-CATHERINE	<i>Professeure émérite, Université de Bordeaux</i>	Examinatrice

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Alain Bonardi, et ma co-directrice, Anne Sèdes, pour leur soutien inébranlable, leurs conseils avisés et leur engagement constant tout au long de mon parcours académique. Vous m’avez accompagné, porté et apporté depuis mes essais balbutiants dans le cadre des mémoires de master il y a six ans jusqu’à la rédaction de cette thèse.

Mes remerciements vont également à mes collègues et ami.e.s Adrien, Alice, David et Diane. J’ai sincèrement beaucoup appris à vos côtés et ce fut un grand plaisir de travailler avec vous. Je suis sûr que nos chemins continueront de se croiser.

Je suis infiniment reconnaissant envers l’E.U.R ArTeC (financée par l’ANR au titre du PIA ANR-17-EURE-0008), qui a rendu cette recherche possible et a fourni les ressources nécessaires à son aboutissement, ainsi que la Maison des Sciences de l’Homme Paris Nord pour avoir accueilli mes travaux. Je remercie notamment Yves Citton pour ses conseils toujours très justes et son énergie contagieuse.

Je remercie aussi tous mes collègues du département Musique de l’Université Paris 8 pour leur confiance en me permettant d’enseigner en qualité d’ATER après m’avoir accompagné depuis mes premières années à l’université. Au-delà de l’épaisseur de cette expérience d’enseignement, ce fut un honneur de contribuer à la vie pédagogique et intellectuelle de ce département qui est celui qui m’a ouvert ses portes en initiation après mon baccalauréat il y a dix ans. Cela compte beaucoup.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers la famille Xenakis, en particulier à Mâkhi Xenakis de m’avoir permis de consulter à plusieurs reprises les archives Xenakis. Un grand merci à Makis Solomos notamment pour m’avoir offert l’opportunité de travailler

REMERCIEMENTS

sur *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* et de collaborer avec le Planétarium et le Conservatoire d'Athènes dans le cadre du projet "Habiter (avec) Xenakis".

Ma reconnaissance va aussi à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de ce voyage académique. Particulièrement mes parents, pour leurs relectures, leur soutien sans faille et surtout pour tout le reste.

Enfin, ma chère Cassandre, je te suis infiniment reconnaissant de m'avoir soutenu et accompagné durant cette aventure unique.

Résumé

REPRÉSENTATIONS OPÉRATOIRES POUR LE TRAITEMENT SPATIAL DU SON : UNE APPROCHE DE LA CRÉATION MUSICALE ET LOGICIELLE

Dans les différentes approches de création musicale contemporaines, la dimension spatiale du son est une dimension composable essentielle. La spatialité du son y est souvent réduite à la spatialisation et à la modélisation acoustique de salle. La pratique de la spatialisation convoque généralement des modèles de représentation de l'espace dominés par des représentations euclidiennes. En dépit de ce constat, bien que moins répandues, de nombreuses approches de l'espace coexistent sans pour autant être accompagnées de représentations adaptées. Cette dualité rend nécessaire l'exploration des enjeux musicaux et technologiques inhérents à la conception des représentations avec lesquelles les compositeurs travaillent les qualités spatiales du son. Dans cette thèse, nous défendons l'idée que la création de représentations opératoires pour le traitement spatial du son, associées à une pratique de composition, engendrent une approche singulière et partageable de l'espace. La première partie du texte remet en question la pensée euclidienne de l'espace en musique et explore la dimension graphique des représentations opératoires pour le traitement spatial du son. La seconde partie est consacrée à l'étude du traitement spatial par décorrélation des signaux en ambisonie à l'échelle du moteur de traitement. Enfin, la troisième partie met en lumière des approches compositionnelles personnelles. Chacune de ces parties présente des contributions musicales et logicielles issues d'une méthodologie de recherche-crédation regroupées sous forme de contribution aux bibliothèques *Faust abc.lib* et *hoa.lib* ainsi que des compositions électroacoustiques originales.

Mots clefs : Traitement spatial du son, spatialisation, décorrélation, ambisonie, HOA, espace sonore, représentation opératoire, FAUST.

Abstract

OPERATIVE REPRESENTATIONS FOR SPATIAL AUDIO PROCESSING : AN APPROACH OF MUSICAL AND SOFTWARE CREATION

In contemporary music, the spatial dimension of sound is an essential compositional dimension. Sound spatiality is often reduced to sound spatialization and acoustic room modeling. The practice of sound spatialization generally calls upon space representation models dominated by Euclidean representations. Despite this observation, although less widespread, many approaches to space coexist without being accompanied by appropriate representations. This duality makes it necessary to explore the musical and technological issues inherent in the creation of representations with which composers work on the spatial qualities of sound. This thesis explores the musical issues involved in creating and implementing operating representations for spatial audio processing. Thus, we argue that the creation and implementation of operating representations for spatial audio processing, combined with a composition practice, generate a unique and shareable approach to space both in software and music. Structured in three parts, the text examines various aspects of operating representations for spatial audio processing. The first part challenges Euclidean thinking of space and explores the graphic dimension of operating representations. The second part focuses on the scale of digital audio processing through the experimental study of ambisonic decorrelation. Finally, the third part highlights personal compositional approaches. Each of these parts presents musical and software contributions from a research-creation methodology grouped as contributions to the Faust abc.lib and hoa.lib libraries as well as original electroacoustic compositions.

Keywords : spatial audio processing, spatialization, decorrelation, ambisonics, HOA, musical space, operative representation, FAUST.

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	3
Abstract	5
Table des matières	10
Table des figures	15
Liste des abréviations	19
Avant-propos	21
Introduction	23
I Représentation, géométrie, interface	29
1 Représentation de l'espace	33
1.1 Le point et la ligne	35
1.1.1 Pensée euclidienne de l'espace	35
1.1.2 <i>Concret PH</i> de I.Xenakis : un contre-exemple ?	36
1.1.3 Euclide : une géométrie commode	39
1.2 Au-delà d'une pensée euclidienne de l'espace en musique	41
1.2.1 Masse et nuage : paradigme granulaire	41
1.2.2 Champs vectoriels et matrices	43
1.2.3 Géométries non-euclidiennes	45
1.3 Géométrie pour la spatialisation	49
1.3.1 Référentiel, repère et système de coordonnées	49
1.3.2 Cadre de référence et conventions	50

1.3.3	Déplacement et rotation	52
1.3.4	Vue, perspective et interface	53
2	Interfaces pour la spatialisation : état de l'art	55
2.1	Interface logicielle	55
2.1.1	GRM Tools	56
2.1.2	<i>HOALibrary</i>	59
2.1.3	Holophonix	63
2.1.4	<i>IEM Plug-in Suite</i>	64
2.1.5	Spat Ircam	65
2.1.6	SpatGris	70
2.1.7	Zirkonium	73
2.2	Écriture et notations de la spatialisation	75
2.2.1	Spatial Symbolic Musical Notation (SSMN)	82
2.2.2	Spatial Sound Description Interchange Format (SpatDIF)	86
2.2.3	Audio Definition Model (ADM)	88
2.3	Synthèse critique	89
3	Approches originales	93
3.1	Interfaces d'écriture	94
3.1.1	<i>Sketch To Ambisonics Processes</i> (stap.js)	95
3.1.2	<i>Two Piecewise Linear Functions</i> (2plf.js)	103
3.2	Interfaces de contrôle	112
3.2.1	<i>Delay Time to Decorrelation</i> (dtd.js)	112
3.2.2	<i>Map +</i> (map_plus.js)	115
3.3	Tests utilisateur	119
3.3.1	Méthodologie	119
3.3.2	Résultats	122
3.4	Synthèse de la première partie	124

II Traitement spatial du son	127
4 Ambisonie : du modèle à l'implémentation	131
4.1 <i>First Order Ambisonics</i> (FOA)	133
4.1.1 Enregistrement	133
4.1.2 Encodage	135
4.1.3 Décodage	136
4.2 <i>High Order Ambisonics</i> (HOA)	139
4.2.1 Extension aux ordres élevés	139
4.2.2 Décodage	140
4.2.3 Vecteurs énergie et vitesse	142
4.3 De <i>HOALibrary</i> à <i>abc.lib</i> puis <i>hoa.lib</i>	143
4.3.1 Contexte	143
4.3.2 Présentation de la bibliothèque	144
4.3.3 Perspectives	146
5 Traitement spatial par décorrélation de signaux	149
5.1 Origines musicales	150
5.1.1 Présentation du formalisme	150
5.1.2 Décorrélation dans le domaine fréquentiel	153
5.1.3 Décorrélation dans le domaine temporel	157
5.2 Décorrélation en ambisonie : un héritage de <i>HOALibrary</i>	160
5.2.1 L'objet <code>hoa.process</code>	160
5.2.2 Le patch <code>hoa.fx.decorrelation</code>	160
5.3 Implémentation dans <i>abc.lib</i> et <i>hoa.lib</i>	162
5.3.1 Formalisme	162
5.3.2 Raffinements : intégrations originales	163
5.3.3 Points critiques	168
6 Décorrélation : vers une généralisation	173
6.1 Extensions de l'approche	173
6.1.1 Surencodage spatial	174

6.1.2	Décorrélation DHC-DOP	176
6.1.3	Multidécorrélation - Méta-décorrélation - Strate	181
6.1.4	Enveloppe	187
6.2	Généralisation	189
6.2.1	Traitements en série et en parallèle	189
6.2.2	Méta-traitement	193
6.2.3	Layer Based Ambisonics Processes	196
6.2.4	Ring Modulation	198
6.3	Analyse du résultat	200
6.3.1	Intercorrélation multicanal : un descripteur spatial	200
6.3.2	Exemples d'analyse : <i>functiontype</i> et multidécorrélation	203
6.4	Synthèse de la deuxième partie	207
III Spatialité composée - spatialité émergente		209
7	<i>Voyage Absolu des Unari vers Andromède de I.Xenakis</i>	213
7.1	UPIC : introduction générale	215
7.1.1	Origines de l'UPIC	215
7.1.2	Description du dispositif	217
7.2	Analyse de la pièce	218
7.2.1	Documents, contexte et montage	218
7.2.2	Écriture de la spatialité	221
7.3	Vers une mise en espace	226
7.3.1	Planétarium de la Cité des Sciences et de l'Industrie	226
7.3.2	Essais et dispositif de travail	226
7.3.3	Adaptations pour <i>Xenakis Alive</i>	229
8	De la poïésis aux prototypes	233
8.1	<i>Suspension</i>	234
8.1.1	Contexte de composition	234
8.1.2	Synthèse FM, modèle de Chowning et utilisation	235
8.1.3	Bilan	240

8.2	<i>Compression/dilatation</i>	242
8.2.1	Dispositif de composition	242
8.2.2	Bilan	246
8.3	<i>Émergences</i>	246
8.3.1	Dispositif de composition	247
8.3.2	Analyse du patch	253
8.3.3	Montage en ambisonie	258
9	Approches compositionnelles	259
9.1	Morphologies spatiales dans <i>Émergences</i>	259
9.1.1	De la notion de morphologie	260
9.1.2	Textures spatiales / texturer l'espace	261
9.1.3	Stratification	264
9.1.4	Enveloppe d'espace	267
9.2	Appropriations musicales	270
9.2.1	<i>Fil de Soi 3</i> de A.Bonardi	270
9.2.2	<i>Mycelium Garden</i> de D.Schuh	274
9.2.3	<i>Azúcar salomónica con estrías</i> de G.M.Monteagudo	277
9.3	Synthèse de la troisième partie	281
	Conclusion	283
	Annexes	291
	A.1 Logiciel	291
	A.2 Œuvres musicales	294
	Bibliographie	296
	Index	307

Table des figures

1.1	« Routes du son » dans le Pavillon Philips, dessin de I.Xenakis	37
1.2	Plan hyperbolique, plan euclidien, plan sphérique	46
1.3	Projection du plan hyperbolique sur un disque	47
1.4	<i>Limite circulaire III</i> , M.C.Escher (1959)	48
1.5	Système de coordonnées lié à la tête d'après J.Blauert	51
1.6	Systèmes de coordonnées et conventions	52
2.1	Interface graphique de <i>Space3D</i> et <i>SpaceFilter</i> (GRM Tools)	57
2.2	Interface graphique de <i>SpaceGrain</i> (GRM Tools)	58
2.3	Interface graphique de <i>hoa.map</i>	60
2.4	Interface graphique de <i>hoa.space</i>	61
2.5	Interface graphique de <i>hoa.recomposer</i>	62
2.6	Interface graphique de <i>Holophonix</i>	63
2.7	Interaction avec les objets dans <i>Holophonix</i>	64
2.8	Interface graphique du <i>multiEncoder</i> (<i>plug-in IEM</i>)	65
2.9	Interface graphique du <i>spat5.viewer</i>	66
2.10	Interface graphique du <i>spat5.hoa.focus</i>	68
2.11	Interface graphique de <i>spat5.simone</i>	69
2.12	Panneau de spatialisation de <i>ControlGris</i>	71
2.13	Interface graphique de <i>SpatGris</i>	72
2.14	Interface graphique de <i>Zirkonium3</i>	73
2.15	Interface graphique de <i>Zirkonium3</i>	75
2.16	Extraits de <i>Quattro pezzi su una nota, Pression, Partiels</i>	77
2.17	Extraits de <i>Studie 1, Set et En écho</i>	79

TABLE DES FIGURES

2.18	Extraits de <i>Nachleben, Sagittarius A*, Sentinelle Nord</i>	80
2.19	Notation originale associée à une taxinomie subjective des qualités spatiales	81
2.20	Exemple d'utilisation des symboles proposés par <i>SSMN</i>	83
2.21	Symboles proposés par <i>SSMN</i>	84
2.22	Taxinomie sous-jacente à la notation de la <i>SSMN</i>	85
2.23	Organigramme des couches d'opérations dans le format <i>SpatDIF</i>	86
2.24	Structure d'un message de commande au format <i>SpatDIF</i>	87
3.1	Représentation d'une matrice de dimension 3	97
3.2	Exemple d'une partition <i>stap.js</i>	98
3.3	Exemple d'utilisation de <i>stap.js</i>	100
3.4	Exemple d'utilisation de <i>2plf.js</i> utilisé pour les tests utilisateur	104
3.5	Échelles temporelles décrites par Curtis Roads	107
3.6	Répartition des caractéristiques données par Roads pour $d \in [0, 1000]$	108
3.7	Tracé de la fonction de seuil en échelle linéaire (gauche) et logarithmique (droite)	109
3.8	Répartition des caractéristiques suivant cinq fonctions de transfert	110
3.9	Matrice de <i>mapping</i> utilisée avec <i>2plf.js</i>	111
3.10	Schéma commenté de l'interface <i>dtd.js</i>	113
3.11	Patch de démonstration utilisé lors des JIM 2020	114
3.12	Planche schématique pour une interface de contrôle générique	116
3.13	patch utilisé pour les tests utilisateur (<i>map_plus.js</i>)	117
4.1	Dispositif d'enregistrement ambisonique avec quatre microphones	134
4.2	Schéma du microphone <i>Soundfield</i>	135
4.3	Représentation des harmoniques sphériques jusqu'à l'ordre 3	141
4.4	Architecture de la bibliothèque <i>abc.lib</i>	145
5.1	Fonctions d'intercorrélation et coefficients de corrélation	152
5.2	Décorrélacion par convolution avec des réponses impulsionnelles de filtres FIR	154
5.3	Schéma du calcul des coefficients pour une paire de filtre FIR	155
5.4	Corrélation croisée sur un échantillon de voix chantée	156
5.5	Implémentation du procédé de décorrélacion décrit par Kendall	157
5.6	Illustration du décalage temporel entre un signal et sa réplique	159

5.7	Première instance du patch <code>hoa.fx.decorrelation~</code>	161
5.8	Illustration des trente fonctions de transferts	164
5.9	Valeurs des coefficients pour quatre fonctions de distribution	165
5.10	Trois modes de distribution des traitements en 3D	168
5.11	Représentation intermédiaire de l'espace avec Y_0 , $Y_{-1,1}$ et $Y_{1,1}$	169
5.12	Compensation du gain par ordre ambisonique en fonction du facteur	169
5.13	Coefficient de traitement par harmonique	170
5.14	Coefficient de traitement par harmonique (facteur dans l'équation)	171
5.15	Coefficient de traitement par harmonique (inversion de l'approche)	171
6.1	Tracé des quinze premières fonctions circulaires $Y_{m,n}$	175
6.2	Distribution des retards dans les signaux envoyés aux HP	179
6.3	Exemple d'une décorrélation en série DHC-DOP	180
6.4	Exemple de multidécorrélation avec quatre modules	181
6.5	Exemple de métadécorrélation avec quatre modules	182
6.6	Exemple d'utilisation de trois strates de décorrélation	185
6.7	Facteur de gain par flux ambisonique en fonction de l'élévation	185
6.8	Représentation schématique de la courbure d'une strate de traitement 2D	186
6.9	Exemple d'utilisation du script <code>spatialEnv.js</code> avec <code>hoa.space</code>	188
6.10	Schéma d'une chaîne de traitement à instance multiple	195
6.11	Taux de corrélation pour un encodage directionnel	202
6.12	Taux de corrélation pour un encodage directionnel avec décorrélation	203
6.13	Comparaison de taux de corrélation dans le DOP	204
6.14	Comparaison des différences de taux de corrélation dans le DOP	205
6.15	Taux de corrélation pour un encodage directionnel avec de la multidécorrélation	206
6.16	Taux de corrélation pour un encodage directionnel avec décorrélation	207
7.1	Extrait de la partition de <i>Metastasis</i> (1953-54) de I.Xenakis	215
7.2	Impression UPIC : extrait de partition de <i>Voyage</i> page 6	217
7.3	Schéma du dispositif de l'UPIC	219
7.4	Indication de montage pour la version de 15'30"	220
7.5	Notice de <i>Voyage Absolu des Unari vers Andromède</i> (version de 15'30")	221

TABLE DES FIGURES

7.6	Impression UPIC : page n°6 et tableau de données associé	222
7.7	Impression UPIC : formes d'onde et enveloppes d'amplitude	223
7.8	Tableau manuscrit indiquant l'origine des pages et quelques spécifications . . .	225
7.9	Vue orthographique de l'implantation du Planétarium et schéma de projection	227
7.10	Plan d'implantation du système de diffusion pour le concert « Xenakis Alive »	230
7.11	Patch de concert pour « Xenakis Alive »	230
7.12	Photographie du système de diffusion pour le concert « Xenakis Alive » . . .	231
8.1	Représentation des fonctions $J_n(x)$ jusqu'à l'ordre 6 pour $x \in [0, 20]$	237
8.2	Spectrogramme des deux spectres utilisés dans <i>Suspension</i>	239
8.3	Spectrogramme de <i>Suspension</i> avec les partiels décalés dans le temps	240
8.4	Spectrogramme de <i>Suspension</i> après le passage dans la décorrélation	241
8.5	Forme d'onde des échantillons audio utilisés dans <i>Compression/dilatation</i> . . .	243
8.6	Patch <i>Max4Live</i> utilisé dans la chaîne de traitement	244
8.7	Vue de la session <i>Ableton Live</i> utilisée pour la composition	245
8.8	Forme d'onde des échantillons audio utilisés dans <i>Émergences</i>	248
8.9	Forme d'onde une portion de l'échantillon n°1	249
8.10	Structure des fichiers <i>wave</i> pour la composition d' <i>Émergences</i>	250
8.11	Schéma de l'écosystème logiciel utilisé pour la composition d' <i>Émergences</i> . . .	251
8.12	Décodeurs pour le <i>monitoring</i> et l'enregistrement (<i>sous-patch</i>)	252
8.13	Page principale du patch utilisé pour la chaîne de traitement dans <i>Émergences</i>	253
8.14	Chaîne de traitement de la première strate (<i>sous-patch</i>)	254
8.15	Instances de <i>2plf.js</i> pour contrôler la première strate de traitement	255
8.16	Exemple d'une instance de <i>2plf.js</i> pour contrôler <i>hoa.space</i>	256
8.17	Matrice de <i>mapping</i> utilisée pour <i>Émergences</i>	257
8.18	Extrait de la session <i>Reaper</i> pour la composition d' <i>Émergences</i>	258
9.1	Extrait de la <i>Reaper</i> utilisée pour la composition d' <i>Émergences</i>	266
9.2	Illustration de l'utilisation des strates de traitement	268
9.3	Utilisation de <i>2plf.js</i> pour l'écriture d'enveloppes spatiales	269
9.4	<i>Blockdiagram</i> du code FAUST de <i>Fil de Soi 3</i> A.Bonardi	272
9.5	Évolution des paramètres de contrôle et partition entre les mesures 6 et 11 . .	273

9.6	Patch de concert de <i>Fil de Soi 3</i> d'Alain Bonardi	274
9.7	Schéma de l'installation proposée aux Rencontres de l'EUR ArTeC	275
9.8	Sous-patch du moteur sonore de <i>Mycelium Garden</i>	276
9.9	<i>Patch PureData</i> utilisé pour la composition des figures	278
9.10	Forme d'onde du son initial et du fichier multipiste résultant	279
9.11	Extrait de la session <i>Reaper</i> utilisée pour le montage	280

Liste des abréviations

ACI Action Concertée Incitative

ACN *Ambisonics Channel Order*

ADM *Audio Definition Model*

ANR Agence Nationale de la Recherche

BBDMI *Body Brain Digital Musical Instruments*

CEMAMU Centre d'Études de Mathématique et Automatique Musicales

CICM Centre de recherche en Informatique et Création Musicale

CIRMMT *Center for Interdisciplinary Research in Music Media and Technology*

CPU *Central Processing Unit*

CREATE *Center for Research in Electronic Art Technology*

DAC *Digital to Analog Converter*

DAW *Digital Audio Workstation*

DBAP *Distance Based Amplitude Panning*

DHC domaine des harmoniques circulaires

DOP domaine des ondes planes

DSP *Digital Signal Processing*

EEG Électro-Encéphalogramme

EMG électro-myogramme

ESAT Établissement et Service d'Aide par le Travail

LISTE DES ABRÉVIATIONS

EUR École Universitaire de Recherche

FAUST *Functional AUdio STream*

FDN *Feedback Delay Network*

FFT *Fast Fourier Transform*

FIR *Finite Impulse Response*

FOA *First Order Ambisonics*

GAN *Generative Adversarial Network*

GRAMME Générateur de Ressources et d'Activités Musicales Exploratoires

GRIS Groupe de Recherche en Immersion Spatiale

GUI *Graphic User Interface*

HOA *High Order Ambisonics*

HPV haut-parleur virtuel

HP haut-parleur

ICST *Institute for Computer Music and Sound Technology*

IEM *Institute of Electronic Music and Acoustics*

INA GRM Groupe de Recherches Musicales

IRCAM Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique

JIM Journées francophones d'Informatique Musicale

LBAMP *Layer Based Ambisonics Processes*

LBAP *Layer Based Amplitude Panning*

LFO *Low Frequency Oscillator*

MIDI *Musical Instrument Digital Interface*

MSH PN Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord

OP onde plane

OSC *Open Sound Control*

SSMN *Spatialization Symbolic Music Notation*

TENOR *International Conference on Technologies for Music Notation and Representation*

UPIC Unité Polyagogique Informatique du CEMAMu

VBAP *Vector Based Amplitude Panning*

WFS *Wave Field Synthesis*

ZKM *Zentrum für Kunst und Medien*

Avant-propos

Les trois parties de cette thèse sont considérées comme trois coupes dans un même objet d'étude, les représentations opératoires pour le traitement spatial du son, chacune d'elles est associée à des livrables référencés en annexe.

Les chapitres trois, six, huit et neuf sont fondamentalement liés : le chapitre trois analyse des interfaces graphiques manipulant des traitements audionumériques présentés dans le chapitre six, eux-mêmes mis en œuvre dans des pièces analysées dans les chapitres huit et neuf. Pour aider le lecteur, des liens de renvoi vers les sections, chapitres et parties jalonnent le document.

Les figures, tableaux, *listing* (code) et équations sont numérotés par chapitre, par exemple la figure 1.9 est la neuvième figure du chapitre 1. Les exemples sonores et logiciels appelés dans le corps du texte renvoient vers les annexes. Tous les exemples sonores sont des réductions stéréophoniques de situations multicanales.

Le nom des objets *Max* ou des fonctions *Faust/JavaScript* est écrit avec la graisse suivante : `monObjet`. Les noms de logiciels, instruments propriétaires et entreprises sont notés en italique.

La bibliographie est classée par ordre alphabétique tous types d'ouvrage confondus. Notre positionnement interdisciplinaire nous amène à publier dans des ouvrages, revues et conférences dont les habitudes ne sont pas toujours celles de la 18^{ème} section et de la musicologie. Ainsi, un certain nombre de publications sont écrites à plusieurs mains. Dans ce cas, il y a toujours un auteur principal et des coauteurs.

Introduction

Dans les différentes approches de création musicale contemporaines, la dimension spatiale du son est une dimension composable essentielle. La spatialité du son y est souvent réduite à la spatialisation et à la modélisation acoustique de salle. La pratique de la spatialisation du son convoque des modèles de représentation de l'espace dominés par des représentations euclidiennes prenant la source sonore réduite à un point comme objet fondamental. Depuis les années quatre-vingt-dix, plusieurs logiciels implémentant les modèles de mise en espace du son rendent accessibles des opérations sur la spatialité, dont la projection de sources ponctuelles et l'écriture de trajectoires sont les plus répandues. La stabilisation des pratiques, l'émergence de formats d'enregistrement et normes tendent à générer des angles morts dans la pensée de l'espace en informatique musicale. En dépit de ce constat, bien que moins répandues, de nombreuses approches de l'espace coexistent sans pour autant être accompagnées de représentations adaptées. Cette dualité rend nécessaire l'exploration des enjeux musicaux et technologiques inhérents à la conception des représentations avec lesquelles les compositeurs travaillent les qualités spatiales du son. Ainsi, cette thèse défend l'idée que la création de modalités d'interaction avec la spatialité du son à différentes échelles associée à une pratique de composition permet l'émergence d'approches singulières et partageables de l'espace en musique. En plaçant au centre de l'étude une pratique personnelle d'informatique musicale à la croisée de la composition et du développement informatique, l'objectif est de contribuer à la diversité des modes d'expressivité avec la spatialité du son tout en portant un regard critique sur les environnements audionumériques de composition d'espaces sonores.

Prenant la création comme une activité de recherche, cette thèse utilise la composition électroacoustique et le développement informatique comme deux moteurs indissociables. La conception des œuvres musicales et des maquettes logicielles originales ont été au cœur de notre méthode. Le terrain expérimental de cette thèse s'inscrit dans un héritage aux travaux menés dans le cadre de la bibliothèque *HOALibrary* développée au CICM (2012-2015). Celui-ci regroupe des éléments logiciels intégrés à *abc.lib* et *hoa.lib* deux bibliothèques écrites en langage *Faust* respectivement pour le traitement multicanal et l'ambisonie. La complexité de l'objet d'étude nécessite le déploiement d'une méthodologie de recherche originale investissant trois pôles tout en associant pratique et théorie : les interfaces graphiques, les traitements audionumériques qu'elles contrôlent et leur mise en œuvre musicale. Ainsi cette thèse est structurée en trois parties conçues comme trois regards sur les représentations opératoires pour le traitement spatial du son. Chacune d'elle comprend un état de l'art, une partie critique et la présentation d'approches originales.

La première partie se concentre sur la dimension graphique des représentations opératoires. Le premier chapitre définit la notion de pensée euclidienne de l'espace en musique et interroge son caractère paradigmatique au prisme d'œuvres du répertoire. Le deuxième chapitre propose un état de l'art critique des solutions logicielles pour la composition d'espace sonore. Le troisième chapitre détaille les hypothèses et leur mise à l'épreuve dans quatre prototypes originaux d'interface graphique pour le traitement spatial.

La deuxième partie se focalise sur les traitements audionumériques contrôlés par les interfaces analysées dans la première partie. Le chapitre quatre présente de façon synthétique le modèle de synthèse spatiale à l'intérieur duquel sont réalisés ces travaux : l'ambisonie. Le chapitre cinq entre dans le détail d'un traitement en partant des origines musicales de la décorrélation de signaux et se focalise sur les spécifications d'implémentation dans *abc.lib*. Le sixième chapitre interroge les implications musicales d'extensions proposées pour la décorrélation en ambisonie et les conditions de leur généralisation.

La troisième partie traite des mises en œuvres musicales et des approches compositionnelles. Le chapitre sept donne des éléments d'analyse et d'interprétation sur la pièce *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* de I.Xenakis à partir d'une proposition de mise en espace réalisée dans le cadre du centenaire de la naissance du compositeur. Le chapitre huit analyse les implications musicales des développements informa-

tiques mis à l'œuvre dans trois compositions électroacoustiques personnelles : *Suspension*, *Compression-dilatation*, *Émergences*. Pour finir, le neuvième chapitre analyse les morphologies spatiales composées dans *Émergences* puis met la lumière sur la prise en main des outils techniques et musicaux proposés dans cette thèse par d'autres compositeurs. S'inscrivant dans les études en musique, cette recherche emprunte également à des champs disciplinaires plus éloignés pour éclairer des notions ou prolonger des intuitions et des résultats. Les notions utilisées tout au long de ce travail ont parfois nécessité une redéfinition spécifique à l'étude menée. Ainsi, nous donnons dès à présent quelques spécifications pour assurer la cohérence de la démonstration.

La distinction entre spatialisation et traitement spatial du son est fondamentale. Cette distinction sera travaillée tout au long de la démonstration, il est alors nécessaire d'en présenter les enjeux. L'avènement des musiques diffusées par haut-parleur s'accompagne d'une histoire des recherches scientifiques et musicales autour de la spatialité du son tant pour sa captation que sa synthèse. Aujourd'hui, les travaux sur la spatialité en musique sont concentrés autour de la mise en espace de sources sonores ponctuelles à l'aide de dispositifs de diffusion multiphonique. Généralement, l'objectif de ces approches est de donner la sensation à l'auditoire qu'une source sonore est à un endroit donné de l'espace : dans une direction et à une certaine distance. C'est ce que nous appelons dans ce texte la spatialisation du son. Toutefois, depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les pièces électroacoustiques et mixtes de compositeurs tels que Iannis Xenakis, Luigi Nono ou plus récemment Horacio Vaggione construisent une spatialité irréductible à la seule spatialisation. L'émergence du paradigme granulaire dans la musique instrumentale et électroacoustique de Iannis Xenakis ou la pluralité et l'hétérogénéité des voix venant de toutes directions, la multiplicité confuse des champs acoustiques diffus, non assimilables à des sources ponctuelles dans *Prometeo* (1984) de Luigi Nono nous obligent à penser l'espace dans toute son épaisseur. Une tension se dessine alors entre ces approches musicales de l'espace et la concentration des technologies de spatialisation.

De nombreux travaux développent des approches de la spatialité sur le plan technologique qui ne se limitent pas à la mise en espace comme la décorrélation des signaux¹,

1. Gary S. KENDALL, « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery »,

la synthèse granulaire spatiale², la diffusion spectrale³, la synthèse sonore spatiale⁴ ou encore les traitements musicaux dans le domaine ambisonique au sein de la bibliothèque *HOALibrary* depuis 2012. Afin d'inclure ces manières de faire, nous privilégierons la notion de « traitement spatial du son », compris comme tout traitement audionumérique opérant sur les qualités spatiales du son.

La distinction ainsi esquissée entre « spatialisation » comme mise en espace de sources ponctuelles et « traitement spatial du son » comme cadre plus général d'opérations sur les qualités spatiales du son, il faut définir ce qui est entendu par « qualités spatiales » du son. Ces termes sont employés pour référer aux qualités d'une source auditive - résultat perceptif d'une source acoustique qui entre dans les plages audibles de l'être humain - qui ont trait à l'espace. Les qualités spatiales d'une source auditive ponctuelle peuvent être par exemple sa localisation et son orientation, et celles d'une source auditive étendue peut être l'enveloppement qu'elle génère⁵. Ce travail traite à la fois des qualités spatiales perçues par un auditeur, des traitements des signaux à l'origine de ces qualités et des approches opératoires liées à la composition. C'est à ce titre que nous parlons de représentation opératoire, en référence à son utilisation par le compositeur Horacio Vaggione, comme des « outils créés afin d'atteindre un champ d'action morphologique »⁶. En somme, les représentations opératoires sont les outils nous permettant d'opérer sur le signal et de fait sur les qualités du son. Cette notion permet de traiter les interactions avec la spatialité à différentes échelles : les interfaces graphiques dans la première partie, les traitements audionumériques dans la deuxième partie et les approches compositionnelles dans la troisième partie.

dans : *Computer Music Journal* 19.4 (1995), p. 71.

2. David KIM-BOYLE, « Spectral and Granular Spatialization with Boids », dans : *ICMC*, Michigan Publishing, 2006, p. 139-142.

3. Tapani PIHLAJAMÄKI, Olli SANTALA et Ville PULKKI, « Synthesis of Spatially Extended Virtual Source with Time-Frequency Decomposition of Mono Signals », dans : *J. Audio Eng. Soc* 62.7/8 (août 2014), p. 467-484.

4. Alain BONARDI, « Composer l'espace sonore », dans : *Revue Francophone Informatique et Musique* 7-8 Culture du code (2020), ISSN : 2261-8589.

5. Leo BERANEK, *Concert and opera halls : how they sound*, Woodbury, NY : Published for the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1996, p. 47.

6. Horacio VAGGIONE, « Représentations musicales numériques : temporalités, objets, contextes », dans : *Manières de faire des sons*, sous la dir. d'Antonia SOULEZ et Horacio VAGGIONE, Paris : L'Harmattan, 2010.

Au-delà de cette distinction initiale, il faut envisager avec précision les constituantes des représentations opératoires pour le traitement spatial du son que nous allons étudier. Les représentations opératoires en musique sont des interfaces entre les compositeurs et le sonore, ce sont les outils permettant d'opérer sur le son, en l'occurrence les éléments de la station de travail audionumérique permettant d'opérer sur ses qualités spatiales. En ce sens, leur constitution contribue à la structuration des opérations. Elles sont à la fois les outils permettant d'atteindre les opérations tout en étant l'endroit où s'adoptent les règles de ces mêmes opérations. L'adoption de ces « règles » est un ensemble de choix qui ne peuvent pas être considérés comme neutres et portent une responsabilité musicale. Ainsi apparaît la nécessité pour les musiciens de se saisir de leur conception et d'en porter une critique aussi bien musicale que musicologique.

Dans le cadre d'une pratique de la composition médiée par un ordinateur, les représentations opératoires sont multiéchelles et sont constituées d'une partie matérielle (*hardware*) comme l'écran, la souris, le clavier, des contrôleurs midi ou des capteurs, et une partie logicielle (*software*). Celle-ci comprend une interface utilisateur (*user interface*), pouvant être graphique (*graphic user interface*) et un moteur de traitement (*digital sound processing*). L'interface utilisateur, aussi bien la partie logicielle que matérielle, sert à entrer les données pour interagir avec les systèmes et avoir un retour sur l'état du système. Les moteurs de traitement sont les noyaux fonctionnels, ils sont la partie qui réalise les opérations sur le signal sonore. Ces moteurs sont eux-mêmes interface à une certaine échelle, ils lient les opérations algébriques sur le signal à des variables accessibles en dehors du code. Les représentations opératoires au centre de ces travaux sont des systèmes interactifs, c'est-à-dire des programmes informatiques qui prennent en compte les informations de l'utilisateur et renvoient une représentation perceptible de l'état du système⁷. L'étude des systèmes interactifs nécessite par conséquent une appréhension située dans leurs diverses activations possibles, et particulièrement en situation musicale.

Ce travail se concentre autour des traitements spatiaux dans le modèle ambisonique écrit en langage *Faust*, incluant un ordinateur avec des prototypes d'interfaces graphiques en *JavaScript* dans l'environnement de programmation graphique *Max 8*. L'ordinateur

7. Michel BEAUDOUIN-LAFON, « Interaction homme-machine », dans : *CNRS - Cahiers IMABIO* (1992).

était manipulé avec un clavier et une souris et la restitution sonore était faite au moyen d'un système de diffusion multiphonique circulaire de huit haut-parleurs ou hémisphérique de seize haut-parleurs *Genelec* 8030A. Afin d'explorer les interactions à différents niveaux de cet environnement, nous avons dû saisir chaque axe avec ses spécificités. La méthodologie employée est basée sur une boucle itérative de prototypage mélangeant les trois pôles (interface graphique, traitement audionumérique, composition) investi avec la création comme moteur. L'écoute a eu une place centrale dans ce processus, nous avons construit des connaissances sensibles et théoriques partir d'une réfutation passant par nos oreilles et par celles de notre communauté d'écoute. Cela a supposé par ailleurs de nous former et emprunter des connaissances en acoustique, psychoacoustique, traitement du signal et ergonomie tout en gardant une approche musicale. Par conséquent, le lecteur devra situer ces emprunts comme une appropriation à des fins musicales.

Première partie

Représentation, géométrie, interface

Bien que l'aspect paradigmatique de la spatialisation ne soit plus à démontrer, en musique, les représentations utilisées dans les logiciels pour la composition de la spatialité sont héritées des modèles mathématiques de l'Antiquité. À l'instar du point et de la ligne dans la géométrie d'Euclide, la source ponctuelle et la trajectoire sont les objets fondamentaux des modèles de spatialisation. Dans les interfaces graphiques des moteurs de spatialisation, les sources sonores sont visuellement réduites à des points, cercles ou sphères placées dans des espaces abstraits à deux ou trois dimensions. Cette conception de l'espace en musique est une approche commode et largement partagée tout en étant une approche parmi d'autres. Néanmoins, les représentations convoquées et les modèles sous-jacents ne sont pas neutres et contribuent à l'établissement de nos manières de faire de la musique.

Nous débuterons ainsi notre investigation par la partie émergée et visible des représentations opératoires pour le traitement spatial du son. Dans le premier chapitre nous portons une réflexion sur les formalismes géométriques sous-jacents aux représentations convoquées pour la composition de la spatialité puis nous explorons différentes approches opératoires. Dans le deuxième chapitre, nous constituons un état de l'art des interfaces graphiques utilisées pour la composition d'espaces sonores et proposons une analyse critique de ces approches. Dans le troisième chapitre, nous interrogeons en pratique les enjeux musicaux que la constitution de la partie graphique de nos interfaces avec le traitement spatial du son cristallise.

Représentation de l'espace

Dans ce chapitre, nous définissons ce que nous appelons la pensée euclidienne de l'espace et confrontons cette notion à l'analyse de *Concret PH* de Iannis Xenakis. Après cela, nous aborderons des approches opératoires irréductibles à une pensée euclidienne de l'espace. Enfin, nous définirons les notions élémentaires de géométrie pour appréhender les outils de spatialisation notamment au travers de la notion de repère et des systèmes de coordonnées les plus couramment utilisés. Ce chapitre s'organise donc autour de quatre objectifs :

- Définir les outils géométriques et sémantiques pour la suite de la démonstration. Nous définirons « la pensée euclidienne de l'espace » afin d'examiner les panneaux de spatialisation dans la section 1.3.
- Produire une analyse musicologique inspirée par Erwin Panofsky mettant au centre les formalismes géométriques pour appréhender les approches de la spatialité en musique. Les représentations de l'espace en arts ne sont pas des dispositifs techniques transparents, elles témoignent d'une pensée de l'espace et d'un rapport au monde. Dans son ouvrage *La perspective comme forme symbolique*, Panofsky porte une réflexion épistémologique sur la technique de la perspective depuis l'Égypte ancienne jusqu'au *Quattrocento*. Fruit d'un long trajet, des travaux géométriques d'Euclide au système d'Alberti, la perspective ne trouvera un assouvissement formel qu'au cours du XV^{eme} siècle. L'auteur esquisse une relation entre les représentations de l'espace et la pensée du monde par les artistes. Ainsi, Panofsky montre que la réalisation artistique n'est jamais soumise aux seules lois de la technique. En utilisant le concept

du philosophe Ernest Cassirer la « forme symbolique »¹, Panofsky interroge le lien entre représentation de l'espace, pensée philosophique et le rapport de l'être au monde. La perspective pour Panofsky contracte un contenu signifiant, elle est pour celui qui la construit et celui qui la regarde quelque chose qui signifie : représenter l'espace de telle ou telle autre façon est porteur de signification. Nous ne pouvons ni transposer en l'état les conclusions de Panofsky dans le domaine musical ni appliquer les mêmes méthodologies : le statut des représentations de l'espace pour l'art pictural et la composition musical est strictement différent. Toutefois, nous avons l'intuition qu'assembler une analyse sur les représentations manipulées autant sur le plan théorique que technique nous permet de faire des hypothèses sur la pensée de l'espace en musique.

- Proposer un éclairage sur les origines mathématiques des représentations de l'espace convoquées en musique avec un parcours allant d'Euclide à Poincaré. Nous nous appuyerons ainsi sur trois ouvrages : *La science et l'hypothèse* d'Henri Poincaré, *Concepts d'espace, une histoire des théories de l'espace en physique* de Max Jammer et *La pensée de l'espace* de Gilles Gaston Granger ;
- Constituer un panorama des approches opératoires hétérodoxes pour la composition de la spatialité. En ce sens, nous souhaitons contribuer à la critique du paradigme opératoire dominant : la spatialisation du son. Un paradigme représente un modèle dominant de pensée et de pratique scientifiques. Il fournit aux scientifiques des règles et des procédures spécifiques pour conduire leurs recherches et résoudre les problèmes qui se posent dans leur domaine d'étude. De fait, en musique et plus spécifiquement en composition, un paradigme opératoire est un modèle d'opération musical sur le sonore, par exemple nous pouvons parler de l'approche granulaire comme un paradigme opératoire².

1. La forme symbolique pour Cassirer est une manifestation de la capacité humaine à créer des systèmes symboliques, d'organiser et de donner sens à notre expérience du monde : « Par "forme symbolique", il faut entendre toute énergie de l'esprit par laquelle un contenu de signification spirituelle est accolée à un signe sensible concret et intrinsèquement adapté à ce signe » ERNST CASSIRER, *Trois essais sur le symbolique*, Le Cerf, 1997, p. 180, ISBN : 978-2204055673, p.13

2. Sur la notion de paradigme, voir THOMAS KUHN, *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion, 1962, ISBN : 2081396017

1.1 Le point et la ligne

1.1.1 Pensée euclidienne de l'espace

La géométrie euclidienne, aussi appelée géométrie affine, est celle qui s'inscrit dans le cadre des *Éléments* et plus particulièrement sur le cinquième de ses postulats. Dans le premier livre s'attachant à définir un système de géométrie plane à partir de « définitions », « propositions » (axiomes ou postulats) et « démonstrations », les cinq premiers postulats sont les suivants :

1. Qu'il soit demandé de mener une ligne droite de tout point à tout point.
2. Et de prolonger continûment en ligne droite une ligne droite limitée.
3. Et de décrire un cercle à partir de tout centre et au moyen de tout intervalle.
4. Et que tous les angles droits soient égaux entre eux.
5. Et que, si une droite tombant sur deux droites fait les angles intérieurs et du même côté plus petits que deux droits, les deux droites, indéfiniment prolongées, se rencontrent du côté où sont les angles plus petits que deux droits.³

Bien que central dans la définition de la géométrie euclidienne, ce n'est pas le cinquième postulat⁴ qui retiendra notre attention, mais plutôt les fondations de l'édifice géométrique : les définitions. Dans les premières lignes de l'ouvrage, Euclide définit les objets élémentaires qui seront à la base d'une grande partie de sa démonstration (définition de la ligne droite, d'un angle, du plan, *etc.*) qu'il débute ainsi :

1. *Un point est ce dont il n'y a aucune partie.*⁵
2. *Une ligne est une longueur sans largeur.*⁶

3. Euclide D'ALEXANDRIE, Bernard VITRAC et Maurice CAVEING, *Les éléments. Volume I, Livres I-IV : Géométrie plane / Euclide d'Alexandrie ; introduction générale par Maurice Caveing ; traduction et commentaires par Bernard Vitrac*, Paris : Presses universitaires de France, DL 1990, 1990, ISBN : 2 13 043240 9, pp.167-175

4. Le cinquième postulat est aussi appelé *postulatum* d'Euclide ou « axiome des parallèles ».

5. Depuis Euclide, les mathématiques s'affranchissent peu à peu d'un rapport analogique à l'expérience sensible. Ici, le traducteur nous informe qu'avant Euclide le point faisait référence à la marque du poinçon. Ainsi, depuis Euclide, les objets mathématiques se développent pour eux-mêmes, nous dit Carvalho Guilherme CARVALHO, « Représentations musicales d'idées mathématiques », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1- arts, philosophie, esthétique, 2007, pp.141-142. Notons néanmoins que Poincaré nous dit que la géométrie d'Euclide reste proche de l'expérience sensible des objets dans l'espace.

6. D'ALEXANDRIE, VITRAC et CAVEING, *Les éléments. Volume I, Livres I-IV : Géométrie plane / Euclide d'Alexandrie ; introduction générale par Maurice Caveing ; traduction et commentaires par Bernard Vitrac*, pp.151-152.

Ainsi, lorsque nous parlons d'une pensée euclidienne de l'espace, nous ferons référence à l'importance du point et de la ligne comme origine du système. Cette notion servira notre analyse des outils de spatialisation prenant le point et la ligne comme fondement tant dans les modèles, les représentations graphiques qu'ils convoquent, que dans les opérations laissées à la portée des compositeurs.

Pour autant, est-ce que toute musique utilisant une représentation euclidienne est réductible à une pensée euclidienne de l'espace prenant la source réduite à un point et la trajectoire comme objets fondamentaux⁷ ?

Dans sa thèse de doctorat *Spatialisation de sources étendues*, Julien Colafrancesco démontre que la spatialisation orientée source ponctuelle n'a pas de statut privilégié tant sur le plan psychoacoustique, computationnel, que musical. Pour affirmer cela sur le plan musical, Colafrancesco analyse la composition de la spatialité dans *Hyperprism* (1923) d'Edgar Varèse, *Concret PH* (1958) de Iannis Xenakis, *Gruppen* (1958) de Karlheinz Stockhausen et *Rituel* (1975) de Pierre Boulez⁸. Bien que les compositeurs y utilisent et convoquent des représentations euclidiennes dans leurs écrits, dans les croquis de compositions, plans d'implantations ou schémas, l'analyse de ces pièces pionnières et emblématiques dans l'art de composer la spatialité du son au XX^{ème} siècle montre la complexité d'une pensée et d'un résultat spatial irréductible à une approche euclidienne. *Concret PH* de Xenakis est un exemple particulièrement intéressant par son ambivalence pour nuancer l'idée d'une pensée euclidienne de l'espace en musique.

1.1.2 *Concret PH* de I.Xenakis : un contre-exemple ?

Dans le cadre de l'exposition universelle de 1958 à Bruxelles, le pavillon Philips dessiné par Xenakis et Le Corbusier accueillit un spectacle multimédia comportant la diffusion d'images et de lumières ainsi que la projection sonore de *Poème électronique* de Varèse composée pour l'occasion. Xenakis composa *Concret PH* pour faire la transition entre les

7. À l'instar de G.G.Granger dans *La pensée de l'espace* s'interrogeant sur la définition d'une pensée de l'espace dans le domaine des mathématiques, il serait intéressant de mener une réflexion sur ce que pourrait-être une pensée de l'espace singulièrement musicale. Nous tâcherons de construire au fur et à mesure de ce manuscrit une réponse à cela, toutefois nous prendrons pour l'instant la pensée musicale de l'espace comme une superposition non hiérarchisée d'une pensée de l'espace mathématique, acoustique, psychoacoustique, et poétique, empruntant à des expériences sensibles individuelles et collectives

8. Julien COLAFRANCESCO, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis, 2015, pp.69-98.

projections. Le titre de l'œuvre fait référence au plan hyperbolique de la géométrie de Lobatchevski.

Pour la diffusion sonore, le pavillon Philips était équipé de plusieurs centaines de haut-parleurs organisés en « clusters » disposés à l'entrée et la sortie du pavillon et en « routes du son », trajectoires formées par des haut-parleurs entre lesquels les sons pouvaient circuler avec une vitesse de déplacement définie par l'utilisateur (de 0 à 10 haut-parleurs par seconde). Cette pensée de l'espace imposée par le dispositif de diffusion semble correspondre à ce que nous avons défini comme pensée euclidienne de l'espace.

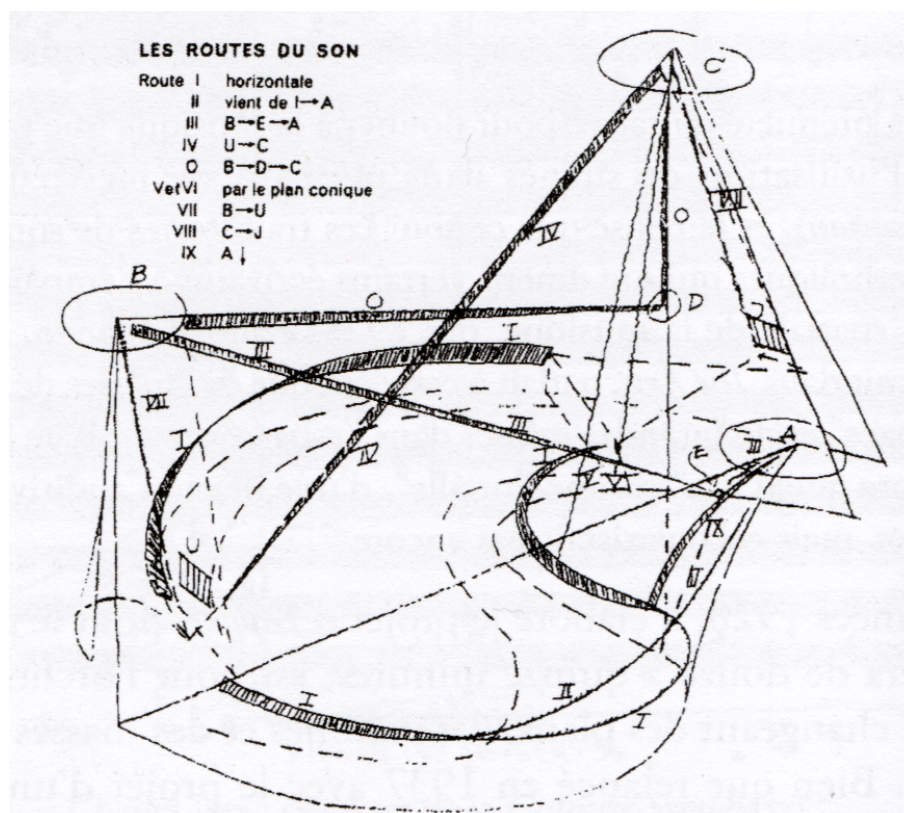


FIGURE 1.1 – « Routes du son » dans le Pavillon Philips, dessin de I.Xenakis

Crédits : Séverine BRIDOUX-MICHEL, « Musique architecture, un projet multimédia : le Pavillon Philips de l'exposition internationale de 1958 », dans : *Musiques, arts et technologies, Pour une approche critique*, sous la dir. de Roberto BARBANTI et al., Harmattan, 2004, p. 420, ISBN : 2-7475-6691-9

Allant dans le sens d'une pensée de l'espace sonore constitué de points, lignes et plans, Xenakis écrit au sujet de *Concret PH* dans *Notes sur un geste électronique* :

Nous pouvons [...] considérer un haut-parleur comme une source ponctuelle dans l'espace à trois dimensions, si le local est inerte acoustiquement. Ces points sonores définissent l'espace au même titre que les points géométriques de la stéréométrie. Tout ce qui peut être énoncé

pour l'espace euclidien pourrait être transposé dans l'espace acoustique. Supposons une droite acoustique définie par des points émetteurs de son. Le son peut surgir de tous les points de cette droite simultanément. C'est la définition statique de la droite. Nous pouvons supposer un réseau orthogonal de telles droites acoustiques définissant un plan acoustique. Nous pouvons, de la même manière, supposer des courbes dans le plan ou dans l'espace, ainsi que des surfaces gauches réglées, etc. Tout ce que nous venons de dire est une définition de la « stéréophonie statique ». Nous pourrions également construire une droite acoustique à l'aide du mouvement, un son qui se déplace sur une droite de haut-parleurs. Les notions de vitesse et d'accélération acoustiques sont introduites ici. Toutes les courbures géométriques et toutes les surfaces peuvent être transposées cinématiquement à l'aide de la définition du point sonore. Nous appellerons cette stéréophonie, la « stéréophonie cinématique ».⁹

Dans cet extrait, Xenakis décrit la mise en espace du son à l'aide de haut-parleurs comme une transposition des mathématiques vers l'acoustique. Pour autant, Colafrancesco émet l'hypothèse, appuyée sur un échange de lettre entre les ingénieurs de Philips et le compositeur, que Xenakis cherchait à brouiller les pistes des trajectoires en plaçant plusieurs sources sur les mêmes trajectoires : « alors que le système à la disposition de Xenakis contraint fortement vers une spatialisation positionnelle et l'élaboration de trajectoires, le compositeur réussit à faire interagir les différentes sources pour donner à l'auditeur l'impression d'une masse sonore étendue et spatialement dynamique »¹⁰. Xenakis souhaitait initialement diffuser trois sources sonores à trois vitesses de rotations distinctes, bien que cela ait probablement été impossible.

Abondant dans ce sens, le musicologue Renaud Meric écrit dans un article au sujet de *Concret PH* :

En effet, l'expression de « route » – qui n'appartient pas à I.Xenakis – pourrait renvoyer à une idée de spatialisation du son conçue comme un « voyage » un déplacement du son dans l'espace, où « le son » de *Concret PH* suivrait des routes qui lui ont été attribuées. Or cette conception de l'espace ne correspond en rien à l'espace tel qu'il était conçu par I.Xenakis ; la nature de l'œuvre et du Pavillon ne nous permettent pas non plus de concevoir l'espace ainsi.¹¹

9. Colafrancesco nous dit que l'utilisation du terme « stéréophonie » n'est pas entendu comme panoramique d'amplitude, il est ici à prendre au sens plus proche de l'étymologie de « stéréo », à savoir la référence au solide et volume, donc des sons dans l'espace tridimensionnel. Ainsi, « stéréophonie » est ici à comprendre comme l'organisation spatiale des sons, équivalent à « spatialisation ».

10. COLAFRANCESCO, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », p.82.

11. Renaud MERIC, « Concret PH, un espace mouvant », dans : *Journées d'Informatique Musicale*

Affirmant un peu plus loin l'irréductibilité du résultat à une conception des trajectoires :

Si l'on prend en compte l'architecture du Pavillon Philips (dans lequel les murs et les plafonds se confondent), ses différentes « routes » de haut-parleurs, aux multiples directions qui correspondaient probablement à autant de lignes droites ou de plans tels qu'ils sont décrits ici, si l'on prend en compte le fait que les auditeurs pouvaient se trouver à n'importe quel endroit du Pavillon, on comprend aisément que la conception classique de la stéréophonie n'a aucun sens pour *Concret PH*.¹²

Quand bien même les schémas de diffusion s'appuient sur une approche du point et de la trajectoire par des « routes de son », que Xenakis convoque une transposition de la géométrie à l'acoustique, comme le souligne Colafrancesco et Meric, la complexité spatiale du rendu dépassait très probablement la perception de simples trajectoires. Si la pensée musicale de l'espace est irréductible à une pensée euclidienne, pourquoi se limiter à ces représentations de l'espace ?

1.1.3 Euclide : une géométrie commode

Quand Xenakis utilisait des représentations euclidiennes en 1958, il s'agit d'un geste précurseur, dans le cadre de la création d'un « instrument »¹³. Nous pensons qu'il y a une différence notable entre un geste d'émancipation et de conquête de l'espace chez les précurseurs engendrant des réactions individuelles, idiosyncrasiques et singulières et l'utilisation d'un outil en voie de normalisation. Notre hypothèse est que cette différence est d'ordre instrumental : dans un cas, les compositeurs construisent leur instrument et donc leur espace composable, dans l'autre ils sont utilisateurs. Pour autant que la complexité du résultat ne soit pas limitée à une approche euclidienne, les représentations convoquées à la fois dans le discours de Xenakis et pour l'écriture spatiale correspondent à une pensée euclidienne de l'espace.

2005, Association Française d'Informatique Musicale and Centre de recherche en Informatique et Création Musicale, Saint-Denis, France, juin 2005, p.2.

12. *Ibid.*, p.3.

13. L'espace du Pavillon est conçu par Xenakis en collaboration avec Le Corbusier, il s'agit aussi de la création d'un dispositif de diffusion singulier par la compagnie Philips.

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, avec les travaux de Gauss, Lobatchevski, Bolyai, Riemann et Hilbert, de multiples géométries ont été construites¹⁴. Par exemple, Lobatchevski construit une géométrie remettant en cause le V^{ème} postulat d'Euclide sans entrer en contradiction avec les autres. La robustesse de ces géométries dites non euclidiennes a fini par montrer d'après l'historien des sciences Max Jammer que « la géométrie euclidienne se présentait donc comme un système parmi d'autres n'ayant aucun privilège particulier, du moins du point de vue de la logique »¹⁵. Pour appuyer cette idée, dans la deuxième partie de *La science et l'hypothèse*, H.Poincaré écrit après avoir présenté la géométrie de Lobatchevski, Riemann, Beltrami et Hilbert :

Dès lors, que doit-on penser de cette question : La géométrie euclidienne est-elle vraie ?

Elle n'a aucun sens.

Autant demander si le système métrique est vrai et les anciennes mesures fausses ; si les coordonnées cartésiennes sont vraies et les coordonnées polaires fausses. Une géométrie ne peut pas être plus vraie qu'une autre ; elle peut seulement être *plus commode*.¹⁶

En retournant vers le musical, cette idée qu'il n'existe pas de géométrie plus « vraie » qu'une autre, seulement « plus commode », nous allons affirmer que la spatialisation du son comprise comme projection de sources sonores ponctuelles est une approche du travail musical sur la spatialité du son parmi d'autres. La pensée euclidienne de l'espace dans l'approche musicale de la spatialité est un paradigme et non une ontologie. À cela vient s'ajouter que dans le langage commun, lorsque nous parlons de la géométrie euclidienne, nous nous attachons à notre expérience sensible des objets dans l'espace¹⁷. En effet, pour compléter la citation d'Henri Poincaré faite ci-dessus, nous pouvons ajouter :

Or la géométrie euclidienne est et restera la plus commode :

1° Parce qu'elle est la plus simple ; [...]

2° Parce qu'elle s'accorde assez bien avec les propriétés des solides naturels, ces corps dont se rapprochent nos membres et notre œil et avec lesquels nous faisons nos instruments de mesure.¹⁸

14. Henri POINCARÉ, *La science et l'hypothèse*, Paris : Flammarion, 2017, ISBN : 2081404362, pp.64-80.

15. Max JAMMER, *Concepts d'espace : une histoire des théories de l'espace en physique*, Paris : Librairie philosophique J. Vrin, 2008, ISBN : 2711619826, p.160.

16. POINCARÉ, *La science et l'hypothèse*, p.80.

17. CARVALHO, « Représentations musicales d'idées mathématiques », pp.142-143.

18. POINCARÉ, *La science et l'hypothèse*, p.80

1.2 Au-delà d'une pensée euclidienne de l'espace en musique

Si un grand nombre des représentations de l'espace utilisées en musique sont tournées vers une pensée euclidienne, cette géométrie « commode » n'est pas la seule utilisée. Dans cette sous-partie, nous exposons et interrogerons trois groupes d'approches de la spatialité en musique tendant vers une émancipation de la pensée euclidienne de l'espace : les notions de nuage (paradigme granulaire), de champs (vectoriel) et le potentiel des géométries non-euclidiennes pour le traitement spatial du son (géométrie hyper-sphérique).

1.2.1 Masse et nuage : paradigme granulaire

À partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, la notion de « masse sonore » apparaît comme une nouvelle conception du composable notamment chez E.Varèse ou G.Ligeti allant jusqu'à des nuages de micro-événements chez I.Xenakis présageant l'émergence du paradigme granulaire¹⁹.

Depuis les années 1990, les travaux de Barry Truax, Curtis Roads puis plus récemment de David Kim-Boyle²⁰ avancent des manières de composer la spatialité du son à partir d'une approche granulaire. Curtis Roads dégage deux approches distinctes : « Premièrement, dans la synthèse et la granulation, nous pouvons articuler la texture des grains en dispersant chaque grain à différents emplacements spatiaux et à différentes profondeurs spatiales. Deuxièmement, grâce à la magie de la granulation, de la convolution et de l'intermodulation, les grains peuvent être utilisés comme spatialisateurs pour d'autres sons »²¹. En somme, il s'agit de la mise en espace de grains (ou flux de grains) et d'une approche prenant des grains comme porteurs de spatialité pour d'autres sons au travers des opérations de convolution.

19. Curtis ROADS, *Microsound*, Cambridge, Mass : MIT Press, 2001, ISBN : 9780262182157, pp.14-17.

20. L'auteur présente notamment en 2006 un outil permettant de contrôler les nuages de grains à partir d'un modèle simulant le comportement d'une nuée d'oiseaux en vol appelé *boids* dans KIM-BOYLE, « [Spectral and Granular Spatialization with Boids](#) ».

21. « First, in synthesis and granulation, we can articulate the particle texture by scattering individual particles in different spatial locations and at different spatial depths. Second, through the magic of granulation, convolution, and intermodulation, the particles can be deployed as spatializers for other sounds » ROADS, *Microsound*, p.222.

Inspiré par l'œuvre musicale et théorique de Xenakis, notamment à partir de l'étude de *Musique formelle*, Curtis Roads débuta dans les années 1970 ses recherches sur le paradigme granulaire et notamment sur ce qu'il nomme les « nuages sonores » (*cloud sound*)²². Dans son ouvrage *Composing Electronic Music*²³, C.Roads présente différentes approches de la granulation spatiale dans ses travaux : le programme *Cloud Generator* développé au Centre d'Études de Mathématique et Automatique Musicales (CEMAMU) positionnant chaque grain dans un nuage de centaine de points, jouant avec ce que le compositeur appelle le *granular spatial scattering*.

Cet effet pulvérise un son de manière granulaire dans l'espace, tout en laissant les autres aspects du son (hauteur, durée, timbre) intacts. Le son peut être projeté ou dispersé de manière aléatoire dans l'espace, créant une décorrélation spatiale.²⁴

Plus récemment, Roads travailla sur le *Creatovox Synthesizer*²⁵ permettant d'appliquer des procédés de réverbération différents sur chaque grain puis de les projeter indépendamment sur un système de diffusion octophonique en temps-réel. L'approche du traitement spatial granulaire qui consiste à projeter dans l'espace chaque grain se situe à la limite d'une approche euclidienne de l'espace. Certes, l'idée est belle et bien d'assimiler chaque grain à un point afin de créer des nuages de points, toutefois les macro-paramètres de la synthèse granulaire comme le *spatial scattering* permettent de faire des opérations sur la spatialité dans un autre paradigme que la gestion de la position de chacun de ces points.

Dans un article de 1998 pour la revue *Organised Sound*, le compositeur et chercheur Barry Truax présente un outil permettant de diriger des flux de granulation vers différents haut-parleurs à l'aide d'une matrice 8 X 8. Dans cet article, l'auteur souligne la relation

22. Roads regroupera plusieurs de ses œuvres de la fin des années 90 et du début des années 2000 dans un album intitulé *Point Line Cloud* sur le label *Asphodel*.

23. Curtis ROADS, *Composing Electronic Music : A New Aesthetic, A New Aesthetic*, Oxford University Press, 2015, p. 510, ISBN : 978-0-19-537323-3, pp.251-252.

24. « This effect sprays a sound spatially in granular form, while leaving all other aspects of the sound (pitch, duration, timbre) intact. The sound can be panned or scattered randomly in space, creating spatial decorrelation. » *ibid.*, p.252

25. Synthétiseur granulaire, émergeant d'un projet de recherche au *Center for Research in Electronic Art Technology* (CREATE) de l'université de Californie à Santa Barbara (Curtis Roads, Alberto de Campo, Ching-Wei Chen). Ce synthétiseur était constitué d'une partie *Digital Signal Processing* (DSP) pour la synthèse granulaire et d'une interface de jeu avec un clavier *Musical Instrument Digital Interface* (MIDI), des potentiomètres et d'un *joystick*. *Mixed Emotions* de Bebe Barron fut la première pièce l'utilisant. Voir ROADS, *Microsound*, pp.193-221 et Curtis ROADS, « From grain to cloud », dans : *Iannis Xenakis, la musique électroacoustique*, sous la dir. de Makis SOLOMOS, L'Harmattan, 2015, ISBN : 978-2-343-06696-7, p.302

entre les opérations sur le micro-temps, le timbre et la spatialité, et *de facto* que la spatialité du son n'est pas une opération de post-production :

Ces deux aspects du processus de composition - timbral et spatialisation - sont généralement abordés séparément, à la fois par le compositeur et par les chercheurs. Cependant, certains liens commencent à émerger lorsque nous nous concentrons de plus près sur le micro-temps. Le facteur clé semble être dans quelle mesure les signaux, ou les composantes d'un signal, sont décorrélés, c'est-à-dire dans quelle mesure ils ont un comportement temporel indépendant (la mesure technique de cette propriété s'appelle l'autocorrélation). Les signaux décorrélés augmenteront la taille apparente d'un son à condition qu'il existe une base pour la fusion perceptuelle de ces composantes en une image auditive unique, éventuellement complexe.²⁶

En jouant avec l'envoi de chaque flux sur un ou plusieurs haut-parleurs avec différentes vitesses d'ouverture, il profite ainsi de décalages micro-temporels, en somme de procédés de décorrélation, pour composer la spatialité de plusieurs de ses pièces des années 1990²⁷.

1.2.2 Champs vectoriels et matrices

En 2019, Andrew Gerzso et Thibaut Carpentier présentèrent aux Journées francophones d'Informatique Musicale (JIM) un outil permettant d'éditer des trajectoires à partir d'un champ vectoriel complètement éditable et paramétrable. Cette approche consiste à déterminer un ensemble de points dans un espace euclidien, et à chacun de ces points correspond un vecteur, en l'occurrence, une vitesse. Ce qui permet de déterminer le comportement d'un objet virtuel (correspondant éventuellement à une source sonore) lorsqu'il se trouve à un endroit donné du champ. La représentation des champs vectoriels sous forme de nuage de flèches est fréquemment utilisée pour appréhender les flux, par exemple le déplacement des masses d'airs ou les courants marins.

26. « These two aspects of the compositional process - timbral design and spatialisation - are usually dealt with separately, both by the composer and by researchers. However, certain common threads are beginning to emerge as we focus more closely on the micro level of sound design. The key factor appears to be the extent to which signals, or components of a signal, are uncorrelated, that is, the extent to which they have independent time behaviour (the technical measurement of this property is called autocorrelation). Unrelated signals will increase the apparent volume of a sound provided there is a basis for perceptual fusion of these components into a single possibly complex auditory image. » Barry TRUAX, « Composition and diffusion : space in sound in space », dans : *Organised Sound* 3.2 (1998), p. 141-146, p.141

27. L'opéra *Powers of Two* ainsi que les deux interludes *Sequence of Earlier Heaven* et *Sequence of Later Heaven* extraits disponibles à l'adresse : <https://www.sfu.ca/sonic-studio-webdav/excerpts/excerpts.html>, [consulté le 20/12/2023], *ibid.*, p.145

Cet outil présente visuellement une matrice dans laquelle chaque cellule correspond à une zone d'un espace virtuel, et un point circule à l'intérieur de cet espace avec un comportement suivant le champ vectoriel défini par l'utilisateur. Il nous semble que cette situation est un point limite d'une pensée euclidienne de l'espace en musique dans la mesure où il s'agit d'un espace opératoire, appuyé sur une représentation euclidienne de l'espace certes (vue de haut en coupe), pouvant cibler le contrôle de la position d'un point source dans l'espace acoustique, comme tout autre variable.

Par ailleurs, Pierre Guillot développe l'idée dans sa thèse de doctorat que nous pouvons décomposer une situation acoustique de différentes façons. Il fait l'hypothèse d'une approche de décomposition du champ acoustique avec un modèle matriciel qu'il intitule *Soxel* (*sound element*). Guillot démontre le potentiel musical des opérations sur les représentations abstraites du champ sonore. Il affirme que les objectifs des approches classiques de la spatialisation doivent être enrichis d'aspirations porteuses de « sens sur un plan compositionnel » en plus d'une « cohérence sur un plan acoustique avec les modèles de propagation des ondes et/ou sur un plan psychoacoustique liés à notre perception des sons dans l'espace ». En analogie au pixel *picture element* et au *Pixel Art*, Guillot amorce la définition d'un modèle de décomposition de l'espace. L'auteur décompose l'état d'un champ acoustique dans une zone à l'aide d'éléments fondamentaux appelés *sound element*. Ici, les cellules de la matrice gardent toujours une certaine épaisseur, elles ne se réduisent jamais à un point.

Cet espace matriciel est [...] abstrait et n'est donc aucunement associé à un système de haut-parleurs ou plus généralement à aucun système de restitution. Nécessairement, le soxel et la portion de l'espace à laquelle il est associé, sont de même abstraits. Le *soxel* n'est régi que par sa position par rapport aux autres soxels et son organisation au sein de l'espace matriciel.²⁸

Cette approche, encore à l'état expérimental, ouvre la pratique de composition d'espace sonore à des procédés opératoires liés aux matrices et définit un nouveau paradigme de synthèse spatiale.

28. Pierre GUILLOT, « La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1 - arts, philosophie, esthétique, déc. 2017, p. 235. L'auteur choisit de projeter cette représentation intermédiaire de l'espace sur un dispositif de haut-parleurs en *Distance Based Amplitude Panning* (DBAP). En effet, Guillot considère chaque *soxel* comme une source virtuelle projetée sur le système.

1.2.3 Géométries non-euclidiennes

Dans *La science et l'hypothèse*, Poincaré nous dit que la géométrie euclidienne, certes commode pour les usages communs, est une géométrie parmi d'autres. Après avoir interrogé les conditions de possibilités de l'analogie avec le domaine musical, nous avons affirmé que la pensée euclidienne de l'espace en musique est un paradigme et non une ontologie. La composition d'espaces sonores conçue comme mise en espace des sons est une façon non exclusive de composer la spatialité du son en musique.

Néanmoins, nous devons lever une ambiguïté pour le lecteur. Les approches de la spatialité en musique que nous avons présentées jusqu'à présent comme alternatives à la pensée euclidienne de l'espace ne s'appuient pas pour autant sur des représentations non-euclidiennes de l'espace. Par exemple, la composition d'espace sonore aux moyens du paradigme granulaire ne s'appuie pas sur une représentation de l'espace, il s'agit d'une représentation opératoire. En effet, les synthèses granulaires héritent de l'approche du son décomposable en *quanta* par Dennis Gabor^{29 30}. De plus, comme nous avons pu le constater avec l'analyse de *Concret PH*, des opérations réalisées dans un contexte euclidien n'induisent pas nécessairement sur le plan musical une pensée euclidienne de l'espace.

Bien que la partie expérimentale de cette thèse utilise la géométrie sphérique³¹, nous n'avons pas étudié en profondeur le potentiel musical d'une pensée de l'espace basée sur des géométries non euclidiennes. Pour autant, il nous apparaît important d'aborder brièvement quelques éléments sur les géométries non euclidiennes pour au moins trois raisons :

1. compléter la critique de la pensée euclidienne de l'espace en musique ;
2. définir quelques notions utiles pour appréhender une approche originale de la spatialité inspirée par la notion de « courbure d'espace » de Riemann que nous présenterons dans les chapitres 8 et 9 ;
3. introduire une appropriation musicale originale de la géométrie hypersphérique.

29. DENNIS GABOR, « Acoustical Quanta and the Theory of Hearing », dans : *Nature* 159.4044 (mai 1947), p. 591-594, ISSN : 1476-4687.

30. ROADS, *Microsound*, pp.43-85.

31. En effet, l'ambisonie, modèle de synthèse spatiale dans le cadre duquel nous déployons les traitements spatiaux que nous présenterons dans la partie II s'appuie sur la géométrie sphérique.

Les géométries non-euclidiennes ont marqué un tournant majeur dans le développement de la géométrie et ont révolutionné notre compréhension du concept d'espace³². Au XIX^{ème} siècle, les travaux des mathématiciens Carl Friedrich Gauss, Nikolai Lobatchevski, János Bolyai et Bernhard Riemann ont remis en question les fondements de la géométrie euclidienne établie depuis l'Antiquité³³. En effet, par la remise en cause de l'axiome des parallèles d'Euclide, leurs travaux ont offert de nouvelles perspectives sur la structure de l'espace et les possibilités géométriques.

L'axiome des parallèles d'Euclide stipule qu'à partir d'un point extérieur à une droite, il n'existe qu'une droite passant par ce point et parallèle à la première droite. Et dans la géométrie de Lobatchevski par exemple, le postulat de la parallèle énonce qu'il existe au moins deux droites parallèles à une droite donnée passant par un point extérieur³⁴. En modifiant l'axiome des parallèles, Lobatchevski construit une géométrie avec un espace à courbure négative appelée géométrie hyperbolique. Ainsi, en deux dimensions, le plan tel que nous le connaissons dans la géométrie euclidienne devient une surface courbe, celui-ci ressemble à une selle de cheval.

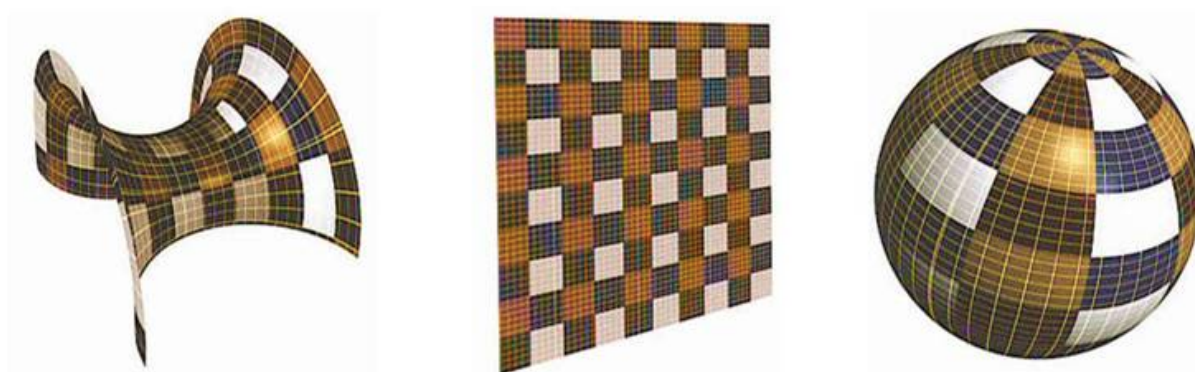


FIGURE 1.2 – De gauche à droite : plan hyperbolique, plan euclidien, plan sphérique

32. En utilisant la géométrie riemannienne, la relativité générale d'Albert Einstein permet de modéliser la gravité comme une courbure de l'espace-temps. Les particules et les objets en mouvement suivent des trajectoires déterminées par cette courbure, ce qui explique les phénomènes gravitationnels observés, tels que l'attraction des planètes ou la déviation de la lumière par les objets massifs. « Rappelons que Riemann et Clifford ont suggéré le fait, qu'Einstein a corroboré ensuite de manière ingénieuse dans sa théorie de la relativité générale, que la métrique de la structure d'espace est une fonction de la distribution de matière et d'énergie » JAMMER, *Concepts d'espace : une histoire des théories de l'espace en physique*, p.201

33. La généalogie et la présentation des géométries est volontairement succincte, pour un exposé plus complet, voir POINCARÉ, *La science et l'hypothèse*, Gilles GASTON GRANGER, *La Pensée de l'espace*, Paris : Odile Jacob, 1999, ISBN : 9782738107329 et Jean-Luc CHABERT, « Les géométries non euclidiennes », dans : *Repères-IREM*, 1, Instituts de recherche sur l'enseignement des mathématiques, 1990, p. 69-91

34. Alain BOUVIER, Michel GEORGE et François LE LIONNAIS, *Dictionnaire des mathématiques (4 éd.)* Presses Universitaires de France, 2013, ISBN : 978-2-13-060951-3, p.548.

Le disque de Poincaré est une représentation couramment utilisée pour visualiser la géométrie de Lobatchevski³⁵. Dans le disque de Poincaré, les droites sont représentées par des arcs de cercle, appelées géodésiques, perpendiculaires au bord du disque. La figure 1.3 nous montre la relation entre le plan hyperbolique et la projection de ses objets sur un disque, et de fait le disque de Poincaré dont le peintre Maurits Cornelis Escher a fait plusieurs représentations (voir la figure 1.4).

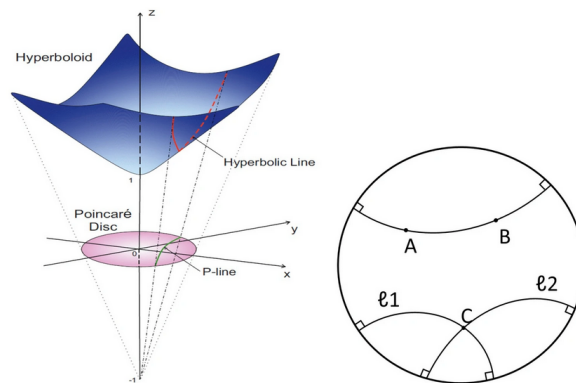


FIGURE 1.3 – Projection du plan hyperbolique sur un disque

Crédits : Wei PENG et al., « Hyperbolic Deep Neural Networks : A Survey », dans : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 44.12 (2022), p. 10023-10044

La géométrie de Lobatchevski est une géométrie parmi d'autres, de nombreux mathématiciens ont saisi la porte ouverte par l'abandon du *postulatum*. Par exemple, Bernhard Riemann introduit la notion de courbure de l'espace. Dans la géométrie riemannienne, la courbure d'une surface peut varier d'un point à un autre, elle peut être constante, variable ou nulle. Les espaces courbes peuvent être modélisés par des surfaces telles que la sphère, mais également d'autres types de surfaces courbes comme l'ellipsoïde, le tore, *etc.*

Cette idée de considérer une forme d'espace à deux dimensions comme une surface à courbure plongée dans un espace tridimensionnel euclidien relève de la thèse générale d'une représentation d'une géométrie par un modèle dans une autre géométrie, thèse assurément essentielle pour la possibilité même d'une *pensée* de l'espace. Car apparaît clairement de cette manière le caractère pour ainsi dire *méta-formel* d'une géométrie, dont les formes du premier niveau peuvent correspondre à d'autres formes dans une autre géométrie.

35. Il s'agit d'un modèle de projection conforme du plan hyperbolique dans un disque unité CHABERT, « Les géométries non euclidiennes », p.88. Par ailleurs, d'autres modèles existent comme le modèle de Beltrami appelé le modèle de la « pseudo-sphère ».

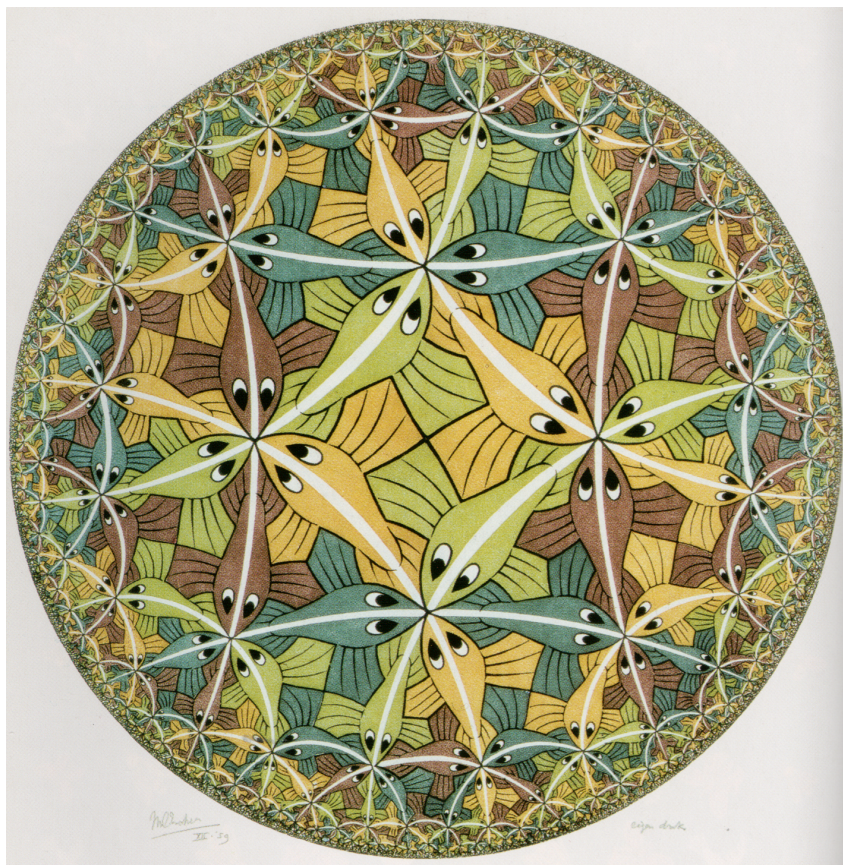


FIGURE 1.4 – *Limite circulaire III*, décembre 1959, gravure sur bois de fil, M.C.Escher
Crédits : Julius WIEDEMANN, *M. C. Escher (Icons S.)* Taschen, 2006, p. 191, ISBN : 978-3-8228-3869-3, p.78

La bifurcation que nous invitent à faire les représentations de l'espace liées aux géométries non-euclidiennes nous semble extrêmement fertile sur le plan des idées musicales et des opérations tout en étant complètement inexploité dans les outils contemporains.

À notre connaissance, la seule approche musicale explorant au niveau opératoire le potentiel d'une géométrie non-euclidienne est celle du jeune chercheur Daniel Picciola. Dans un article publié aux JIM 2022³⁶, Daniel Picciola expose une expérimentation autour du potentiel opératoire des harmoniques hyper-sphériques pour générer des « espaces sonores paradoxaux » qu'il décrit comme : « un phénomène psycho-acoustique où un son réfléchi est perçu comme plus proche que sa source, à tel point que leur localisation

36. Daniel PICCIOLA, « Espaces sonores paradoxaux : Approche des harmoniques hypersphériques et implémentation logicielle, pour une pratique créative de la spatialisation immersive du son en free-party », dans : *Sound and Music Computing*, sous la dir. de Romain MICHON, Laurent POTIER et Yann ORLAREY, Université Jean Monnet, Saint-Étienne and GRAME and INRIA, Saint-Étienne, France : Zenodo, juin 2022.

semble intervertie ». En partant d'expériences sensibles de paradoxes auditifs en *free-party* et d'un héritage aux sons paradoxaux chez Jean-Claude Risset, le chercheur propose une implémentation de synthèse sonore spatiale utilisant le modèle des harmoniques hypersphériques en quatre dimensions. En effet, par un produit de deux synthèses spatiales utilisant le modèle des harmoniques sphériques et un jeu d'opposition de phase, il introduit une variable, l'hyper-angle analogue en 4D de l'azimut en 3D, permettant générer des espaces sonores paradoxaux.

1.3 Géométrie pour la spatialisation

Revenons un instant vers la géométrie « commode » afin d'aborder les outils géométriques utilisés dans les interfaces graphiques des logiciels et autres outils pour la pratique de la spatialisation du son. Ceux-ci nous seront utiles pour l'analyse critique que nous ferons des interfaces graphiques dans le chapitre 2.

1.3.1 Référentiel, repère et système de coordonnées

Afin d'appréhender le comportement des objets dans un espace ainsi que leur position, nous utilisons des formalismes mathématiques constitués d'un cadre de référence, d'un repère et d'un système de coordonnées. L'observation, la description ou la manipulation des objets sera liée au référentiel spatial choisi. En mathématiques, le référentiel se définit par l'ensemble des éléments à partir desquels sera défini un système de coordonnées³⁷.

Par exemple, un repère cartésien en deux dimensions est formé par un point appelé « origine » et deux vecteurs non colinéaires³⁸ formant ce qu'on appelle la « base ». Les droites passant par l'origine et allant dans la direction des vecteurs formant la base sont appelées les axes du repère. Le repère est dit orthogonal lorsque les vecteurs sont perpendiculaires, et orthonormal lorsqu'ils sont perpendiculaires et que leur norme vaut 1. Formellement, un repère cartésien de \mathbb{R}^2 se définit par le « triplet (O, \vec{i}, \vec{j}) où (\vec{i}, \vec{j}) est une

37. Lionel BRINGOUX, « Cadres de références spatiaux : des espaces formels à l'espace représenté », HDR, Université d'Aix Marseille, 2018, p.2.

38. Le terme « colinéaire » est utilisé pour décrire des objets ou des points situés sur une même ligne droite ou une même droite.

base de \mathbb{R}^2 , l'axe (O, D_1, \vec{i}) noté encore Ox est appelé l'axe des abscisses, l'axe (O, D_2, \vec{j}) noté encore Oy est celui des ordonnées »³⁹.

Afin de pointer vers une position dans un espace défini, nous utilisons des coordonnées qui dans un espace euclidien à trois dimensions sont le plus souvent cartésiennes (x, y, z) ou sphériques (r, ϕ, θ) ⁴⁰. Les grandeurs expriment la distance à l'origine de la projection du point sur les trois plans formés par les axes deux à deux dans le cas des coordonnées cartésiennes. Pour les coordonnées sphériques, l'élévation désigne l'angle entre le vecteur pointant dans la direction de l'objet et le plan horizontal alors que l'azimut désigne l'angle entre la projection du vecteur sur le plan horizontal et le plan médian, la distance correspond à la norme du vecteur.

1.3.2 Cadre de référence et conventions

La position de l'origine du repère et l'orientation des axes de celui-ci définiront le cadre de référence (ou référentiel) utilisé. Par exemple, en mécanique classique, différents référentiels cohabitent, le choix de l'un d'entre eux dépend du regard porté sur ce qui est étudié (référentiel héliocentrique, géocentrique, *etc.*). Dans ce document, nous allons plutôt nous intéresser aux terminologies utilisées dans les sciences du mouvement et sciences cognitives utilisant des référentiels prenant en compte l'observateur : allocentré (extérieur à l'observateur) ou égocentré (par rapport à l'observateur). Dans les logiciels de spatialisation, les repères n'ont pas de référentiel, c'est à l'utilisateur de le définir, toutefois, dans la plupart des outils, les interfaces supposent ou tendent vers l'utilisation d'un référentiel égocentré à partir d'un auditeur virtuel situé au *sweet-spot*.

Les travaux du psycho-acousticien Jens Blauert fréquemment cités dans les ouvrages sur la spatialisation et les documentations des logiciels de spatialisation utilisent un référentiel égocentré lié à la tête. Dans ce type de référentiel, la position et l'orientation du sujet définissent l'origine et les axes de référence de toute mesure. Celui-ci est formé par trois plans (médian, horizontal et frontal) et trois références directionnelles (axe céphalique naso-occipital, axe interaural, axe longitudinal corporel) :

39. BOUVIER, GEORGE et LE LIONNAIS, *Dictionnaire des mathématiques (4 éd.)* p.128.

40. D'autres types de coordonnées existent comme les coordonnées cylindriques, coniques, paraboloidales.

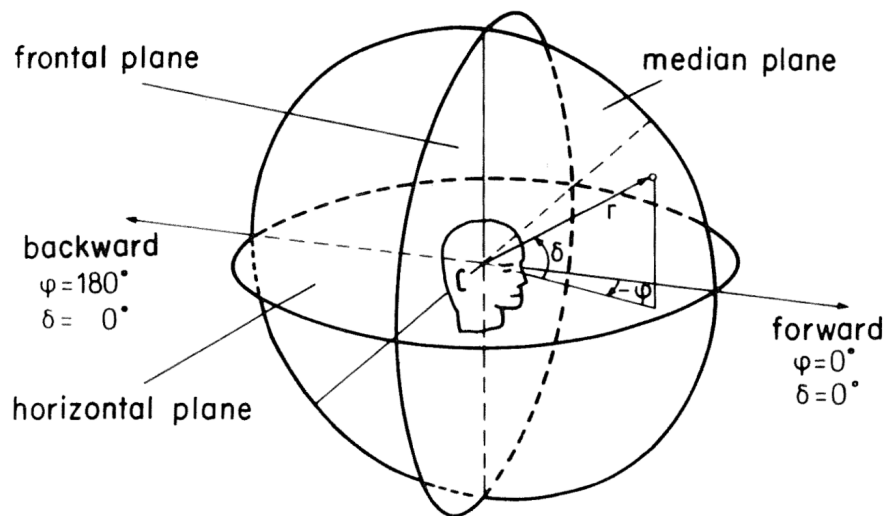


FIGURE 1.5 – Système de coordonnées lié à la tête d'après J.Blauert

Crédits : Jens BLAUERT, *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization*, Cambridge, Mass : MIT Press, 1983, ISBN : 0-262-02190-0, p.14

- Le plan médian permet de distinguer la gauche de la droite ;
- Le plan horizontal permet de discriminer le haut et le bas ;
- Le plan vertical interaural appelé plan frontal par Blauert permet de discriminer l'avant et l'arrière.

Le cadre étant posé, il nous faut maintenant appréhender les différentes conventions les plus utilisées en spatialisation du son. Trois conventions exprimées sous deux formes (cartésienne et sphérique) cohabitent : navigation, mathématique et acoustique. Ces différentes conventions déterminent une façon de nommer les axes, leur orientation ainsi que le sens d'incrémentation dans les coordonnées. Par exemple, dans le système de navigation utilisant un système de coordonnées lié à la tête, un axe pointe en face (noté Y), un autre à droite (noté X) et un troisième en haut (noté Z). Ces différences sont simplement des choix de convention, mais peuvent impacter le résultat spatial dans le cas d'une utilisation liant plusieurs outils qui n'utiliseraient pas les mêmes normes.

Par ailleurs, pour certains systèmes, le sens rotation est trigonométrique (mathématique, ou anti-horaire) ou anti-trigonométrique (antimathématique ou horaire). Le tableau 1.1 réalisé à partir des informations des patchs d'aide de la bibliothèque ambisonique de l'*Institute for Computer Music and Sound Technology* (ICST) récapitule les trois conventions et les usages suivant les coordonnées utilisées.

Coordonnées sphériques	Azimuth = 0	Élévation = 0	Sens de rotation
Navigation	en face	plan horizontal	horaire
Acoustique	en face	plan horizontal	anti-horaire
Mathématiques	à droite	en bas	anti-horaire
Coordonnées cartésiennes	Axe x	Axe y	Axe z
Navigation	à droite	en face	en haut
Acoustique	en face	à gauche	en haut
Mathématiques	à droite	en face	en haut

TABLE 1.1 – Résumé des conventions en fonction des coordonnées

Crédits : patch d'aide de la bibliothèque logicielle de l'*Institute for Computer Music and Sound Technology* (ICST) <https://ambisonics.ch> [consulté le 20/12/2023]

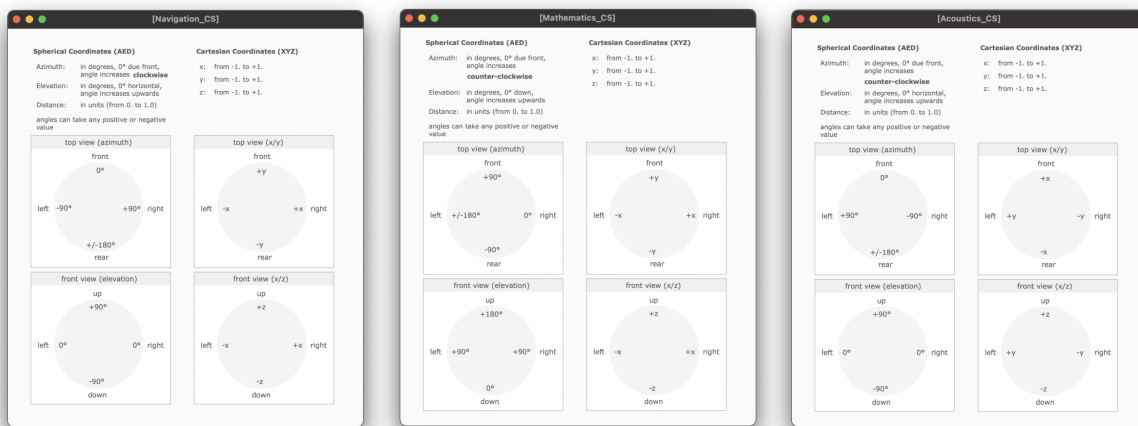


FIGURE 1.6 – Systèmes de coordonnées et conventions

Crédits : patch d'aide de la bibliothèque logicielle de l'ICST <https://ambisonics.ch> [consulté le 20/12/2023]

1.3.3 Déplacement et rotation

Le déplacement ou la rotation d'une source peut être défini par rapport au repère global ou à un repère local propre à l'objet en question. Par exemple, le déplacement d'une source peut être défini par rapport à un auditeur qui constituerait le référentiel (égocentré) ou par rapport à la source (allocentré). Dans ce cas, le repère a une origine extérieure à l'observateur et les axes du repère sont indépendants de l'observateur.

Les rotations et les déplacements appliqués à un objet peuvent être intrinsèques ou extrinsèques. Les rotations intrinsèques sont des rotations effectuées par rapport aux axes locaux de l'objet. Alors que les rotations extrinsèques sont des rotations effectuées par rapport aux axes globaux d'un espace de référence. Les rotations extrinsèques modifient la position de l'objet par rapport à l'espace de référence, mais pas l'orientation de l'objet

lui-même. Pour appliquer des rotations, deux outils sont couramment utilisés : les angles d'Euler et les quaternions. Les angles d'Euler sont utilisés en mécanique pour étudier le mouvement d'un solide utilisant une séquence de trois rotations autour de trois axes orthogonaux. Ces axes de rotation sont généralement désignés par les lettres x , y et z . L'angle d'Euler peut être utilisé pour décrire l'orientation d'un objet en termes d'angles d'inclinaison, de tangage et de lacet. Les quaternions sont une extension des nombres complexes qui permettent de représenter les rotations en 3D.

1.3.4 Vue, perspective et interface

Dans le cas de représentations en deux dimensions, le plus souvent elle est allocentrée (c'est-à-dire extérieure à l'origine si nous admettons que l'origine représente l'auditeur virtuel situé au *sweet-spot*) et propose une vue de haut de l'espace abstrait. Pour les représentations en trois dimensions, soit elles sont réalisées avec deux repères à deux dimensions, soit elles utilisent une technique de perspective isométrique. La perspective isométrique est une technique de représentation graphique en 3D utilisée pour créer des dessins ou des modèles où les objets conservent leur proportion et leurs angles relatifs, mais où la profondeur et la perspective linéaire sont éliminées.

Dans la suite de ce document, lorsque nous ferons référence à l'outil permettant d'effectuer la spatialisation, en somme interagir avec l'espace virtuel, nous parlerons de « panneau de spatialisation ». Ce que nous appelons panneau de spatialisation est généralement constitué d'un repère orthonormé avec des points à l'intérieur. Ces interfaces envoient les coordonnées des points aux moteurs de spatialisation. Ces panneaux de spatialisation sont-ils des représentations de l'espace de la salle de projection ? Dans la plupart des cas, il s'agit d'espaces abstraits normalisés, sans côte, ni référentiel, ni emprunt de l'architecture de la salle, ni même du système de reproduction. Ces repères sont des télécommandes commodes pour manipuler les coordonnées des objets (sources) réduits à des points dans un espace abstrait et ainsi transmettre aux algorithmes de projection une partie des informations nécessaires au calcul des signaux à envoyer aux haut-parleurs ou encodage dans une représentation intermédiaire du champ sonore. Ainsi, n'allons-nous pas un peu vite en présumant que les interfaces de contrôle de position et d'édition de trajectoire sont des représentations de l'espace ?

Interfaces pour la spatialisation : état de l'art

Qu'il s'agisse des premières heures de la *Computer music*, de l'*Elektronische musik*, de la musique concrète ou des musiques mixtes, les recherches technologiques et les recherches musicales tissent de fines relations¹. Depuis 1950, la spatialité du son comme dimension composable est accompagnée de solutions techniques variées². Bien que l'ère des précurseurs de la deuxième moitié du XX^{eme} siècle soit révolue, analyser les relations entre création musicale, technologique et logicielle reste fertile pour appréhender les émergences dans ces trois dimensions. Les technologies utilisées pour faire de la musique, interfaces entre les compositeurs et le son, sont un lieu de cristallisation d'approches du sonore et des opérations musicales. Ainsi, dans ce chapitre, nous constituons un état de l'art de la partie graphique des solutions logicielles liée à la spatialité du son.

2.1 Interface logicielle

Nous choisissons de faire apparaître dans cet état de l'art une sélection non exhaustive des différents outils analysés. Ce corpus correspond à un équilibre entre des outils massivement reconnus et utilisés par la communauté, s'appuyant sur de nombreuses années de

1. João SVIDZINSKI, « Modélisation orientée objet-opératoire pour l'analyse et la composition du répertoire musical numérique », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1- arts, philosophie, esthétique, sept. 2018, pp.68-102 ; Les pièces comme *Turenas* (1971-72) de John Chowning, *Little Boy* (1968) de Jean-Claude Risset, *Concret PH* (1958) de Iannis Xenakis ou encore *Répons* (1981) de Pierre Boulez sont des exemples cristallisant des défis technologiques, scientifiques et musicaux.

2. Pour ne citer que quelques exemples pionniers, nous pensons à *Gesang der Jünglinge* (1955) de K.Stockausen ou *Kontakte* (1960), au Gmebaphone (1973) orchestre de haut-parleurs précurseur de l'Acousmonium (1974), l'utilisation de la 4X dans *Répons* (1981) de Pierre Boulez ou encore celle du *Halaphon* de Hans Peter Haller utilisé pour le *Prometeo* (1984) de Luigi Nono.

recherche et développement, pour partie libre de droit et surtout utilisés activement dans des créations. Nous avons décidé de présenter les outils les plus originaux, qui incorporent notamment des fonctionnalités dépassant la simple projection spatiale. De nombreux projets et logiciels ne seront pas abordés dans cette section, bien qu’ils aient été consultés, notamment Spatium³, les outils Ambisonics de l’ICST⁴, *Ambitools* et *Spatbox* écrits en *Functional Audio Stream* (FAUST)⁵, *Holophon* et *HoloEdit* du GMEM⁶, *IanniX*, *Sparta* et *Hades*⁷, *SPAT Revolution - FLUXX*⁸, *Dolby Atmos*⁹. Les projets analysés sont organisés par ordre alphabétique.

2.1.1 GRM Tools

Nous allons nous concentrer ici sur trois outils des *GRM Tools* : le *SpaceGrain*, *SpaceFilter* et *Space3D*. L’interface graphique du *Space3D* (voir figure 2.1) permet de manipuler des objets dans un espace virtuel 3D, éditer des trajectoires et bouger la position de la caméra. Les haut-parleurs sont représentés dans l’interface pour des points comme les autres sources. La grille matérialise le repère avec trois plans : F, B, L. Lorsqu’une boule représentant une source arrive dans le périmètre d’une boule représentant un haut-parleur (HP), cette dernière grossit. Les boules sont manipulables à la souris directement dans le panneau de spatialisation alors que les trajectoires sont éditables depuis un autre panneau. L’interface graphique du *SpaceFilter* permet d’interagir avec quatre objets dans un espace virtuel à deux dimensions. Chacun d’eux représente une bande de fréquences dont les paramètres du filtre sont éditables. Une zone entourant le point source représente le *spread*, c’est-à-dire l’étalement de la source sur les différents haut-parleurs.

L’interface graphique du *SpaceGrain* permet de visualiser la position des grains dans l’espace et donne un indicateur sur les différentes variables du granulateur. La représenta-

3. Rui PENHA, « Spatium, Tools for Sound Spatialization », dans : *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference 2013*, juill. 2013.

4. Bien que la dernière version de la bibliothèque Max de 2021 soit très intéressante pour l’édition de trajectoire en 3D avec un outil écrit exclusivement en JS dans l’objet JSUI <https://ambisonics.ch/>.

5. Pierre LECOMTE, « The Spatbox : An Intuitive Trajectory Engine to Spatialize Sound », dans : *Sound and Music Computing Conference*, Saint-Étienne, France, juin 2022.

6. <https://gmem.org/holophon> [consulté le 7/03/2024]

7. <https://leomccormack.github.io/sparta-site/docs/plugins/sparta-suite/> [consulté le 7/03/2024]

8. <https://www.flux.audio/project/spat-revolution/> [consulté le 7/03/2024]

9. <https://professionalsupport.dolby.com/s/article> [consulté le 8/01/2024]

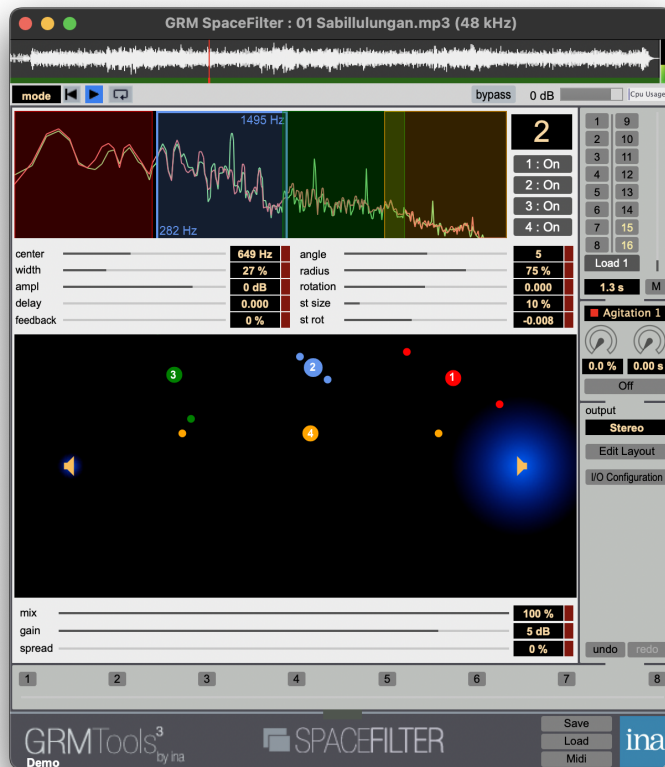
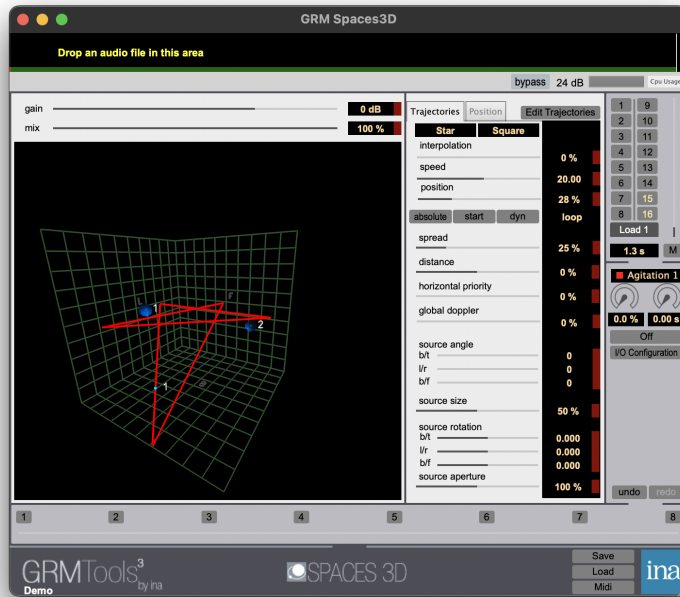


FIGURE 2.1 – Interface graphique de *Space3D* (en haut) et *SpaceFilter* (en bas), exemple d'édition de trajectoire et d'édition de projection spectrale

tion graphique n'est pas interactive avec la souris, bien qu'elle réagisse à la manipulation des variables dans les boîtes nombre. L'idée du *SpaceGrain* est qu'un fichier est divisé en plusieurs grains (100 maximum) projetés sur un dispositif de haut-parleurs avec un comportement dirigé par des méta-paramètres.

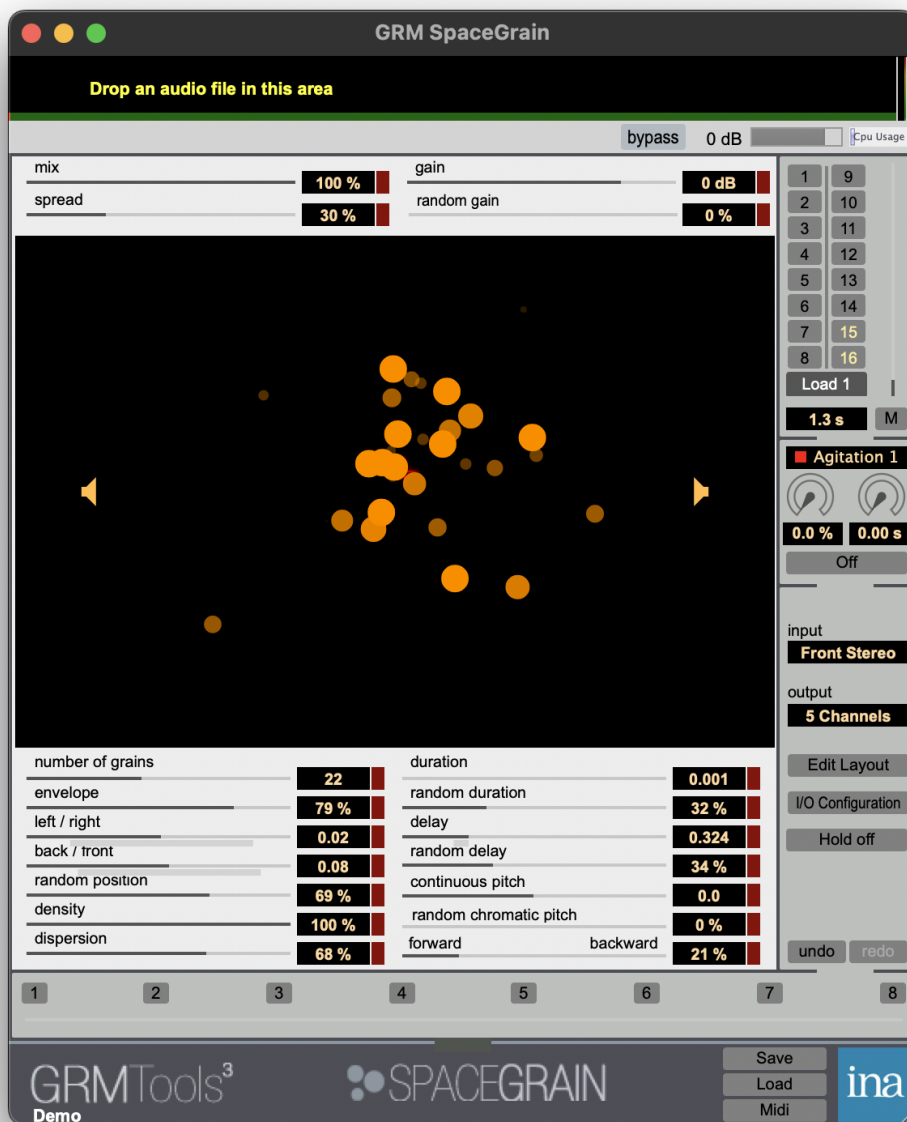


FIGURE 2.2 – Interface graphique de *SpaceGrain* (GRM Tools), exemple d'édition des grains dans l'espace

2.1.2 *HOALibrary*

HOALibrary développée au Centre de recherche en Informatique et Création Musicale (CICM) par Julien Colafrancesco, Pierre Guillot et Elliott Paris entre 2012 et 2015 dans le cadre des projets du LabEx Arts-H2H sous la responsabilité scientifique de Anne Sèdes et Alain Bonardi est un ensemble de classes C++ et FAUST *open-source* destinées à l'ambisonie d'ordre élevé¹⁰. Ce projet prend place dans un sillon que le CICM creuse depuis sa création. Le CICM créé par Horacio Vaggione en 1992 accueille des travaux de recherches mêlant création, technologies, sciences informatiques et particulièrement sur la dimension spatiale du son depuis le début des années 2000, notamment dans le cadre de l'Action Concertée Incitative (ACI) Jeunes Chercheurs « Espaces sonores »¹¹ puis dans les différents projets du LabEx Arts H2H¹². La bibliothèque a été intégrée au langage FAUST notamment avec la contribution de Y.Orlarey, S.Letz et D.Fober du Générateur de Ressources et d'Activités Musicales Exploratoires (GRAME). De récents développements et portages ont été réalisés depuis 2020 au sein de la bibliothèque *abc.lib* puis *hoa.lib* que nous décrivons dans le chapitre 5 et 6.

Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur les interfaces graphiques de la distribution pour *Max*, plus particulièrement sur les interfaces graphiques interactives. Il existe six interfaces graphiques dans cette bibliothèque : *hoa.map*, *hoa.space*, *hoa.recomposer*, *hoa.gain~*, *hoa.vector~*, *hoa.scope~*. Les trois dernières permettent de représenter le gain dans le domaine des ondes planes, les vecteurs énergies et vitesse, et une les harmoniques sphériques ou circulaires. Du fait qu'elles ne sont pas interactives et opératoires, nous ne les présenterons pas. Néanmoins, le lecteur pourra se référer au mémoire de master de E.Paris sur le sujet.

La première interface, *hoa.map* (voir figure 2.3), est un panneau de spatialisation,

10. Anne SÈDES, Pierre GUILLOT et Elliott PARIS, « The HOA library, review and prospects », dans : *International Computer Music Conference / Sound and Music Computing*, Proceedings ICMC|SMC, Athènes, Greece, sept. 2014, p. 855-860.

11. Anne SÈDES, *Espaces sonores, actes de recherches*, Ed. Musicales transatlantiques, 2003, ISBN : 2-903933-08-1.

12. « La spatialisation du son par et pour les musiciens », « Des interfaces pour la spatialisation », « HOA 3D ». Pour une généalogie précise de la bibliothèque, le lecteur peut se référer à la thèse de Guillot. En ce qui concerne les origines de la bibliothèque, voir les actes de recherche de l'ACI « Espace sonore » dirigée par Anne Sèdes, voir aussi COLAFRANCESCO, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », pp.135-138 et GUILLOT, « La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son », pp.76-80

c'est-à-dire une fenêtre comprenant la représentation d'un espace plan constituée d'un repère orthonormé et de sources réduites à des points. Cet objet utilisé pour contrôler `hoa.2d.map` permet d'insérer des points dans ce repère et envoie en sortie leurs coordonnées. L'utilisateur peut créer des groupes de points, cela fera apparaître un point supplémentaire qui permettra de déplacer tout le groupe de points.

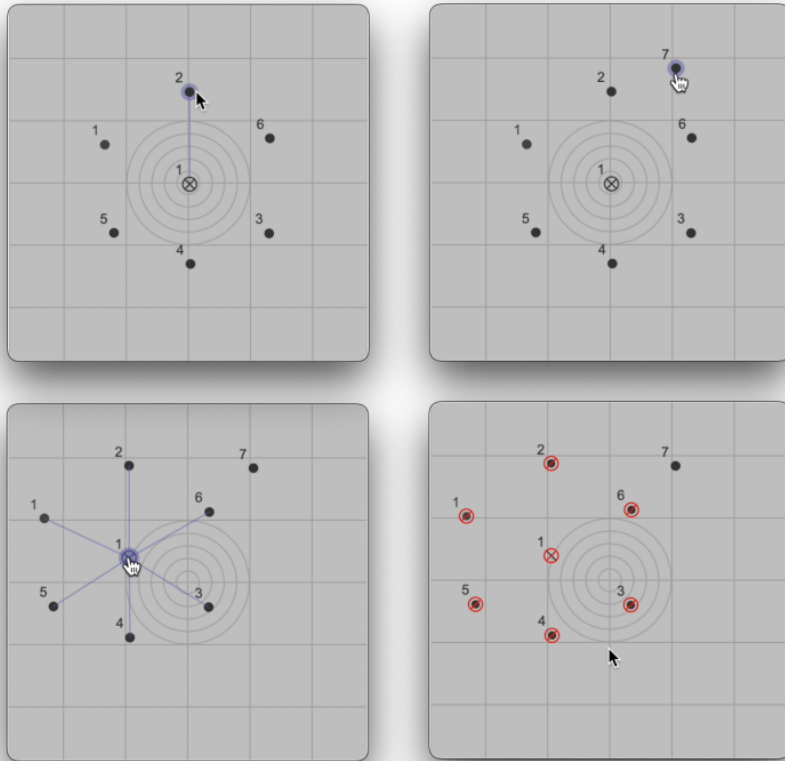


FIGURE 2.3 – Interface graphique de `hoa.map`, quatre captures d'écran

Les sources peuvent être incluses dans plusieurs groupes et les groupes peuvent être rendus silencieux. L'utilisateur peut gérer le niveau de zoom et contraindre les mouvements des points en coordonnées circulaires ou cartésiennes. `hoa.map` peut être utilisé avec trois vues différentes sur le repère : xy , xz ou yz . Elle permet donc le contrôle de la 3D, notamment en utilisant plusieurs instances liées par le même `scriptname`, mais avec des vues différentes : alors que l'une permet de contrôler la position des points sur le plan xy , l'autre permet de contrôler la position des points sur le plan yz par exemple. Les points sont doublés d'un bord lorsque la souris passe à leur niveau ainsi que des segments liant les points au centre du groupe si le point fait partie d'un groupe. Si l'utilisateur passe la

souris au-dessus du point matérialisant le centre du groupe, des segments vont de celui-ci jusqu'à chaque point du groupe. Ce qui permet à l'utilisateur de visualiser la constitution du groupe ou l'appartenance de chacune des sources très rapidement.

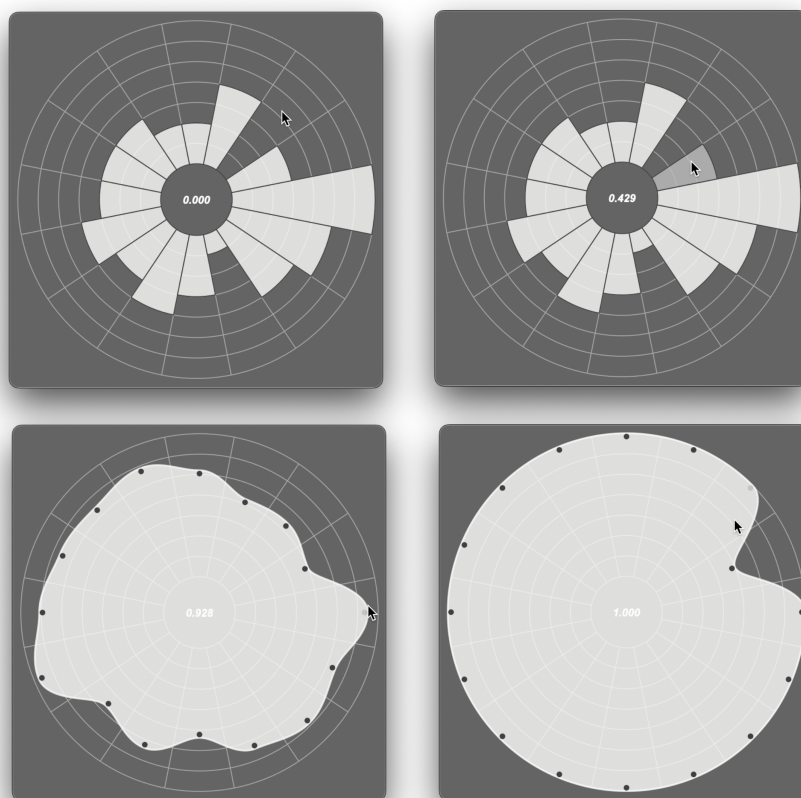


FIGURE 2.4 – Interface graphique de `hoa.space`, quatre captures d'écran

`hoa.space` (voir figure 2.4) est une interface permettant de contrôler le niveau de multiples glissières présentées de façon circulaire (*circular multi-sliders*¹³). Leur nombre, le pas, l'échelle et la grille sont modulables. Les glissières peuvent être contraintes de suivre la grille (option *snap to grid*), ou se déplacer librement le long de la course. Deux styles de glissières cohabitent : *blob* ou *bar*. Avec le style *blob*, le maximum est représenté par un point, une zone sous forme de patatoïde suit les différents points. Le disque est divisé en autant de portion que de glissière et lorsque l'utilisateur passe la souris dans une portion du disque, le point représentant le maximum de la glissière associée change de couleur. Avec le style *bar*, l'interface prend une allure de diagramme en barre circulaire.

13. GUILLOT, « La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son », p. 98.

Si l'utilisateur passe la souris au niveau d'une portion de disque, la barre associée change de couleur.

L'objet `hoa.recomposer` permet de contrôler `hoa.2d.recomposer~` opérant le passage du domaine des ondes planes au domaine des harmoniques circulaires en mode *free*¹⁴. Elle permet à l'utilisateur de contrôler l'angle et l'élargissement de chaque onde plane avant le passage dans le domaine des harmoniques circulaires. Le champ sonore est représenté par une rosace, chaque onde plane est représentée par un de ses lobes. L'utilisateur peut contrôler l'angle de chacun des lobes ainsi que leur élargissement avec différentes options au moyen de combinaison de touches (guidage, selection multiple, *etc.*).

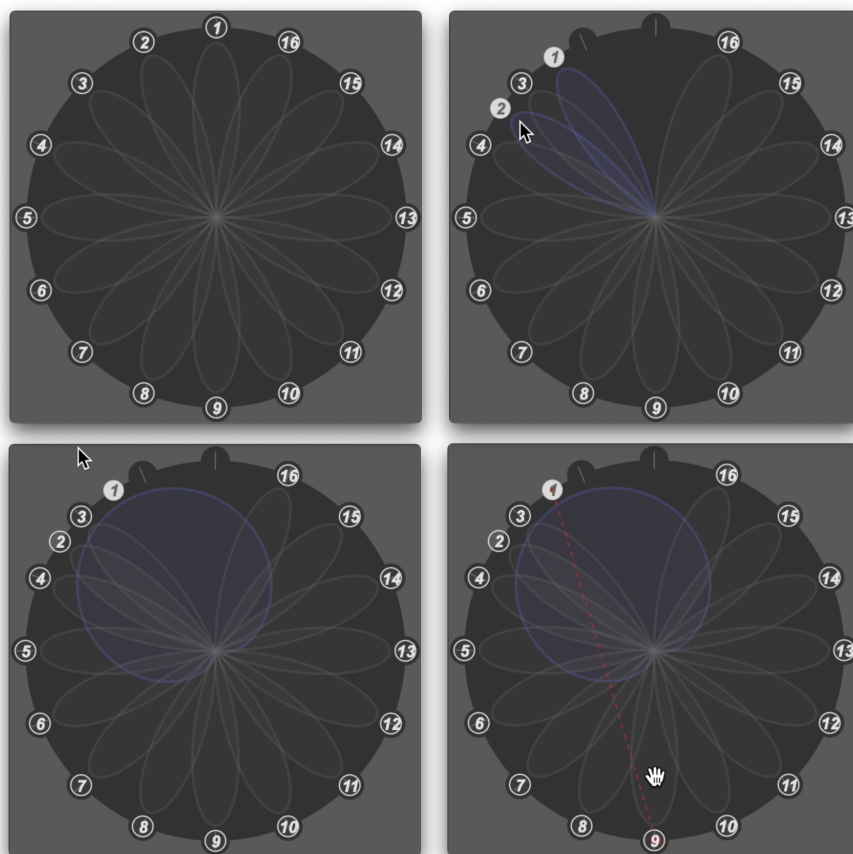


FIGURE 2.5 – Interface graphique de `hoa.recomposer`, quatre captures d'écran

14. L'objet `hoa.2d.recomposer~` a trois modes : fixe, *fisheye* et *free*. Le premier effectue le passage d'un domaine à l'autre sans opération particulière, le deuxième permet à l'utilisateur d'effectuer une distorsion globale du champ sonore assimilable à un effet *fisheye* dans le domaine visuel, et le troisième permet de contrôler la position et l'élargissement des ondes planes dans chaque direction. Eliott PARIS, « Des interfaces pour la mise en espace du son avec la bibliothèque HOA », mém. de mast., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1- arts, philosophie, esthétique, 2013, pp.53-62.

2.1.3 Holophonix

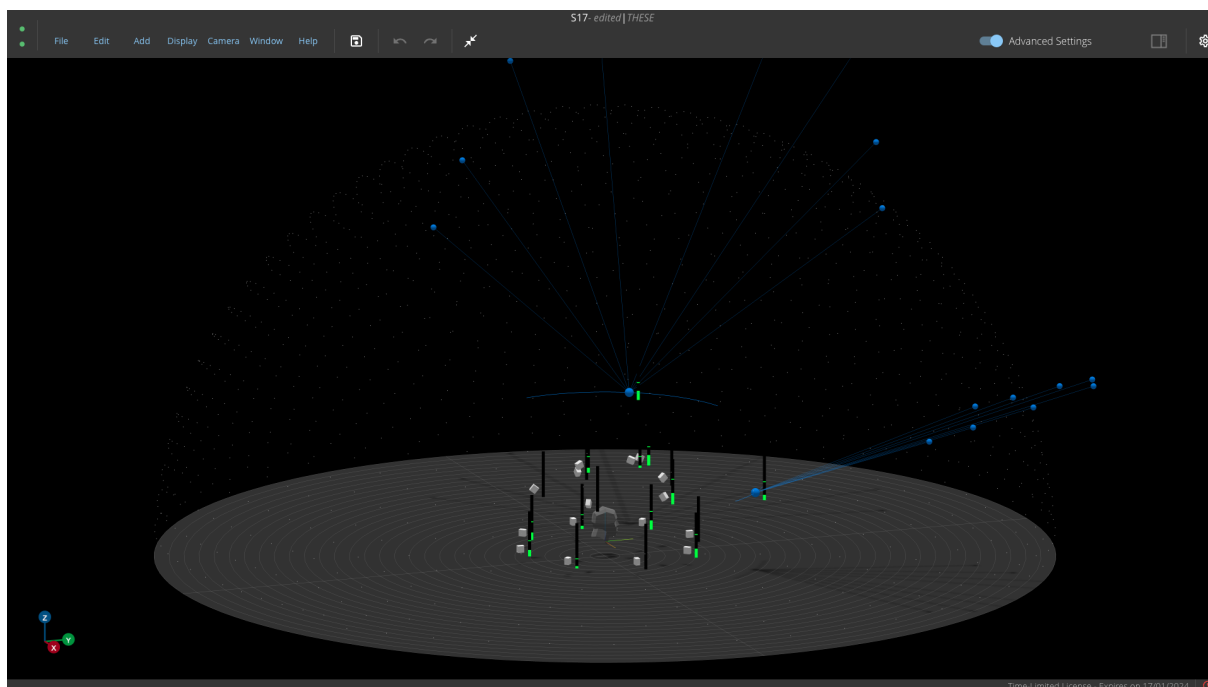


FIGURE 2.6 – Interface graphique de *Holophonix* : projection de 2 sources sur 16HP et affichage des réflexions

Holophonix est un processeur de spatialisation *hardware* et *software* conçu par la société *Amadeus*. Les algorithmes de spatialisation (2D/3D) et de réverbération sont ceux de l'équipe Espace Acoustique et Cognition de l'UMR STMS, Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM). Nous allons nous concentrer ici sur le panneau de spatialisation de l'interface graphique du processeur (voir figure 2.6). Il s'agit d'un espace virtuel dans lequel l'utilisateur peut manipuler des objets, à la différence de plusieurs solutions abordées dans cette section, l'espace est à trois dimensions. Cette différence implique de nombreuses problématiques de représentation : position des objets, déplacement des objets dans les trois dimensions, rotation des objets, déplacement de la vue, en somme la perspective. L'affichage de la grille peut être un quadrillage cubique ou un dôme, le plan correspondant au sol a une opacité et des traits réglables indépendamment des parois. L'utilisateur peut insérer un modèle 3D ou des images à placer sur la grille. Au centre de l'espace se trouve un repère avec la silhouette d'un buste. En bas à gauche de la fenêtre, le repère est reporté afin d'informer l'utilisateur de l'orientation de la vue qu'il a sur cet espace. L'ombre de chaque objet peut être affichée afin de donner

de la lisibilité sur son emplacement. L'utilisateur peut déplacer la vue sur cet espace avec différents degrés de liberté : zoom/de-zoom sur le point central de l'écran, déplacement sur plan frontal de la caméra, déplacement sur une sphère autour du point central de l'écran.

Lorsque les objets sont sélectionnés, trois axes, un cube et trois carrés apparaissent en leur centre (voir figure 2.7). Ce sont les commandes interactives pour déplacer les objets, soit avec contrainte sur les axes du repère qui leur est associé, soit sur leurs plans sagittal, horizontal et frontal, ou librement dans le repère qui leur est associé en sélectionnant le cube. Lorsque la souris passe au niveau d'un de ces sept éléments interactifs, il se met en surbrillance et un repère est affiché. Les objets peuvent être groupés et ces groupes peuvent être manipulés avec des opérations globales (répartition automatique, *scaling*, rotation, *etc.*).

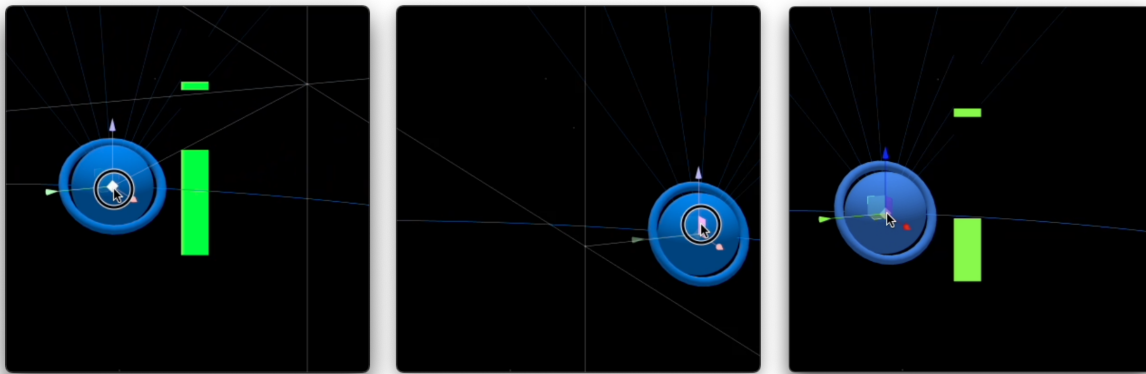


FIGURE 2.7 – Interaction avec les objets dans *Holophonix*

2.1.4 *IEM Plug-in Suite*

Les chercheurs et étudiants de l'*Institute of Electronic Music and Acoustics* (IEM) ont développé une suite de *plug-in* pour l'encodage, décodage et traitement ambisoniques et binaural. Le panneau de contrôle pour l'encodeur ambisonique est intéressant, car il prend avantage du fait que l'ambisonie ne permet pas de spatialiser des sources à l'intérieur du système. En effet, l'ambisonie ne permet pas de simuler des sources virtuelles à l'intérieur du cercle ou dôme de haut-parleurs, ni même de simuler un éloignement, car il n'y a pas de notion de distance nativement dans ce modèle. De fait, les développeurs ont choisi de

contrôler l'élévation des sources virtuelles avec la distance entre le cercle représentant la source et le centre du cercle unité pouvant représenter le système. Si le point source est situé sur le périmètre du cercle unité, l'élévation de la source est à 0° , si le point source est situé au centre du cercle unité, l'élévation est à 90° , c'est-à-dire que la source est projetée au zénith. Par ailleurs, l'utilisateur peut contrôler une valeur d'élévation négative. L'élévation négative se contrôle de la même façon que l'élévation positive (distance source-centre du cercle) néanmoins le point source apparaît en transparence lorsqu'il permet de contrôler une valeur négative. Pour passer d'un côté à l'autre du plan horizontal lorsque l'on manipule le point source à la souris, il suffit de cliquer et de glisser le pointeur de la souris hors du cercle. Le point source se dirige progressivement vers l'extérieur du cercle puis est renvoyé vers le centre comme s'il rebondissait sur le périmètre du cercle. Lorsque la source a une élévation positive et que le cercle représentant la source s'approche du périmètre, le rayon de ce cercle diminue. Lorsque l'élévation est négative et qu'elle décroît vers -90° , le rayon du cercle continue de diminuer.

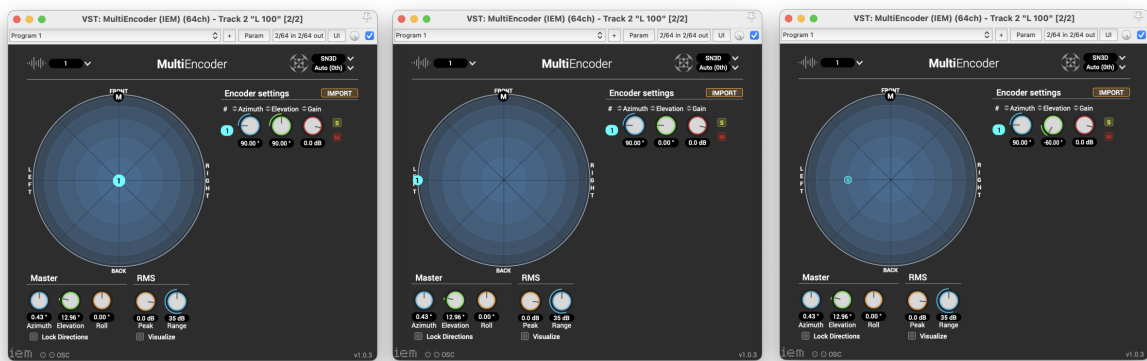


FIGURE 2.8 – Interface graphique du *multiEncoder* (*plug-in* IEM), trois captures d'écran

2.1.5 Spat Ircam

Développé à l'IRCAM depuis le début des années 1990, le *Spatialisateur* est une bibliothèque dédiée à la spatialisation de sources sonores et la réverbération en temps réel. D'abord centré sur un moteur de réverbération dans *Max*, il fut complètement ré-écrit en C++ à la fin des années 2000 et réparti dans deux bibliothèques *cross-platform* et indé-

pendantes des logiciels hôtes¹⁵. La version *Max* du *Spatialisateur*, *Spat~*, comporte plus de trente interfaces graphiques, toutefois seules trois d'entre elles retiendront notre attention dans le cadre de cet état de l'art : le *spat5.viewer*, *spat5.hoa.focus* et *spat5.simone*.



FIGURE 2.9 – Interface graphique du *spat5.viewer*, trois captures d'écran

15. Thibaut CARPENTIER, « Spat : A Comprehensive Toolbox For Sound Spatialization in Max », dans : *Ideas Sonicas*, Electroacoustic Space - Reflections - Tools for its design 13.24 (2021), Guest editor : Dr. Luis Naón Bilingual publication of the Mexican Centre for Music and Sonic Arts (CMMAS), p. 12-23, p.1.

Le `spat5.viewer` est le panneau de spatialisation permettant de visualiser et de manipuler la position des sources sonores et des haut-parleurs dans un espace virtuel¹⁶. Cette interface est hautement configurable (plus de 250 messages de commandes sont répertoriés dans la page de référence de l'objet *Max*). Lister l'intégralité des fonctionnalités serait vain. Nous nous concentrons ici sur les fonctionnalités propres à la représentation de l'espace et à l'interaction. Le panneau de spatialisation est constitué d'une fenêtre pouvant se diviser en deux afin d'afficher deux vues du même espace virtuel pour l'édition et la visualisation des trois dimensions. Elles sont constituées d'un cercle unité, une grille, un repère et une échelle. Le cercle unité est à rayon variable et peut-être masqué. La grille peut être circulaire ou en quadrillage, le nombre d'unités (cercles concentriques ou carrés), leurs dimensions, la largeur des traits sont modulables. Une division angulaire de l'espace au départ de l'origine peut être ajoutée quel que soit le mode de grille. Une règle peut être placée dans l'espace.

Par défaut, une échelle de distance (SI ou unité britannique) est indiquée en bas à droite du panneau. L'origine du repère se situe au centre par défaut, mais l'utilisateur peut ajouter un *offset* et choisir la taille de la zone visible (le niveau de zoom dans l'espace virtuel). Quel que soit l'affichage du repère, le format de sortie des coordonnées de chaque objet est configurable. Les objets fondamentaux de cet espace sont :

- les sources sonores représentées par des cercles pleins avec un label (pouvant aussi être des microphones ou téléphones), leur position est éditable à la souris, leur orientation et ouverture éditable par message. L'utilisateur peut afficher un historique de la position de chaque source avec une certaine profondeur temporelle, ce qui laisse apparaître un tracé de la trajectoire ;
- les haut-parleurs sont éditables individuellement ou en groupe, directement dans la fenêtre ou par message ;
- les zones permettant de détecter si une source est à l'intérieur ;
- l'auditeur initialement au centre du repère, mais dont la position et l'orientation peuvent être édités.

16. Cette interface est utilisée dans des interfaces de plus haut-niveau : le `spat5.oper` ou `spat5.panoramix` par exemple.

Les rotations peuvent être exprimées de façon intrinsèque ou extrinsèque grâce à l'objet `spat5.quat.fromeuler`, la convention par défaut est intrinsèque ZYX.

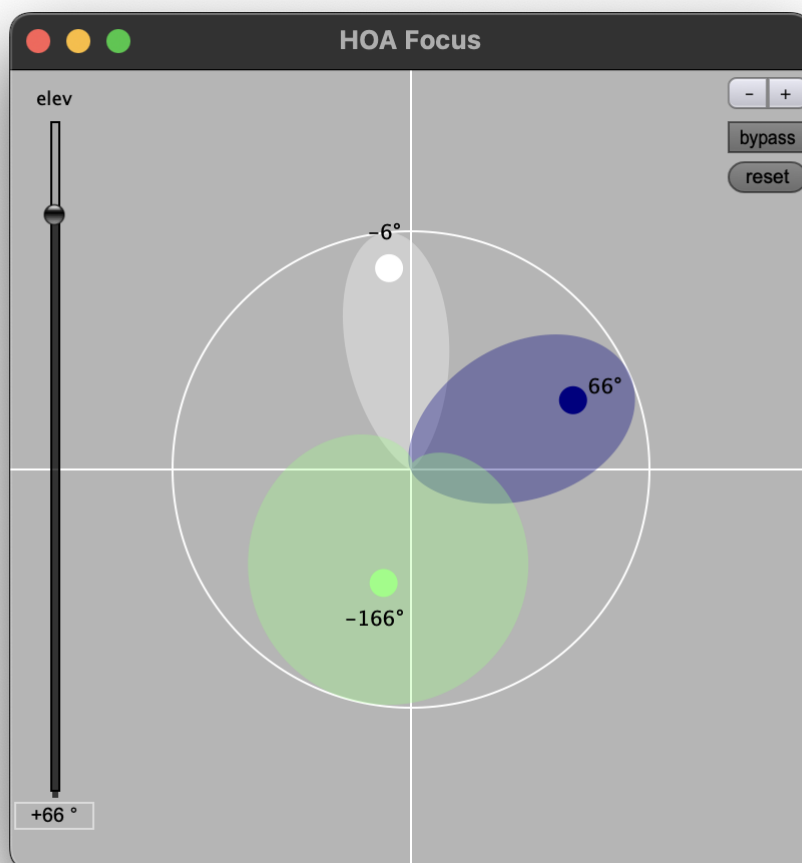


FIGURE 2.10 – Interface graphique du `spat5.hoa.focus`, capture d'écran du patch d'aide

L'objet `spat5.hoa.focus` présenté dans la figure 2.10 est conçu pour appliquer « une directivité virtuelle au flux HOA »¹⁷ et contrôler un filtrage spatial (2D et 3D) appelé « formation de voix » (*beamforming*)¹⁸. Cette interface et le traitement associé effectuant

17. CARPENTIER, « *Spat : A Comprehensive Toolbox For Sound Spatialization in Max* », p.4.

18. Le *beamforming* est une technique qui consiste à former un faisceau acoustique directionnel, cela permet de concentrer l'énergie sonore dans une direction spécifique. Il peut être imaginé ici comme un microphone virtuel placé au centre de la sphère, pointant dans une direction et à la directivité variable. Pour une explication formelle du *beamforming* dans le domaine des ondes planes et dans le domaine des harmoniques sphériques, voir Thibaut CARPENTIER, « Réduction horizontale d'un flux Ambisonic 3D », dans : *16ème Congrès Français d'Acoustique*, Marseille, France, avr. 2022, p.2 et Franz ZOTTER et Matthias KRONLACHNER, « Spatial transformations for the enhancement of Ambisonic recordings », dans : *2nd Int. Conf. on Spatial Audio (ICSA)*, jan. 2014.

la partie DSP permettent d'isoler certaines directions en contrôlant la directivité. L'utilisateur peut insérer plusieurs faisceaux aux directivités et angles indépendants. Ces deux variables sont manipulables à la souris.

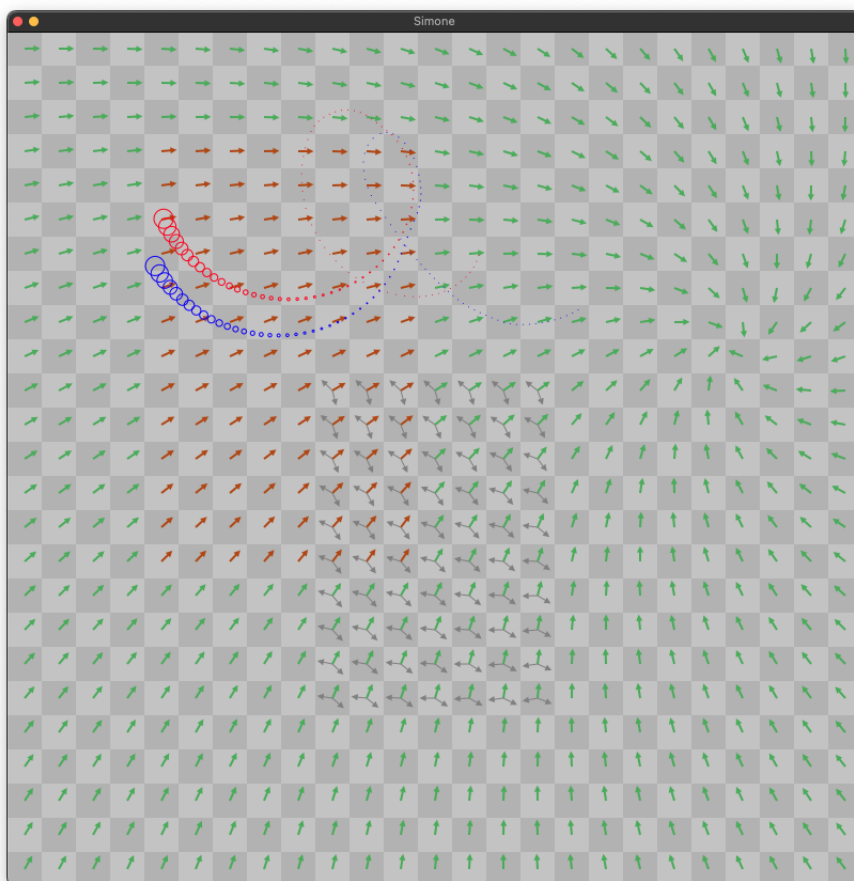


FIGURE 2.11 – Interface graphique de `spat5.simone`, capture d'écran depuis le patch d'aide

`spat5.simone` (voir figure 2.11) est un objet mélangeant une approche algorithmique, symbolique et représentationnelle. Il repose de façon métaphorique sur la notion de « champ vectoriel »¹⁹ :

Un champ vectoriel (ou champ de vecteurs) consiste en une collection de points dans l'espace, désignée comme le domaine, et une fonction qui associe à chaque point du domaine un (et un seul) vecteur. Les champs vectoriels sont typiquement représentés dans le plan 2D ou dans l'espace 3D comme un ensemble de flèches, avec une longueur et une orientation donnée, pour chaque point du domaine.

19. Thibaut CARPENTIER et Andrew GERZSO, « Champs vectoriels pour le contrôle de la spatialisation », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2019*, LaBRI, Bayonne, France, mai 2019, p.2.

La fenêtre de `simone` (pour *Simulation of MOTion*) affiche un champ vectoriel sur un quadrillage à N lignes et M colonnes. Chaque cellule contient une opération (parmi onze possibles) qui sera appliquée à l'objet passant sur cette cellule. Les nombres de lignes et colonnes sont à déterminer par l'utilisateur. Les opérations possibles sont : la cellule vide, le vecteur (impose une direction et une vitesse), le *ranged vector* (direction aléatoire dans une plage donnée appliquée à l'objet), le *radial vector* (même principe avec un tirage dans un ensemble discret), le réflecteur (réflexion en fonction de l'angle), l'opérateur aléatoire (direction avec variance de 360°), opérateur répulsif (réflexion orthogonale), l'attracteur (mouvement orbital autour de la cellule), la téléportation, le changement de vitesse et la déviation. Chaque opérateur a des degrés de liberté et l'espace vectoriel peut être composé de différents vecteurs. L'historique des positions de la source représentée par un cercle peut être tracé sur une fenêtre temporelle choisie par l'utilisateur.

2.1.6 SpatGris

SpatGris est un logiciel conçu et développé depuis 2009 par le Groupe de Recherche en Immersion Spatiale (GRIS) soutenu par le *Center for Interdisciplinary Research in Music Media and Technology* (CIRMMT) de l'Université du Québec à Montréal. D'après les développeurs, l'objectif de cet outil est de permettre aux compositeurs.ices utilisant des *Digital Audio Workstation* (DAW) de pouvoir composer la dimension spatiale du son, comprise comme la localisation de sources dans un espace de projection²⁰, en concomitance avec les autres dimensions du son. Cet outil de spatialisation est composé de deux parties : *SpatGris* et *ControlGRIS*. La partie *SpatGris* s'occupe de faire le rendu de spatialisation à partir des canaux audios correspondant à des sources depuis des logiciels tiers. Les coordonnées spatiales sont envoyées avec le protocole *Open Sound Control* (OSC) par *ControlGRIS* instancié dans un logiciel tiers. *SpatGris* s'occupe de distribuer les signaux à transmettre aux haut-parleurs en fonction du dispositif de diffusion et de l'algorithme choisi par l'utilisateur²¹. Dans leur article aux JIM 2019, les auteurs soulignent l'approche « orientée objet », c'est-à-dire une approche qui fait abstraction du dispositif de diffusion.

20. David LEDOUX et al., « Vers une approche immersive de la composition musicale par le développement d'outils de spatialisation sonore : ControlGRIS et ServerGRIS », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2019*, LaBRI, Bayonne, France, mai 2019, p.1.

21. L'utilisateur a le choix entre le *Vector Based Amplitude Panning* (VBAP), le LBAP et le binaural.

Dans cette approche, les objets fondamentaux sont des sources sonores à projeter selon certaines contraintes indépendantes du système de restitution.

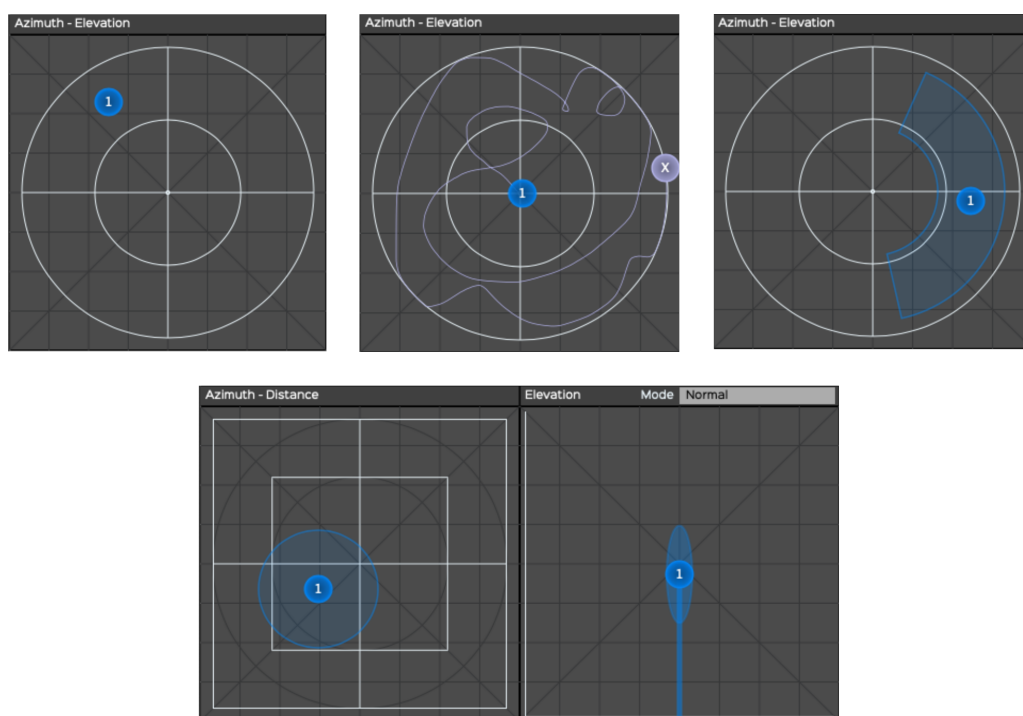


FIGURE 2.12 – Panneau de spatialisation du plug-in *ControlGris* (de gauche à droite et de haut en bas) : mode « dome », trajectoire, *span*, mode « cube »

Concentrons-nous dans un premier temps sur l’outil de contrôle *ControlGRIS* en regardant l’interaction avec l’objet fondamental : la source. Deux algorithmes de projection peuvent être utilisés le VBAP appelé « dome », *Layer Based Amplitude Panning* (LBAP) appelé « cube ». Suivant l’algorithme choisi, les interactions et les interfaces ne sont pas les mêmes. Dans le mode « dome », le panneau de spatialisation comprend un carré avec un repère cartésien, un quadrillage ainsi que deux cercles concentriques blancs. Les sources peuvent avoir une zone d’action appelée *span* en élévation et azimuth. Celle-ci est matérialisée par une prolongation d’une partie du cercle en transparence. Nous pouvons définir un certain nombre de sources (jusqu’à 128) représentées par des cercles pleins colorés avec un identifiant au centre. Deux degrés de liberté sont laissés à l’utilisateur : la distance du point par rapport au centre déterminera l’élévation, la direction du cercle contrôlera l’azimuth de la source. Les trajectoires peuvent être dessinées, ou insérer à partir d’une banque de *preset* avec des paramètres de modifications (vitesse d’exécution, rythme d’exécution, type de lecture, taille de la trajectoire).

Lorsque le mode « cube » est activé, deux repères s'affichent : un repère pour contrôler la position de la source sur le plan horizontal et un autre pour contrôler son élévation. Pour ce deuxième, les sources représentées par des cercles pleins n'ont par conséquent qu'un degré de liberté. Dans ce deuxième repère, un segment relie les cercles à l'extrémité basse du repère. Nous pouvons dessiner des trajectoires ou insérer des *presets* qui vont être exécutés en boucle en un temps précisé par l'utilisateur. Les mouvements des sources peuvent être liés avec des modalités d'interaction définies par l'utilisateur (miroir, circulaire, *etc.*).

L'interface de la partie *SpatGris* comporte une représentation du système de projection dans un espace virtuel avec un repère cartésien, la possibilité d'afficher les haut-parleurs, les sources matérialisées par des sphères (leur zone par des plus petites sphères) ainsi que le plan sur lequel peuvent être projetées les sources. L'interface graphique représentant la scène sonore est un repère à deux ou trois dimensions avec un quadrillage ou un cercle unité, des cubes représentant les haut-parleurs ainsi que les sources représentées par des sphères.

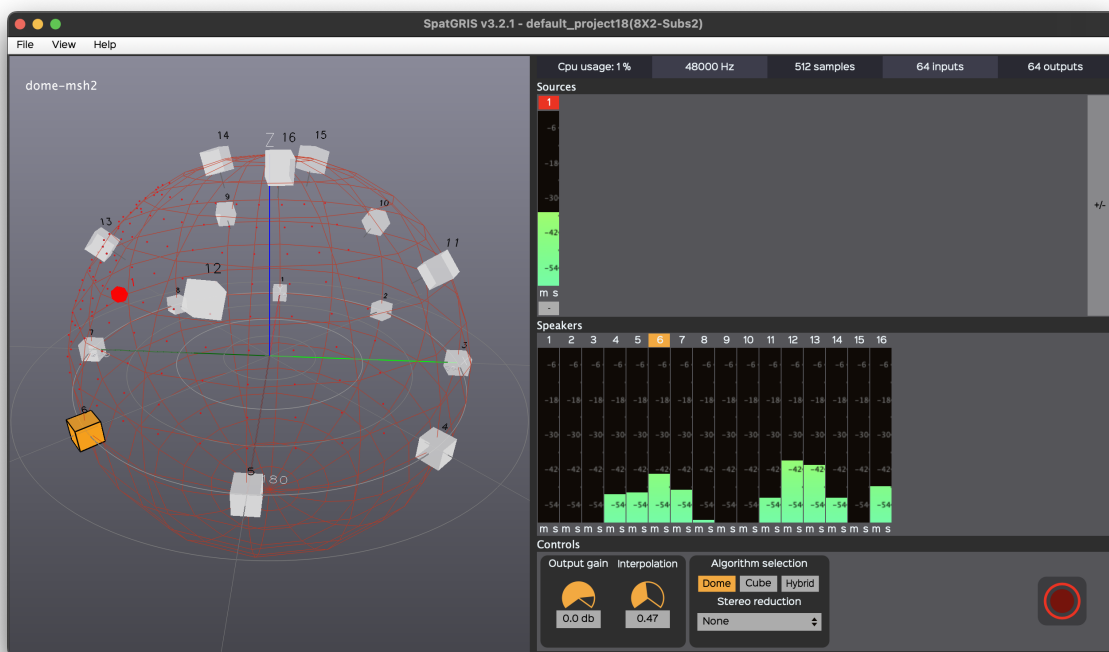


FIGURE 2.13 – Interface graphique de *SpatGris*

2.1.7 Zirkonium

Développé au Hertz Lab du *Zentrum für Kunst und Medien* (ZKM) depuis 2004, *Zirkonium* est un ensemble de logiciels constitué d'un *standalone* (*Zirkonium3*) pour l'édition et la gestion de trajectoire, d'un éditeur de modèle 3D pour configurer le système de diffusion exportable au format *XML* ainsi qu'un lecteur vidéo. Dans la troisième version, *Zirkonium3* permet d'éditer le comportement temporel de la projection d'échantillons importés ou de flux audio en temps réel avec deux algorithmes : le VBAP et l'ambisonie. Le rendu sonore est opéré par des patches *PureData* s'appuyant sur les bibliothèques *HOALibrary* et VBAP. Les coordonnées (cartésiennes ou polaires) des sources peuvent être envoyées à des programmes tiers par OSC. Nous allons nous concentrer sur trois éléments de l'interface graphique de *Zirkonium* : le panneau de spatialisation, la *timeline* et le *path editor*.



FIGURE 2.14 – Interface graphique de *Zirkonium3* : exemple d'édition de trajectoires

Le panneau de spatialisation appelé *dome view* (partie A de la figure 2.14) est constitué d'un repère orthonormé interactif, un cercle unité et une grille. Les sources sonores sont matérialisées par des points (repère n°2 dans la figure 2.14) et les haut-parleurs représentés par des carrés numérotés. Les seules interactions possibles sont la manipulation de la position des sources à la souris et l'édition de trajectoire. Chaque source a deux degrés de liberté. Lorsqu'un dispositif de diffusion permet la projection en 2D, la distance entre l'origine du repère et la source n'a pas d'influence dans la mesure où les deux algorithmes de projection ne permettent pas de gérer la situation où une source se situe à l'intérieur du dispositif. La distance entre la source et l'origine correspond à l'élévation lorsque le dispositif permet de projeter les sources en 3D. L'édition de trajectoire se fait en cliquant avec la souris à l'intérieur du panneau de spatialisation (partie A dans la figure 2.14) afin d'insérer des points pour construire et éditer des segments, courbes de Bézier ou effectuer des modifications paramétriques (translation, mise à l'échelle, *etc.*). Par exemple, dans la figure 2.14, deux fichiers audio doivent être projetés, chaque fichier a un événement associé sur une période définie dans la *timeline*, la source n°1 a une trajectoire représentée en jaune et la source n°2 en rose. Toutes les sources ou groupes de sources (*ID*) sont affichés sur la *timeline* (partie B dans la figure 2.14) avec les événements qui leur sont affectés. Une visualisation de l'intégralité de la trajectoire est faite à gauche de chaque bloc correspondant à un événement (partie C). À l'intérieur d'un bloc correspondant à un événement, nous retrouvons les trois courbes : *x*, *y*, *span* (partie B dans la figure 2.14).

En plus de la fenêtre *dome view*, une fenêtre permet d'éditer le comportement de trois paramètres de chaque événement (voir partie C figure 2.15) : le *span* (paramètre de focalisation/diffusion), *motion path* (lecture de la trajectoire), le volume. La représentation de la lecture de la trajectoire permet de définir combien de temps la source doit prendre pour aller de point en point. Les points insérés sur la ligne sont représentés sur le côté gauche de la fenêtre et la dimension horizontale représente le temps. L'édition de trajectoire peut se faire en 2D bien que la distance source-origine ne contrôle rien sur le plan du rendu sonore, toutefois les coordonnées peuvent être transmises en OSC à d'autres programmes. Les trajectoires sont matérialisées par des lignes à la graise constante, le *span* est représenté par un élargissement en transparence de la ligne (repère n°5 sur la figure 2.15).

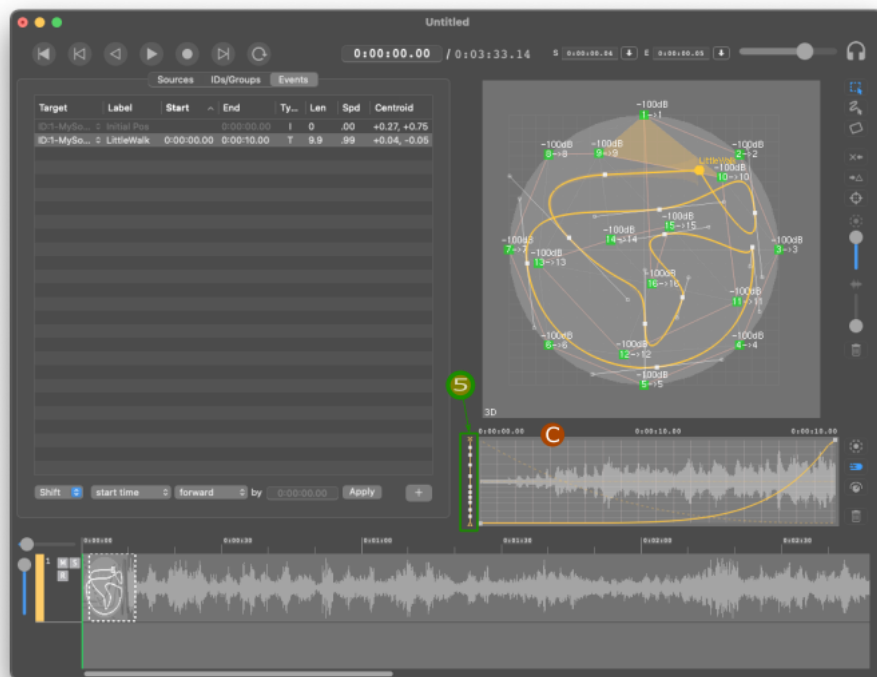


FIGURE 2.15 – Interface graphique de *Zirkonium3* : exemple d'édition de la lecture de la trajectoire

2.2 Écriture et notations de la spatialisation

Suivant le moment de l'histoire et l'endroit du monde que l'on regarde, l'art des sons organisés s'accompagne de différentes approches de la notation ²². La notation telle que nous la connaissons en occident s'est instituée progressivement à partir du IX^{eme} siècle et est passée de simples indications quant aux inflexions du geste vocal à un système symbolique comportant une mesure du temps chronométrique. Pour des raisons pratiques et en relation avec la complexification du répertoire (le plain-chant vers la polyphonie), la notation tend à se préciser et se fonctionnaliser : les neumes, la notation carrée puis mesurée, l'apparition des lignes, le nom des notes, l'apparition de la mesure et des clefs. ²³.

L'établissement de la notation n'est pas neutre et tisse une fine relation avec la pensée musicale. Dans un article publié en 1979, la musicologue Marie-Élisabeth Duchez pro-

22. La notation musicale aura connu plusieurs points d'émergence : d'après l'ethnomusicologue Mireille Helffer, les premières traces nous viennent du XVIII^{eme} siècle avant J.-C. sur des tablettes cunéiformes. En occident, les premières traces se situent au V^{eme} siècle avant J.-C.

23. Jean-Yves BOSSEUR, *Du son au signe : histoire de la notation musicale*, Paris : éd. Alternatives, 2005, ISBN : 2862274399.

pose une analyse de l'émergence de la représentation spatiale dans la conscience musicale occidentale²⁴. La musicologue décrit l'intrication complexe des origines de la notion de hauteur dans la conscience musicale avec les conditions historiques traversées depuis le IX^{ème} siècle. L'auteurice montre que la qualité grave-aigu, pensée et décrite en fonction d'un rapport analogique (la tension de la corde) chez les Grecs avec une pensée de la spatialité arithmétique (division de la corde), s'est progressivement abstraite et spatialisée aussi bien dans la conscience musicale que dans la notation. L'utilisation d'une terminologie spatiale pour décrire le caractère de gravité et d'acuité d'un son s'est développée du IX^{ème} au XVIII^{ème} siècle corrélativement aux besoins d'optimisation de la notation musicale. Les théoriciens du IX^{ème} siècle ont été confrontés d'une part à la nécessité de diffuser, transmettre et pérenniser le répertoire liturgique (jusque-là principalement transmis oralement) et d'autre part à la difficulté que l'exécution d'une musique gagnant en complexité (la polyphonie) représente. Marie-Élisabeth Duchez met en valeur l'importance que cette représentation a eue pour l'établissement de la musique des notes : la discrétisation du continuum grave-aigu, la notion d'intervalle et d'échelle, par conséquent l'établissement de systèmes de composition telle que la tonalité. Du IX^{ème} siècle à nos jours, nous avons employé des représentations et des terminologies spatiales pour une notion sensible (perception de la qualité grave-aigu) qui ne l'est pas essentiellement.

Face aux changements d'échelles dans la composition qui ont eu lieu au cours du XX^{ème} siècle, la notation est de nouveau entrée en mouvement. À partir du moment où la construction dynamique du timbre a été investie par les compositeurs²⁵, les normes ont été progressivement étendues. *Quattro pezzi su una nota* (1959) de Giacinto Scelsi comportant des indications de vibrato, *Pression* (1969) d'Helmut Lachenmann ou encore à *Partiels* (1975) de Gérard Grisey comportant des indications gestuelles ou d'instabilités du son. D'autre part, le développement des modes de jeu étendus et le travail sur la voix ont largement participé à ce développement comme dans *Momente* (1962) de Karlheinz Stockhausen, dans *Nouvelles aventures* de György Ligeti composée entre 1962 et 1965 ou encore dans la *Sequenza III* de Luciano Berio composée en 1966.

24. Marie-Élisabeth DUCHEZ, « La représentation spatio-verticale du caractère musical grave-aigu et l'élaboration de la notion de hauteur de son dans la conscience musicale occidentale », dans : *Acta Musicologica* 51.1 (jan. 1979), p. 54.

25. Nous pensons ici aux mélodies de timbres de *Farben* (1909) de Schönberg et aux travaux d'Édgar Varèse comme *Amériques* (1921) ou *Hyperprism* (1922-1923).

L'apparition de nouvelles conditions de production du son a amené compositeurs et musicologues à s'interroger sur les questions de représentation pour la création, la pérennisation du répertoire, l'interprétation et l'analyse. Des notations aux représentations analytiques en passant par les instructions techniques ou les analyses de signaux, les approches sont plurielles. En effet, les parties électroniques des œuvres renouvellent les quatre questions : pourquoi noter ? Quoi noter ? Comment noter ? Pour qui noter ?

En effet, quelles sont les fonctions de l'écriture des parties électronique ? Est-ce pour que l'interprète puisse se repérer ? Est-ce pour le réalisateur en informatique musicale ? Est-ce pour les compositeurs eux-mêmes afin de composer ces parties électroniques ? Nombreuses sont les œuvres déployant une notation de la partie électronique, avec des approches à chaque fois singulière et idiosyncrasiques. *Studie 1* (1953) de Stockhausen²⁶, dans laquelle le compositeur note les hauteurs et intensité méticuleusement de chaque oscillateur. Les pièces mixtes des années 80 de Horacio Vaggione comme *Thema* (1985), *Set* (1986), *Tar* (1987), *Sçir* (1988) pour lesquelles le compositeur emploie une notation similaire pour la partie instrumentale et la bande. Celle-ci est constituée en partie de son d'origine instrumentale, et la notation permet aux interprètes de se repérer. Certaines pièces de Philippe Manoury comme *En Écho* (1993-1994) dans laquelle le compositeur esquisse l'écriture de l'électronique, ou les pièces d'« électronique de chambre » de Marco Stroppa²⁷.

En ce qui concerne la dimension spatiale, là aussi nous avons pu voir différentes approches, par exemple dans les pièces de Sacha Blondeau comme *Nachleben* (2014), les trajectoires apparaissent aux côtés de l'écriture instrumentale. Dans les pièces de Natasha Barrett comme *Sagittarius A** (2017), quelques schémas illustrent des opérations spatiales, probablement repère pour l'interprète. Plus récemment dans les pièces de Florent Caron-Darras comme dans sa pièce *Sentinelle Nord* (2017), comportant des schématismes pour les croquis utilisés lors de la composition.

Dans le cadre de nos recherches de master nous avons esquissé quelques éléments pour une notation des qualités spatiales du son à partir d'une taxinomie subjective. Notre idée

26. Nous savons par ailleurs que le compositeur a largement travaillé sur la notation afin d'atteindre ses objectifs musicaux, nous pensons par exemple à *Inori* et aux échelles de nuances, ou encore aux multiples schémas du cycle *Licht* accompagnant l'écriture des mouvements.

27. Marco STROPPIA, « Accorder musicalement un espace réel et un espace inventé », dans : Paris : Presses universitaires de France, 2007, ISBN : 9782130562221, pp.79-81.

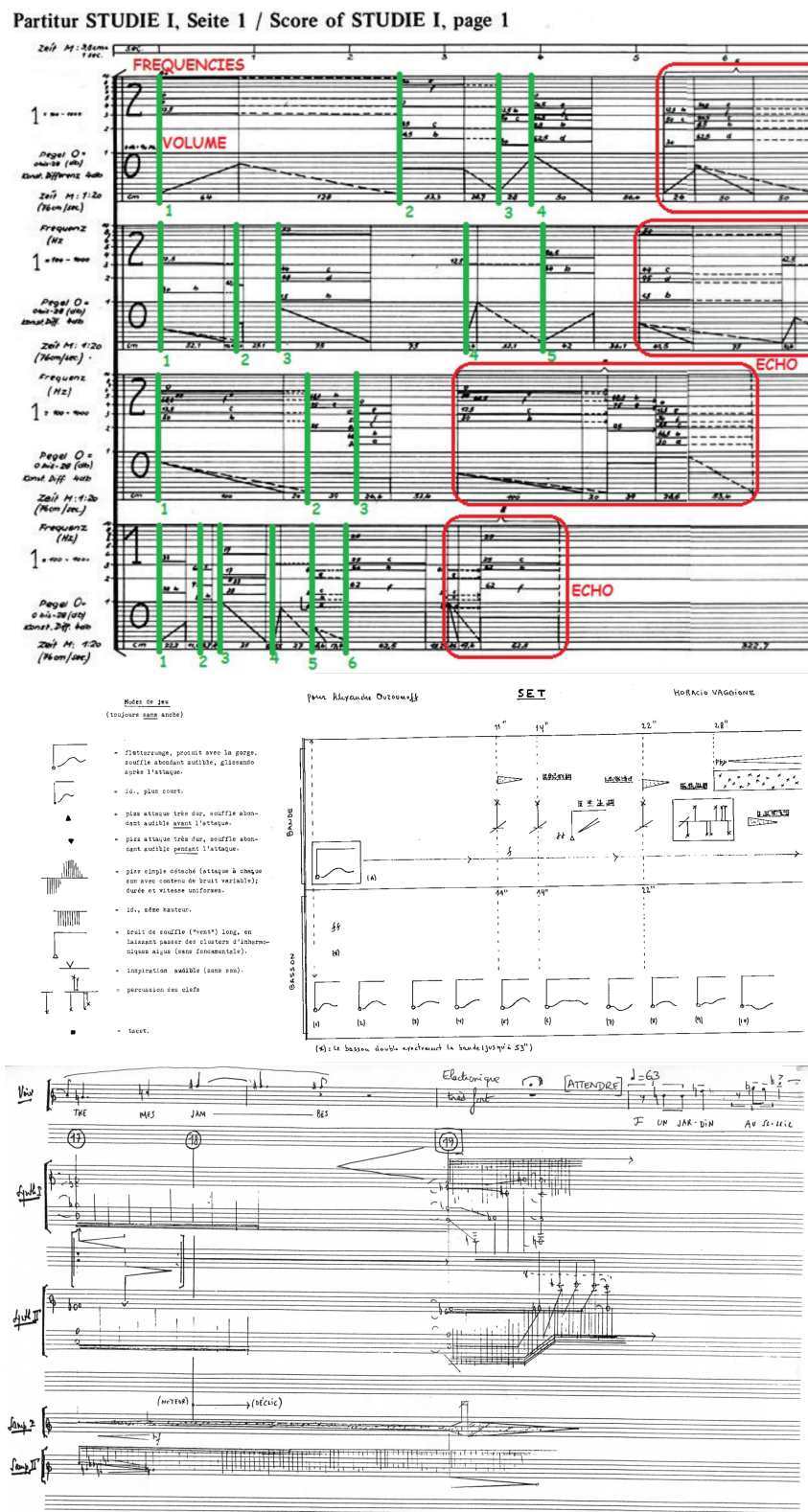


FIGURE 2.17 – Extraits de *Studie 1* (K.Stockhausen), *Set* (H.Vaggione) et *En écho* (P.Manoury)

Crédits : (1) Stockhausen Verlag Edition, (2) Horacio Vaggione, (3) Durand DF 15125

The figure consists of three parts illustrating musical notation and spatialization techniques:

- Top part:** A complex musical score for a vocal ensemble and orchestra. It includes vocal lines with lyrics in French and German, and multiple instrumental staves. A tempo marking of $\text{♩} = 84$ is present.
- Middle part:** A detailed view of a violin part (Vln.) and its spatialization (EA). The Vln. staff shows a melodic line with dynamics like *ff* and *mf*, and a 'crush' effect. The EA staff shows 'live processing: spatialisation effect (auto from T14)' and 'violin glissy weave' with an 'attack' phase. A tempo marking of $\text{♩} = 72$ is shown.
- Bottom part:** Another violin part (Vln.) and its spatialization (EA). The Vln. staff shows a rhythmic pattern with dynamics like *ff*, *mp*, and *ff*. The EA staff shows 'live processing: spatialisation effect rapid, tracking violin' and '(violin glissy weave cont.)'.
- Bottom right:** A hand-drawn spatialization diagram for a scene (Scène) and a hall (Salle). It shows a 3D coordinate system with L (Left), C (Center), and R (Right) channels. Arrows indicate the movement of sound sources between these channels. Labels include 'Scène', 'Salle', 'L', 'C', 'R', and 'L5'. A note says 'après avoir joué l'instrument, les électro-acteurs'.

FIGURE 2.18 – Extraits de *Nachleben* (S.Blondeau), *Sagittarius A** (N.Barrett), *Sentinelles Nord* (F.Caron-Darras)

était de partir de point de vue (ou d'écoute) du compositeur, dans une perspective opératoire, c'est-à-dire dans l'objectif d'atteindre des opérations sur le sonore. Nous avons alors dégagé cinq qualités spatiales conçues comme des *continuum* : le proche-lointain, le localisé-immersif, le raréfié-condensé, le plat-profond et enfin de calme-agité. Nous souhaitons faire la démonstration que les taxinomies sur lesquelles sont appuyées les notations sont arbitraires et correspondent à une approche du sonore à un moment donné dans un contexte musical et qu'elles n'avaient aucune valeur ontologique.

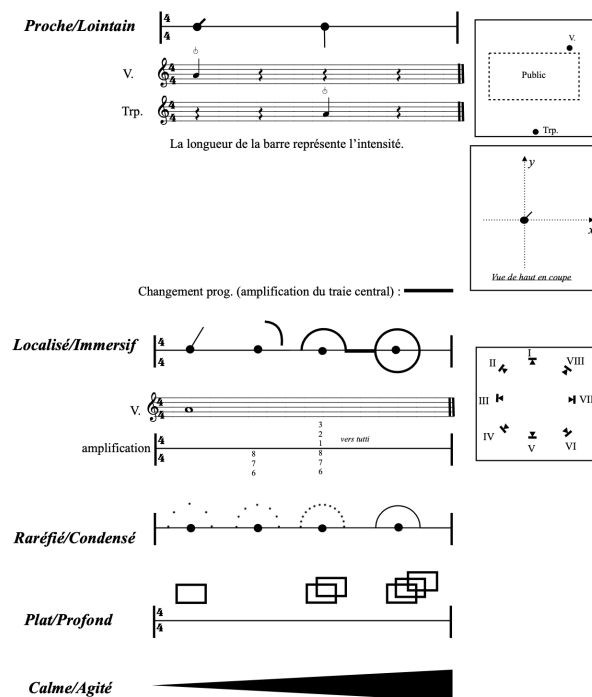


FIGURE 2.19 – Notation originale associée à une taxinomie subjective des qualités spatiales

Il est évident que l'écriture en informatique musicale ne se limite pas à l'utilisation de notation et encore moins à la notation dans la partition (s'il y en a une). Il y a de multiples autres façons de mettre en mémoire, d'éditer, de composer les processus opératoires. Lorsque l'on s'intéresse aux solutions d'écriture de la spatialité du son en informatique musicale, nous constatons que la quête principale est l'écriture de trajectoire en deux ou trois dimensions, ce qui peut déjà comporter certaines difficultés :

1. plus on augmente le nombre de sources, plus le nombre de paramètres est important et devient donc difficile à appréhender et composer ;

2. la représentation de l'espace est schématique, la composition des qualités spatiales est donc liée à une représentation héritée de la physique, nous nous cantonnons à une pensée orientée vers des mouvements et à disposer des sources ;
3. la présence de trois ou quatre dimensions (deux ou trois spatiales et une temporelle) rend difficile la représentation en deux dimensions ;
4. Plusieurs solutions semblent cohabiter sans s'exclure : l'écriture de façon textuelle, alphanumérique (langage pour l'édition de trajectoire), édition de trajectoire sur des représentations (iannix, holoedit, ICST), édition par ligne d'automatisation, édition par méthode algorithmique (simone).

Néanmoins, les projets portant des solutions de notation spécifique pour la composition de la spatialité du son sur le plan logiciel sont très rares. Nous présenterons le seul projet de notation à notre connaissance, ainsi que des exemples de mise en mémoire des qualités spatiales et des normes émergentes.

2.2.1 Spatial Symbolic Musical Notation (SSMN)

La *Spatialization Symbolic Music Notation* (SSMN) émerge d'un ensemble de projets principalement porté par Émile Ellberger dans les années 2010. Aujourd'hui, le projet est arrêté et le prototype testé par un groupe d'utilisateurs n'est pas disponible. Toutefois, nous trouvons important de l'ajouter à notre état de l'art, car il s'agit d'une expérimentation originale.

Dans leurs publications, les chercheurs de l'ICST font un constat amer quant à la spatialisation : difficulté pour le monitoring lors de la composition, contrôle par point *cue* pendant la performance rendant difficile la conceptualisation, absence de représentation pour la communication entre ingénieurs et compositeurs (surtout que le travail sur l'espace est souvent relégué à l'étape de post-production). Face à cela, l'équipe de Zurich a proposé un système symbolique intégré au logiciel de gravure *MuseScore* permettant de contrôler un moteur sonore de spatialisation. Ce travail présenté dans une première publication en 2014²⁸, fera l'objet d'un poster lors de l'édition 2015²⁹ de la conférence *International*

28. Emile ELLBERGER et al., « Spatialization Symbolic Music Notation at ICST », dans : *International Conference on Mathematics and Computing*, 2014.

29. Emile ELLBERGER et al., « A Paradigm for Scoring Spatialization Notation », dans : *Proceedings*

Conference on Technologies for Music Notation and Representation (TENOR) puis d'un article, plus long, plus précis quant au protocole dans celle de 2016³⁰ ainsi que d'un prototype.

The image shows the "Tenor2016" software interface. At the top, it says "Tenor2016" for Tenor Saxophone and Electronics. The main area displays a musical score with a tenor saxophone part (ts.) and two electronic parts (ssmn). A green box highlights a section of the score with a red box labeled 'B' containing a symbol. Below the score is a control panel with a grid of symbols, a 'Cubic Bezier spline' control panel with a red box labeled 'C' containing a symbol, and two circular spatialization diagrams labeled 'D' and 'E'. A red box labeled 'A' highlights a symbol in the grid.

FIGURE 2.20 – Exemple d'utilisation des symboles proposés par SSMN

Crédits : Emile ELLBERGER et al., « Taxonomy and Notation of Spatilization », dans : *TENOR 2016 : International Conference on Technologies for Music Notation & Representation*. Cambridge UK, jan. 2016

Le système symbolique SSMN permet le travail de la spatialisation à l'intérieur des logiciels de gravure et développe une représentation qui tend à s'abstraire du schématisme commun que nous pouvons observer dans différentes partitions comprenant des schémas. Les symboles permettent de contrôler le moteur de spatialisation de l'ICST depuis le logiciel de gravure et sa *timeline*. Lorsque nous regardons les symboles plus en détail, ce système est issu d'une classification des opérations sur les qualités spatiales. Cette

of the First International Conference on Technologies for Music Notation and Representation (Paris, France), Institut de Recherche en Musicologie (IReMus), mai 2015, p. 98-102.

30. Emile ELLBERGER et al., « Taxonomy and Notation of Spatilization », dans : *TENOR 2016 : International Conference on Technologies for Music Notation & Representation*. Cambridge UK, jan. 2016.

classification nous permet de mettre en valeur une pensée de l'espace propre à la SSMN qui est orientée source ponctuelle, même s'il existe des symboles se référant à des types de réverbération, d'autres à des plans sonores, la majorité des opérations porte sur les mouvements. La taxinomie du projet SSMN est fondée sur des descripteurs simples ou complexes.






















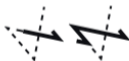








Cube		Hemi-sphere	
Church		Other	
Performer		Perf_line	
Perf_arc		Music stand	
Audience		Micro-phone	
Loud-speaker		Swinging microph.	
Swinging loudsp.		Choreo-graphy	
Sound point RS		Sound point PA	
Group RS		Group PA	
Plane		Scale	
Straight		Polyline	
Poly_closed		Circle	
Slinky		Spiral	
Bézier		Bézier_spline	
Bézierton		Bernoulli	

FIGURE 2.21 – Symboles proposés par SSMN

Crédits : Emile ELLBERGER et al., « Taxonomy and Notation of Spatilization », dans : *TE-NOR 2016 : International Conference on Technologies for Music Notation & Representation*. Cambridge UK, jan. 2016

Les descripteurs simples sont les unités de bases auxquelles peuvent être ajoutées des transformations, après quoi les descripteurs deviennent complexes. Elle est divisée en trois parties : description de la salle, description des sources, opérations possibles. La deuxième catégorie attire particulièrement notre attention, nous pouvons y trouver (voir figure 2.22) : le type de source (A), les qualités spatiales de la source (B), ses dimensions (C), la localisation (D), les trajectoires (E) et trajectoires composées (F).

II. Descriptors of sound sources

A. Types of sound sources

1. Sound points

- a. Physical root sound (RS)
label

- b. Projected audio signal (PA)
label

2. Groups

=> Definition: A group is a collection of sound points with common spatial features. A group is defined by a perimeter wherein the single elements can be found. Position and movement of single elements within the perimeter can be defined in the same way as single points.

- a. Root sound

label, number of sources, position of reference point

- b. Projected audio

label, number of sources, position of reference point

3. Planes (PA)

=> Definition: a plane is a homogenous sound spread out in space.

label, shape

B. Spatial quality of single sources

1. Perceived distance (PA)

presence, brilliance, warmth (equalization)

C. Dimension of single sources

2. Scale

=> PA, perception of «bigger or smaller» than real sound source)

scale factor

D. Localization of sound sources

1. Localization of single points (PA, RS)

position, direction, inclination, aperture (PA)

2. Localization of groups

shape, geometrical center, position of each element, within the shape

3. Localization of planes

position, direction, inclination

E. Simple trajectories of sound points, groups or planes

1. Linear

- a. Straight

start/end

- b. Polyline (open)

segments, start/end

- c. Poly_closed (closed polyline)

segments, start/end

2. Circular

- a. Circle

center point, radius, start/end angle, direction

- b. Slinky (named after the toy invented 1945 by Richard James)

start/end center point, radius, start/end angle, direction

- c. Spiral

start/end center point, start/end radius, start/end angle, number of rotations

3. Curve

- a. Bézier

start/end, control points, reiterations

- b. Bézier_spline

start/end, control points, reiterations

- c. Béziergon (closed Bézier curve)

start/end, control points, reiterations

- d. Bernoulli (lemniscate)

start/end, control points, reiterations

- e. Other (e.g. Lissajoux, etc.)

F. Compound trajectories

1. Compound using simple trajectories

2. Generic polygons (selection of basic shapes)

FIGURE 2.22 – Taxinomie sous-jacente à la notation de la *SSMN*

Crédits : Emile ELLBERGER et al., « Taxonomy and Notation of Spatialization », dans : *TE-NOR 2016 : International Conference on Technologies for Music Notation & Representation*. Cambridge UK, jan. 2016

Dans cette approche, l'alternative à la source ponctuelle est le groupe de sources ponctuelles ou le plan. En effet, partir d'un niveau de complexité, il devient difficile de décrire le champ sonore avec un assemblage de sources ponctuelles. L'utilisation d'un concept de plus haut niveau tel que le plan sonore (A.3), que nous pouvons définir comme un son étalé homogène, n'admet aucune opération. Ne sont pas pris en compte la largeur de ce plan, sa densité ni la distance perçue, car toutes les descriptions qui suivent (B.1, C.2) font référence aux sources ponctuelles et (D.3) peuvent définir la position d'un plan, mais pas sa largeur. De fait, l'intégralité de la proposition de SSMN est liée à une taxinomie ancrée dans une pensée euclidienne de l'espace. Cette proposition d'une notation systématisée est malgré tout très intéressante pour les compositeurs souhaitant travailler avec ce type d'opérations.

2.2.2 Spatial Sound Description Interchange Format (SpatDIF)

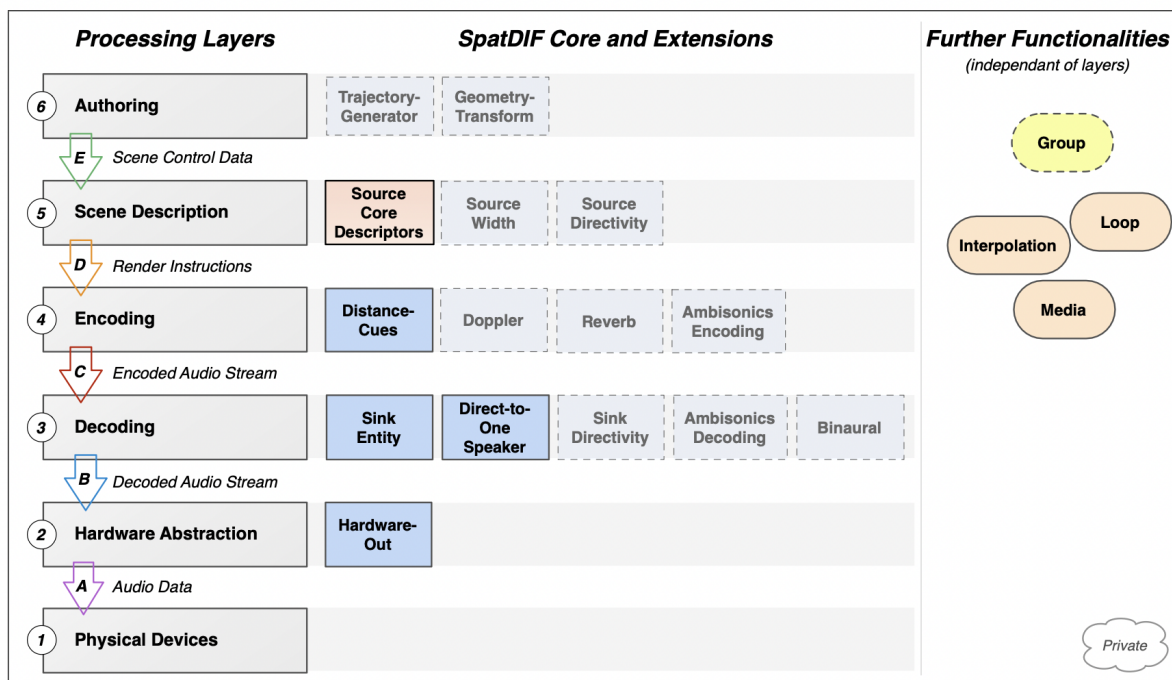


FIGURE 2.23 – Organigramme des couches d'opérations dans le format *SpatDIF*

Crédits : Nils PETERS, Trond LOSSIUS et Jan SCHACHER, « SpatDIF : Principles, Specification, and Examples », dans : *Proceedings of the 9th Sound and Music Computing Conference (SMC)*, Copenhagen, Danemark, jan. 2012, p. 500-505

Le *SpatDIF* est une syntaxe émanant d'une collaboration entre l'ICST, le ZKM et l'IRCAM utilisée pour transmettre les informations élémentaires à la reproduction de scènes

sonores. Les données écrites au format *SpatDIF* peuvent inclure des informations sur la position, l'orientation, la distance, et d'autres caractéristiques pertinentes des sources sonores. De façon analogue à la SSMN, la structure de cette syntaxe suppose une manière d'appréhender les opérations sur les qualités spatiales et de fait une façon de penser la spatialité du son. Un bref regard sur la taxinomie utilisée suggère que la spatialité du son est là aussi réduite à une pensée euclidienne de l'espace.

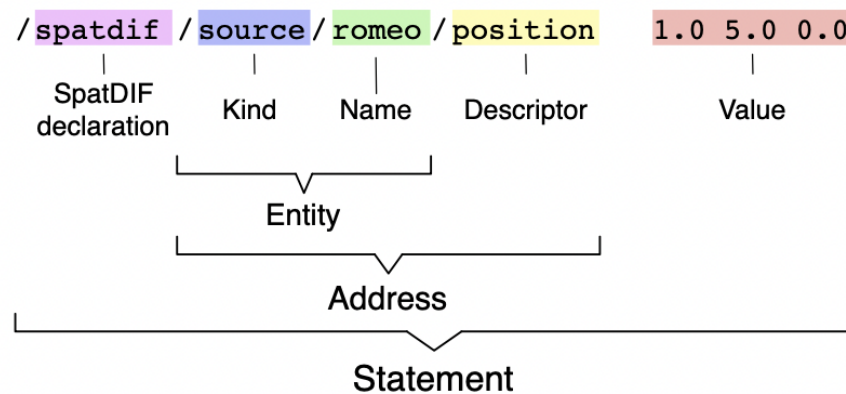


FIGURE 2.24 – Structure d'un message de commande au format *SpatDIF*

Crédits : Nils PETERS, Trond LOSSIUS et Jan SCHACHER, « SpatDIF : Principles, Specification, and Examples », dans : *Proceedings of the 9th Sound and Music Computing Conference (SMC)*, Copenhagen, Danemark, jan. 2012, p. 500-505

Le format *SpatDIF* est basé sur une taxinomie des opérations en différentes couches (voir la figure 2.23). Une liste d'informations au format *SpatDIF* est organisée en *scene* et *entities*, objets fondamentaux constituant la scène sonore. Les *entities* peuvent être de plusieurs types, chaque instance de l'entité peut avoir un *name*, les propriétés de l'entité sont décrites et transmises par des *descriptors*. De façon analogue aux instructions OSC, un ordre *SpatDIF* consiste à envoyer la valeur d'un descripteur à un identifiant correspondant à une entité (*address*). Il y a dans cette syntaxe une partie *meta section* pour préciser les extensions utilisées, *time section* pour préciser les informations temporelles s'il s'agit d'évènements, *core* et *extention*. *Core* et *extensions* sont un ensemble de descripteurs. Dans le *core*, l'objet élémentaire est le point, sa position et son orientation³¹. Dans la version 0.4 de la bibliothèque, des extensions permettent de préciser des informations comme la réverbération, des trajectoires paramétriques ou liées à des formes élémentaires

31. Nils PETERS, Trond LOSSIUS et Jan SCHACHER, « SpatDIF : Principles, Specification, and Examples », dans : *Proceedings of the 9th Sound and Music Computing Conference (SMC)*, Copenhagen, Danemark, jan. 2012, p. 500-505, pp.2-3.

(ligne, cercle, rectangle), la directivité de la source, ou encore des variables de traitement comme le *spread extension*³². Certaines extensions permettent des transformations globales comme des translations, rotations ou mouvements de groupe.

Ce projet émane d'une volonté de normalisation à des fins d'efficacité dans la transmission des pièces entre les centres et la pérennisation des œuvres est très intéressante. Toutefois, nous remarquons notamment à partir des exemples d'utilisation³³ que ce format suppose une taxinomie liée à une pensée euclidienne de l'espace. Néanmoins, nous remarquons l'ouverture progressive du paradigme de la source ponctuelle vers des descripteurs opératoires.

2.2.3 Audio Definition Model (ADM)

L'*Audio Definition Model* (ADM) est un modèle proposé par l'ITU-R BS.2076-2 qui vise à normaliser la représentation des données audio dans le cadre de la production musicale et de l'audio professionnel. L'ADM a été développé pour faciliter l'échange d'informations audio entre différents logiciels, équipements et systèmes audio. Il s'agit d'un format d'enregistrement de métadonnées pour les formats et contenus de flux audio comprenant notamment les informations spatiales. Les métadonnées associées au flux audio sont au format *XML* et intègrent les fichiers de type *BWF* et *BW64*.

L'idée est que chaque canal audio est accompagné d'un certain nombre d'informations : cinq types de canaux existent, *objects*, *directspeakers*, *binaural*, *hoa* et *matrix*. Les canaux de type *objects* ont un gain et une position associés. Lorsque les canaux sont de type *directspeakers*, cela correspond à une pratique de *channel-based audio*, c'est-à-dire que le flux est à envoyer directement au HP. Le *channel-based audio* est en opposition à l'*object-based audio*, pratique dans laquelle chaque flux correspond à un objet auquel sera associé des métadonnées (sa position, son niveau, *etc.*). Les canaux *hoa* ont toutes les informations concernant les normes, ordres associés. L'ADM comme format d'enregistrement ou communication est adapté pour une pratique de la spatialisation, mise en espace de sources ponctuelles notamment avec une approche orientée objet.

32. Jan SCHACHER et al., « Authoring Spatial Music With SpatDif Version 0.4 », dans : *13th Sound And Music Computing Conference*, Hamburg, Allemagne, sept. 2016, ISBN : 978-3-00-053700-4.

33. Jan C SCHACHER, Chikashi MIYAMA et Trond LOSSIUS, « The SpatDIF library – Concepts and Practical Applications in Audio Software », en, dans : *40th International Computer Music Conference & 11th Sound and Music Computing Conference*, Athènes, Grèce : Unpublished, sept. 2014.

Dans le cadre du projet Européen ORPHEUS (2015-2020)³⁴, l'équipe de l'IRCAM a travaillé sur des expérimentations autour de l'utilisation de la réverbération dans un dispositif de travail d'audio orientée objet³⁵. Dans ce contexte, l'équipe a notamment développée un enregistreur/lecteur de fichiers au format ADM aujourd'hui disponible sous forme d'application *standalone ADMix Player*.

2.3 Synthèse critique

L'état de l'art montre une concentration des modes de représentation de l'espace et des opérations dans les solutions logicielles permettant d'interagir avec la spatialité du son. Une grande majorité des outils consultés et la majorité des outils analysés privilégient l'utilisation de panneau de spatialisation intégrant la source ponctuelle réduite à un point comme objet fondamental³⁶. En effet, sur les sept logiciels présentés en détail, quatre d'entre eux ne proposent que des interfaces graphiques liées à la projection de sources ponctuelles³⁷. Il en va de même pour les outils cités en introduction de la section 2.1. Les contre-exemples sont en partie des approches héritant d'une conception des opérations sur des objets dans l'espace - position, taille, distance, trajectoire -. Les deux seuls exemples intégrant des traitements spatiaux n'offrent que peu d'interfaces interactives pour ces derniers. Cette situation contribue à la constitution d'angles morts dans les pratiques de composition d'espace sonore et de la pensée de l'espace en informatique musicale.

Les *GRM Tools* proposent une représentation originale des opérations de filtrage ainsi que de la granulation dans l'espace. Néanmoins, celles-ci sont marquées par une pensée des opérations « dans l'espace » et non « sur l'espace ». En effet, pour le filtre spatial, l'utilisateur peut interagir avec la position d'une bande de fréquence dans l'espace et la place qu'elle occupe. Pour le granulateur, hormis les glissières horizontales, l'interface

34. <https://orpheus-audio.eu/workshops/index.html>

35. Geier MATTHIAS et al., « Software tools for object-based audio production using the Audio Definition Model », dans : *International Congress on Spatial Audio*, Graz, Austria, sept. 2017, pp.149-153.

36. Nous avons fait le choix de ne pas présenter dans le manuscrit tous les logiciels permettant de faire de la spatialisation avec des interfaces graphiques liées à une pensée euclidienne de l'espace, car cela aurait été redondant.

37. Il s'agit d'*Holophonix*, IEM, *SpatGris* et *Zirkonium*. Toutefois, précisons qu'*Holophonix* permet d'afficher une représentation des première réflexions, que l'IEM a des plug-in multicanaux - par exemple des filtres - qui utilisent les mêmes interfaces que leur version stéréo, *SpatGris* et *Zirkonium* permettent d'afficher une représentation du *span*, c'est-à-dire l'envergure de la source.

graphique n'est pas interactive. Le résultat des opérations spatiales (dispersion des grains, répartition dans l'espace, *etc.*) est illustré dans l'interface graphique par un ensemble plus ou moins dense de cercles clignotants. Ce qui, au-delà de son originalité, reste une approche des objets dans l'espace et non d'opération proprement spatial.

La bibliothèque *HOALibrary* propose deux interfaces interactives pour le traitement dans le domaine des ondes planes (`hoa.space` et `hoa.recomposer`). La première est une glissière multiple et circulaire, permettant de contrôler différents traitement en fonction de la direction. La deuxième est une représentation des ondes planes, leur direction et leur focalisation.

Le *Spat* de l'IRCAM propose une interface permettant de contrôler des opérations de *beamforming* (`spat5.hoa.focus`) et une interface représentant une matrice de vecteurs pour la génération de trajectoires dans un espace 2D (`spat5.simone`). Cette deuxième interface n'est pas une interface interactive, elle permet d'illustrer des opérations. Par ailleurs, elle est liée à une pensée des opérations sur des sources ponctuelles pour l'édition algorithmique de trajectoire.

La seule approche intégrant dans une seule fenêtre le panneau de spatialisation interactif et les outils d'écriture des événements est le *Zirkonium*. Cette solution a notamment intégré la représentation des opérations spatiales dans la *timeline* (miniature de la trajectoire, tracé du *span* et de la position).

La création interactive de trajectoire est l'opération privilégiée dans de nombreux cas (*Space3D*, *SpatGris*, *Zirkonium* pour les solutions analysées - bien plus largement dans celles citées). Notons que l'édition de la position d'un objet ou l'écriture d'une trajectoire dans un environnement 3D à la souris n'est pas une opération aisée (par exemple dans *Space3D*, `hoa.map`, *Holophonix*, `spat5.oper`, *SpatGris*). La solution des plug-in de l'IEM retenue par le *SpatGris* lorsqu'il n'y a pas de compensation de distance, et par le *Zirkonium* lorsque l'on utilise l'algorithme HOA nous apparaît comme la plus pratique. En effet, dans le modèle ambisonique, il n'y a pas de notion de distance et une source ne peut pas être projetée à l'intérieur du cercle, de ce fait, dans les interfaces mentionnées, le rayon contrôle l'élévation. Pour les outils de l'IEM, le point est opaque lorsque l'élévation est positive, et transparent lorsque l'élévation est négative.

Le projet SSMN est la seule proposition de système générique pour une écriture sym-

bolique et pour intégrer la notation d'opération spatiale dans la partition instrumentale. Cette proposition nous interroge sur sa fonction : est-elle pour le compositeur, l'interprète ou le musicologue ? De plus, nous avons remarqué que cette notation est fondée sur une taxinomie héritée de l'approche physique de la spatialisation prenant principalement la source ponctuelle comme objet fondamental et l'écriture de trajectoire.

Enfin, les formats *SpatDIF* et *ADM* représentent des solutions intéressantes pour « écrire » les opérations spatiales avec les fichiers audio sous forme de méta-données tout en étant empreint du même paradigme. Ces deux spécifications montrent des signes d'enrichissement et semblent s'ouvrir progressivement à d'autres approches.

La concentration des modes de représentation contribue selon nous à la constitution d'un paradigme et génère *de facto* des angles morts sur la pensée de l'espace et des opérations en musique. En effet, les solutions logicielles proposent des panneaux de spatialisation avec une pensée euclidienne de l'espace, et cela est tout à fait pertinent. Néanmoins, dans la grande majorité des cas, elles ne proposent que ce type d'approche, ce qui nous paraît réducteur et normatif.

Tout un champ d'interrogations sur le rapport aux opérations reste inexploré. Nous pouvons nous demander ce que pourrait être l'interface interactive de la dispersion des grains dans l'espace, ou de la gestion de l'aléatoire dans leur répartition, plutôt qu'une glissière horizontale pour les *GRM Tools* ? Pouvons-nous mettre au centre les méta-paramètres comme les *Low Frequency Oscillator* (LFO) sur les trajectoires (*SpatGris*) ou l'interpolation entre des trajectoire (*Space3D - GRM TOOLS*) ? Que pourrait-être l'interface interactive pour une décorrélation ambisonique ou une granulation ambisonique ? Le manque d'interface graphique pour contrôler ces méta-paramètres ou ces traitements induit de fait un manque pour les manipuler et penser les opérations faites avec eux.

Approches originales

Dans le cadre de cette thèse, nous interrogeons les enjeux inhérents à la conception de représentations opératoires pour le traitement spatial du son. Comme nous l'avons exposé en introduction, la notion de représentation opératoire peut être considérée comme un système complexe multi-échelle comprenant des interfaces graphiques, des moteurs sonores et des idées musicales. Ainsi, les différents éléments qui composent ce système sont indissociables les uns des autres et leurs frontières sont floues. Notre terrain expérimental repose de fait sur plusieurs aspects que nous devons séparer momentanément pour la démonstration : les interfaces graphiques, le moteur sonore et la composition électroacoustique.

Dans ce chapitre, nous concentrons l'attention du lecteur sur les interfaces graphiques, tout en lui demandant de garder à l'esprit l'interconnexion avec les autres dimensions des représentations que nous analysons. Ainsi, pour la partie *Graphic User Interface* (GUI) de notre terrain, nous avons conçu un ensemble de codes *JavaScript* regroupés dans la bibliothèque *abc.lib*. Ceux-ci sont issus d'une méthodologie de recherche-création fondée sur une boucle de prototypage itérative. L'objectif de cette boucle n'est pas la réalisation d'un outil optimal, mais l'ancrage de la réflexion dans une pratique concrète afin de faire émerger de nouvelles problématiques. Nous oscillons entre les problématiques générales et des problématiques locales aux prototypes en avançant par zoom et de-zoom avec une heuristique à la souplesse variable. N'ayant pas adopté une logique de versionnage¹, le moment de passer d'un prototype à l'autre est souple, nous nous permettons

1. Dans la mesure où l'objectif n'est pas de produire un outil optimal, mais de mener une réflexion

d’avoir une réflexion hors des sentiers battus. D’une intuition émerge un prototype dont le processus de réalisation est appuyé sur des problématiques qui lui sont propres, nous permettant ainsi d’éclairer la problématique globale depuis un certain angle. À chaque tour de boucle, nous réorientons la suite de nos investigations vers une autre direction : tantôt dans la continuité, tantôt en contre-pied, tantôt avec un pas de côté. Ainsi, un réseau de points d’éclairage sur la partie graphique des représentations opératoires pour le traitement spatial a été tissé. Nous commencerons ce chapitre avec une discussion à partir de deux maquettes d’interfaces d’écriture générique : *stap.js* (pour *Sketch to Ambisonics Processes*) et *2plf.js* (pour *Two Piecewise Linear Function*). Nous présenterons ensuite une interface de contrôle dédiée à un traitement : *dtd.js* (pour *Delay Time to Decorrelation*). Enfin, nous aborderons une approche du contrôle générique avec *map_plus.js*. Nous allons donc exposer les différents scripts, leur mise en œuvre, les problématiques desquelles ils découlent, les conclusions qu’ils nous permettent de tirer ainsi que les pistes de développement.

3.1 Interfaces d’écriture

Afin d’interroger les enjeux de la conception et la réalisation de représentation opératoire pour le traitement spatial du son, nous avons travaillé deux problématiques. Composer l’espace sonore suppose dans la majorité des cas de travailler avec un grand nombre de paramètres. Qu’il s’agisse d’une situation de contrôle en temps-réel ou d’écriture, les compositeurs doivent manipuler beaucoup de variables en même temps. Dans un cas pratique avec plusieurs sources sonores et plusieurs traitements spatiaux, donner des moyens d’interagir aisément avec celles-ci ou représenter leur évolution au cours du temps et les écrire n’est pas simple. C’est ici que réside la première question à laquelle nous nous sommes confrontés : comment représenter et rendre interactif un grand nombre de variables dans l’espace de la page à deux dimensions ? La deuxième problématique est issue de notre analyse de l’état de l’art : la concentration des modes de représentation de l’espace contribue à la création de paradigmes opératoires et génère *de facto* des angles morts sur la pensée de l’espace en musique. Ainsi, nous nous demandons comment pourrions-nous concevoir

sur les enjeux de la conception d’interface pour le traitement spatial du son, chaque script est laissé à l’état de prototype.

des interfaces pour le traitement spatial les plus ouvertes et souples possibles ? Nous parlons ici de « souplesse » pour pointer vers le fait de ne pas contraindre l'utilisateur dans un paradigme opératoire pré-établi, lui laissant la possibilité d'adapter et de « tordre » le modèle.

La première question peut se déployer vers trois autres questions. Pour qui interfaçons-nous les traitements ? Que choisissons-nous de représenter ? Et comment le représenter ? Dans la mesure où nous travaillons sur le rapport aux interfaces dans la pratique de la composition avec une méthodologie centrée sur notre pratique, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que les interfaces sur lesquelles nous travaillons sont destinées aux compositeur.ice.s, créateur.ice.s, et autres praticien.ne.s des musiques électroniques. Il ne s'agit pas d'outil d'analyse ou de mesure. La deuxième question est fondamentale, faisons-nous des interfaces génériques adaptables à toutes les situations ou des interfaces spécifiques pour chaque traitement ? Nous avons choisi d'enquêter sur les deux. Pour répondre à la troisième, nous devons avant tout nous demander ce que nous représentons, notamment dans le cas d'une interface spécifique à un traitement. Est-ce que nous représentons les variables manipulées ou le résultat attendu ? Dans ce dernier cas, est-ce que le résultat attendu est regardé sur le plan du traitement du signal ou de la psychoacoustique ? En somme, situons-nous les interactions sur le plan opérationnel, psychoacoustique ou avec des outils d'analyse du signal ? Pour finir, faisons-nous des interfaces de jeu temps-réel ou des interfaces d'écriture ?

3.1.1 *Sketch To Ambisonics Processes (stap.js)*

Inspiré par l'Unité Polyagogique Informatique du CEMAMu (UPIC)², *stap.js* est un prototype sous forme de patch *Max* permettant d'éditer des partitions graphiques pour contrôler des traitements spatiaux sur des échantillons sonores monophoniques. Le choix de commencer notre investigation sur les interfaces et la modularité par un outil d'écriture graphique prend naissance dans deux hypothèses imbriquées que nous détaillerons ensuite :

- le graphisme sous sa forme matricielle comporterait une ambiguïté computation-

2. Développé entre 1968 et 2001 au CEMAMu, l'UPIC est un instrument permettant de contrôler de la synthèse additive et par modulation avec une table à dessin. Voir le chapitre 8 pour une présentation détaillée.

nelle. Autrement dit, nous pouvons l’appréhender de différentes façons sur le plan du calcul. De la même façon qu’une forme d’onde peut être analysée avec différents outils suivant ce que l’on cherche (*Fast Fourier Transform* (FFT), crête-mètre, valeur rms, descripteurs, *etc.*), nous pouvons analyser une matrice avec différents outils statistiques. Nous faisons le choix de rester sur le plan opératoire en faisant fit de toute signification symbolique liée au graphisme.

— cette ambiguïté aurait un potentiel génératif permettant d’être au plus près du geste sans y être analogue, autrement dit, elle permettrait un contrôle « flou » ;

Le terme « génératif » fait référence à la faculté de créer des approches, des idées, des situations³ et le terme « flou » fait pour sa part référence à l’idée que le lien précis entre le graphisme et le résultat nous échapperait au premier abord. Pour comprendre ce lien, il faudrait passer du temps avec l’outil, mettre à l’épreuve et apprendre à en jouer, et ce serait au cours de ce processus que se présenteraient des rencontres inattendues. Nous cherchons ainsi à avoir un contrôle qui laisse de la place à l’imprévu, à la surprise.

Mise en œuvre

stap.js est un script interprété dans l’objet `js` utilisant *Jitter*⁴. L’idée de ce prototype est de pouvoir faire un dessin en utilisant l’objet `lcd`⁵ avec différentes brosses (bombe, ligne droite, gomme), qui sera ensuite analysé avec différents descripteurs statistiques⁶ que nous pourrions utiliser pour contrôler les variables du moteur sonore. La dimension horizontale représente le temps. Concrètement, il s’agit de remplir une matrice avec autant de cellules que de pixels sur l’objet `lcd` et d’analyser chaque colonne. Les tests de mise à l’épreuve ont été réalisés avec *Max* ainsi qu’une version adaptée du patch pour *Max4Live* afin de l’intégrer dans un DAW. Nous souhaitons expérimenter le contrôle d’un granulateur spatial en ambisonie avec différentes situations de *mapping* entre les descripteurs et les

3. Il ne s’agit pas d’une référence à l’art génératif et la musique générée par processus algorithmiques ROADS, *Composing Electronic Music : A New Aesthetic*, pp.338-368.

4. Extension du logiciel *Max* pour le traitement de matrices.

5. L’objet `lcd` de dessiner dans une interface graphique et donne les informations liées au pointeur de la souris (position, clic). Cet objet a été déclaré obsolète par *Cycling ’74* après que nous ayons produit cette maquette. Il est encore utilisable et fonctionnel au moment de la rédaction du présent document.

6. Ici, nous faisons référence à la notion descripteur telle qu’elle est employée en audio numérique et particulièrement dans le milieu de l’analyse du signal. Les descripteurs audio sont des manières d’appréhender le contenu d’un signal.

variables du traitement. Avant de présenter des exemples d'utilisation, concentrons-nous sur le fonctionnement de *stap.js*.

Le terme matrice est à comprendre ici au sens mathématique, c'est-à-dire un tableau de valeurs à N dimensions. Elle est caractérisée par un nombre de lignes (L) et de colonnes (M), sa taille appelée aussi dimension dépendra du produit du nombre de lignes par le nombre de colonnes ($L \times M$). Dans notre cas, il s'agit d'un tableau à trois dimensions avec une profondeur notée (N).

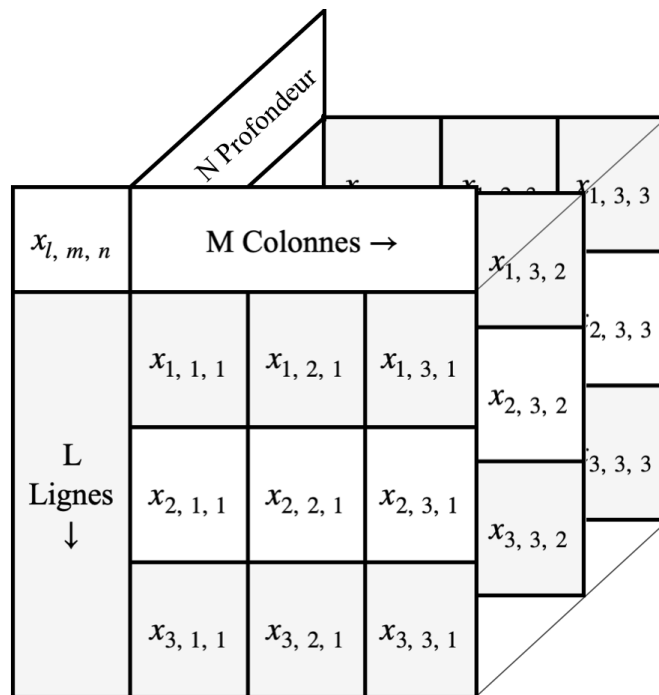


FIGURE 3.1 – Représentation d'une matrice de dimension 3

Pour pointer vers un élément de la matrice, une cellule, nous utilisons ses coordonnées. L'objet `1cd` envoie cinq informations : les coordonnées cartésiennes de la cellule, niveau de rouge, de vert et de bleu en 8 bits. Une fois le dessin terminé, une matrice à trois dimensions est remplie à partir des valeurs de chaque pixel de l'objet `1cd`. Une fois la matrice remplie, le script calcule les descripteurs statistiques sur chaque colonne de la matrice et stocke ces valeurs dans des tableaux qui seront envoyés en sortie. Dans la dernière version du code, nous calculons la position moyenne des pixels, l'écart-type, l'étendue, la densité absolue et la densité relative pour chacune des colonnes. Nous avons choisi ces descripteurs, car ils sont très facilement implémentables pour entrer au plus vite dans l'expérimentation sensible.

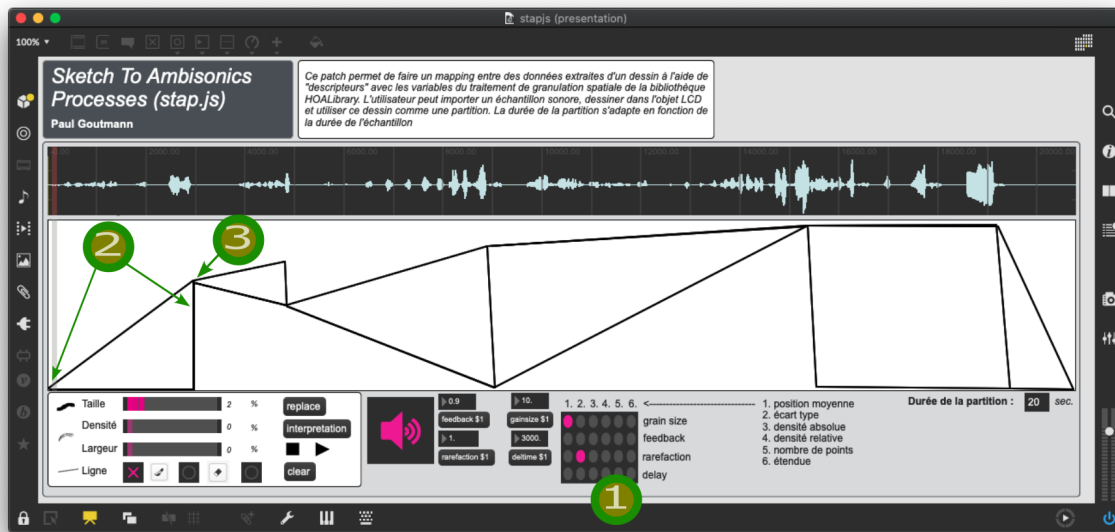


FIGURE 3.2 – Exemple d’une partition *stap.js*

La matrice peut être pensée comme une partition graphique dont la dimension horizontale est comprise comme étant le temps et la durée de la partition dépend du choix de l'utilisateur.ice. Avec une matrice⁷ de *mapping* chaque descripteur peut être utilisé pour contrôler une variable du moteur sonore.

Par exemple, la figure 3.2 présente une situation dans laquelle nous jouons avec le contrôle du *grain size* et la *rarefaction*. Le *grain size* est contrôlé par la position moyenne des points sur la partition et la *rarefaction* par l'écart-type. Pour des raisons arbitraires, nous ne contrôlons pas directement la *rarefaction* mais son opposée⁸. En effet, nous pouvons voir dans le repère numéro 1 (en vert) une matrice de *mapping* permettant de changer les connections entre les sorties de l'interface et les variables du moteur de traitement à la volée. Dans la portion de la partition pointée avec le repère numéro 2, nous écrivons une augmentation de la taille de grain ainsi qu'une diminution de la raréfaction (car le descripteur contrôle l'opposée de la raréfaction), puis passons subitement à une raréfaction maximale au repère 3.

7. Ici le terme matrice fait référence à une matrice booléenne à deux dimensions permettant de flécher des flux entrant vers des sorties.

8. Lorsque la raréfaction vaut 1, nous n'entendons aucun grain, et lorsqu'elle vaut 0, nous entendons le flux de grain dans son intégralité. En l'occurrence, nous avons choisi de manipuler l'opposée de la raréfaction, car nous souhaitons contrôler la quantité de grain plutôt que que la raréfaction. Lorsque le descripteur est à sa valeur minimum, nous n'entendons aucun grain, lorsqu'il est à son maximum, nous entendons tous les grains.

Décrivons maintenant les différents descripteurs que nous avons utilisés. Notons que les statistiques ne sont réalisées que sur une seule dimension, nous avons utilisé la couleur dans une des versions, mais comme il s'agit d'un cas particulier, nous la présenterons en dernier. Nous avons choisi d'effectuer les calculs sur des objets fondamentaux dont le nombre de pixels est à définir par l'utilisateur, toutefois dans la présentation qui suit, les objets fondamentaux sont des cellules. En somme, nous laissons le choix de l'épaisseur de ce que nous considérons comme un point (le nombre de pixels) pour plus de modularité. Par ailleurs, nous avons fait le choix par convention de placer le minimum en bas de la matrice et de renvoyer une valeur nulle pour les différents descripteurs si aucun pixel n'est activé sur une colonne⁹.

Si nous décrivons la matrice analysée par :

$$A = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{L,1} & \cdots & x_{L,M} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Le tableau $\bar{x}[n]$ contenant les moyennes pour chaque colonne de la matrice A de dimension $L \times M$, où $n \in [1, \dots, M]$ peut s'écrire :

$$\bar{x}[n] = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_{i,n} \quad (3.2)$$

Le tableau $\sigma[n]$ contenant les écart-types¹⁰ pour chaque colonne de la matrice A de dimension $L \times M$, où $n \in [1, \dots, M]$ peut s'écrire :

$$\bar{\sigma}[n] = \sqrt{\frac{1}{L} \left(\sum_{i=1}^L x_{i,n}^2 \right) - \bar{x}[n]^2} \quad (3.3)$$

L'étendue est le nombre d'unités séparant les deux objets de référence (groupement de pixels dont la taille est à définir par l'utilisateur) les plus éloignés. La densité absolue représente le rapport entre le nombre d'objets de référence (groupement de pixels dont la taille est à définir par l'utilisateur) pour chaque colonne et le nombre d'objets de

9. Que faire si aucun pixel n'est activé sur une colonne? Nous avons deux possibilités, soit laisser la valeur de sortie statique, soit repasser par zéro. Nous avons fait le choix de repasser par zéro. Ce choix est discutable, car un passage par zéro peut être réalisé par inadvertance, alors que si la valeur restait constante et que l'utilisateur souhaite aller à zéro, il devrait le préciser et il n'y aurait plus d'ambiguïté.

10. En statistique, l'écart type dans un ensemble représente l'écart moyen par rapport à la moyenne.

référence maximum que la colonne peut accueillir. Alors que la densité relative représente le même rapport dans l'intervalle des cellules actives de chaque colonne, en somme la densité calculée sur l'étendu définie plus tôt. Dans la version prenant en compte la couleur, nous faisons une somme entre les trois dimensions (RVB), puis nous calculons la moyenne sur toute la colonne et normalisons la valeur de sortie entre 0 et 1.

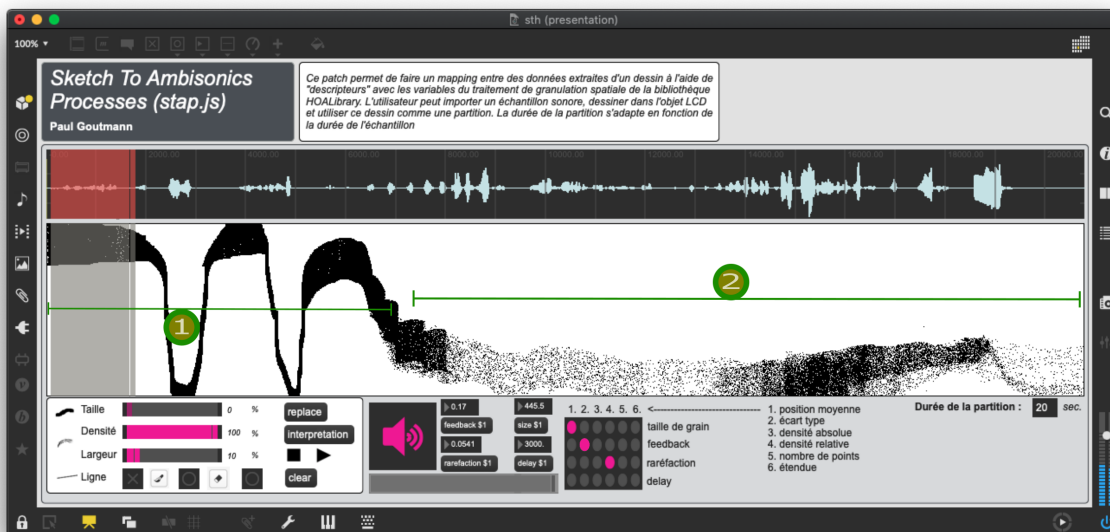


FIGURE 3.3 – Exemple d'utilisation de *stap.js*

Dans la figure 3.3, nous pouvons voir un essai d'utilisation dans lequel nous avons utilisé la position moyenne des points pour contrôler la taille de grain d'un granulateur spatial, l'écart type pour contrôler le *feedback* et la densité relative pour contrôler la *rarefaction*. Dans la portion 1 de la « partition », nous jouons avec une oscillation entre une situation avec des grains de grande taille avec de la ré-injection et des grains de petites taille sans ré-injection. En effet, sur tout cet extrait, nous ne jouons pas avec la densité relative, chaque colonne garde une densité importante à l'intérieur des bornes définies par le point le plus bas et le point le plus haut. Dans la portion numéro 2, nous jouons avec la quantité de grains : moins la densité de point est importante, moins il y aura de grains, plus la densité est importante, plus il y aura de grains. Les quelques expérimentations rudimentaires que nous avons réalisées nous montrent qu'il est difficile de se repérer temporellement par rapport à l'échantillon sonore que nous éditons et qu'il est difficile de manier les différentes broches à la souris. En effet, lorsque nous voulons

jouer avec la densité du nuage de points, il faut changer la valeur pas à pas, nous n'avons pas trouvé de moyen de le faire progressivement. Sur les essais que nous avons réalisés en intégrant la couleur, nous avons rencontré la même difficulté. Nous avons alors essayé de contrôler cette variable à l'aide d'un contrôleur externe avec un potentiomètre, toutefois cela nous a fait sortir de contexte que nous souhaitons étudier, à savoir des interactions avec la souris et le clavier comme interface *hardware*.

Bilan

Pour mettre à l'épreuve ce prototype, nous avons réalisé une esquisse de composition électroacoustique avec une version *Max4Live* du patch et utilisé *stap.js* pour contrôler un traitement par granulation spatiale. Lors de ces essais, nous nous sommes rendu compte que la relation entre le graphisme et le résultat sonore n'était pas évidente à saisir au premier abord. Le fait de ne pas contrôler directement les variables, mais de passer par des outils d'analyse pour les contrôler suppose de faire un effort d'abstraction supplémentaire si l'on souhaite contrôler précisément une variable. Toutefois, cela a eu pour effet de nous engager dans une pratique de recherche et de jeu pour explorer et comprendre le fonctionnement. La difficulté à saisir précisément la correspondance entre l'entrée et la sortie permet d'éclairer nos hypothèses : le graphisme comporte une équivoque computationnelle, cette difficulté à saisir la correspondance entre l'entrée et la sortie a tendance à nous engager dans un processus de recherche et d'exploration. L'écriture graphique permet un contrôle génératif. Pour autant, *stap.js* n'est pas nécessairement maniable. En effet, les différents descripteurs implémentés ne sont pas indépendants. Ce qui a pour effet de limiter les combinaisons possibles. Par exemple, nous ne pouvons pas avoir une position moyenne maximale et un écart-type maximal en même temps, si ces deux descripteurs sont utilisés pour contrôler des variables du moteur sonore, il y aura des combinaisons qui ne pourraient être écrites. Donc, la non-indépendance des descripteurs ne permet pas une grande maniabilité.

Penser les degrés de liberté de l'interface indépendamment de ce pourquoi ils pourront être utilisés, en ajoutant la possibilité de changer à la volée ce qu'ils contrôlent, a eu tendance à encourager le jeu et l'exploration. En effet, chaque changement de configuration a supposé une phase d'apprentissage et d'étalonnage.

Par ailleurs, ce premier prototype concentre plusieurs inconvénients majeurs : il n'est utilisable qu'en temps-différé et supposerait une refonte pour améliorer le temps de calcul. L'objet `lcd` est devenu obsolète et les outils de dessin que nous avons implémentés sont rudimentaires. Par ailleurs, la gestion de la dimension temporelle est un problème dense. Celui-ci comporte au moins deux volets : la gestion de la flèche du temps, et l'enchaînement des « pages » de la partition. Nous avons choisi par convention que la flèche du temps irait de gauche à droite de façon linéaire¹¹. Dans *Max*, nous n'avons pas mis en place un moyen d'enchaîner les pages, bien que chaque dessin puisse être sauvegardé puis rappelé pour être interprété. Dans la version *Max4Live*, chaque page correspond à un certain nombre de mesures et en fonction de la position de l'index de lecture sur la grille, le patch va chercher en mémoire si une partition a été enregistrée pour cette plage temporelle.

Pour conclure, les expérimentations avec ce prototype ne nous permettent pas de mettre à l'épreuve de façon satisfaisante le potentiel opératoire de la modularité ni la maniabilité d'interfaces à plusieurs degrés de liberté. Nous n'arrivons pas à savoir si les limites que nous avons rencontrées sont liées au sujet que nous interrogeons ou bien aux limites inhérentes au prototype pour quatre raisons : l'implémentation, l'approche, le développement et la gestion du temps. Les descripteurs que nous avons implémentés ne sont pas indépendants et cela limite la maniabilité. Le choix de passer par une analyse des données de contrôle plutôt que de contrôler directement les variables ajoute une couche de complexité qui rend difficilement maniable ce prototype. Les outils permettant l'entrée des données ne sont pas assez avancés et maniables. Par ailleurs, l'absence de repère temporel dans la « partition » rend difficile l'écriture minutieuse des événements. La gestion de la dimension temporelle dans ce prototype est trop rudimentaire pour pouvoir être exploitée musicalement. Le fait que nous écrivions une fenêtre temporaire fixée en avance et que l'exécution de la « partition » soit linéaire sont des contraintes trop importantes. Avancer l'exploration dans cette direction supposerait de nous éloigner de notre objet. Fort de cette expérience, nous décidons de simplifier notre approche pour le second prototype d'interface d'écriture. Dans ce deuxième tour de boucle, l'idée est de compléter l'approche que nous avons dans *stap.js* tout en en prenant le contre-pied.

11. Tout un pan de recherche se situe ici : nous avons imaginé une version où la flèche du temps serait un vecteur dessiné par l'utilisateur, ou bien la vitesse de lecture aurait pu être variable, modulable elle-même par le dessin.

3.1.2 *Two Piecewise Linear Functions (2plf.js)*

Les trois scripts suivants sont prévus pour être utilisés avec l'interpréteur embarqué `jsui` de *Max 8*. Ils sont tous trois compatibles avec l'objet `patrrstorage` pour sauvegarder des situations dans des fichiers `json`. Pour chacun d'eux, les arguments sont éditables soit à partir de l'inspecteur, soit en précédant les arguments du signe « @ » dans le nom de l'objet `jsui` ou encore en envoyant un message à l'objet.

2plf.js est une interface d'écriture à trois degrés de liberté : elle permet d'éditer deux fonctions linéaires par morceaux ainsi que la couleur des points insérés sur l'une d'entre elles. Nous constatons précédemment que la non-indépendance des descripteurs limitait la maniabilité et l'utilisation de fonctions de dessin rudimentaires rendait compliqué l'entrée des données. À cela s'ajoute la difficulté de se repérer dans la fenêtre temporelle que l'objet représente. Ainsi, nous souhaitons épurer notre approche afin de nous concentrer sur la mise à l'épreuve du potentiel de la modularité des interfaces. Nous souhaitons par ailleurs explorer le potentiel d'un élargissement des possibilités d'une courbe d'automatisme en permettant de contrôler non pas une dimension au cours du temps comme c'est le cas dans la grande majorité des cas, mais trois ¹².

Mise en œuvre

2plf.js se rapproche de l'objet `function`, mais son originalité réside dans la possibilité d'afficher un repère sur l'écran avec les coordonnées du curseur de la souris et la possibilité d'utiliser la couleur des points sur une des deux fonctions comme degré de liberté. Ce script a été pensé et réalisé avant l'arrivée de l'objet `mc.function` dans *Max 8* permettant de multiples fonctions avec le même objet.

Le message `play` suivi d'une durée en milliseconde fait sortir trois listes : les positions des points sur les deux courbes et la couleur des points sur la première courbe en coordonnées cartésiennes. Les trois listes suivent la même structure permettant l'utilisation de l'objet `line`, où d est le temps d'exécution choisi par l'utilisateur : $\langle y_0 (x_0.d) \dots y_n (x_n.d) y_{n+1} (x_{n+1}.d) \dots y_N (x_N.d) \rangle$.

12. *Reaper*, *Ableton*, *ProTools*, *Audacity*, *Sequoia* permettent d'afficher des lignes d'automatisme mais une seule à la fois contrairement à *Logic*.

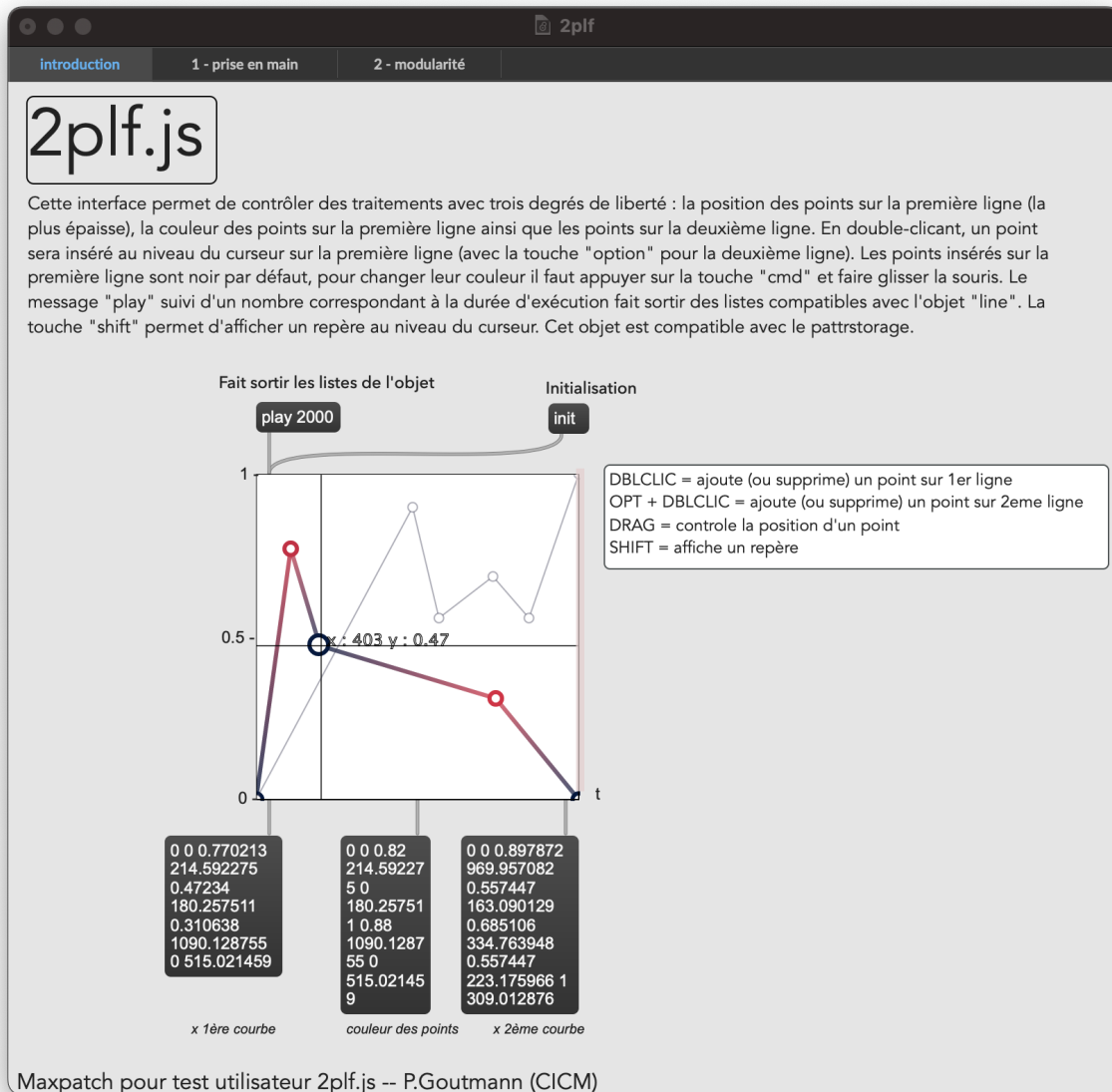


FIGURE 3.4 – Exemple d'utilisation de *2plf.js* utilisé pour les tests utilisateur

Le message *init* initialise les deux fonctions en insérant un point à chaque extrémité de l'interface à une valeur de 0.5. Pour la courbe avec le trait le plus épais, l'insertion et la suppression de point se font avec un double clic, les points peuvent être déplacés sur les deux axes à l'exception des deux points situés aux extrémités qui ne peuvent être déplacés que sur l'axe des ordonnées. Lorsque le curseur passe sur un point, celui-ci grossit et sa couleur est manipulable en faisant glisser le curseur après avoir effectué un clic et en maintenant la touche *cmd* enfoncée. Le repère s'affiche en maintenant la touche *shift* enfoncée. L'insertion et la suppression de point sur la courbe avec le trait le plus fin se font en maintenant la touche *option* enfoncée.

Nous avons mis à l'épreuve *2plf.js* dans une courte pièce électroacoustique *Compression/Dilatation*, en contrôlant un traitement par décorrélation dans le domaine ambisonie¹³. Ce traitement permet de passer d'un champ sonore formé de sources ponctuelles et localisables à un champ venant de toutes les directions : un champ diffus. Au cours des essais, nous nous sommes rendus compte que nous devions avoir une réflexion sur les fonctions de transfert (fonction décrivant le rapport entre l'entrée et la sortie d'un système) à appliquer aux sorties de l'interface pour manipuler les variables du traitement. Au regard de la loi de Fechner-Weber, la réponse du système sensoriel à la variation d'un stimulus n'est pas nécessairement linéaire¹⁴.

Les variables de ce traitement sont la fenêtre temporelle sur laquelle nous faisons les opérations, le facteur de diffusion et un niveau de *feedback*. En l'occurrence, les points sur la courbe au trait gras étaient utilisés pour manipuler la fenêtre temporelle et l'espace utilisable sur l'interface pour l'édition de la plage de valeur qui nous intéressait était trop petit pour permettre une écriture précise. Le résultat perceptif de la décorrélation n'étant pas linéaire, n'y aurait-il pas des fonctions de transfert plus adaptées qu'une fonction linéaire ?

La décorrélation en ambisonie relève du principe de la ligne à retard et lui est en partie analogue sur le plan perceptif. Curtis Roads dans son ouvrage *Microsound* caractérise le comportement perceptif de la ligne à retard sur certaines échelles temporelles (voir figure 3.5) : altération spectrale (0 - 10 ms), décalage de l'image spatiale (10 ms - 50 ms), écho de tête de lecture (50 ms - 100 ms) et écho (> 100 ms). Bien que ce découpage soit communément partagé, les seuils entre ces caractéristiques sont plus des zones floues que des frontières bien définies : elles sont poreuses et mobiles. La caractérisation du résultat sonore émerge dans un processus alliant perception et écoute. Bien que l'auteur ait fixé des limites sur ce schéma, Curtis Roads nuance ces zones :

En passant d'une échelle de temps à une autre, le son franchit les limites de la perception. Il semble changer de qualité. Cela s'explique par le fait que la perception humaine traite chaque échelle de temps différemment. Considérons une simple sinusoïde transposée à différentes

13. Un traitement spatial que nous présenterons en détail dans les chapitres 5 et 6. Les points sur la première courbe étaient utilisés pour contrôler la fenêtre de décorrélation, leur couleur pour contrôler le facteur de décorrélation et la deuxième courbe pour le feedback.

14. Michèle CASTELLENGO, *Ecoute musicale et acoustique : avec 420 sons et leurs sonagrammes dé-cryptés*, Paris : Eyrolles, 2015, ISBN : 9782212138726, pp.103-104.

échelles de temps (1 μ sec, 1 ms, 1 sec, 1 minute, 1 heure). La forme d'onde est identique, mais il serait difficile de classer ces expériences auditives dans la même famille.

Dans certains cas, les frontières entre les échelles de temps sont clairement délimitées ; dans d'autres, des zones ambiguës les entourent. L'entraînement et la culture conditionnent la perception des échelles de temps. Percevoir une note un peu basse ou un rythme à la traîne, par exemple, c'est détecter une anomalie temporelle à une échelle microscopique qui pourrait ne pas être remarquée par d'autres personnes.¹⁵

Cette description est facilement manipulable au premier abord. Toutefois, comme nous le précisons, elle est discutable aussi bien sur le plan psychoacoustique que musical. L'analyse précise de la perception de différences temporelles est un sujet complexe et connecté à des sujets comme le continuum discontinu-continu, la discrimination temporelle, la perception de la hauteur¹⁶. Les capacités de discrimination temporelle dépendent du niveau d'expertise de l'auditeur¹⁷.

Sur le plan de l'écoute musicale, dans une perspective opératoire, nous pouvons faire émerger autant de groupements caractéristiques que de « manettes » qui nous permettent d'y accéder. Le terme de « manette » est employé ici pour référer à ce qui est manipulable, aux variables sensibles. Il est emprunté à H.Vaggione qu'il définit comme ce que le musicien « utilise pour atteindre un certain niveau opératoire et morphologique »¹⁸. Autrement dit, il existe autant de groupements caractéristiques qu'il nous est possible de discerner des continuités et discontinuités, similarités et différences, puis de les manipuler. Ainsi, le nuancier des échelles temporelles différentiables n'est pas limité à ces quatre catégories. Ces caractéristiques mises à l'épreuve d'un dispositif multicanal - avec un traitement par décorrélation ambisonique par exemple - ne sont que partiellement pertinentes. Comment caractériser une échelle temporelle sur laquelle nous pouvons écouter

15. « As sound passes from one time scale to another it crosses perceptual boundaries. It seems to change quality. This is because human perception processes each time scale differently. Consider a simple sinusoid transposed to various time scales (1 μ sec, 1 ms, 1 sec, 1 minute, 1 hour). The waveform is identical, but one would have difficulty classifying these auditory experiences in the same family. In some cases the borders between time scales are demarcated clearly ; ambiguous zones surround others. Training and culture condition perception of the time scales. To hear a flat pitch or a dragging beat, for example, is to detect a temporal anomaly on a micro scale that might not be noticed by other people. » ROADS, *Microsound*, p.4

16. CASTELLENGO, *Ecoute musicale et acoustique : avec 420 sons et leurs sonagrammes décryptés*, pp.104-127.

17. Les travaux d'Emile Leipp rapporté par Castellengo montrent que des musiciens sont notamment en capacité de discerner une différence entre deux impulsions dès 1 ms de décalage (*ibid.*, p.126).

18. VAGGIONE, « Représentations musicales numériques : temporalités, objets, contextes », p.1.

des mouvements, de l'altération spectrale et des degrés d'immersion¹⁹ comme c'est le cas pour une décorrélation ambisonique entre 0 et 500 ms ?

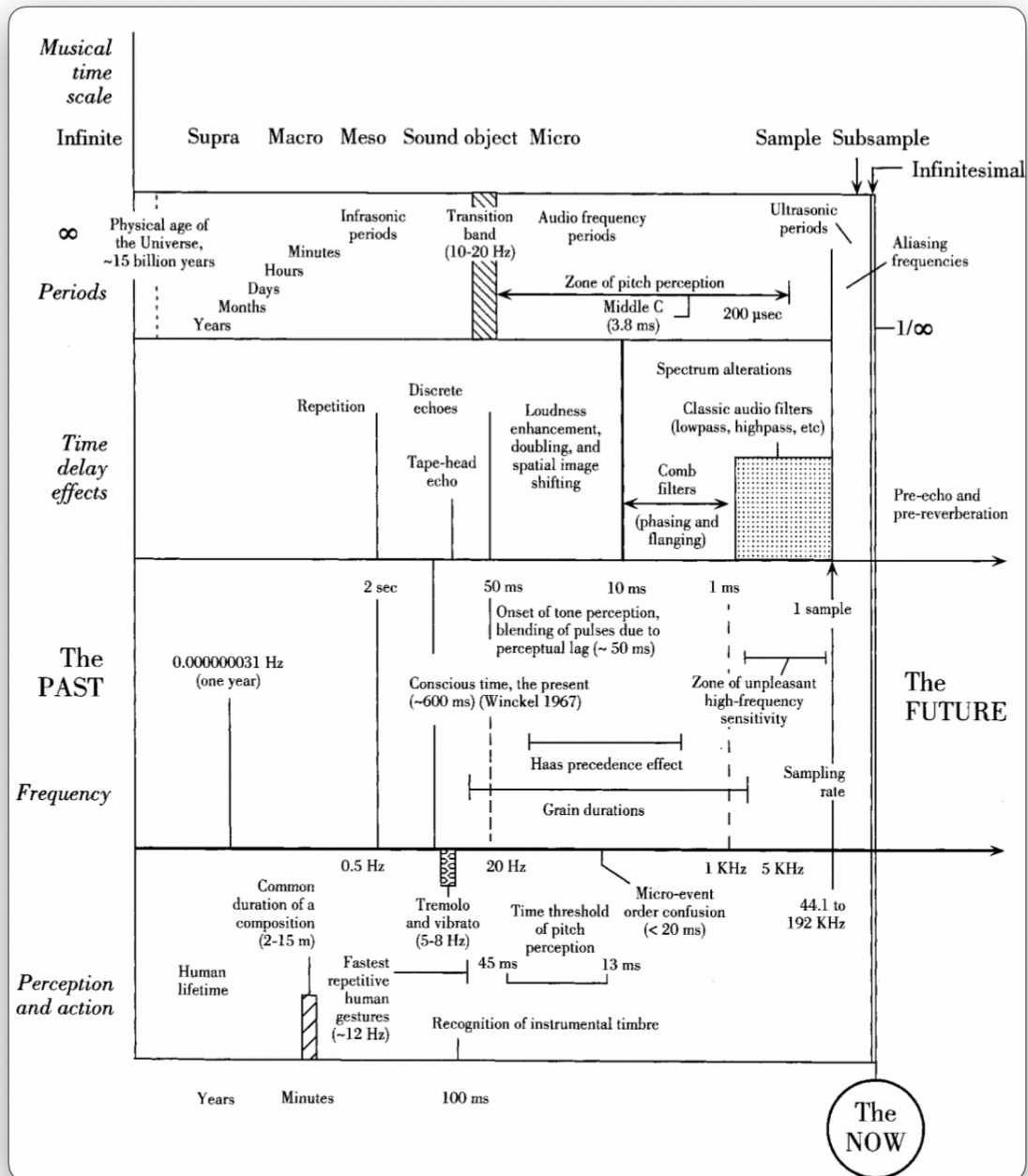


FIGURE 3.5 – Échelles temporelles décrites par Curtis Roads

Crédits : Curtis ROADS, *Microsound*, Cambridge, Mass : MIT Press, 2001, ISBN : 9780262182157, p.5

19. Cela dépasse la délimitation de notre objet d'étude, mais il serait intéressant d'élaborer une géométrie de l'écoute spatiale qui réponde aux nécessités opératoires de la composition en situation multicanale.

Penser des représentations pour un traitement spatial nécessite *de facto* de savoir ce que nous pouvons manipuler et comment nous percevons le résultat de ces manipulations afin d'adapter le comportement de l'interacteur avec les variables. Dans ce contexte, nous avons entamé une exploration du résultat sonore de la décorrélation en ambisonie afin d'établir les échelles en jeu dans l'évolution de la variable temporelle. Si nous prenons comme base de travail les plages temporelles délimitées par Curtis Roads, nous pouvons voir qu'elles n'ont pas la même durée : la plage temporelle correspondant aux altérations spectrales est de 10 ms, 40 ms pour le décalage de l'image spatiale, 60 ms pour l'écho de tête de lecture et potentiellement une infinité pour l'écho²⁰.

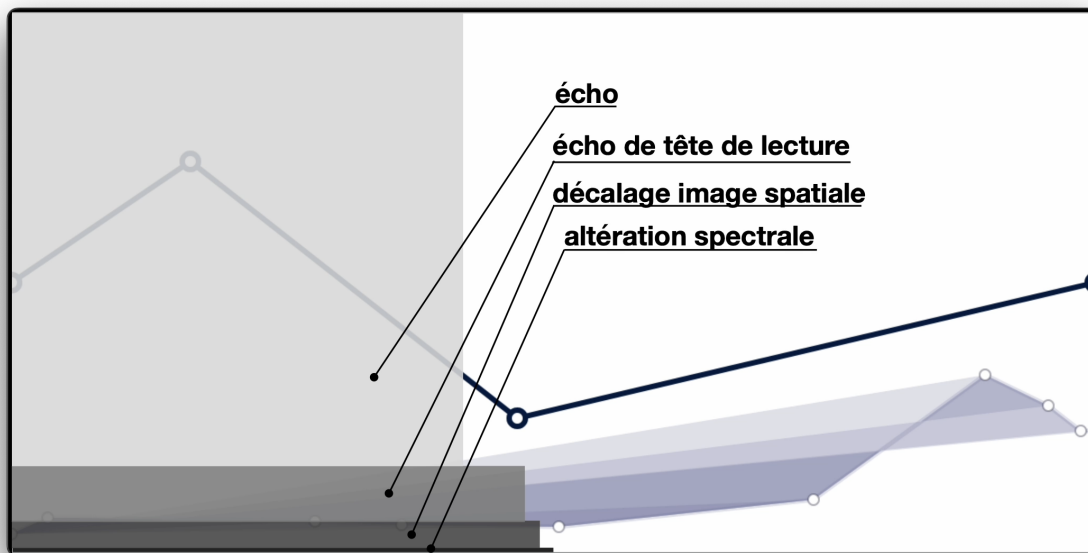


FIGURE 3.6 – Répartition des caractéristiques données par Roads pour $d \in [0, 1000]$

Si nous utilisons un *mapping* linéaire entre les points de la première courbe et la fenêtre de décorrélation entre 0 et 1000 ms, avec la catégorisation de Curtis Roads, nous nous rendons compte que nous avons une plus grande marge de manœuvre pour les grandes plages de valeur. La figure 3.6 représente l'espace attribué dans l'interface à chacune des catégories pour la situation que nous venons de décrire. L'inégalité des plages de valeurs associées aux différentes caractéristiques rend difficilement accessible les opérations précises. Nous

20. Nous verrons lorsque nous aborderons la théorie de l'ambisonie au chapitre 4 et les traitements audionumériques dans ce formalisme aux chapitres 5 et 6 que la réponse perceptive dépend de plusieurs variables toutes interconnectées.

avons dans un premier temps cherché à définir une fonction de transfert correspondant aux seuils différentiels²¹ sur une large plage de valeur. Toutes les variables²² impactant le résultat sonore de façon largement perceptible et significatif, la définition précise de cette fonction est fastidieuse. Afin d'évaluer la pertinence de cette approche, nous avons choisi de déterminer les seuils différentiels pour une variable, la fenêtre temporelle, aux bornes des catégories définies par C.Roads en ambisonie 2D d'ordre 3, pour un facteur de diffusion maximal, en faisant abstraction du *feedback*.

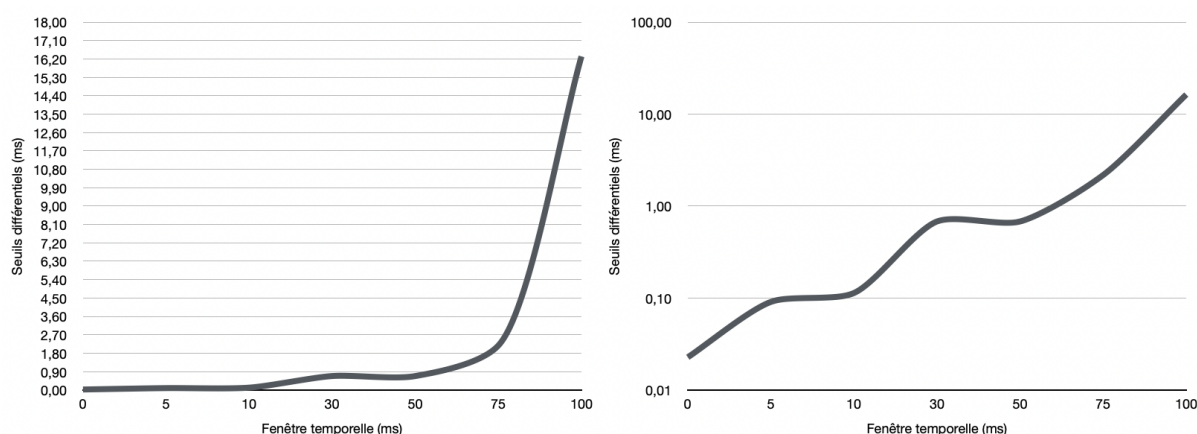


FIGURE 3.7 – Tracé de la fonction de seuil en échelle linéaire (gauche) et logarithmique (droite)

Ces tests rudimentaires ont permis de confirmer l'hypothèse qu'une fonction de transfert linéaire n'est pas nécessairement la plus adaptée. À défaut d'avoir défini une fonction de transfert qui permettrait de manipuler la fenêtre temporelle en ayant une impression linéaire de variation sur toute sa course, pour toutes les configurations possibles, nous avons cherché à élargir les portions correspondant aux deux premières plages à l'aide de fonctions mathématiques bien définies. Ainsi, nous avons ajouté à notre système quatre fonctions de transfert.

La figure 3.8 représente des glissières horizontales (*slider*) utilisées pour manipuler la fenêtre temporelle comprise entre 0 ms et 1000 ms. Les quatre teintes définissent les zones des glissières qui correspondent aux caractéristiques des échelles temporelles (altération spectrale, décalage de l'image spatiale, écho de tête de lecture, écho) en utilisant quatre

21. Un seuil différentiel est une notion utilisée pour désigner une valeur seuil, la plus petite valeur à partir de laquelle un changement significatif ou une distinction est observée.

22. C'est l'agencement de l'ordre ambisonique, du facteur de diffusion, de la fenêtre de décorrélation et du *feedback* qui déterminera le rendu.

fonctions de transfert et une référence sur la ligne du bas (fonction de transfert linéaire). Au regard des différentes expérimentations, nous ne pouvons pas conclure sur une solution optimale. Le choix de la fonction de transfert dépend des envies de l'utilisateur. Par exemple, si un utilisateur cherche à travailler plus finement le filtrage ayant un caractère spatial alors qu'un autre préférera travailler les figures rythmico-spatiales des échos, les fonctions de transfert à appliquer ne seront pas les mêmes. Ainsi, nous pensons laisser le choix aux utilisateurs de la fonction de transfert à appliquer à l'interface. Nous pouvons alors affirmer que la conception et la réalisation d'interface sont directement liées aux questions de perception, d'écoute et d'intention musicale.

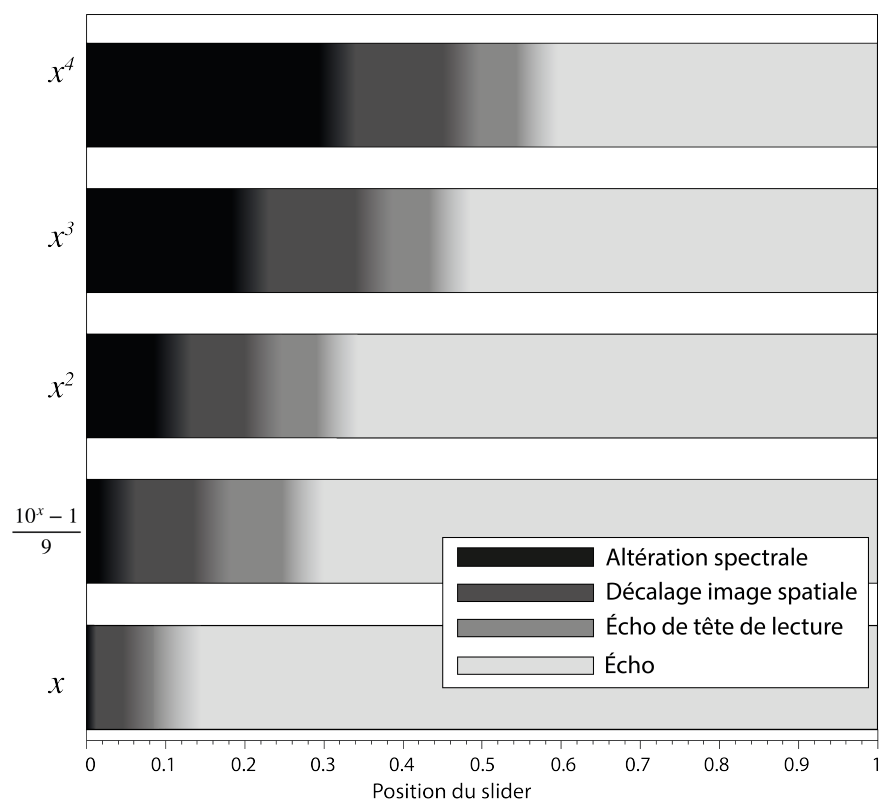


FIGURE 3.8 – Répartition des caractéristiques suivant cinq fonctions de transfert

À partir de ces expérimentations, nous avons constamment inséré une matrice de *mapping* dans les patches d'essais permettant d'utiliser n'importe quelle sortie des interfaces pour contrôler les variables du moteur sonore avec la fonction de transfert de notre choix. Ainsi, nous soulignons le potentiel musical de la modularité de nos interfaces. En effet, comme nous venons de le souligner dans le cas du contrôle de la décorrélation, qu'il n'y a pas de fonction de *mapping* plus pertinente qu'une autre, tout dépend des envies musi-

cales de l'utilisateur. Ainsi, il apparaît primordial de pouvoir changer d'échelle à la volée lorsque nous manipulons des manettes, afin de trouver la configuration qui s'approche le plus de l'échelle opératoire qui nous intéresse dans un projet musical donné. Ici, la modularité de l'interface à deux pans, d'une part le fait de pouvoir connecter n'importe quelle sortie de l'interface à n'importe quelle variable de la chaîne de traitement, et par ailleurs, la fonction de transfert, l'échelle²³ en quelque sorte, que nous choisissons (voir 3.9).

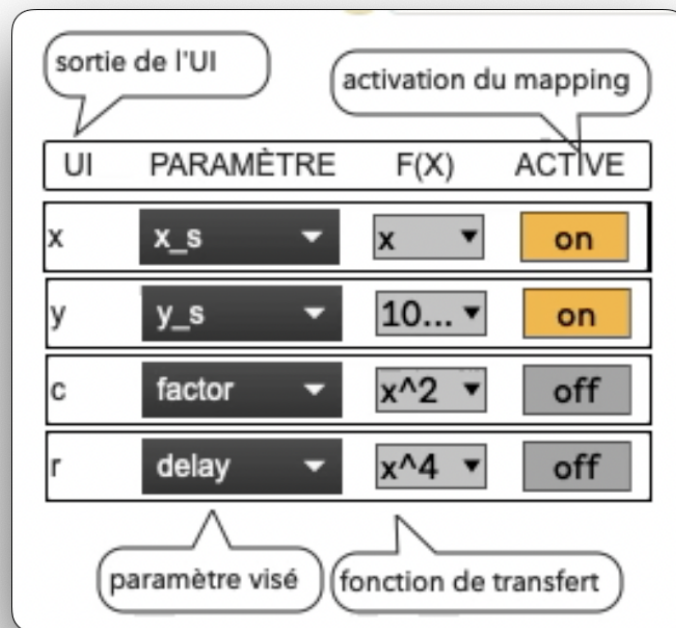


FIGURE 3.9 – Matrice de *mapping* utilisée avec *2plf.js*

Bilan

Ce prototype nous a confronté au fait que réaliser des interfaces (concevoir des « manettes »), suppose de savoir comment le système répond, comment il sonne. De plus, cela suppose de savoir comment il bouge et ce qu'il permet de faire. Quelles sont les variables

23. Nous employons le terme échelle en référence aux types d'affichage sur les graphiques par exemple. Nous pouvons tracer des courbes en suivant une échelle linéaire, logarithmique, exponentielle, *etc.* La plupart des spectrogramme nous permettent de jouer avec ce type d'affichage, plus ou moins pertinent en fonction de la situation d'analyse.

accessibles ? Que permettent-elles de faire ? Comment cela sonne ? Comment cela peut être utilisé ? De fait, nous avons enrichi notre définition de la modularité que nous comprenons maintenant non seulement comme la possibilité de connecter les sorties des interfaces avec n'importe quelle variable, la possibilité de les interconnecter entre elles, mais aussi comme le choix des fonctions de transfert utilisées pour commander les variables du moteur sonore. La création de modalités d'interaction avec la spatialité est donc liée à des questions d'écoute et d'intention musicale. À la suite de ces explorations sur le prototype de *2plf.js* et la décorrélation, nous nous sommes intéressés à la partie DSP de la décorrélation pour avoir une compréhension plus approfondie de ce traitement. Les chapitres 5 et 6 y seront dédiés et mettront en valeur les échos qu'il y a eu entre les expérimentations liées aux interfaces graphiques et celles liées au moteur sonore.

3.2 Interfaces de contrôle

3.2.1 *Delay Time to Decorrelation* (dtd.js)

Les expérimentations sur *2plf.js* et la décorrélation nous ont montré que la réflexion sur la notion de représentation opératoire et d'interface ne peut pas se réaliser en faisant abstraction de ce qui est manipulé. Du moins, il est primordial de penser l'interfaçage comme une pratique mobile entre différentes échelles. Ainsi, dans ce troisième prototype, nous souhaitons explorer le potentiel opératoire de l'interfaçage d'un traitement spécifique. *dtd.js* est une interface conçue spécifiquement pour manipuler la décorrélation. Celle-ci représente et permet d'éditer la distribution des temps de retard dans les harmoniques circulaires ainsi que le gain de chaque harmonique (voir chapitre 6).

Mise en œuvre

Le message *channels* suivi d'un nombre permet de spécifier le nombre d'harmoniques, le message *delay* permet de préciser la fenêtre temporelle, *fa* permet de préciser le facteur de traitement. En fonction de la valeur de facteur, le nombre d'harmoniques traitées change. Lorsqu'une harmonique est traitée, le segment ainsi que la valeur du traitement apparaissent en rouge, dans le cas contraire, ils apparaissent en gris. Le message *function-*

type permet de sélectionner le type de distribution parmi vingt-deux types de distribution. L'utilisateur peut enregistrer ses propres distributions, passer de l'une à l'autre avec l'objet *patterstorage*. L'objet a deux sorties, une pour les valeurs de traitement et une pour les valeurs de gain.

Cette interface est conçue pour commander une version modifiée de la décorrélation telle quelle disponible dans la version de FAUST ou la bibliothèque *abc.lib*. En effet, elle suppose de commander chaque ligne à retard indépendamment.

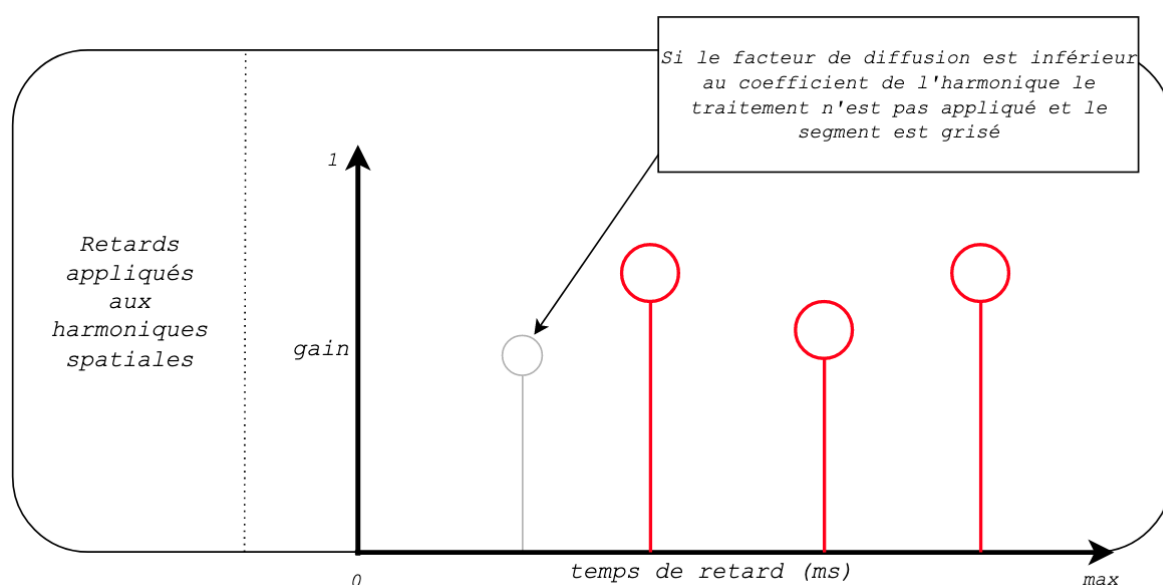


FIGURE 3.10 – Schéma commenté de l'interface *dtd.js*

Nous avons mis à l'épreuve *dtd.js* dans notre pièce électroacoustique *Émergences* (voir chapitres 8 et 9) dans laquelle nous composons des textures spatiales au moyen de multiples modules de décorrélation ambisonique. La distribution des retards dans les harmoniques spatiales de chacun des modules est effectuée au moyen de *dtd.js*. De plus, avec une légère modification des modules de décorrélation, nous pouvions contrôler le gain de chacune des harmoniques avec l'interface *dtd* : la longueur de chaque segment contrôle le gain appliqué à chaque harmonique. De fait, nous avons pu construire la polyphonie spatiale pas à pas, en ajoutant chaque harmonique puis en écoutant les rapports entre chacune d'elles.

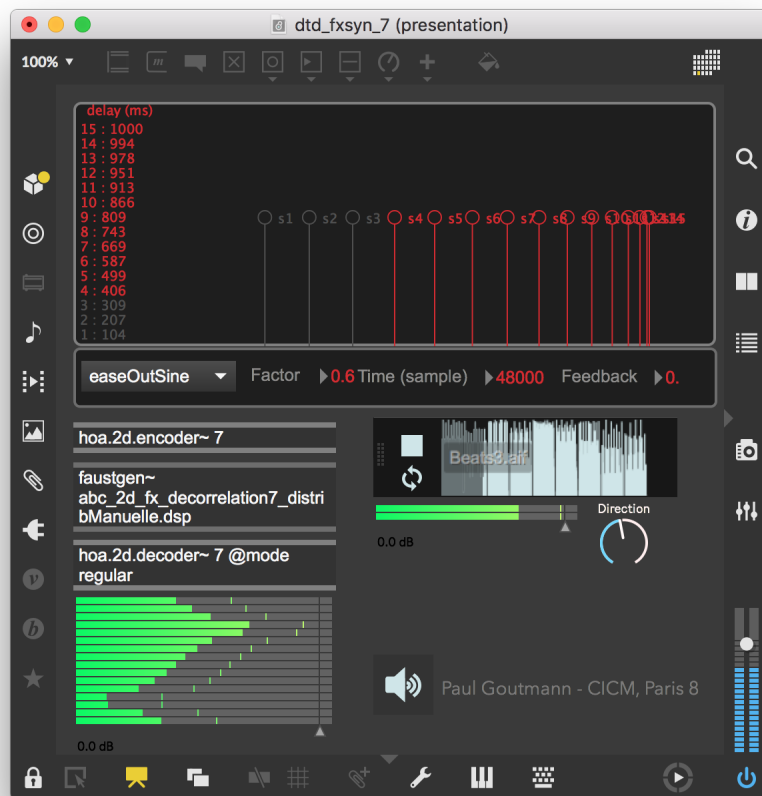


FIGURE 3.11 – Patch de démonstration utilisé lors des JIM 2020

Crédits : Paul GOUTMANN, « Traitement spatial du son par décorrlation des signaux en ambisonie d'ordre élevé », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2021*, AFIM, Visioconférences, France, juill. 2021

Bilan

Dans l'approche initiale de la décorrlation ambisonique, la distribution des retards est fixée : chaque composante spatiale a un coefficient de retard qui lui est attribué en fonction d'un rapport entre son numéro et le nombre total de composantes de telle sorte que les premières harmoniques aient moins de traitement que les dernières. En réalisant cette interface, nous avons fait l'hypothèse qu'il serait intéressant musicalement de laisser la possibilité de manipuler la distribution²⁴. Nous avons d'abord ajouté des types de distribution à partir de fonctions de référence : les fonctions de *easing* utilisées pour décrire le comportement d'objet. Le type de distribution peut être choisi parmi vingt-

24. Si l'on regarde ce qu'il se passe à différentes échelles temporelles, nous pouvons nous rendre compte que la distribution des retards impacte le résultat sonore. Ainsi, laisser cette dimension accessible pour les utilisateurs est opératoire et pertinent sur le plan musical.

deux fonctions de référence. Par la suite, nous avons ajouté la possibilité de manipuler manuellement la distribution en déplaçant les segments.

D’abord pensée comme une interface donnant un retour sur le processus en cours (le nombre d’harmoniques retardées, avec combien de temps de retard *etc.*), nous avons ajouté des fonctionnalités la rendant interactive. Par ailleurs, le fait d’avoir une approche locale (centrée sur un traitement) tout en restant au niveau de la représentation des variables nous a permis de l’utiliser pour d’autres traitements ambisoniques ayant la même logique de traitement. Il ne s’agit *in fine* que d’une représentation d’objets positionnés dans un espace à deux dimensions, en l’occurrence correspondant à un couple amplitude/temps, mais cela pourrait tout à fait être un couple amplitude/fréquence. La seule différence est l’unité inscrite dans le panneau d’affichage. Ainsi, nous avons réalisé une version pour contrôler la modulation en anneau en ambisonie à partir de la même interface.

3.2.2 *Map* + (`map_plus.js`)

Le dernier prototype nous a permis d’éprouver une situation de développement d’interface de contrôle générique et de mettre à l’épreuve des questions d’ergonomie. Au début de notre protocole expérimental, nous constatons que la composition de la spatialité du son suppose la manipulation de multiples variables. Ainsi, une des difficultés pour la réalisation d’interfaces pour le traitement spatial du son est le fait de rendre accessible plusieurs variables dans un seul outil. Quand nous nous demandions avec *stap.js* « comment écrire le comportement de plusieurs variables dans l’espace de la page à deux dimensions », nous nous demandons ici « comment produire une interface à plusieurs degrés de liberté » ?

Par ailleurs, dans la pratique de spatialisation 3D, de nombreuses interfaces utilisent deux repères 2D, ainsi nous souhaitons explorer une autre approche de la 3D en 2D. Pour finir, nous souhaitons explorer le potentiel de la modularité des fonctions de transfert dans un cas différent de celui de l’écriture.

Mise en œuvre

L’idée est de partir d’un *Pad XY* et d’augmenter le nombre de degrés de liberté. Par exemple, nous représentons dans la figure 3.12 un objet dans un espace à deux dimensions. Sa position et sa taille permettent déjà trois degrés de liberté. Nous pouvons imaginer

ajouter une zone d'action à taille, courbure et orientation variable, cela donnerait un total de 6 degrés de liberté. Nous pouvons aussi ajouter la couleur, la position de l'objet dans son périmètre d'action, ce qui nous amène à 8 degrés de liberté. Nous pourrions en ajouter de nombreux autres, ainsi que permettre des interactions entre les objets.

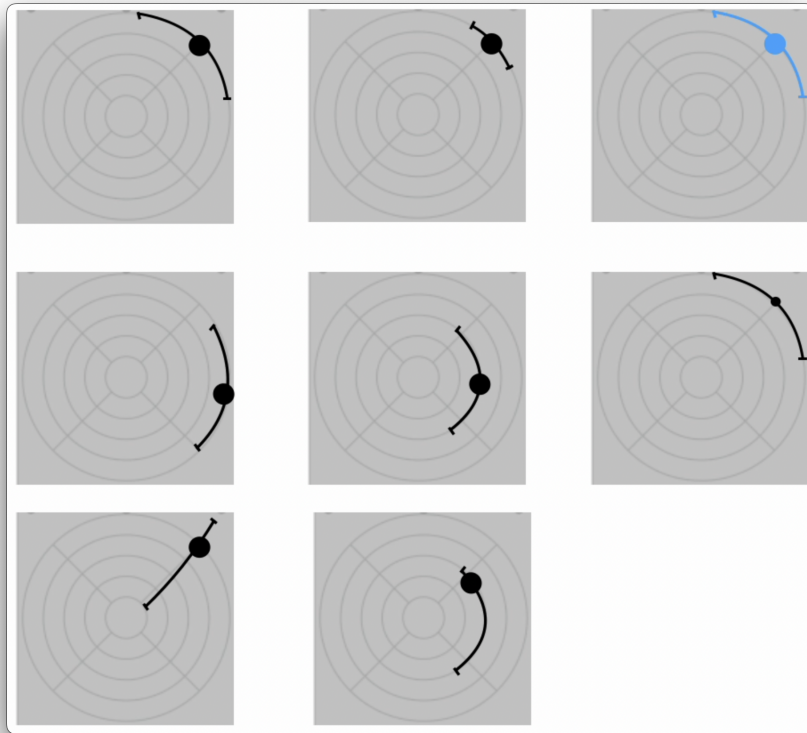


FIGURE 3.12 – Planche schématique pour une interface de contrôle générique

Afin de ne pas disperser nos expérimentations et aller au plus vite vers une phase d'exploration musicale, nous avons choisi de limiter le nombre de degrés de liberté que nous implémenterons à quatre. Ainsi *map_plus.js* permet de manipuler des cercles dans un espace à deux dimensions. Ce prototype se rapproche en certains points de l'objet *pictslider* ou *nodes* de Max. Cependant, son originalité réside dans le fait que le rayon et la transparence des cercles sont manipulables et utilisables comme variable.

Le message *add* suivi d'un nombre permet d'ajouter des cercles dans l'interface, le message *del* suivi d'une liste permet de supprimer les cercles ciblés. Lorsque la souris passe sur un cercle, celui-ci change de couleur, sa position est manipulable à la souris, son rayon en maintenant *option* appuyée et son opacité avec *cmd* appuyé. L'objet sort quatre listes (x, y, rayon, opacité) qui sont actualisées automatiquement lorsqu'une variable change.

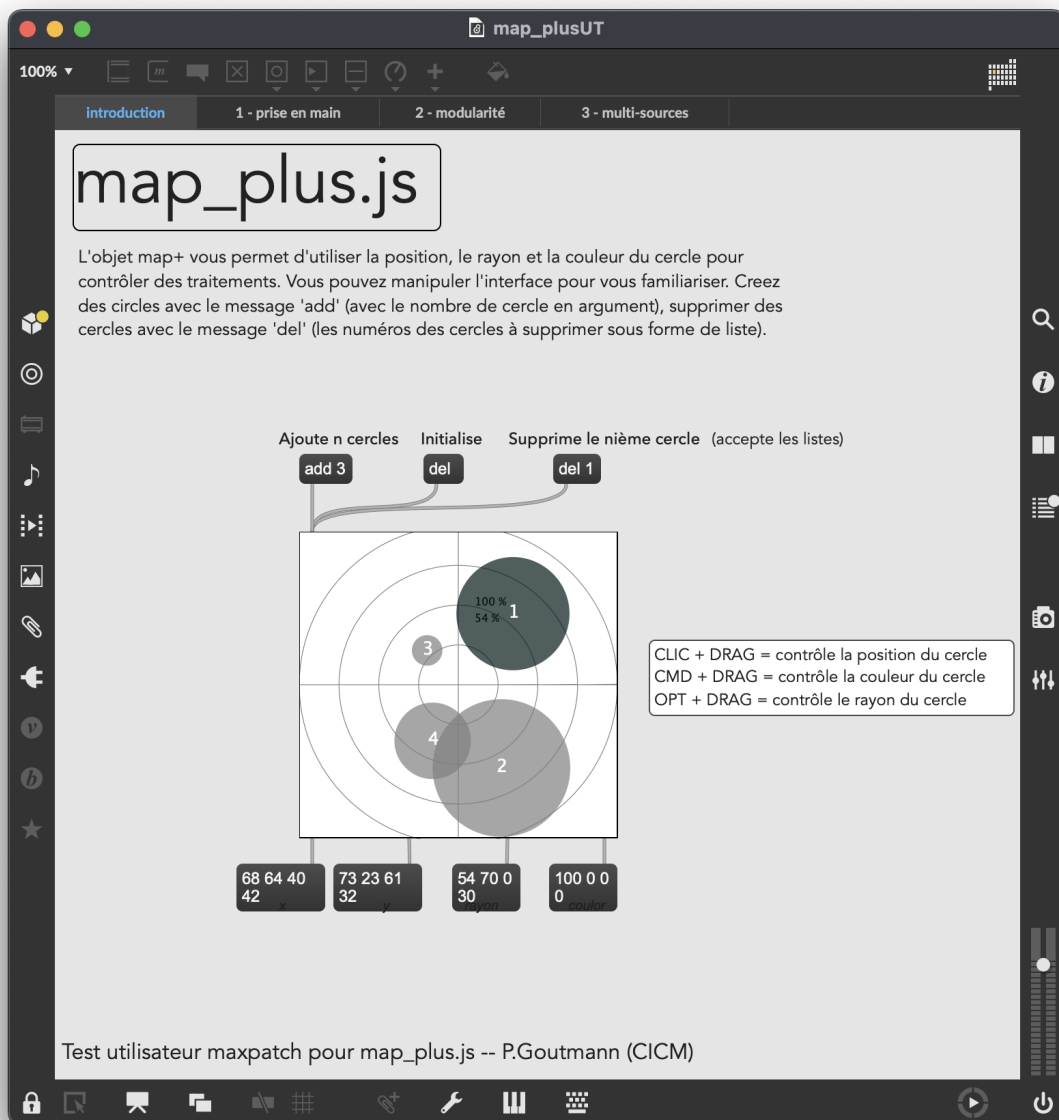


FIGURE 3.13 – patch utilisé pour les tests utilisateur (*map_plus.js*)

Nous avons mis à l'épreuve *map_plus.js* principalement dans notre pièce électroacoustique *Émergences* (voir chapitres 8 et 9) et ses esquisses préliminaires. Dans *Émergences map_plus* nous permet de contrôler l'angle de projection d'une source en 2D, de diriger l'envoi du signal de cette source monophonique vers ce que nous appelons une strate de traitement (voir 6.1.3) en jouant avec la taille du cercle. En effet, dans cette pièce, nous composons l'espace acoustique 3D en superposant des couches de traitement 2D sur différentes couronnes de HP. Par ailleurs, l'opacité du cercle nous permet de contrôler

le facteur de décorrélation global, qui est une variable qui nous permet de passer d'une source directionnelle à un champ diffus.

Dans les esquisses préliminaires à la composition d'*Émergences*, nous avons utilisé *map_plus* comme un *joystick* pour contrôler des traitements sans rapport à la projection spatiale. Par exemple, nous avons essayé de contrôler la décorrélation ambisonique qui comporte quatre variables (fenêtre de décorrélation, facteur, *feedback*, distribution des retards) avec les quatre degrés de liberté de *map_plus*. Nous avons essayé différentes situations de *mapping* avec différentes fonctions de transfert. Par exemple, l'axe *x* contrôlait le *feedback*, l'axe *y* contrôlait la fenêtre de décorrélation, l'opacité contrôlait la fonction de distribution et la taille contrôlait le facteur. Le fait d'essayer différentes situations de *mapping* a induit des situations de jeux inattendues et de fait très intéressantes. Celles-ci nous ont invités à explorer des situations que nous n'aurions pas cherchées autrement qu'avec cette configuration de jeu.

Ces essais ont été un moyen de mettre à l'épreuve notre hypothèse sur le potentiel de la modularité des interfaces. Ici, nous comprenons la modularité comme le fait de laisser à l'utilisateur le moyen de connecter les sorties d'une interface à n'importe quelle variable avec une fonction de transfert au choix. *map_plus.js* n'est pas une interface pensée pour contrôler un traitement particulier, elle n'a pas d'usage *a priori*, et cela nous a conduits lors de nos expérimentations à explorer différentes situations musicales, à être surpris et à jouer avec celle-ci.

Bilan

Nous avons d'abord essayé d'utiliser le rayon des cercles pour contrôler l'élévation d'une source, les premiers tests ont permis de vérifier que cette approche est pertinente. Cela pourrait représenter un espace vu de haut en coupe, plus un objet se rapproche des la « camera », plus il apparaît imposant. Par ailleurs, nous avons utilisé cette interface pour la décorrélation, et en ce qui concerne les quatre degrés de liberté, cela a été très maniable. Cela nous permettait de faire de la spatialisation et de contrôler en plus une autre variable : le facteur de diffusion. Dans d'autres cas, nous avons contrôlé toutes les variables du traitement avec une seule interface. Ces essais confirment selon nous le potentiel génératif de l'approche modulaire : dans la mesure où nous devons faire un choix

(quelle variable est contrôlée par tel ou tel autre degré de liberté?), nous devons essayer. Avoir la possibilité de changer à la volée nous permet de nous confronter plus facilement à des situations auxquelles nous ne nous serions pas confronté au premier abord. Il en va de même pour les fonctions de transfert, la possibilité de les changer à la volée invite à trouver celle qui correspond à l'usage que nous souhaitons en faire sur l'instant. Dans sa réalisation, il reste une difficulté que nous n'avons pas réussi à résoudre, lorsque l'on superpose plusieurs objets et que l'on cherche à manipuler l'un d'entre eux, comment informer le script, celui que nous voulons manipuler? Pour l'heure, c'est toujours l'objet avec le rayon le plus petit qui est sélectionné.

3.3 Tests utilisateur

Afin d'enrichir la mise à l'épreuve de ces différents prototypes, nous avons mené des tests utilisateur avec un protocole original. Nous présentons dans ce sous-chapitre les objectifs, la méthodologie et les résultats de cette étude.

3.3.1 Méthodologie

Étude qualitative par entretien d'autoconfrontation

L'étude des prototypes d'interfaces graphiques, *map_plus.js*, *2plf.js* et *dtd.js* interroge le statut de ces productions au sein de nos travaux de recherche. Sont-ils des moyens pour mettre à l'épreuve des hypothèses, des moteurs de la réflexion ou des réponses à un manque dans l'état de l'art? La réponse est à l'entrelacs.

Ces prototypes sont considérés autant dans leur constitution que leur utilisation comme des dispositifs expérimentaux pour porter une investigation sur les interactions à différentes échelles de nos représentations opératoires, la notion d'interface et de modularité. Cependant, sans que ce soit un des objectifs, nous n'excluons pas la possibilité qu'ils gagnent une indépendance par rapport à la recherche. Par conséquent, nous choisissons d'utiliser cette phase de test utilisateur comme un moteur génératif de nouvelles interrogations et non dans une stricte volonté d'amélioration des prototypes. Les deux objectifs de cette étude qualitative sont l'observation de la prise en main et l'évaluation de la fonc-

tionnalité. Ces deux objectifs ont une importance inégale et s'appuient plus précisément sur deux points :

- Voir ce que la transposition des objets issus d'une approche locale produit chez d'autres utilisateurs. Comment sont-ils préhendés et appréhendés par notre communauté de pratique? Qu'est-ce que cela génère?
- Dans une moindre mesure, se demander dans quelles conditions ces prototypes sont partageables et opérationnels pour autrui.

L'objectif heuristique de cette étude nous a conduit à nous inspirer d'une méthode d'entretien d'autoconfrontation que nous aménagerons pour nos besoins. Cette méthode proposée par l'ergonome Jacques Theureau d'écrite dans « Les entretiens d'autoconfrontation et de remise en situation par les traces matérielles et le programme de recherche 'cours d'action' »²⁵ vise à analyser les activités humaines au cours de leur réalisation. Nous trouvons que cette méthode est pertinente, car elle laisse selon l'auteur une place à l'émergence d'éléments non prévus par le chercheur. Il s'agit pour nous d'une base, d'un point de départ. Le prisme au travers duquel nous avons mené la partie la plus directive de ces entretiens émane des expériences personnelles au cours de cette recherche. Nous avons concentré notre regard sur quatre plans interconnectés :

1. l'aspect fonctionnel

Ce plan d'analyse est fondamental bien qu'il ne soit pas central dans nos travaux. La conception et réalisation de ces prototypes sont les moteurs d'une réflexion et ont servi de support pour l'analyse des interactions. Bien que les prototypes soient pensés pour permettre l'émergence de questions plus que des modèles faisant étalon pour la réalisation d'outils partageables.

Permettent-ils de faire ce pourquoi ils sont conçus? Est-ce que les degrés de liberté et les interactions associées sont identifiées? Est-ce que les interactions sont fonc-

25. Jacques THEUREAU, « Les entretiens d'autoconfrontation et de remise en situation par les traces matérielles et le programme de recherche « cours d'action » », dans : *Revue d'anthropologie des connaissances* Vol 4, 2.2 (2010), p. 287.

tionnelles ? Y a-t-il des degrés de libertés privilégiés ? Si oui, pourquoi ? Quelles sont les difficultés rencontrées pour la préhension et l'appréhension ?

2. potentiel de la modularité

La modularité est une partie importante de l'évaluation. Ce pan de l'analyse correspond à une des hypothèses initiales : la modularité permettrait de dépasser les paradigmes opératoires engendrés par les interfaces et favoriserait une diversité d'usages. Nous cherchons ici à évaluer ce que la modularité laissée aux mains des utilisateurs²⁶ engendre dans les usages.

Est-ce que la modularité influence la sensation de précision sur le contrôle de ce qui est (ou devient) recherché ? Est-ce que la modularité influence le potentiel génératif d'envies/d'idées/de pratiques des interfaces ? Est-ce que la modularité influence la sensation de complexité : agissant comme un frein dans l'utilisation ? Est-ce que cela peut être dépassé par l'apprentissage ?

3. potentiel instrumental / potentiel de jeu

Est-ce que le dispositif nous engage dans un moment d'exploration ? Est-ce que le dispositif devient un instrument (objet qui permet de faire quelque chose qui fait sens pour l'utilisateur) ? Si oui à partir de quel moment devient-il un instrument ? Quel est l'élément déclencheur ? Sur quels degrés de liberté cela se fait ?

4. potentiel réflexif

Cette dimension de l'analyse est centrée sur la transformation de l'appréhension de la dimension spatiale du son par l'usage du dispositif et les représentations qu'il convoque. Qu'est-ce que l'utilisation de ces interfaces graphiques associées à ces traitements génère dans l'approche de l'espace des utilisateurs ? Cela engendre-t-il des envies ? Lesquelles ? Cela engendre-t-il des frustrations ? Lesquelles ? Est-ce que cette expérience a changé leur manière d'appréhender la spatialité, et en quoi cela consisterait ?

Nous avons réalisé quatre patchs avec des onglets, suivant le même modèle pour chacun d'eux : 1) prise en main 2) tests des fonctionnalités 3) test sur la modularité 4) situation ouverte ou situation complexe.

26. Paramètre du moteur sonore visé pour chaque degré de liberté de l'interface, fonction de transfert entre la sortie de l'interface et le paramètre du moteur sonore.

Le postulat de cette méthode est que nous pouvons accéder à une pensée préréflexive d'activités humaines en contexte de travail. L'objectif de cette méthode est d'explicitier l'activité de l'opérateur au cours d'entretiens filmés dans une double interrogation : comment l'utilisateur voit ce qu'il fait et comment l'analyse-t-il. Cette méthode peut favoriser selon l'auteur l'émergence de problématiques non prévues.

Le prisme de l'approche instrumentale

Nous avons en filigrane l'idée d'une hybridation de cette méthode avec des éléments de la théorie instrumentale de P.Rabardel²⁷. Le système analysé est délimité à l'intérieur du trièdre utilisateur-artefact, artefact-instrument, utilisateur-instrument. Dans la théorie instrumentale, Rabardel définit la « genèse instrumentale » comme un moment où un utilisateur se détourne de l'utilisation initialement prévue pour un objet afin de réaliser une activité, un projet qui lui est propre.

Nous avons d'une part cherché à voir si les interfaces peuvent devenir des instruments, s'il peut y avoir une « genèse instrumentale » ? D'autre part, nous interrogeons les effets structurants des artefacts (interfaces) sur les activités (« ouverture des possibles » et « activités relativement requises »). Nous empruntons ce concept à Rabardel tout en l'adaptant à nos besoins : nous considérons la genèse instrumentale comme le moment où l'artefact devient instrument de musique, c'est-à-dire lorsque l'artefact (l'interface) s'intègre dans un projet musical.

3.3.2 Résultats

Trois doctorants experts de l'utilisation des technologies de création musicale ont participé à ces tests. La durée moyenne des entretiens fut de deux heures. Sur le plan fonctionnel (premier point de notre grille), les participants ont rencontré de légères difficultés à manipuler certains degrés de liberté pour *2plf.js* et *map_plus.js* ainsi que la matrice de *mapping*. Nous faisons l'hypothèse que ces difficultés sont principalement liées aux conditions de réalisation du test. En effet, bien que la durée puisse paraître importante, le temps n'était pas suffisant pour entrer dans le détail de chaque interface. En un temps

27. Pierre RABARDEL, *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*, Armand Colin, 1995, p. 239.

limité, les participants ont dû apprendre à se servir de trois interfaces différentes, dans des conditions musicales (choix des sons et des traitements) qui leur étaient imposées.

Pour *2plf.js*, la manipulation de la couleur se fait en maintenant une touche du clavier puis en faisant un *clic and drag* à partir du point manipulé. L'espace permettant la manipulation de la couleur avec la souris n'est pas limité, mais la vitesse de déplacement de la souris impact le pas d'incrémentation de la variable. Pour aller d'un extrême à l'autre (d'un point noir à un point rouge), suivant où se situe le point en question sur l'axe vertical, si l'utilisateur déplace le curseur doucement, il devra parcourir une distance plus courte que s'il le déplace rapidement. De fait, s'il déplace le curseur rapidement, il devra peut-être faire plusieurs aller-retours entre le point et la limite de son moniteur. Un des participants a été troublé par cette interaction et a dû répéter le processus plusieurs fois avant d'apprendre à manipuler ce degré de liberté. Deux utilisateurs ont rencontré des difficultés à manipuler cette variable, l'un parce qu'il n'arrivait pas à intégrer la logique d'incrémentation et faisait des mouvements rapides et amples lorsqu'il souhaitait augmenter cette variable. L'autre utilisateur interrogeait la relation entre le maximum de la variable et la couleur choisie pour le visualiser. Pour *map_plus.js*, la manipulation du rayon et l'opacité des cercles relève du même principe et a troublé de la même façon un autre participant. De fait, nous avons affiné la sensibilité au déplacement de la souris et choisi une couleur moins chargée symboliquement.

Au sujet du deuxième point de notre grille d'analyse, la modularité comprise comme la possibilité offerte aux utilisateurs de choisir la fonction de *mapping* pour chacune des interfaces, a montré du potentiel tout en restant à un stade superficiel. Chacun des participants était invité à choisir les variables des traitements qu'ils souhaitaient manipuler avec *2plf.js* et *map_plus.js* et par la suite à naviguer entre les différentes fonctions de *mapping*. Chacun d'eux a choisi des configurations différentes. Pour autant, cela ne nous semble pas suffisant pour pouvoir statuer sur la pertinence de l'approche modulaire sous cette forme. En effet, les conditions du test, aussi bien sa durée que les conditions musicales, paraissaient contraindre les utilisateurs à faire des choix parce qu'ils leur avaient été demandés plus que par nécessité musicale.

Néanmoins, l'élément le plus intéressant selon nous est que pour chacun des trois utilisateurs, nous avons observé des moments durant lesquels leur utilisation est devenue

musicale. Ces moments sont ceux durant lesquels les utilisateurs cessent de parler et paraissent être pleinement engagés dans un projet musical. Des moments durant lesquels les utilisateurs semblent être totalement dans l'écoute et l'exploration. Ces moments que nous qualifions de genèse instrumentale semblent être particulièrement intéressants à observer. À partir de quand et surtout pourquoi quelqu'un entre en jeu avec un artefact qui soudain devient instrument ? Pour chaque utilisateur, cela s'est déroulé à un moment du test différent. Dans notre pratique, nous avons identifié cette transition à partir du moment où l'interface nous permet d'atteindre un niveau morphologique correspondant à notre échelle d'écoute, qu'il y a un équilibre entre la surprise dans le résultat et le contrôle que nous avons, engendrant une dimension ludique.

3.4 Synthèse de la première partie

À partir de la définition du point et de la ligne chez Euclide, nous avons établi une analogie pour définir la pensée euclidienne de l'espace en musique. Après avoir confronté ce concept à la pièce *Concret PH* de I.Xenakis, nous présentons des exemples d'approches de la spatialité irréductibles à une pensée euclidienne de l'espace. Bien que commode, l'approche euclidienne est insuffisante pour appréhender la composition de la spatialité du son dans toute sa complexité et son épaisseur. En adoptant le point de vue de Poincaré, qui postule qu'aucune géométrie n'est plus vraie qu'une autre, simplement plus commode, nous avons souligné que la pensée euclidienne en musique constitue un paradigme plutôt qu'une ontologie. Cette trajectoire d'Euclide à Poincaré dans le domaine des idées joue pour nous le rôle d'un fil d'Ariane, nous conduisant de la pensée de l'espace sous-jacente à la pratique de la spatialisation au monde opératoire du traitement spatial du son. Une analyse approfondie des solutions logicielles a confirmé la prédominance de la pensée euclidienne, tant dans les représentations convoquées que dans les taxinomies à la base des méthodes de notation et d'enregistrement. Cette concentration contribue à la constitution d'angles morts dans la pensée de l'espace en informatique musicale. Confrontés à ces constats, nous avons exploré les enjeux musicaux et technologiques inhérents à la conception d'interfaces pour le traitement spatial du son. Des hypothèses sur la modularité, le potentiel génératif du dessin et la diversité des niveaux de modularité ont

été étudiées. Adoptant une approche heuristique et exploratoire, nous avons examiné différents types d'interfaces : interface écriture (*stap.js*, *2plf.js*) et de contrôle, locale à un traitement (*dtd.js*) et générique (*map_plus.js*). Cette investigation permet notamment de souligner l'interconnexion des interfaces graphiques avec les moteurs sonores (ce qu'elles manipulent) et les approches musicales (ce qu'elles nous permettent d'atteindre).

Deuxième partie

Traitement spatial du son

Les représentations opératoires pour le traitement spatial du son sont des outils multidimensionnels et multi-échelles. En effet, elles nous permettent d’opérer sur la spatialité du son à différents niveaux et mettent en jeu des interfaces graphiques, des moteurs sonores tout en s’appuyant sur une écoute et une approche musicale. Dans cette thèse, nous explorons les enjeux musicaux et technologiques inhérents à la conception de représentations opératoires pour le traitement spatial du son en explicitant et interrogeant les interactions/rétroactions entre les différents pans.

Nous en avons interrogé certains aspects depuis le niveau des interfaces graphiques dans la première partie. Nous nous focaliserons maintenant sur le moteur sonore et plus particulièrement au niveau du code DSP. En effet, analyser les interactions avec la spatialité du son suppose d’investir toutes les échelles de nos manettes sur le sonore et notamment les opérations réalisées sur le signal. La conception d’un traitement audionumérique induit des manières d’interagir avec le signal et par ailleurs il s’agit déjà à ce niveau de la définition de notre instrument.

En informatique musicale, la programmation participe de la pensée musicale déployée. Sêdes et Carvalho en travaillant sur la question de l’écriture compositionnelle avec les moyens informatiques écrivaient : « Dans le travail compositionnel, nous sommes amenés à programmer (‘faire des patches’) avec certains logiciels (Pd, Max, PWGL). Cette programmation met en jeu des choix et des décisions musicales (et pas seulement techniques ou technologiques), ce qui nous mène à la considérer comme une activité compositionnelle à part entière. »²⁸. Nous partons ainsi de ce postulat et cherchons à ajouter une lumière sur la boucle de rétroaction en jeu dans la pratique de la composition incluant la conception de représentations opératoires.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons de façon synthétique le modèle ambisonique et la bibliothèque logicielle que nous convoquons dans nos expérimentations. Dans le cinquième chapitre, nous abordons le traitement spatial par décorrélation et présentons l’implémentation proposée. Enfin dans le sixième chapitre, nous exposons des extensions à la décorrélation et interrogeons les conditions de possibilités de leur généralisation.

28. Guilherme SILVEIRA CARVALHO et Anne SÊDES, « Nouvelles écritures compositionnelles et informatique musicale », dans : *“Écritures et re-productions : Techniques compositionnelles et méthodes de ré-écriture”*, INHA, Paris, 8-9 décembre 2008, Paris, France, 2008.

Ambisonie : du modèle à l'implémentation

Dans ce chapitre, nous abordons les éléments fondamentaux de l'approche ambisonique afin de définir le socle théorique et technologique sur lequel nous appuyons nos travaux. Ce panorama nous permettra par ailleurs d'explicitier les raisons pour lesquelles nous composons avec des traitements dans le domaine ambisonique. Nous commencerons ce chapitre par une présentation approfondie de l'ambisonie du premier ordre. Nous poursuivrons en présentant l'extension de l'approche aux ordres élevés et les outils d'analyses de champ sonore. Enfin, nous aborderons le contexte technologique de cette thèse et préciserons notre apport aux bibliothèques *abc.lib* et *hoa.lib*.

Tout au long du XX^{ème} siècle, les techniques d'enregistrement et de restitution sonore ont été pensées pour se rapprocher le plus possible de copies fidèles sur le plan acoustique ou perceptif de scènes sonores. Dans les années 1930, les techniques stéréophoniques ont émergé et se sont progressivement démocratisées, notamment grâce aux travaux d'Alan Blumlein¹. La stéréophonie permet d'enregistrer et restituer des scènes sonores sur le plan frontal. Dans les années 70 les techniques dites « pantophoniques »², ont permis des enregistrements et restitutions entourant l'auditoire. Enfin, les techniques dites « périphoniques » initiées au milieu des années 70 sous l'impulsion de Michael Gerzon et Peter Fellgett ont permis l'enregistrement et la restitution de scènes sonores sur le plan horizontal et vertical. Les travaux de Gerzon ont été à la base des approches appelées *Ambisonics*

1. Allan BLUMLEIN, « Improvements in and relating to sound-transmission, sound-recording and sound-reproducing systems », brev. amér. GB394325A, 1931 ; Les travaux de Clément Ader autour du théatrophone sont régulièrement cités dans les travaux l'émergence de la stéréophonie.

2. Terme employé pour parler des systèmes de restitution 2D dont les système de restitution en quadriphonie font partie par l'Union Internationale des télécommunications (UIT-R BS.2094-1 06/2017).

dont Jérôme Daniel proposa une extension aux ordres élevés au début des années 2000. Ainsi, nous avons fait le choix de travailler avec ce formalisme pour quatre raisons :

1. Nous souhaitons travailler musicalement sur la synthèse d'attributs spatiaux qui ne se limitent pas à la synthèse de source sonore ponctuelle, ce qui nous a amené à nous rapprocher des techniques de synthèse de champ. De fait, nous nous sommes orientés vers les techniques de synthèses de champ dites « holophoniques » : l'ambisonie et *Wave Field Synthesis* (WFS) ;
2. Pour des raisons musicales, nous souhaitons travailler dans un contexte de diffusion enveloppant l'auditoire (*surround*). Bien que des extensions soient possibles, la WFS est initialement basée sur un modèle de synthèse de front d'onde qui privilégie le rapport frontal. Ajoutons à cela la volonté de mettre des sources en mouvement dans le cas de l'utilisation de sources sonores ponctuelles. Or, les mouvements de source peuvent engendrer des artefacts type effet Doppler en WFS ;
3. De nombreux travaux sur le traitement spatial du son en ambisonie ont été publiés depuis la fin des années 2000, constituant une base solide pour nos recherches ;
4. L'approche ambisonique est à notre connaissance la seule approche de synthèse spatiale qui utilise une représentation intermédiaire du champ sonore. En effet, nous verrons dans la première section que l'ambisonie nécessite une étape d'encodage dans une représentation intermédiaire du champ sonore indépendante du système de restitution, puis une étape de décodage pour adapter les signaux au système de restitution. Cette caractéristique a selon nous deux avantages majeurs :
 - a) Les signaux ambisonique (après l'étape d'encodage) comportent les informations spatiales³, de fait, chaque opération de traitement réalisée sur les signaux ambisoniques aura un impact sur la spatialité du son ;
 - b) Les opérations réalisées sur les signaux ambisoniques sont indépendantes du système de restitution.

3. « Une spécificité majeure de l'approche ambisonique, par rapport aux techniques précédemment évoquées, repose sur le fait que les canaux transmis contiennent de façon explicite l'information directionnelle des images sonores dans la scène sonore à reproduire, indépendamment du dispositif de haut-parleurs employé » Jérôme DANIEL, « Representation de champs acoustiques, application a la transmission et a la restitution de scenes sonores complexes dans un contexte multimedia », thèse de doct., 2000, p. 361, p.101.

4.1 *First Order Ambisonics* (FOA)

L'approche ambisonique regroupe un ensemble de techniques pour l'enregistrement, la synthèse, la transformation et la restitution de champs sonores. Elle repose sur la décomposition dans une représentation intermédiaire de la fonction sphérique associée au champ de pression en un point d'écoute puis sur sa restitution avec un système de diffusion. La décomposition du champ de pression est fondée sur l'écriture de l'équation des ondes en coordonnées sphériques permettant le développement en série de Fourier-Bessel dans lequel apparaissent les fonctions à dépendances angulaires appelées harmoniques sphériques⁴. Autrement dit, les harmoniques sphériques sont les éléments fondamentaux permettant de décrire ou de synthétiser un champ sonore dans une représentation intermédiaire⁵.

4.1.1 Enregistrement

L'approche développée par Gerzon dans son article intitulé *Periphony : With-Height Sound Reproduction* publié en 1973 permet de décrire l'évolution de la pression en un point, le point d'écoute de l'auditeur à partir d'un ensemble de microphones. Il définit ainsi ce qui se nommera par la suite le *format B*⁶.

La chaîne ambisonique est constituée d'au moins deux étapes fondamentales : l'encodage et le décodage. L'encodage est la décomposition de la fonction sphérique (3D) ou circulaire (2D) correspondant au champ sonore capté (ou à celui qu'il eût été possible de capter), en une somme pondérée de fonctions de références : les harmoniques sphériques ou circulaires. Le décodage consiste à calculer, en fonction d'un système de restitution - d'une matrice de décodage -, les jeux de gains associés aux haut-parleurs.

Dans sa réalisation, l'encodage ambisonique du premier ordre d'un champ acoustique en un point d'écoute consiste à mesurer (ou calculer) la pression (composante omnidirectionnelle W) ainsi que trois gradients de pression selon trois directions orthogonales (composantes bidirectionnelles X , Y , Z). Qu'il s'agisse d'une captation à l'aide d'un mi-

4. *Ibid.*

5. De façon analogue, les sinus et cosinus sont les éléments fondamentaux permettant d'approcher et de décrire le contenu spectral d'un signal avec une décomposition en série de Fourier.

6. Michael A. GERZON, « *Periphony : With-Height Sound Reproduction* », dans : *J. Audio Eng. Soc* 21.1 (1973), Presented March, 1972, at the 2nd Convention of the Central Europe Section of the Audio Engineering Society, Munich, Germany, p. 2-10.

crophone de champs, ou d'une synthèse, l'encodage se fait en un point d'écoute, le même point d'écoute qui sera proposé à l'auditeur au moment de la restitution. Suivant ce principe, un dispositif de prise de son ambisonique peut être réalisé à partir d'un microphone omnidirectionnel (capteur de pression) et trois microphones bidirectionnels suivant trois axes (capteur à gradient de pression), et cela, en un seul et même point.

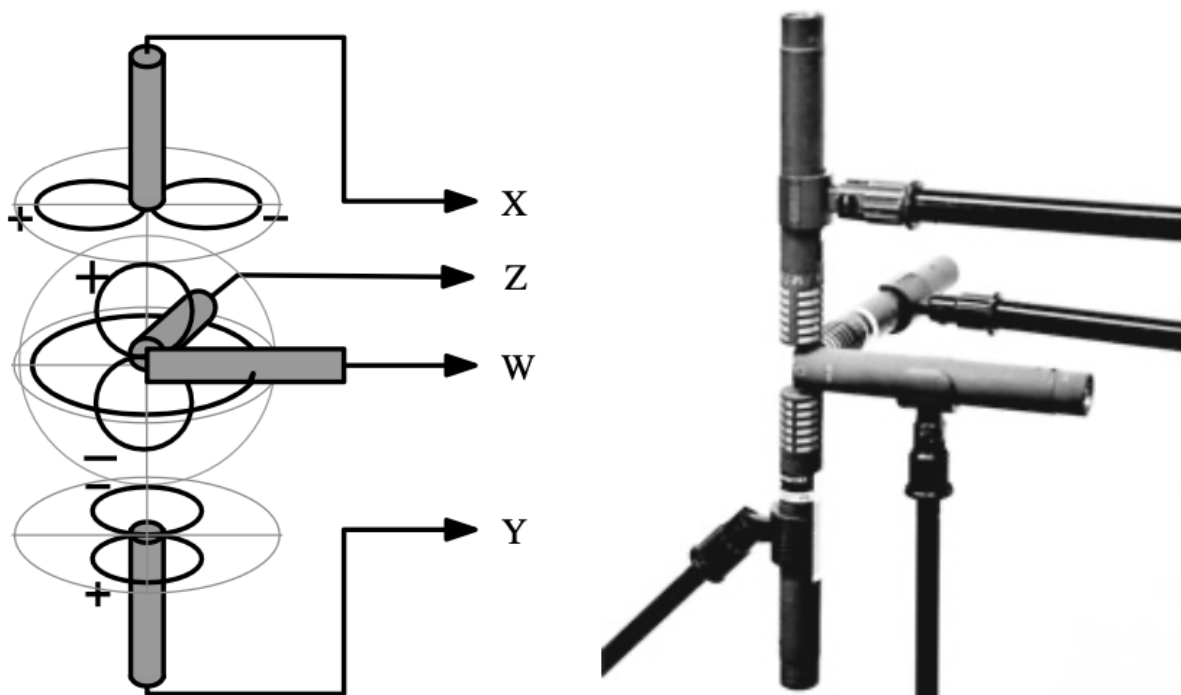


FIGURE 4.1 – Dispositif d'enregistrement ambisonique avec quatre microphones

Crédits : Franz ZOTTER et Matthias FRANK, *Ambisonics : A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, Springer, 2019, p. 224, ISBN : 978-3-030-17206-0

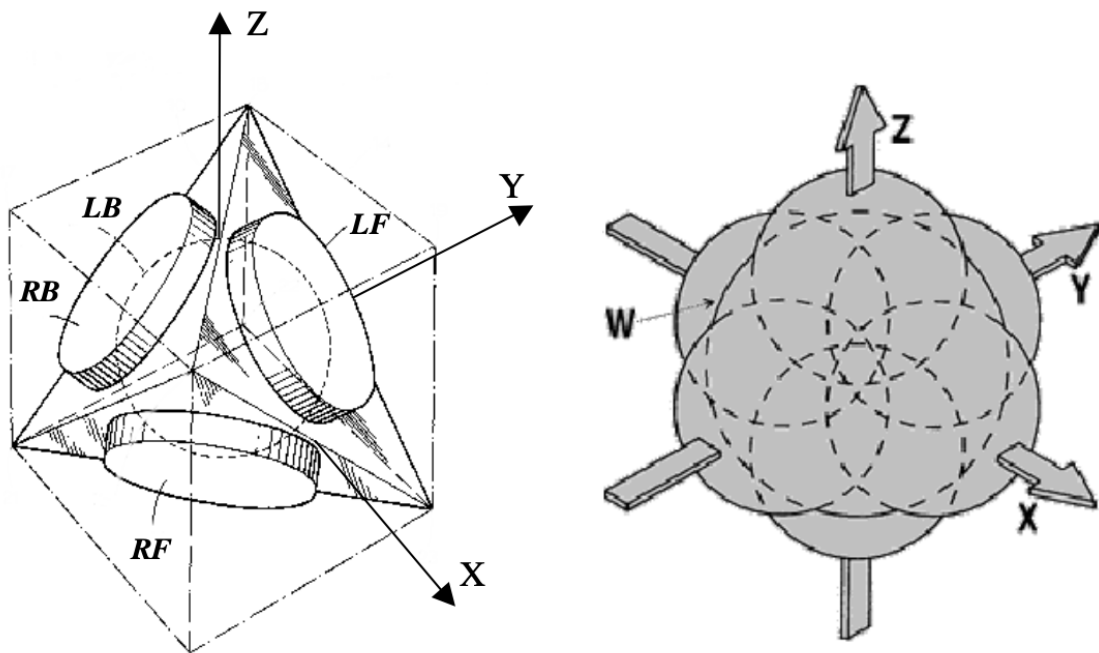
La figure 4.1 montre une installation tendant à se rapprocher de ce dispositif idéal. Évidemment, les quatre capsules ne peuvent pas être parfaitement au même endroit, d'autant que chaque microphone fait écran pour les autres. Gerzon et Craven proposent d'utiliser quatre capsules cardioïdes positionnées sur un tétraèdre régulier et de matricer leurs signaux afin d'obtenir la composante omnidirectionnelle et les trois bidirectionnelles⁷.

Les signaux issus des capsules cardioïdes nommés *LF*, *LB*, *RB* et *RF* dans la figure 4.2 constituent le *format A*. Le passage du *format A* issu d'un microphone *Soundfield* au *format B* est décrit par Craven et Gerzon par le matricage suivant⁸ :

7. Peter Graham CRAVEN et Michael Anthony GERZON, « Coincident microphone simulation covering three dimensional space and yielding various directional outputs », EN, 4042779, 1977.

8. Le système d'équation suit l'adaptation des équations n°2.15 dans la thèse DANIEL, « Representa-

$$\begin{cases} W = LF + LB + RF + RB \\ X = LF - LB + RF - RB \\ Y = LF + LB - RF - RB \\ Z = LF - LB - RF + RB \end{cases} \quad (4.1)$$

FIGURE 4.2 – Schéma du microphone *Soundfield*

Crédits : Jérôme DANIEL, « Representation de champs acoustiques, application a la transmission et a la restitution de scenes sonores complexes dans un contexte multimedia », thèse de doct., 2000, p. 361, p.103

4.1.2 Encodage

Si nous quittons le domaine de l'enregistrement pour regarder le domaine de la synthèse ambisonique, l'encodage d'une source dans une direction donnée peut être décrit par les équations suivantes⁹ :

tion de champs acoustiques, application a la transmission et a la restitution de scenes sonores complexes dans un contexte multimedia », p.103.

9. Ces équations sont issues de l'équation n°2.14 de (*ibid.*), nous avons laissé le facteur $\sqrt{2}$ qui correspond à la norme N2D. Nous adoptons le format acoustique avec θ l'azimut, ϕ l'élévation.

$$\begin{cases} W = S \\ X = \sqrt{2} \vec{u} \cdot \vec{x} S = \sqrt{2} \cos \theta \cos \phi S \\ Y = \sqrt{2} \vec{u} \cdot \vec{y} S = \sqrt{2} \sin \theta \cos \phi S \\ Z = \sqrt{2} \vec{u} \cdot \vec{z} S = \sqrt{2} \sin \phi S \end{cases}, \quad (4.2)$$

avec S le signal de la source, \vec{u} la direction d'encodage, \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} les trois axes.

En gardant l'analogie avec la microphonie, nous pouvons imaginer chaque harmonique sphérique comme un microphone virtuel avec un diagramme de directivité associé. Ainsi la matrice d'encodage serait constituée des gains que chacun des microphones virtuels aurait en sortie dans la direction souhaitée pour la source.

Prenons un exemple, pour une source sonore S encodée à 30° d'azimut et 0° d'élévation, nous ne prendrons que les informations concernant l'azimut, et donc nous laisserons de côté la composante Z . En reprenant l'équation 4.2, on la matrice d'encodage B :

$$B = \begin{bmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \cos(30) \cos(0) \\ \sqrt{2} \sin(30) \cos(0) \\ \sqrt{2} \sin 0 \end{bmatrix} \cdot S = \begin{bmatrix} 1 \\ 1.224 \\ 0.707 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot S. \quad (4.3)$$

Le processus d'encodage est alors la pondération du signal S de la source par les coefficients dépendants de la position souhaitée afin d'obtenir les canaux au format ambisonique en l'occurrence au *format B* avec la norme N2D.

4.1.3 Décodage

L'objectif du décodage est de retrouver au centre du dispositif de haut-parleurs le même champ acoustique que celui enregistré ou qu'il eût été possible d'enregistrer. L'étape de décodage consiste alors à venir appliquer une matrice de décodage dépendant du système de haut-parleurs aux signaux ambisoniques afin d'obtenir les signaux à envoyer aux haut-parleurs. Pour une restitution sur le plan horizontal (2D), le dispositif est défini par

un nombre N de haut-parleurs également répartis sur un cercle. Les signaux S_N envoyés aux haut-parleurs sont définis par le produit matriciel¹⁰ :

$$S_N = D.B, \quad (4.4)$$

où B représente la matrice d'encodage et D la matrice de décodage. L'enjeu est ici de calculer la matrice de décodage en fonction de la position des haut-parleurs. Afin de trouver la matrice de décodage, il nous faut faire un détour. Regardons la situation au centre du dispositif et décomposons le champ acoustique généré par les haut-parleurs en ambisonie. Chaque haut-parleur devient une source S_n à projeter dans le domaine des harmoniques sphériques ou circulaires. La matrice contenant les informations de ré-encodage B_{reenc} sera :

$$B_{reenc} = C.S_N, \quad (4.5)$$

où S_N est la matrice contenant les signaux provenant des haut-parleurs et C la matrice des harmoniques sphériques fonctions de la position des haut-parleurs. Autrement dit, le champ sonore est le résultat de la somme de la contribution de chaque haut-parleur dans chacune des directions. Projeter dans le domaine des harmoniques sphériques le champ acoustique produit par le dispositif de haut-parleurs revient à regarder dans quelle mesure le n^{ieme} haut-parleur contribue à la reproduction de la fonction sphérique dans chaque direction. En combinant les deux équations précédentes, nous avons :

$$B_{reenc} = C.D.B. \quad (4.6)$$

Comme nous cherchons à faire en sorte que le champ acoustique reproduit soit le même que le champ acoustique encodé, nous considérons que $B_{reenc} = B$. Alors la matrice de décodage D est l'inverse de la matrice correspondant à la projection de chaque haut-parleur dans le domaine des harmoniques sphériques.

10. La démonstration suivante est inspirée par la thèse de Stéphanie SALAÜN BERTET, « Formats audio 3D hiérarchiques : caractérisation objective et perspective ces systèmes Ambisonics d'ordres supérieurs », Thèse de doctorat dirigée par E.Parizet, INSA Lyon, thèse de doct., 2009, p. 151, pp.26-28.

La matrice C n'étant pas nécessairement carrée et inversible, nous prenons la pseudo-inverse¹¹. Nous avons alors :

$$D = C^t(C^t.C)^{-1}, \quad (4.7)$$

et si la configuration est régulière, Daniel nous dit¹² que la matrice de décodage se simplifie par :

$$D = \frac{1}{N}.C^t. \quad (4.8)$$

En regroupant les équations 4.4 et 4.8 nous avons :

$$S_N = \frac{1}{N}.C^t.B, \quad (4.9)$$

avec S_N la matrice comprenant les signaux associés à chaque haut-parleur n pour tout n entier allant jusqu'à N le nombre de haut-parleurs, C la matrice comprenant la projection des haut-parleurs dans le domaine des harmoniques sphériques et B la matrice comprenant la projection dans le domaine des harmoniques sphériques de la source S .

En reprenant l'exemple mentionné plus haut en nous concentrant sur un système à deux dimensions pour un système de restitution constitué de quatre haut-parleurs disposés à 45° , 135° , 225° et 315° , nous avons :

$$C = [Y_N(\theta_1), \dots, Y_N(\theta_N)]^t, \quad (4.10)$$

et $Y_N(\theta_i)$ la matrice contenant la projection dans le domaine des harmoniques sphériques du haut-parleur situé à l'angle θ_i selon :

$$Y_N(\theta_i) = [Y_0(\theta_i), Y_{-1,1}(\theta_i), Y_{1,1}(\theta_i)]^t. \quad (4.11)$$

11. Trouver la solution de l'équation $AX = B$ où A, X, B sont des matrices et A et B sont connues alors $A^tAX = A^tB \Leftrightarrow X = (A^tA)^{-1}A^tB$ où X est la solution approchée par la méthode des moindres carrés. La pseudo inverse de A , noté A^+ est $(A^tA)^{-1}A^t$. Nous choisissons de garder la convention trouvée chez Daniel, Colafrancesco et autres, notant la transposée avec le t à droite de la matrice.

12. Jérôme DANIEL, Jean-Bernard RAULT et Jean-Dominique POLACK, « Ambisonics Encoding of Other Audio Formats for Multiple Listening Conditions », dans : (jan. 1998), p. 30, p.3.

Nous avons donc :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

En combinant les équations :

$$S_N = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1.224 \\ 0.707 \end{bmatrix} \cdot S = \begin{bmatrix} 0.732 \\ 0.120 \\ -0.232 \\ 0.379 \end{bmatrix} \cdot S \quad (4.13)$$

Ainsi, nous avons les facteurs de gain à appliquer aux quatre HP pour le décodage d'une source située à 30° d'azimut.

4.2 High Order Ambisonics (HOA)

Bien que Gerzon formulait l'utilisation d'une infinité de composantes spatiales, le *format B* se limitait aux 4 composantes W X Y Z. Daniel généralisera l'approche ambisonique aux ordres élevés utilisant des composantes spatiales avec plus de lobes. Durant nos expérimentations, toutes les opérations de traitement et de composition ont été réalisées en ambisonie d'ordre élevé (voir 6.1.1). Ainsi, nous proposons au lecteur un panorama résumé de cette approche afin de fournir les éléments théoriques fondamentaux pour les deux chapitres suivants.

4.2.1 Extension aux ordres élevés

Les harmoniques sphériques notées $Y_{m,n}$ s'organisent en ordre m et degrés n , le nombre d'harmoniques utilisées dépend de l'ordre de décomposition noté N avec $2N + 1$ harmoniques en 2D, et $(N + 1)^2$ en 3D. Les harmoniques prennent deux angles en entrée, θ

l'azimut et ϕ l'élévation et sont définis par :

$$Y_{m,n}(\theta, \phi) = A_{|m|,n} P_{|m|,n}(\cos(\phi)) \begin{cases} \cos(m\theta) & \text{si } m \geq 0 \\ \sin(|m|\theta) & \text{si } m < 0 \end{cases}, \quad (4.14)$$

avec $A_{|m|,n}$ un coefficient dépendant de la norme utilisée, $P_{|m|,n}$ le polynôme de Legendre¹³. Les harmoniques sphériques peuvent être tracées dans un repère polaire comme dans la figure 4.3, avec en gris les valeurs positives, en noir les valeurs négatives. Ainsi, pour la décomposition d'une fonction sphérique constituée de n éléments, l'amplitude de chaque harmonique est définie par :

$$a_{m,n} = \sum_{i=0}^I Y_{m,n}(\theta_i, \phi_i) x_i, \quad (4.15)$$

où $a_{m,n}$ est le coefficient d'amplitude de l'harmonique d'indice ambisonique m , n , θ_i et ϕ_i les coordonnées du i^{eme} élément, x_i la valeur du i^{eme} élément. Et réciproquement, chaque élément est défini par :

$$x_i = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n Y_{m,n}(\theta_i, \phi_i) a_{m,n}. \quad (4.16)$$

4.2.2 Décodage

L'opération de décodage revient à faire un échantillonnage de la fonction circulaire ou sphérique représentant le champ sonore. Le support d'échantillonnage peut être régulier, semi-régulier ou irrégulier. Pour une reproduction 2D, l'échantillonnage régulier du cercle correspond à un dispositif de HP constitué d'au moins $2N + 1$ haut-parleurs répartis de façon homogène sur un cercle¹⁴. Pour la reproduction 3D, le problème de la discrétisation de la sphère est autrement complexe. Idéalement, les haut-parleurs doivent être disposés à égale distance angulaire, ce qui restreint les situations régulières aux cinq solides de Platon. Toutefois, la relation entre le nombre de points (HP) et le nombre d'harmoniques sphériques n'est plus aussi évidente. Par exemple, Daniel nous dit que ni un dodécaèdre (20 sommets), ni la combinaison d'un dodécaèdre et d'un icosaèdre (32 sommets) ne sont

13. Formule adaptée d'après la thèse de COLAFRANCESCO, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », p.120 et du papier de CARPENTIER, « Réduction horizontale d'un flux Ambisonic 3D », p.1.

14. DANIEL, « Representation de champs acoustiques, application a la transmission et a la restitution de scenes sonores complexes dans un contexte multimedia », pp.172-177.

des supports suffisants pour une situation régulière à l'ordre 3 (comportant 16 harmoniques)¹⁵. La réalisation de systèmes de reproduction ambisoniques réguliers n'étant pas toujours possible, différentes solutions de décodage ont été proposées pour palier aux irrégularités angulaires de la répartition des haut-parleurs (EPAD, MAD, AllRad, Slepian)¹⁶. Différentes normalisations des signaux ambisoniques coexistent (*format B* - pour l'ordre 1 -, SN3D, N3D, FuMa, N2D, SN2D, MaxN) ainsi que des façons d'ordonner les canaux (*Ambisonics Channel Order* (ACN), SID, FMH). Pour la réalisation d'une chaîne ambisonique, il est nécessaire d'utiliser la même norme pour l'encodage, les traitements et le décodage.

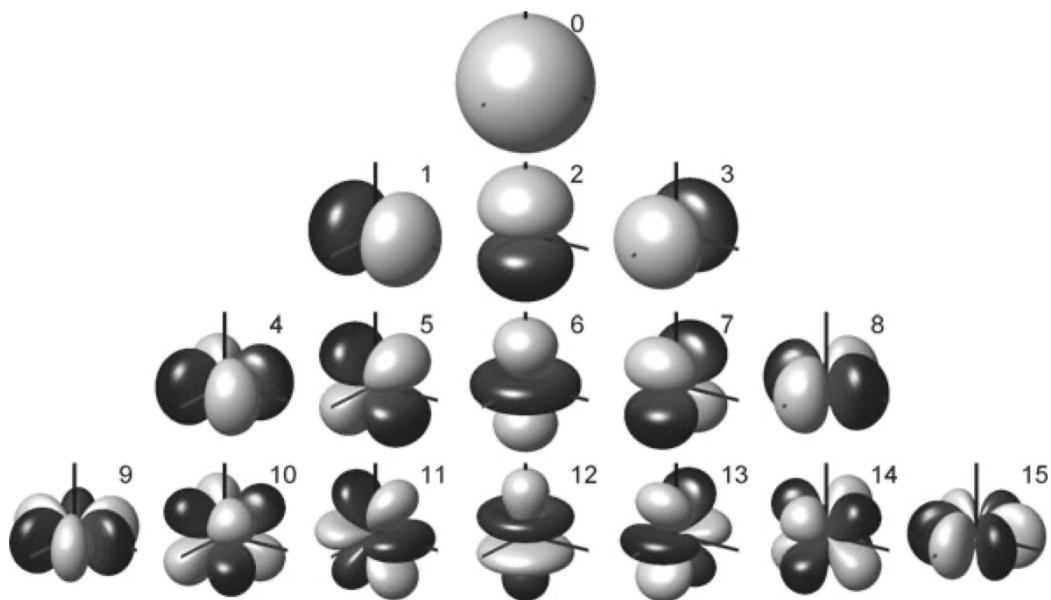


FIGURE 4.3 – Représentation des harmoniques sphériques jusqu'à l'ordre 3 suivant l'ordre ACN, en gris les valeurs positives et en noir les valeurs négatives.

Crédits : Franz ZOTTER et Matthias FRANK, *Ambisonics : A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, Springer, 2019, p. 224, ISBN : 978-3-030-17206-0

15. Pour plus de détails, voir [ibid.](#), pp.175-177, et Franz ZOTTER et Matthias FRANK, *Ambisonics : A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, Springer, 2019, p. 224, ISBN : 978-3-030-17206-0, p. 157-164. Différentes techniques de discrétisation de la sphère sont proposées pour concevoir des systèmes de diffusion ambisoniques 3D, voir COLAFRANCESCO, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », p.124.

16. ZOTTER et FRANK, *Ambisonics : A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, pp.72-77.

4.2.3 Vecteurs énergie et vitesse

Afin d'appréhender ou anticiper la précision de localisation d'une reproduction ambisonique, deux indices ont été théorisés par Gerzon¹⁷ en s'appuyant sur la théorie de la perception de Makita¹⁸ : le vecteur énergie et le vecteur vitesse. Le vecteur vitesse est valable pour les fréquences en dessous de 700 Hz, sa direction correspond à la direction apparente de la source et sa norme correspond à la précision (ou au flou) du rendu. Le vecteur énergie est l'analogie du vecteur vitesse pour les fréquences allant de 500 Hz à 5 kHz. Ces indices de localisation, calculés sur les signaux envoyés aux haut-parleurs, permettent d'optimiser les signaux ambisoniques afin d'avoir le meilleur rendu possible dans une situation donnée. Les vecteurs vitesses et énergies¹⁹ :

$$\vec{V} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i \vec{u}_i}{\sum_{i=1}^N g_i} \quad (4.17)$$

$$\vec{E} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i^2 \vec{u}_i}{\sum_{i=1}^N g_i^2} \quad (4.18)$$

Avec les coordonnées du vecteur vitesse :

$$x_{\vec{V}} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i x_{\vec{u}_i}}{\sum_{i=1}^N g_i}, \quad y_{\vec{V}} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i y_{\vec{u}_i}}{\sum_{i=1}^N g_i} \quad \text{et} \quad z_{\vec{V}} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i z_{\vec{u}_i}}{\sum_{i=1}^N g_i} \quad (4.19)$$

et celles du vecteur énergie :

$$x_{\vec{E}} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i^2 x_{\vec{u}_i}}{\sum_{i=1}^N g_i^2}, \quad y_{\vec{E}} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i^2 y_{\vec{u}_i}}{\sum_{i=1}^N g_i^2} \quad \text{et} \quad z_{\vec{E}} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i^2 z_{\vec{u}_i}}{\sum_{i=1}^N g_i^2} \quad (4.20)$$

L'optimisation dépend d'une part des plages de fréquences et d'autre part de la disposition de l'auditoire. L'idée est de trouver des solutions pour que les vecteurs vitesse et énergie (correspondant respectivement à la qualité de la localisation en dessous de 700Hz et sur la bande 500-5kHz) soient colinéaires et pointent dans la direction de la source sonore encodée.

L'optimisation *max-r_e* permet de maximiser le vecteur énergie, c'est-à-dire la localisation des hautes fréquences (au-dessus de 500 Hz). Et l'optimisation *in-phase* minimise

17. Michael A. GERZON, « General Metatheory of Auditory Localisation », dans : *Journal of The Audio Engineering Society* (1992).

18. Yuko MAKITA, « On the Directional Localisation of Sound in the Stereophonic Sound Field », dans : *12th Meeting of the Technical Committee of the E.B.U*, Monte Carlo, oct. 1962.

19. DANIEL, « Representation de champs acoustiques, application a la transmission et a la restitution de scenes sonores complexes dans un contexte multimedia », p.106.

les gains des haut-parleurs s'éloignant de la source et allant jusqu'à annuler le gain du haut-parleur dans la direction opposée à la source.

4.3 De *HOALibrary* à *abc.lib* puis *hoa.lib*

4.3.1 Contexte

abc.lib est une bibliothèque *opensource* écrite en langage FAUST et distribuée pour *Max* et *Pd* émergeant d'une volonté de rassembler, organiser, trier et pérenniser vingt années de recherches, de création et d'enseignements au CICM. Résonnant avec ses réflexions sur la pérennité des logiciels émanant de projets de recherche²⁰ et les parties électroniques des œuvres, Alain Bonardi a entamé une formalisation des différents patches et outils utilisés, développés au CICM. L'obsolescence de la distribution *Pd* de *HOALibrary* en 2019 a été le catalyseur pour entamer ce processus.

Une grande partie des outils développés dans le cadre des projets de recherche du CICM viennent de pratiques de création, de techniques de composition traversant les projets et se retrouvant par la suite dans les enseignements dispensés à l'université Paris 8. L'objectif de *abc.lib* est aussi de fournir une base de travail permettant de pérenniser le code et factoriser les travaux antérieurs. Bonardi souhaitait permettre aux utilisateurs d'entrer le plus vite possible dans une pratique d'expérimentation dans le *patching* sans avoir à refaire continuellement les « briques » élémentaires de leurs patches. Par exemple, dans le cadre du projet ANR ASTREE, Bonardi travailla sur le ré-encodage en FAUST de la pièce *En écho* de Philippe Manoury, et notamment sur un *harmonizer*. Celui-ci se retrouvera tout en étant transformé dans ses propres pièces *Fil de Soi 1* et *Fil de Soi 2* puis dans les enseignements de master « Musique et outils informatiques ».

En 2020, la version FAUST de la bibliothèque *HOALibrary* ne comportait que les fonctions primitives : encodage 2D et 3D, décodage 2D, optimisation *InPhase*, *max-r_e*, *wider*, *map* et *rotate*. A. Bonardi a dans un premier temps transcodé les différents patches instan-

20. Les questions liées à la pérennité du code ont donné lieu à un groupe de travail de l'Association Francophone d'Informatique Musicale et à une journée d'étude en 2023 à la Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord (MSH PN) sous l'impulsion de Yann Orlarey intitulée « Logiciels de création musicale : quels enjeux culturels, artistiques et politiques ? ».

ciés dans l'objet *hoa.process*, optimisé le code de l'encodeur 3D et ajouté des fonctionnalités aux fonctions de base pour qu'elles soient facilement utilisables par les musiciens²¹.

En 2021, dans le cadre de nos travaux de recherches, nous avons entamé une refonte de la décorrélation et de la modulation en anneau, notamment en ajoutant des fonctions de distribution. Nous avons aussi travaillé sur l'ajout d'une couche de VBAP pour le décodeur irrégulier en 2D. En 2022, toutes les modifications concernant le DSP des fonctions ambisoniques ont quitté *abc.lib* et ont intégré *hoa.lib*, bibliothèque standard du langage FAUST. De plus, nous avons fait une refonte des patchs *help* pour la distribution *Max* et *Pd*. À partir de cette étape, seules les fonctions d'interface graphique permettant de contrôler les fonctions de *hoa.lib* restèrent dans *abc.lib*. Ainsi, la bibliothèque *abc.lib* a plutôt destination à être un chapeau de haut-niveau, regroupant des GUI pour des traitements dans un écosystème de bibliothèque émanant du CICM : *mm.lib*, *hoa.lib*, *abcsound.lib*. Enfin, en 2024 les traitements 3D et les vecteurs énergies et vitesses 2D et 3D ont été intégrés à la librairie *hoa*.

4.3.2 Présentation de la bibliothèque

Dans sa version 1.0.2, la bibliothèque regroupe plus de 65 fonctions divisées en trois groupes :

1. fonctions et traitements ambisoniques ;
2. traitements multicanaux ;
3. utilitaires pour les musiques mixtes et électroniques ;

Depuis 2022, les fonctions d'*abc.lib* sont principalement des fonctions graphiques appelant les fonctions DSP de trois autres bibliothèques *hoa2.lib*²², *mm.lib* (musique mixte), *abcsounds.lib* et constituent une interface adaptée pour les musiciens. Dans la mesure où nous ne pouvons pas adapter dynamiquement le nombre d'entrées et de sorties d'un objet *Max* ou *Pd* après compilation du code FAUST, nous avons choisi de générer les objets pour différentes situations. Pour l'ambisonie à tous les ordres, pour toutes les configurations

21. Par exemple, les étudiants rencontrent des difficultés à manipuler des radians pour positionner des sources. Par ailleurs, Bonardi a ajouté une variable : la vitesse de rotation, permettant de mettre très rapidement des objets en mouvement.

22. Pour plus de maniabilité, un *fork* de *hoa.lib* est utilisé. *hoa2.lib* est vouée à *merger* avec *hoa.lib*.

de nombre de sources et de haut-parleurs jusqu'à une configuration maximale. Pour les traitements multicanaux, jusqu'à un certains nombre de canaux.

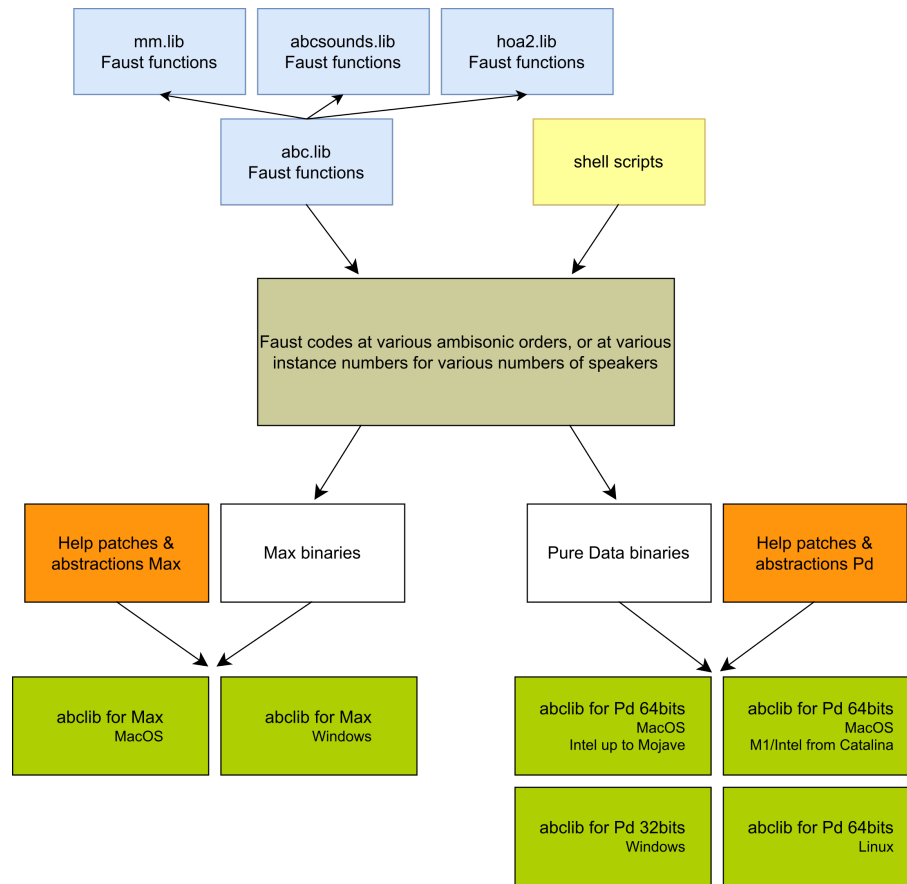


FIGURE 4.4 – Architecture de la bibliothèque *abc.lib*

Crédits : d'après ^a

^a. Alain BONARDI, « La librairie abclib : un ensemble de codes Faust rassemblant 20 ans de recherche, enseignement et création en musique mixte », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2021*, AFIM, Visioconférences, France, juill. 2021.

Pour les fonctions ambisoniques, la bibliothèque dans sa distribution *Max* et *Pd* utilise la nomenclature `abc_<2/3d>_<nom><ordre>~` et `abc_<2/3d>_<nom><ordre>_<src/hp>~` si l'objet est conçu pour un nombre précis de sources ou de haut-parleurs. Par exemple, l'objet pour un encodeur « multisources » à l'ordre 3 en 2D pour trois sources se nomme `abc_2d_multienncoder3_3~`. Et l'objet pour un décodeur 2D à l'ordre 5 sur 16 haut-parleurs se nomme `abc_2d_decoder5_16~`. Nous utilisons des signes « `_` » comme délimiteur, alors que l'utilisation la plus répandue pour *Max* et *Pd* est le point, car le compilateur FAUST ne permet pas de compiler des objets contenant des points dans le nom.

Si le nombre de haut-parleurs n'est pas précisé, l'objet aura $2N+2$ sorties ou N est l'ordre ambisonique. Pour les traitements ambisoniques, la bibliothèque utilise la nomenclature `abc_<2d/3d>_<mode>_<nom><ordre>~`. Par exemple, une décorrélation d'un flux ambisonique 3D d'ordre 3 en mode *fx* serait : `abc_3d_fx_decorrelation3~`. Cet objet aura le bon nombre d'entrées/sorties pour traiter un flux ambisonique correspondant aux nombres de dimensions et l'ordre choisi, en l'occurrence 16 entrées et 16 sorties. De même que pour une *ring modulation* ambisonique avec le mode *syn* à l'ordre 5 : `abc_2d_syn_ringmod5~`. Cet objet prendra une entrée, pour le signal de la source à traiter, et 11 sorties pour pouvoir s'adapter à un décodage ambisonique d'ordre 5 en 2D.

La bibliothèque est compilée pour les objets ambisoniques allant jusqu'à l'ordre 7. Pour les objets multisources comme le *multiencoder*, le *map*, la bibliothèque sont compilés jusqu'à 8 sources. Les décodeurs 2D irréguliers sont compilés pour des situations de 3 à 16 HP.

4.3.3 Perspectives

Un inconvénient majeur de l'utilisation de FAUST pour des cibles comme *Pd* ou *Max* 8 est le fait que nous ne pouvons pas changer dynamiquement le nombre d'entrées et de sorties du code une fois compilé, ni le nombre de processus dans les *par* et *seq*. Le nombre de processus réalisés en parallèle doit être connu au moment de la compilation. Cela implique pour les objets ambisoniques de compiler autant d'objets que de situation (ordre, nombre de sources, nombre de HP). De plus, il n'y a pas de solution multicanale possible à l'heure actuelle. Cela a plusieurs implications non négligeables : (1) la place en mémoire prise par la bibliothèque, (2) la différence d'utilisation par rapport à la plupart des bibliothèques *Max* et *Pd*, (3) le nombre de patchs *help* à générer, (4) le *listing* des objets dans le menu déroulant de *Max* apparaissant au moment de l'appel d'un objet est rendu impraticable.

Nous réfléchissons à différentes possibilités pour dépasser ces limitations. Premièrement, David Fierro a conçu un *wrapper* afin d'adapter la bibliothèque pour une utilisation multicanale dans *Max* et se rapprocher d'une utilisation habituelle de ce logiciel. L'idée est d'avoir autant d'abstractions que de familles d'objets à l'intérieur desquelles, il n'y a qu'un script dans l'objet *js*. Cette abstraction prend plusieurs arguments suivant la fa-

mille d'objet (ordre ambisonique, nombre de processus, nombre de haut-parleurs, nombre de sources, *etc.*) et le script génère un patch avec l'objet `abc` qui correspond au nom et arguments de l'abstraction, prépare une entrée et sortie multicanales pour le signal et une entrée pour le contrôle. Cette solution, en plus d'intégrer la logique multicanale, nous permet d'alléger la documentation et les références du package *Max*, le nombre de patches d'aide ainsi que le nombre d'objets/abstractions dans le menu déroulant.

À l'heure actuelle, la bibliothèque prend plus de 1,3 Go en mémoire, dont un cinquième pour les décodeurs. Néanmoins, nous n'avons pas encore intégré la 3D, et les objets sont compilés jusqu'à l'ordre 7 pour 16 haut-parleurs. Plusieurs pistes sont évoquées : (1) compiler les décodeurs pour des situations les plus couramment rencontrées, (2) utiliser un compilateur embarqué (`faustgen`) pour ne compiler que les objets utilisés par l'utilisateur.

La première piste ne s'applique que pour les décodeurs ambisonique et n'est pas évidente à mettre en œuvre. En effet, si nous pouvons dire que les systèmes à quatre (quadriphonie), cinq (*surround 5.1*) et huit (octophonie) HP sont particulièrement représentés pour la 2D, que devons-nous garder comme situation au-delà de huit HP ?

La deuxième piste nécessite d'être un peu étayée. `faustgen` est un compilateur embarqué sous forme d'objet *Pd* et *Max*. Il permet d'éditer et de compiler du code FAUST directement dans un patch avec un cycle édition-compilation réduit au maximum. Une fois compilé, le binaire est inscrit directement dans le *json* du patch. Cela signifie que si nous créons plusieurs patches en utilisant dans chacun d'eux un compilateur embarqué pour les mêmes fichiers `.dsp` résultant au même binaire, il serait stocké plusieurs fois.

Notre idée serait de n'avoir aucun objet compilé dans la distribution pour *Max*, seulement des fichiers `.dsp` comportant les fonctions élémentaires avec toutes leurs dépendances. En utilisant la logique du *wrapper*, nous pourrions faire appel à une abstraction incorporant un script qui réaliserait le patch en utilisant le fichier `.dsp` correspondant au nom et en modifiant les paramètres du *process* en fonction des arguments pour le compiler à la volée. L'idée serait de garder en mémoire dans un *cache* les objets déjà compilés de la sorte et qu'à chaque appel d'une abstraction `abc`, le script vérifie si l'objet souhaité ne s'y trouve pas.

Traitement spatial par décorrélation de signaux

Maintenant que nous avons énoncé les rudiments du modèle ambisonique au sein duquel nous situons nos travaux, entrons dans le détail du traitement au centre de notre thèse : la décorrélation. La spatialité du son comme une dimension composable est intimement liée à la dimension temporelle. Les opérations à des échelles micro-temporelles (à l'échelle de la phase par exemple ou à celle de l'échantillon), sont une façon d'interagir avec la spatialité du son. Ces opérations sur le micro-temps permettent de travailler le son venant de toutes parts, celui qui n'a pas de direction privilégiée, celui qui porte des ambiguïtés. Les envies sonores que nous venons d'évoquer nous ont conduit à nous intéresser à la décorrélation micro-temporelle dans le sillon creusé par des compositeurs comme Horacio Vaggione ou Anne Sèdes.

Dans ce chapitre, nous entrons dans le détail du principe de décorrélation et son application comme traitement spatial. En effet, nous nous sommes particulièrement intéressés à ce traitement, car nos objectifs musicaux sont centrés sur la production d'attributs spatiaux du son dans le contexte de sources sonores diffuses. Ainsi, nous organiserons la suite de notre réflexion autour de deux questions ¹ :

1. Quelles stratégies pour étendre la décorrélation en ambisonie sur le plan musical ?
2. Quels ajouts et modifications au niveau de l'implémentation de la décorrélation ?

1. Nous développerons ces deux questions avec un autre point de vue dans les chapitres 8 et 9.

Dans un premier temps, nous situons le principe de décorrélation dans ses origines en traitement du signal, puis ses origines musicales. Nous cherchons ainsi à explorer les différentes possibilités d'implémentation en nous replongeant dans les origines de l'approche. Ensuite, nous traiterons de son insertion dans le domaine ambisonique au cours des années 2010 dans le cadre des projets ayant mené à la bibliothèque *HOALibrary*. Enfin, nous aborderons les stratégies d'implémentations que nous avons appliquées dans le cadre d'*abc.lib* et *hoa.lib*.

5.1 Origines musicales

La notion de corrélation se réfère à des outils mathématiques, notamment utilisés en statistique et en traitement du signal qui évaluent la relation entre deux variables. Les techniques associées à la corrélation sont largement utilisées dans le domaine de l'acoustique musicale, l'ingénierie du son et sont introduites comme technique de composition en tant que telle par Horacio Vaggione au début des années 2000 et enfin dans le domaine ambisonique dans le cadre de la bibliothèque *HOALibrary*. Pour comprendre l'origine de la décorrélation en tant que technique de composition, il est essentiel de nous intéresser à son utilisation dans le domaine du traitement du signal appliqué au son.

5.1.1 Présentation du formalisme

La corrélation entre deux variables indique si elles évoluent ensemble, ou si elles évoluent de manière indépendante. Une corrélation positive signifie que lorsque l'une des variables augmente, l'autre a tendance à augmenter également, tandis qu'une corrélation négative indique que lorsque l'une des variables augmente, l'autre a tendance à diminuer. En revanche, une corrélation proche de zéro suggère une absence de relation entre les variables. La fonction d'intercorrélation (aussi appelée corrélation croisée ou *cross-correlation* en anglais), est un outil permettant d'appréhender la ressemblance entre deux signaux à un décalage temporel près². La fonction est définie par le produit scalaire de deux signaux (considérés comme des vecteurs) à un décalage temporel près. Le produit

2. Et la fonction d'autocorrélation permet d'appréhender la ressemblance d'un signal avec lui-même à un décalage temporel près.

scalaire entre deux vecteurs peut être pensé comme un indicateur de similarité entre ces deux vecteurs. Ainsi, la fonction d'intercorrélacion est la fonction qui définit la similarité entre deux signaux pour chaque décalage temporel d'un des deux signaux par rapport à l'autre. La fonction d'intercorrélacion est décrite dans le domaine discret par

$$\Gamma_{s_1, s_2}[m] = \sum_{n=0}^{N-m-1} \begin{cases} s_1[n+m]s_2[n] & \text{si } m \geq 0 \\ s_1[n]s_2[n-m] & \text{si } m < 0 \end{cases}, \quad (5.1)$$

avec N le nombre d'échantillons total, m le décalage entre les signaux $s_1[n]$ et $s_2[n]$.

La fonction d'intercorrélacion est le tracé du résultat du produit scalaire entre les signaux s_1 et s_2 pour chaque décalage $m \in [-N, N]$ ³. La corrélation croisée est un outil qui se retrouve à divers niveaux de l'analyse de la spatialité du son, tant sur les signaux émis que sur les signaux reçus. Par exemple, le *coefficient de corrélation interaural* (IACC), qui consiste à calculer le coefficient de corrélation sur les signaux arrivant aux oreilles d'un auditeur, intervient dans la quantification d'indices psychoacoustiques liés à la perception de la spatialité comme l'*envelopment* ou le *spaciousness*⁴.

Prenons un exemple pratique, la figure 5.1 présente trois tracés de la fonction d'intercorrélacion. De haut en bas, la première est effectuée entre deux signaux similaires dont l'un est décalé de quelques samples. La fonction admet un extremum appelé coefficient de corrélation, ici égal à 1, ce qui signifie que les signaux sont similaires à un décalage temporel près. La deuxième fonction a un coefficient de corrélation de -1 ce qui signifie que les deux signaux sont en opposition de phase. Alors que pour la troisième, réalisée entre deux signaux différents, le taux de corrélation est de 0.3. Dans la pratique, la fonction d'intercorrélacion peut être utilisée pour remettre en phase des signaux qui seraient décalés, l'objectif est alors de trouver le décalage temporel pour lequel la fonction d'intercorrélacion est la plus élevée. À partir des travaux de Kurozumi et Ohgushi sur la relation entre le coefficient de corrélation croisée et la largeur de l'image d'une source sonore en stéréophonie⁵, Kendall a proposé dès 1995 des techniques de traitement spa-

3. Nous avons adapté l'écriture de cette fonction pour notre situation, c'est-à-dire avec des valeurs réelles et dans le domaine discret.

4. BERANEK, *Concert and opera halls : how they sound*, pp.39-48.

5. Kohichi KUROZUMI et Kengo OHGUSHI, « The relationship between the cross-correlation coefficient

tial par décorrélation sur des sources sonores en situation musicale. Plus tard, Vaggione s'appuiera sur les travaux de Kendall pour développer une approche compositionnelle de la décorrélation⁶.

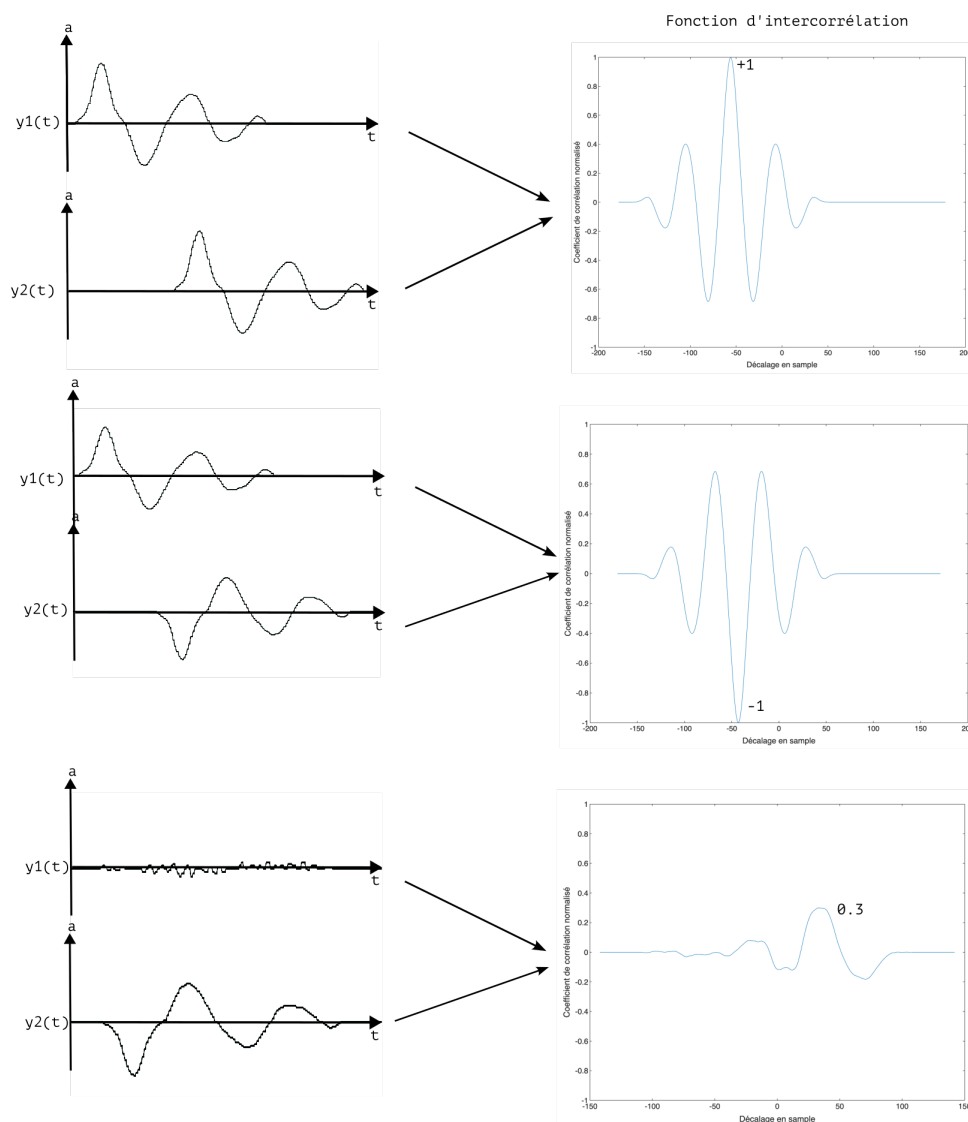


FIGURE 5.1 – Fonctions d'intercorrrelation et coefficients de corrélation pour (a) signaux identiques, (b) signaux en inversion de phases, (c) signaux différents

Crédits : D'après Gary S. KENDALL, « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », dans : *Computer Music Journal* 19.4 (1995), p. 71

of two-channel acoustic signals and sound image quality », dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 74.6 (déc. 1983), p. 1726-1733.

6. Horacio VAGGIONE, « Composing Musical Spaces By Means of Decorrelation of Audio Signals », dans : *Proceedings of the DAFx Conference on Digital Audio Effects*. University of Limerick, University of Limerick : Limerick (Irlande), déc. 2001.

5.1.2 Décorrélation dans le domaine fréquentiel

Le chercheur Gary Kendall constatait déjà au milieu des années 90 les angles morts dans les recherches sur la spatialité du son :

Bien qu'il existe une littérature abondante sur le traitement du son spatial, cette littérature se concentre généralement sur l'un des deux objectifs suivants : (1) positionner des images sonores à un emplacement particulier dans l'espace tridimensionnel, ou (2) créer des environnements simulés en trois dimensions. Ces objectifs sont importants, mais il est évident qu'il existe de nombreuses autres possibilités créatives pour le traitement spatial du son, ainsi que d'autres types de problèmes pratiques à résoudre.⁷

En effet, dans son article *The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery*, Garry Kendall fait état d'un ensemble de travaux réalisés avec M.Wilde et W.Martens à l'université Northwester entre 1988 et 1990 autour de traitements spatiaux et leurs impacts perceptifs. Dans cet article fondateur, il propose deux approches pour réaliser de la décorrélation des signaux à partir d'une source mono et étudie cinq de ses effets :

1. l'élimination de la coloration timbrale (interférences constructives et destructives) ;
2. la production de champ acoustique diffus ;
3. l'externalisation des sources dans le cas d'une écoute binaurale ;
4. la résilience de la position du champ acoustique face aux changements de position de l'auditeur par rapport au système de restitution stéréophonique ;
5. le contournement de l'effet de précedence (dit de Haas)⁸ .

Dans cette section, nous nous intéressons à la mise en œuvre de la décorrélation par Kendall pour interroger son utilisation à des fins musicales en ambisonie. La première méthode utilise une série de filtres *Finite Impulse Response* (FIR) aux coefficients pilotés

7. « While there is a considerable literature on spatial sound processing, this literature is usually concerned with one of two goals : (1) positioning sound images at a particular location in three-dimensional space, or (2) creating three-dimensional simulated environments. These goals are important, but there are obviously many other creative potentials for spatial sound processing, and other kinds of practical problems to solve. For example, decorrelation can produce sound images with the width, depth, and spaciousness typical of natural environments while circumventing the computational burden of a full environmental simulation. »

8. Les points 1 et 5 concernent la situation particulière que Kendall étudie : des signaux décorrélés auxquels l'auteur applique un retard pour les déphaser.

par leur taux de corrélation dans le domaine fréquentiel. Pour cela, l'auteur effectue la convolution entre les séries de coefficients notées $h_1(nT)$ et $h_2(nT)$ avec le signal entrant $x(nT)$ (voir figure 5.2)⁹.

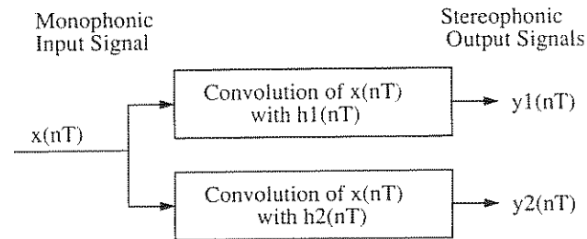


FIGURE 5.2 – Décorrélation par convolution avec des réponses impulsionnelles de filtres FIR

Crédits : Gary S. KENDALL, « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », dans : *Computer Music Journal* 19.4 (1995), p. 71

Lesdits coefficients sont calculés à partir du domaine fréquentiel : deux séries de nombres aléatoires entre $-\pi$ et π notées A et B sont utilisées pour définir les phases des coefficients, les magnitudes sont égales à 1 pour chacune des phases. Ces informations sont ensuite envoyées vers une FFT inverse afin d'avoir les deux séries de coefficients $h_1(nT)$ et $h_2(nT)$ qui correspondent respectivement aux séries de nombres A et B . L'auteur nous dit que le taux de corrélation des signaux correspondant aux coefficients $h_1(nT)$ et $h_2(nT)$ déterminera le taux de corrélation des signaux $y_1(nT)$ et $y_2(nT)$ issus de la convolution entre $x_1(nT)$ et $x_2(nT)$ avec $h_1(nT)$ et $h_2(nT)$. Afin de contrôler le taux de corrélation du rendu, une somme pondérée entre les séries A et B est effectuée avant l'étape de FFT inverse pour déterminer les coefficients $h_2(nT)$ (voir figure 5.3).

Ainsi, en référant à des brevets déposés avec Martin Wilde et Martens William, Kendall¹⁰ détermine le comportement présenté dans le tableau 5.1. Toutefois, Kendall ne précise pas le poids de la séquence B pour le calcul des coefficients $h_2(nT)$. Lorsque nous avons réalisé les essais d'implémentation, nous avons utilisé l'opposé de k pour pondérer la séquence B afin d'avoir une progression continue dans le poids de chacune des deux séries.

9. $h(i)$ est la convention de notation pour la rangée h des coefficients d'un filtre FIR.

10. KENDALL, « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », p.74.

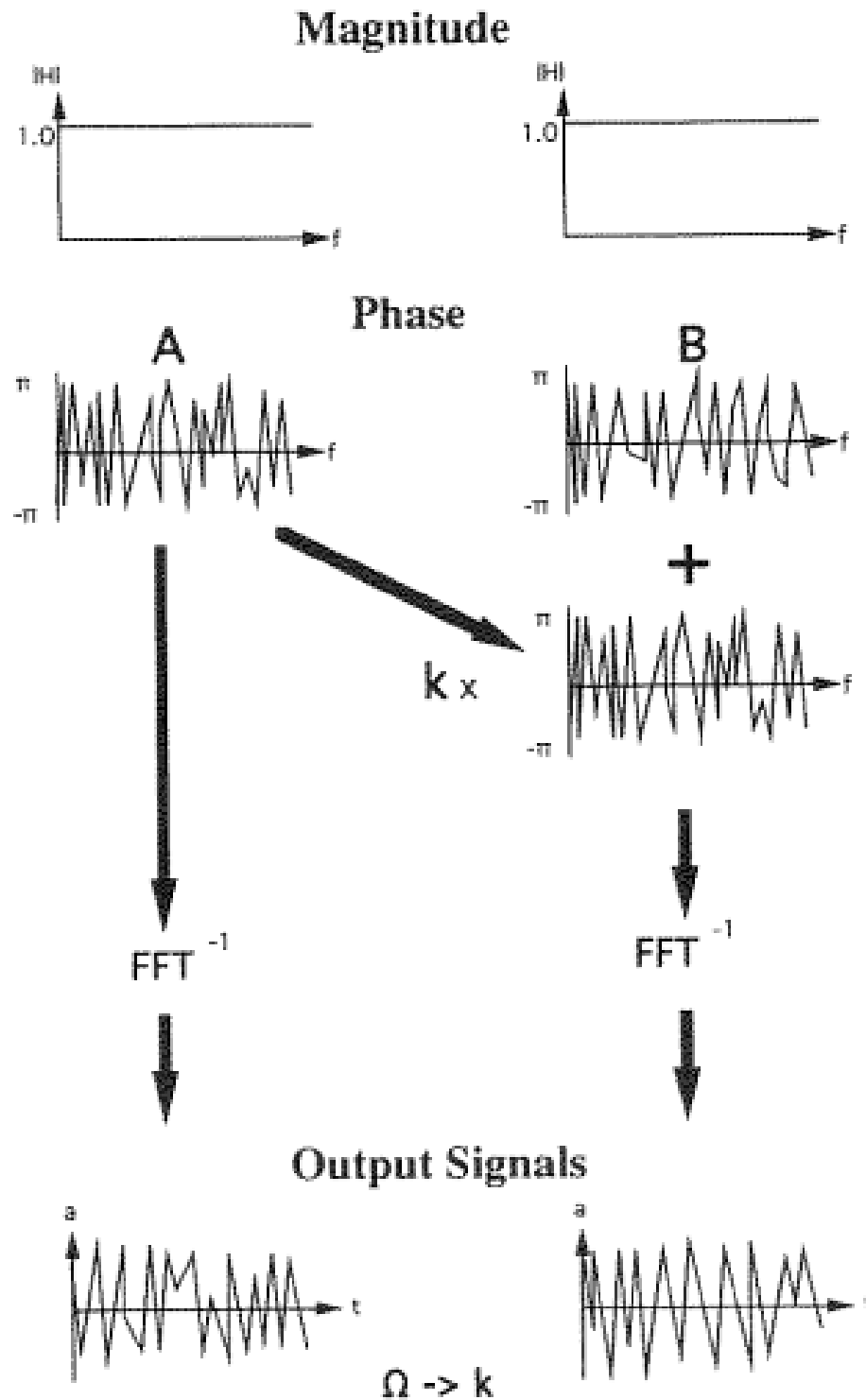


FIGURE 5.3 – Schéma du calcul des coefficients pour une paire de filtre FIR

Crédits : Gary S. KENDALL, « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », dans : *Computer Music Journal* 19.4 (1995), p. 71

Ω	k	$h_1(nT)$	$h_2(nT)$
+1	1	A	A
[1, 0]	[1, 0]	A	$B + kA$
0	0	A	B
[0, -1]	[0, 1]	A	$B + k(A + \pi)$
-1	1	A	$A + \pi$

TABLE 5.1 – Indications pour le calcul des coefficients des filtres FIR

Crédits : D'après Gary S. KENDALL, « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », dans : *Computer Music Journal* 19.4 (1995), p. 71

Ainsi, pour les coefficients de $h_2(nT)$ à partir de la pondération de A , B et k , nous avons choisi :

$$h_2(n) = \begin{cases} (1 - k).B[n] + k.A[n] & \text{si } \Omega \subset \mathbb{R}^+ \\ (1 - k).B[n] + k.(A[n] + \pi) & \text{si } \Omega \subset \mathbb{R}^- \end{cases} . \quad (5.2)$$

Les tests ont été réalisés avec le patch présenté dans la figure 5.5 qui est appelé dans l'objet `pfft~`. Ces tests ont montré que la décorrélation de Kendall a effectivement un impact sur les attributs spatiaux de l'image source. Nous avons essayé de l'utiliser dans une approche croisée avec la décorrélation dans le domaine ambisonique. Toutefois, les résultats n'étaient pas satisfaisants sur le plan perceptif et l'implémentation mériterait davantage d'investigation pour être utilisée dans un contexte musical. En effet, de nombreux artefacts se sont insérés dans le signal, ce qui nécessiterait du débogage. Le module de décorrélation donne un résultat satisfaisant d'après les tracés des fonctions de corrélation croisée (voir la figure 5.4). Notons par ailleurs que les coefficients de filtre ont un impact important sur le résultat sonore : si nous générons de nouvelles listes de coefficients, le résultat perceptif et de la fonction d'intercorrélation ne sera pas le même.

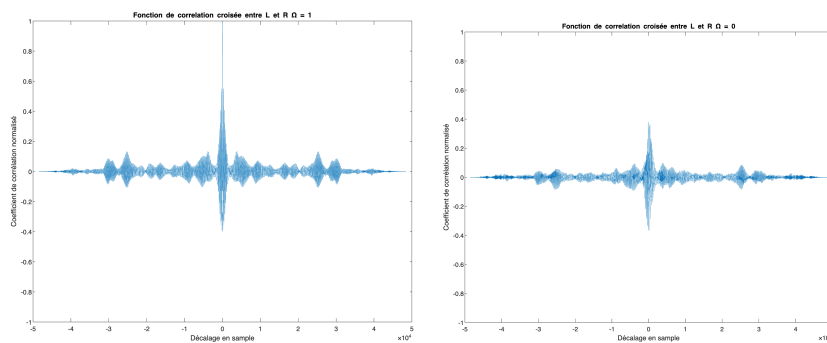


FIGURE 5.4 – Corrélation croisée sur un échantillon de voix chantée : coefficient de corrélation à 1 (gauche) et coefficient de corrélation à 0 (droite)

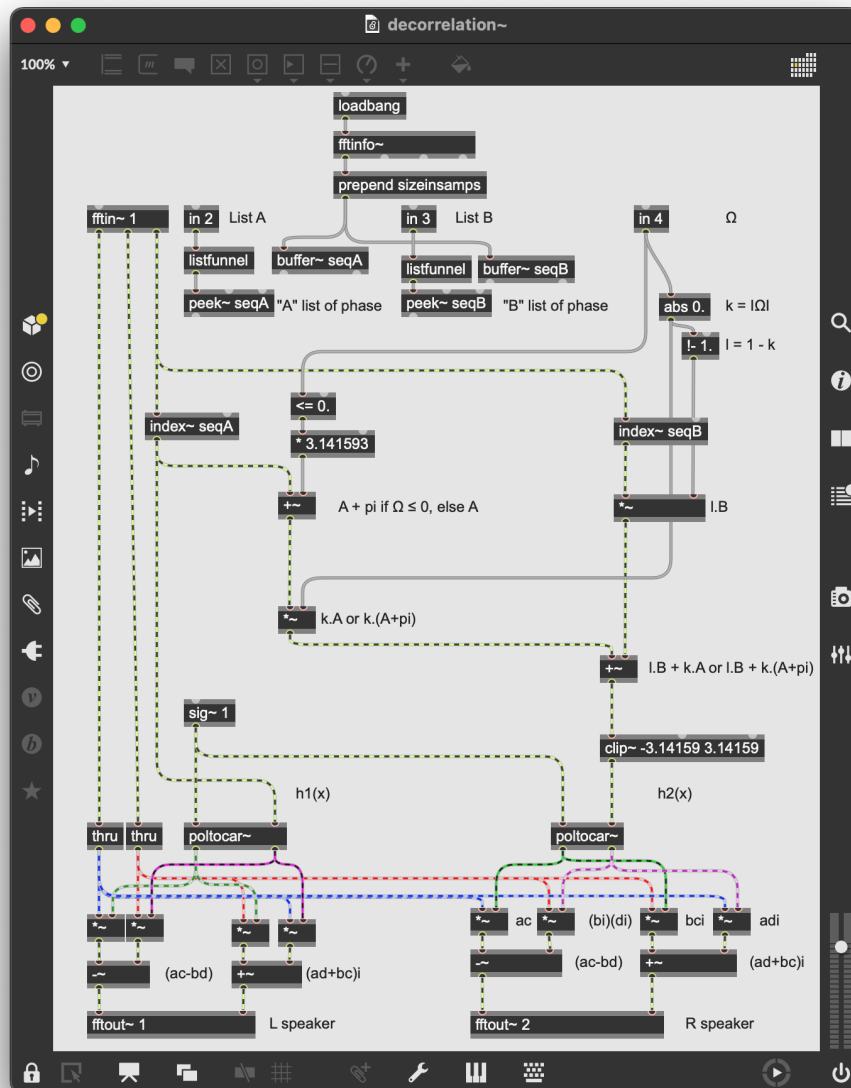


FIGURE 5.5 – Implémentation du procédé de décorrélation décrit par Kendall

5.1.3 Décorrélation dans le domaine temporel

Pour Vaggione la décorrélation est un moyen compositionnel *morphologique*, c'est-à-dire porteur de formes, notamment au niveau de la dimension spatiale. C'est dans le cadre de mixage algorithmique pour sa pièce *Octuor* (1983)¹¹ que le compositeur commence à utiliser des décalages de phases entre de multiples signaux pour générer des sensations d'ordre spatial.

11. Horacio VAGGIONE, « The Making of Octuor », dans : *Computer Music Journal* 8.2 (1984), p. 48-54, ISSN : 01489267, 15315169.

Se saisissant des travaux de Kendall et les amenant sur le terrain de la composition, il explicite cette technique dans deux articles (une version anglaise puis une traduction française). Dans ceux-ci, il fait état de ce qu'il appelle les « effets spatiaux » générés par le principe de décorrélation. Pour Vaggione la décorrélation consiste en un décalage de phase entre des signaux sans jamais s'y limiter. Le compositeur superpose de multiples « couches » afin de former ce qu'il appelle un « tissu de décorrélations ». Dans le cadre de cette présentation, Vaggione part de la définition de Kendall et nous dit que la décorrélation est :

un processus dans lequel un signal-source audio est transformé en de multiples signaux en sortie qui apparaissent comme étant visuellement différents les uns des autres, mais qui sonnent identiquement à la source

L'utilisation du terme décorrélation chez Vaggione n'est pas strictement la même que celle que l'on peut trouver en traitement du signal ou en statistique. Pour le compositeur, la décorrélation est un décalage de phase entre deux signaux. Néanmoins, le compositeur n'utilise jamais un décalage de phase seule et de façon statique : « Avant mixage, chaque fichier stéréo avait été décorrélé - ou désynchronisé, ou déphasé - à divers moments, avec des valeurs différentes ; ces décorrélations avaient été placées à des endroits spécifiques »¹².

Toutefois, nous avons vu la corrélation au sens de Kendall est la similarité entre deux signaux à un décalage temporel et de gain près. Cependant, nous comprenons que Vaggione, ne réalise jamais un simple déphasage, il les multiplie, les enregistre en stéréophonie, les superpose, voire applique du filtrage. À la fin de son article, il souligne la possibilité d'utiliser des filtres *all-pass* pour perturber les phases du signal ou *band-pass* pour modifier le timbre. Mais cela n'a pas une grande importance dans le sens où nous allons le voir, le principe du décalage de phase n'intervient jamais seul. Le compositeur se saisit de la technique de décorrélation et se l'approprie à des fins musicales. Vaggione indique un certain nombre de recommandations pour la réalisation de décorrélation. À défaut de savoir si elles sont de rigueur dans son processus de composition, elle nous indique au moins des considérations du compositeur. L'une de ces recommandations est la construction d'une polyphonie. Cela nous montre que la décorrélation chez Vaggione n'est jamais isolée, elle est toujours conçue dans une pluralité d'opérations de décorrélation.

12. VAGGIONE, « [Composing Musical Spaces By Means of Decorrelation of Audio Signals](#) », p.2.

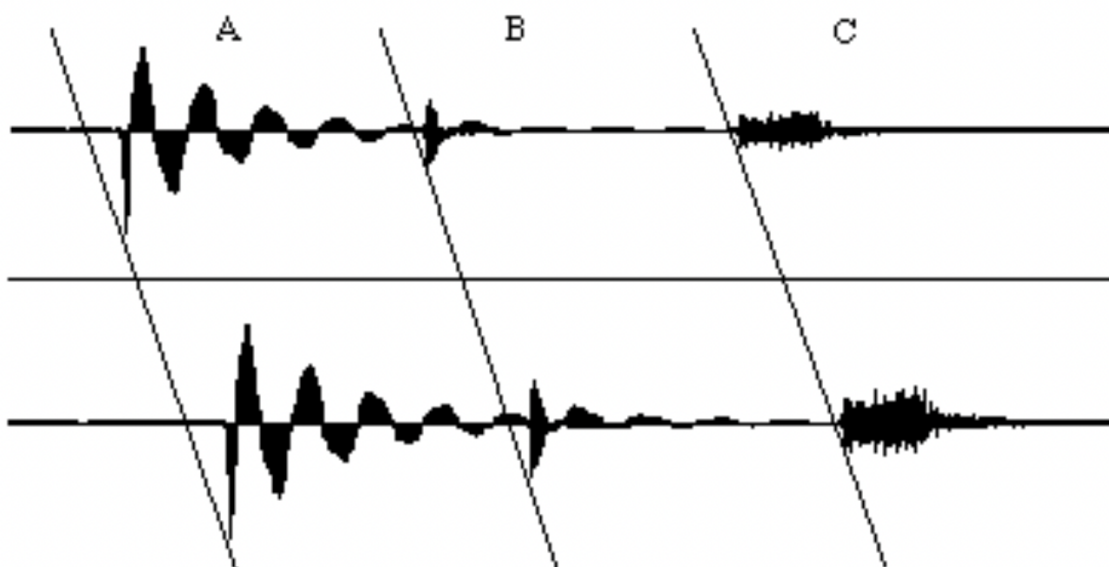


FIGURE 5.6 – Illustration du décalage temporel entre un signal et sa réplique

Crédits : Horacio VAGGIONE, « Composing Musical Spaces By Means of Decorrelation of Audio Signals », dans : *Proceedings of the DAFx Conference on Digital Audio Effects*. University of Limerick, University of Limerick : Limerick (Irlande), déc. 2001

En effet, le compositeur affirme que si ce décalage est constant, cela ne produit qu'une morphologie statique et le traitement perd ainsi son intérêt musical :

Si on a une séquence de plusieurs secondes couplée avec sa réplique décorrélée avec une seule valeur stable, on aura une image figée et le mouvement spatial ne serait pas intéressant ; pour qu'il le soit, il faudrait réaliser des décorrélations dont les paramètres soient réellement « time-varying », et que diverses lignes temporelles soient superposées.

Ainsi, pour Vaggione dans cet article, la décorrélation est nécessairement constituée d'un tissu de répliques, elle est pensée de façon polyphonique, avec des *offsets* variés et mouvants dans le micro-temps. Par ailleurs, il y a pour lui toujours un original « physiquement » séparé des répliques, pour des questions spectrales. Pour lui, la décorrélation est indissociable des caractéristiques morphologiques des sources (zone spectrale, densité, évolution temporelle). En fait, on pourrait dire que Vaggione en a fait ce qu'il avait envie d'en faire. Il s'en est saisi pour atteindre un niveau d'opérations musicales qui l'intéressait.

5.2 Décorrélation en ambisonie : un héritage de *HOALibrary*

5.2.1 L'objet `hoa.process`

Une des originalités de la bibliothèque *HOALibrary* fut de généraliser le traitement ambisonique et de l'amener sur le terrain de l'opérateur avec une approche musicale. Inspirés par l'objet `poly` de *Max*, les développeurs ont conçu `hoa.process~` permettant d'instancier un patch pour traiter un flux multicanal spécifiquement ambisonique. Différents patches à utiliser dans ce contexte implémentant les traitements bien connus des compositeurs sont disponibles dans la bibliothèque : convolution, décorrélation, delay, réverbération, granulateur, mixeur, modulation en anneau, *phaser*, gain. Néanmoins, l'objet `hoa.process~` peut instancier n'importe quel patch, ouvrant ainsi tout un pan de recherche sur le traitement spatial du son en ambisonie.

Deux modes sont disponibles : *harmonics* ou *planewaves*, en 2D et 3D. À l'instar de l'objet `this.poly~`, l'objet `hoa.thisprocess~` donne accès aux informations globales et locales à chaque instance : l'ordre de décomposition, le degré de l'harmonique et son ordre azimutal (en mode *harmonics*), le numéro du canal en mode *planewaves*, si nous sommes en mode 2d ou 3d, en mode *harmonics* ou *planewaves*, les arguments et attributs du patcher.

La logique utilisée dans les différents patches instanciés dans l'objet `hoa.process~` est d'associer des coefficients à chaque numéro d'instance (chaque harmonique ou onde plane) qui détermineront la profondeur du traitement sur chacune d'elles. Pour la plupart des traitements, des facteurs permettent de contrôler de façon globale le traitement.

5.2.2 Le patch `hoa.fx.decorrelation`

Par exemple, le patch de décorrélation a deux variables globales accessibles à l'extérieur de l'objet `hoa.2d.process` : *delay time* et *factor*, qui sont respectivement la fenêtre temporelle à l'intérieur de laquelle le traitement sera réalisé¹³ et un méta-paramètre

13. Aucune ligne à retard ne pourra excéder cette valeur.

contrôlant le nombre d’harmoniques décorréliées. Ce facteur permet de passer dans le cas d’un encodage directionnel d’une situation de focalisation à une situation de diffusion.

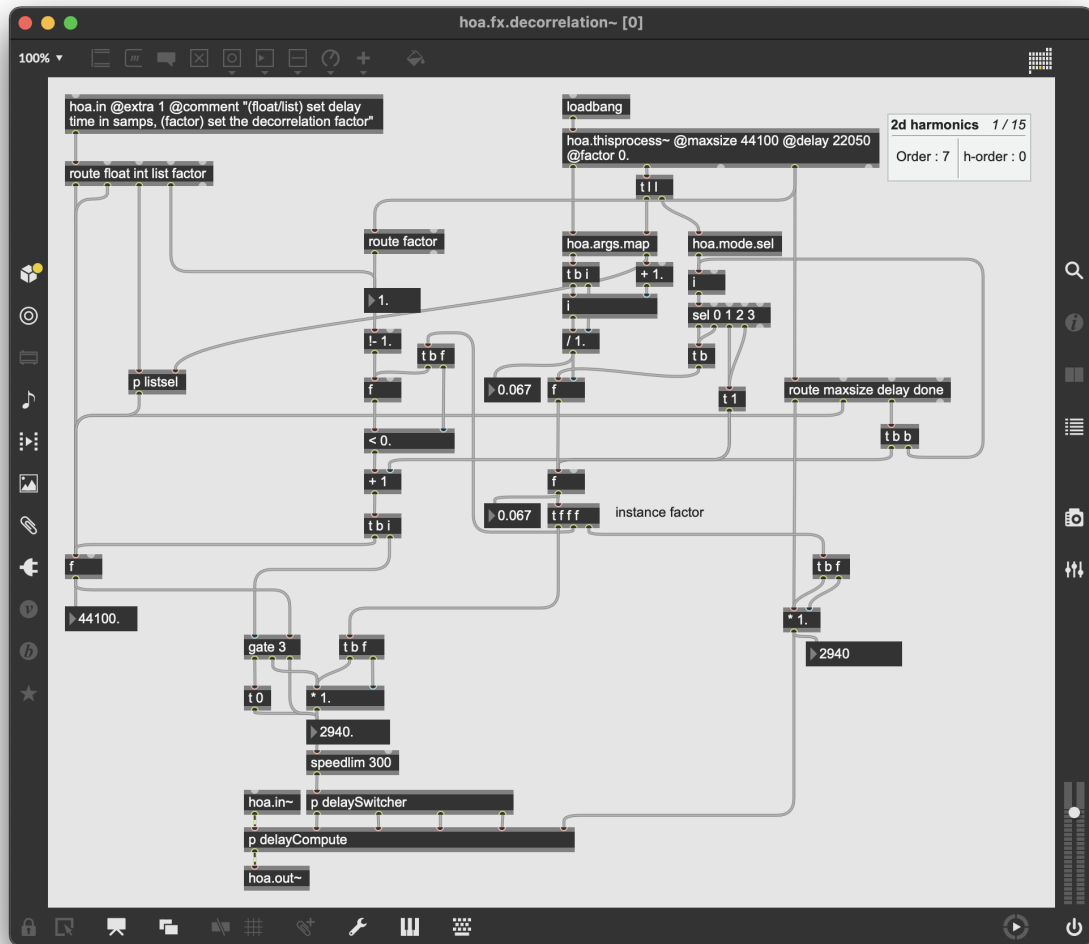


FIGURE 5.7 – Première instance du patch `hoa.fx.decorrelation~`

Dans l’objet `hoa.process~ hoa.fx.decorrelation~ 7`, le patch de décorrélation sera instancié quinze fois (en ambisonie 2D à l’ordre 7). La figure 5.7 présente la première instance. Nous pouvons voir qu’un facteur d’instance est appliqué à la fenêtre temporelle ($\frac{1}{15} \cdot 44100 = 2940$ samples).

La décorrélation dans le domaine ambisonique de *HOALibrary* a été largement saisie sur le plan musical par Anne Sèdes¹⁴, notamment dans ses pièces *Écoute/Expansion*, *Immersion* et *Ouverture*. Pour la compositrice, la décorrélation en ambisonie permet de tra-

14. Anne SÈDES, « Approche musicale de la decorrelation microtemporelle dans la bibliothèque HOA », dans : *Journées d’Informatique Musicale 2015*, sous la dir. d’université de MONTRÉAL, Université de Montréal, Montréal, Canada, mai 2015.

vailler l’opposition champ direct/champ diffus, autrement dit l’opposition entre la source ponctuelle et le son venant de partout¹⁵, et cela à partir d’une variable : le facteur de diffusion. A.Sèdes a une approche originale du traitement en ambisonie, elle profite du fait que l’encodage génère des répliques du signal source pour augmenter la granularité des traitements. En effet, la compositrice cherche à augmenter au plus possible le nombre de composantes spatiales, même si les différentes pièces sont amenées à être décodées vers des dispositifs avec un nombre de haut-parleurs inférieur à ce que le modèle prévoit. Réaliser des traitements à des ordres élevés lui permet d’appliquer les traitements sur un plus grand nombre de canaux. Nous aborderons plus largement cette question du « suréchantillonnage spatial » à des fins de traitement dans le prochain chapitre.

Les différents patches de la bibliothèque ont été transcodés dans les bibliothèques *abc.lib*, *hoa.lib* et *mm.lib*. Dans le contexte de ce transcodage et de nos travaux de recherche, nous avons notamment entamé une refonte de la décorrélation. Dans la suite de ce chapitre, nous allons nous concentrer sur ce traitement dans le domaine ambisonique.

5.3 Implémentation dans *abc.lib* et *hoa.lib*

5.3.1 Formalisme

Dans le sillon creusé par les développeurs de *HOALibrary*, la décorrélation temporelle en ambisonie consiste en un décalage temporel des différentes composantes spatiales avant l’étape de décodage. Chaque signal associé à une composante spatiale se voit attribuer une ligne à retard avec un temps de retard spécifique. L’application des lignes à retard est commandée par un méta-paramètre, le facteur de diffusion, et le temps de retard de chaque ligne est pondéré par un coefficient lié à chaque harmonique. Dans la version 2.2 de la bibliothèque, le coefficient associé à chaque harmonique de degré l et d’ordre azimutal m peut être décrit pour la 3D par :

$$C3D_{l,m} = \frac{l^2 + l + m + 1}{(N + 1)^2}, \quad (5.3)$$

15. L’intérêt de la compositrice pour le champ diffus se retrouve dans l’analyse qu’elle fait du *Prometeo* de Luigi Nono voir Anne SÈDES, « L’espace sonore du Prometeo de Luigi Nono », dans : *L’opéra éclaté - La dramaturgie musicale entre 1969 et 1984*, sous la dir. de Giordano FERRARI, L’Harmattan, 2006, p. 223-238, ISBN : 2-296-01702-9.

et pour la 2D par :

$$C2D_{l,m} = \frac{1}{2N+1} \cdot \begin{cases} 2l+1 & \text{si } m \geq 0 \\ 2l & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.4)$$

Ce coefficient est le rapport entre le numéro de l'harmonique suivant l'ACN avec le nombre total d'harmoniques utilisées pour décrire le champ sonore. Ainsi, plus l'harmonique est d'un degré et d'un ordre élevés, plus son coefficient se rapproche de 1 et le temps de retard associé sera important. Le temps de retard appliqué à chacun des signaux associés aux harmoniques est :

$$\Delta t_{l,m} = \begin{cases} C_{l,m} \cdot t_{max} & \text{si } fa > 1 - C_{l,m} \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (5.5)$$

avec t_{max} la fenêtre de décorrélation, autrement dit la durée maximum de retard que l'harmonique la plus élevée pourra recevoir, fa le facteur de diffusion compris dans l'intervalle $[0, 1]$. L'idée est que plus le facteur est élevé, plus le nombre d'harmoniques retardées augmente.

5.3.2 Raffinements : intégrations originales

Distribution du temps de retard

Rappelons qu'un de nos objectifs sur le plan musical est de trouver des stratégies compositionnelles permettant de créer de la diversité dans la manière de générer et opérer sur le champ sonore, dans un contexte de travail avec des sources sonores diffuses. La première piste que nous avons avancée est la distribution du temps de retard au sein des composantes spatiales. Dans l'approche d'*HOALibrary*, la décorrélation distribue de façon linéaire les retards entre les harmoniques. L'incrément du coefficient est constant de la première harmonique à la dernière. Quel serait le résultat d'une autre distribution ? Serait-il perceptible ? Et si oui, serait-elle musicalement utilisable ?

Nous avons dans un premier temps réalisé différentes distributions avec les fonctions mathématiques élémentaires lorsque nous explorions les enjeux de la conception d'interfaces graphiques (sous-section 3.1.2) : carré, portion de sinus, racine carrée. Constatant une diversité notable, nous avons alors utilisé un ensemble de fonctions permettant de

décrire des courbes d'accélération. Cela constituait une variété de fonctions élémentaires facilement implémentables. En générant des relations temporelles différentes entre les composantes spatiales, le choix de la fonction de distribution devient une nouvelle variable expressive.

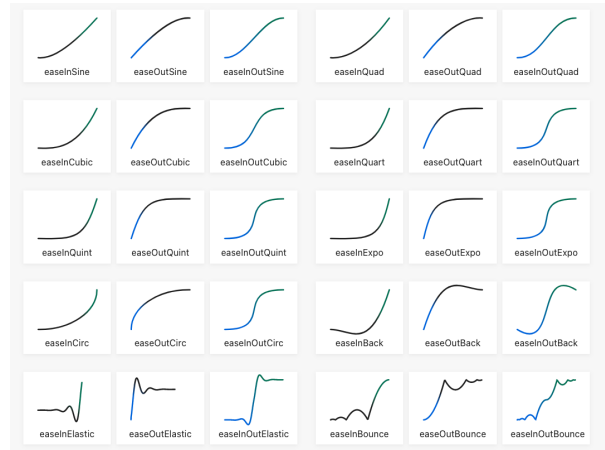


FIGURE 5.8 – Illustration des trente fonctions de transferts

Crédits : Capture d'écran de <https://easings.net/> [Consulté le 04/01/24]

Ainsi, travailler sur les calculs et processus inclus dans les moteurs sonores est une manière de définir les conditions d'interactions entre le compositeur et les attributs spatiaux. Autrement dit, concevoir des variables expressives est une façon de concevoir des interfaces. L'impact de chaque distribution diffère selon l'échelle temporelle traitée et est difficilement généralisable.

```

1 th(0, i, p) = (i+1) / p;
2 th(1, i, p) = ((i+1) / p)^2;
3 th(2, i, p) = sin(ma.PI * 0.5 * (i+1) / p);
4 th(3, i, p) = log10(1 + (i+1) / p) / log10(2);
5 th(4, i, p) = sqrt((i+1) / p);
6 th(5, i, p) = 1 - cos(ma.PI * 0.5 * (i+1) / p);
7 th(6, i, p) = (1 - cos(ma.PI * (i+1) / p)) * 0.5;

```

Listing 5.1 – extrait des fonctions de distribution dans *hoa.lib*

Comme nous pouvons le voir dans la portion de code ci-dessus présentant un extrait du code de la bibliothèque *hoa.lib*, les fonctions de distribution prennent en entrée leur numéro (entre 0 et 21), le numéro de l'harmonique (i), le nombre d'harmoniques (p) et renvoient une valeur par laquelle nous multiplions la fenêtre de décorrélation (voir la

portion de *Listing 5.2*). Par exemple, la figure 5.9 montre les coefficients associés aux neuf premières harmoniques en fonction des quatre premières fonctions de distributions.












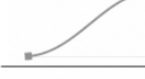

	 0	 1	 2	 3	 4	 5	 6	 7	 8
	1/9	2/9	3/9	4/9	5/9	6/9	7/9	8/9	9/9
	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55	0.67	0.78	0.89	1
	0.01	0.06	0.13	0.23	0.35	0.50	0.65	0.82	1
	0.03	0.11	0.25	0.41	0.58	0.75	0.88	0.97	1
	0.38	0.63	0.80	0.90	0.96	0.99	0.99	0.99	1

FIGURE 5.9 – Valeurs des coefficients pour quatre fonctions de distribution

Feedback

L'incursion de la réinjection ouvre les possibilités de la décorrélation d'un traitement principalement au résultat temporel à un traitement de transformation de timbre dans certaines configurations. Pour l'heure, la réinjection est faite d'une harmonique vers elle-même, néanmoins nous pouvons tout à fait imaginer utiliser un *Feedback Delay Network* (FDN) contrôlable par des matrices de réinjection. L'utilisation du *feedback* permet d'explorer des situations proches de la synthèse de Karplus-Strong pour des fenêtres temporelles de décorrélation très courtes avec un fort niveau de réinjection, un résultat pouvant se rapprocher de module de réverbération (FDN), où vers des relations complexes sur des fenêtres temporelles au-delà de la seconde. En ajoutant de la réinjection, il nous a fallu repenser les opérations réalisées par le traitement, car jusqu'alors, si le facteur de diffusion était inférieur à l'inverse du coefficient de l'harmonique, le signal passait toujours dans une ligne à retard à zéro échantillon de retard. De fait, lorsque nous utilisons de la réinjection, nous appliquons de la réinjection sur des harmoniques qui n'étaient pas retardées, ce qui engendrait de la saturation. Dans la version présentée à *Sound and Mu-*

sic Computing Conference en 2022¹⁶, nous dupliquions chacun des signaux, l'un passait au travers d'une ligne à retard et l'autre n'était pas traité. Une porte logique était commandée par le facteur de diffusion : soit nous entendions le signal passant au travers de la ligne à retard, soit nous entendions le signal sans traitement. Nous avons récemment choisi d'appliquer cette porte logique sur le taux de réinjection permettant ainsi d'éviter la duplication du signal.

```

1 fxDecorrelation(N, d, wf, fa, fd, tf) = par(i, 2*N+1, gate(d, i, 2*N+1,
   fa, tf, wf, fd))
2 with {
3   gate(d, i, N, fa, tf, wf, fd) = _ <: fdOverlappedDelay(dur(d, i, N,
   fa, tf), 262144, wf, fd) * env1(fa, i, N), _ * env1c(fa, i, N) : +;
4   //
5   fdOverlappedDelay(nsamp, nmax, freq, fdbk) = (+ : de.sdelay(nmax,
   int(ma.SR / freq), nsamp)) ~ (*(fdbk));
6   //
7   env1(fa, i, N) = (fa > ((N-i-1)/N)) : si.smooth(ba.tau2pole(0.005));
8   env1c(fa, i, N) = 1 - env1(fa, i, N);
9   //
10  //computes the ith duration of the ith delay in samples with twenty
   two possibilities of distribution
11  elemdur(d, i, p, fa, tf, ind) = (tf == ind) * (fa > (1 - x)) * d * x
   * fa
12  with {
13    x = th(ind, i, p);
14  };
15  //duration in samples computed as a sum of the 22 cases//
16  dur(d, i, p, fa, tf) = sum(ind, 22, elemdur(d, i, p, fa, tf, ind)) :
   int;
17 };

```

Listing 5.2 – Processus de décorrélation ambisonique 2D en FAUST

16. Paul GOUTMANN et Alain BONARDI, « Approaching Spatial Audio Processing by Means of Decorrelation and Ring Modulation in Ambisonics », dans : *Sound and Music Computing*, sous la dir. de Romain MICHON, Laurent POTIER et Yann ORLAREY, Université Jean Monnet, Saint-Étienne and GRAME and INRIA, Saint-Étienne, France, juin 2022.

Approche de la 3D

Comme l'évoquaient déjà Bonardi et Guillot¹⁷, nous pouvons considérer la représentation intermédiaire comme un lieu d'opérations musicales. L'idée d'augmenter l'importance du traitement à mesure que le degré augmente s'appuie sur le fait que les harmoniques ont un gain décroissant à mesure que leur degré augmente. Cela signifie que nous appliquons un traitement plus important aux harmoniques que nous percevons le moins. Par ailleurs, nous pouvons jouer avec la façon dont nous parcourons le tableau afin d'avoir des rendus différents. Ainsi, nous pouvons tout à fait considérer le coefficient indépendamment de l'ACN en définissant le coefficient par :

$$C3D_{l,m} = \frac{1}{(N+1)^2} \cdot \begin{cases} l^2 + 2(l+m) + 1 & \text{si } m \leq 0 \\ l^2 + 2(l-m) + 2 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.6)$$

Ainsi, la distribution des traitements partirait des harmoniques aux ordres azimutaux extrêmes pour aller vers l'harmonique d'ordre 0 pour chaque degré. Nous pouvons aussi parcourir le tableau à l'inverse, partir de l'ordre azimutal 0 et aller vers les extrêmes pour chaque degré. Ainsi :

$$C3D_{l,m} = \frac{1}{(N+1)^2} \cdot \begin{cases} l^2 - 2m & \text{si } m < 0 \\ l^2 + 2m + 1 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.7)$$

Le changement d'affectation des coefficients de traitement impact perceptiblement le résultat sonore, créant ainsi une variable potentiellement expressive sur le plan musical. Dans la dernière version de la décorrélation, nous avons implémenté les trois modes de parcours de l'arbre. Ces variations, conjuguées aux fonctions de distributions, constituent une nouvelle interface avec le traitement spatial, intégrant l'idée de la modularité : suivant les recherches des compositeurs, une configuration sera peut-être plus adaptée qu'une autre.

17. Alain BONARDI et Pierre GUILLOT, « Concevoir des traitements ambisoniques en 2D et en 3D : l'exemple de Pianotronics 2 », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2015*, sous la dir. d'université de MONTRÉAL, université de Montréal, Montréal, Canada, mai 2015, p. 8.

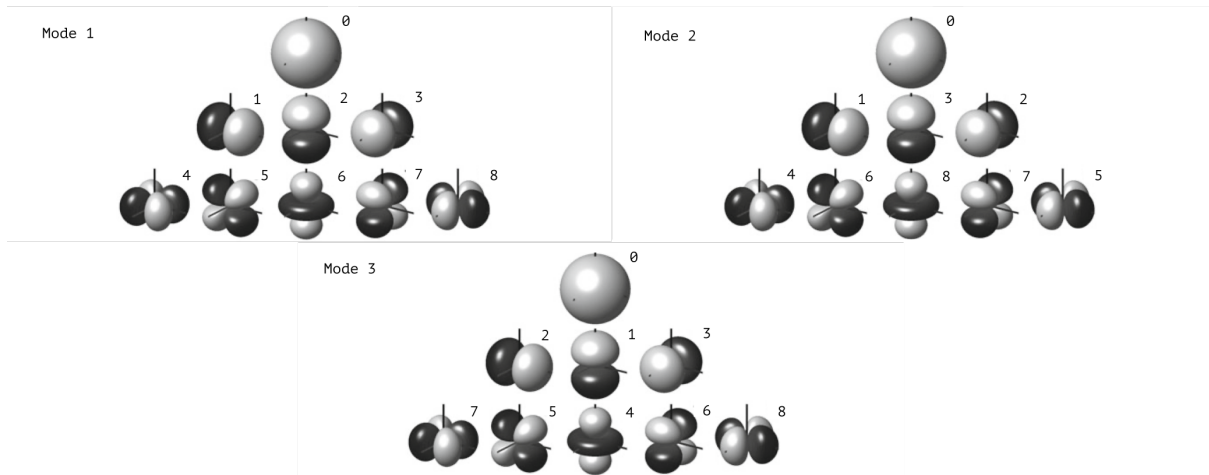


FIGURE 5.10 – Trois modes de distribution des traitements en 3D

5.3.3 Points critiques

Mode *SYN*

Comme nous l'avons précisé en début de chapitre, il existe deux modes d'application dans *hoa.lib* : FX et SYN. Le mode FX applique le traitement aux harmoniques circulaires ou sphériques après encodage ambisonique. L'idée de ce mode est de contrôler la profondeur du traitement sur le champ sonore, passant d'un champ sonore avec des sources potentiellement focalisées à un champ sonore diffus. L'idée du mode SYN est de partir d'une source mono, et de synthétiser directement un champ sonore diffus en envoyant des signaux directement au décodeur. Cependant, nous avons montré que lorsque le facteur est égal à zéro, le même signal est envoyé à toutes les entrées du décodeur, comme si un champ sonore localisé avait été synthétisé (la source est localisée dans une direction : 45°)¹⁸. Par exemple, dans le cas du premier ordre, si le même signal est envoyé à toutes les entrées d'un décodeur, cela se rapproche de l'encodage d'une source à 45° (lorsque l'angle de la source est de 45° , la sortie de $Y_{-1,1}$ et $Y_{1,1}$ est de 0,707) et la représentation intermédiaire de l'espace (fonction circulaire) est illustrée dans la figure 5.11.

Par conséquent, nous avons décidé de supprimer toutes les harmoniques sauf la première lorsque le facteur est égal à 0. L'objectif était de créer un «grand» mono lorsque le facteur est égal à zéro, et de passer progressivement à un champ sonore diffus. Nous appliquons une compensation de gain et nous introduisons progressivement les autres

18. GOUTMANN et BONARDI, « [Approaching Spatial Audio Processing by Means of Decorrelation and Ring Modulation in Ambisonics](#) ».

harmoniques lorsque le facteur augmente dans l'intervalle $[0, \frac{1}{n}]$. La figure 5.12 montre la compensation de gain du Y_0 par ordre ambisonique (jusqu'à 7) en fonction du facteur pour la 2D.

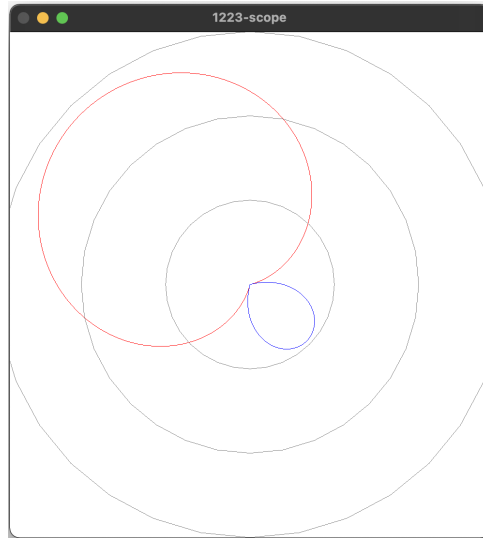


FIGURE 5.11 – Représentation intermédiaire de l'espace avec Y_0 , $Y_{-1,1}$ et $Y_{1,1}$

Cette compensation a été formulée de façon empirique en cherchant à avoir une sensation de continuité entre la situation durant laquelle seule l'harmonique Y_0 est entendue et celle où les autres harmoniques commencent à s'entendre. Une adaptation pour la version 3D de la décorrélation en mode SYN doit être trouvée, pour l'instant, nous utilisons un facteur de compensation qui n'est pas complètement satisfaisant.

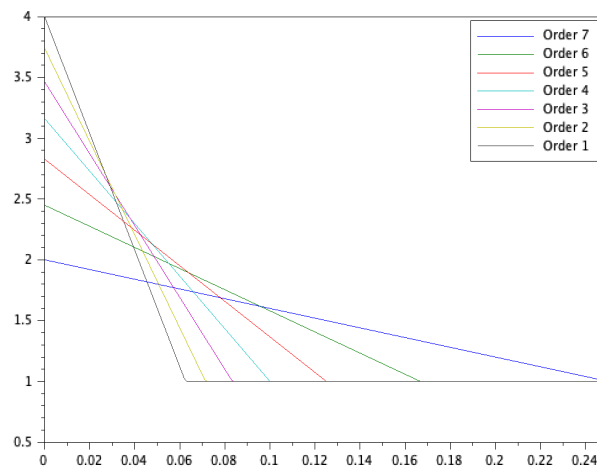


FIGURE 5.12 – Compensation du gain par ordre ambisonique en fonction du facteur

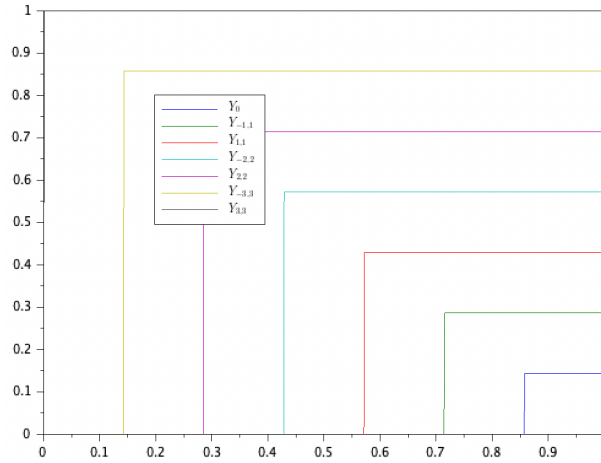


FIGURE 5.13 – Coefficient de traitement par harmonique en fonction du facteur

Problème de l'escalier

Lorsque le facteur module et que les seuils de déclenchement des retards sont franchis, les lignes à retard passent de 0 à un temps de retard qui leur est associé. Ce saut est perceptible et lorsque nous faisons croître le facteur entre 0 et 1, le rendu perçu est une entrée successive de lignes à retard (voir figure 5.13). Afin de rendre la réponse de ce traitement plus progressive, nous avons choisi d'introduire d'une part le facteur dans le calcul de la durée du retard afin de moduler le retard et d'autre part de réduire l'écart entre les retards à l'entrée de chaque retard (voir figure 5.14). Le calcul du temps de retard pour la n^{eme} harmonique peut s'écrire :

$$delay_n = delay.th_i(coef_n).fa. \begin{cases} 1 & \text{si } fa > 1 - coef_n \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.8)$$

avec $delay$ la fenêtre temporelle de décorrélation, th_i la fonction de distribution choisie parmi les vingt-deux disponibles, $coef_n$ le coefficient de l'harmonique ($\frac{n}{P}$ avec n le numéro de l'harmonique et P le nombre total d'harmoniques), fa le facteur de décorrélation. Ce choix implique l'utilisation d'un *overlapped delay* pour éviter les discontinuités lors du changement de temps de retard. Nous pouvons aussi retourner l'approche et donner le maximum de traitement aux harmoniques aux ordres et degrés les plus petits tout en ne l'appliquant que tardivement (voir figure 5.15).

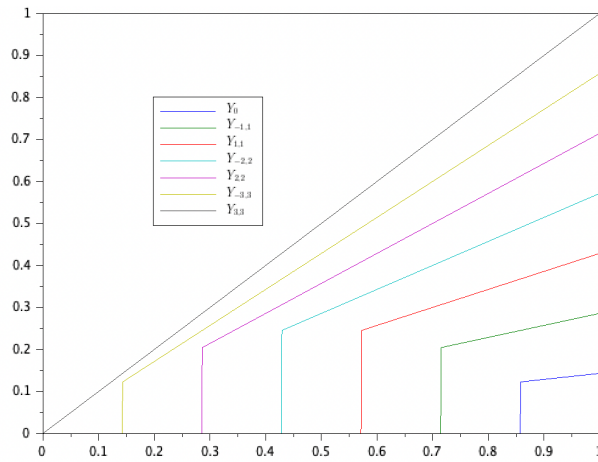


FIGURE 5.14 – Coefficient de traitement par harmonique en fonction du facteur (facteur dans l'équation)

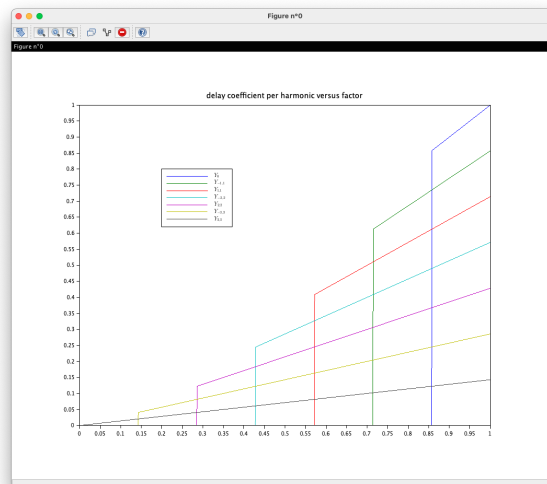


FIGURE 5.15 – Coefficient de traitement par harmonique en fonction du facteur (inversion de l'approche)

Décorrélation : vers une généralisation

Maintenant que nous avons présenté le modèle ambisonique, la décorrélation dans ce contexte et défini les raffinements que nous avons proposés pour son implémentation en FAUST, nous pouvons nous intéresser aux différentes extensions que nous avons expérimentées. Dans ce chapitre, nous présentons les extensions de la décorrélation et des pratiques liées au traitement spatial du son en ambisonie que nous avons mis en œuvre dans des projets de composition et de recherche.

Ainsi, nous expliciterons les implications musicales de la conception d'une partie de nos représentations opératoires pour le traitement spatial du son : nos moteurs sonores. Ce chapitre doit être pensé en miroir avec les chapitres 8 et 9. En effet, lorsque nous regardons les implications musicales depuis l'analyse du moteur sonore ici, nous regarderons les implications techniques depuis une approche compositionnelle dans les chapitres 8 et 9. D'autre part, dans ce chapitre nous nous interrogerons sur les conditions de possibilités d'une généralisation de ces approches locales. Si elles le sont, qu'est-ce que leur généralisation impliquerait dans l'écriture du code et sur les choix musicaux ? Pour finir, nous proposerons des outils d'analyse multicanale pour quantifier les transformations impliquées par ces extensions.

6.1 Extensions de l'approche

Dans le cadre de cette thèse, nous avons composé trois pièces électroacoustiques et contribué à plusieurs projets de recherche et création. Ainsi, nous avons développé des

manières de faire des traitements en ambisonie et conçu des extensions au principe de décorrélation. Dans cette section, nous présentons cinq « briques » qui nous ont semblé les plus pertinentes sur le plan musical. Notre objectif est ici de comprendre ce qui relève déjà d'une pensée musicale dans le processus de conception de nos représentations opératoires à l'échelle du traitement du signal.

6.1.1 Surencodage spatial

Le théorème de Shannon-Nyquist nous dit qu'un signal continu peut être intégralement décrit en prélevant des échantillons à intervalles réguliers à une fréquence au moins deux fois supérieure à la fréquence de la composante la plus élevée du signal¹. Ainsi, pour échantillonner un signal audio transportant des informations sur le spectre audible, une fréquence d'échantillonnage supérieure à 40kHz suffirait *a priori*. Pour autant, nous savons que dans la pratique de l'audio numérique, les techniques de suréchantillonnage peuvent notamment être utilisées pour simplifier la réalisation de filtre *anti-aliasing*. De façon analogue, la théorie ambisonique demande d'utiliser un nombre de HP au moins égal au nombre d'harmoniques spatiales. De fait, le système de restitution cible contraint *a priori* l'ordre ambisonique employé lors de l'étape d'encodage des sources. Toutefois, nous verrons dans cette section qu'il peut être pertinent dans une approche musicale du traitement en ambisonie d'encoder le champ sonore à des ordres supérieurs à ceux que le système de restitution cible permettrait de décoder. Nous parlerons alors de « surencodage spatial » pour pointer vers cette pratique qui consiste à utiliser plus d'harmoniques que ce que le modèle prévoit pour une restitution optimale sur le dispositif de HP cible.

Dans le cas d'une synthèse ambisonique, il peut être intéressant d'opérer sur un flux ambisonique à un ordre plus élevé que ce que le système de restitution cible supposerait. En effet, lorsque nous réalisons des traitements sur les signaux ambisoniques, le nombre d'harmoniques changera le nombre de signaux traités et la profondeur du traitement sur chacun d'eux. Quand bien même le surencodage spatial n'augmente pas la précision de la localisation des sources encodées et semble contreproductif pour optimiser la charge *Central Processing Unit* (CPU), surencoder spatialement présente au moins trois avan-

1. « If a function $f(t)$ contains no frequencies higher than W cps, it is completely determined by giving its ordinates at a series of points spaced $1/2W$ seconds apart. » Claude Elwood SHANNON, « Communication in the Presence of Noise », dans : *Proceedings of the IRE* 37.1 (1949), p. 10-21, p.11.

tages : (1) laisser la possibilité de décoder pour des dispositifs plus denses que ceux sur lesquels les compositions ont été composées (2) réaliser des traitements sur un nombre plus important de signaux (3) de fait, dans un contexte de traitement musical, cela permet d'enrichir la polyphonie spatiale.

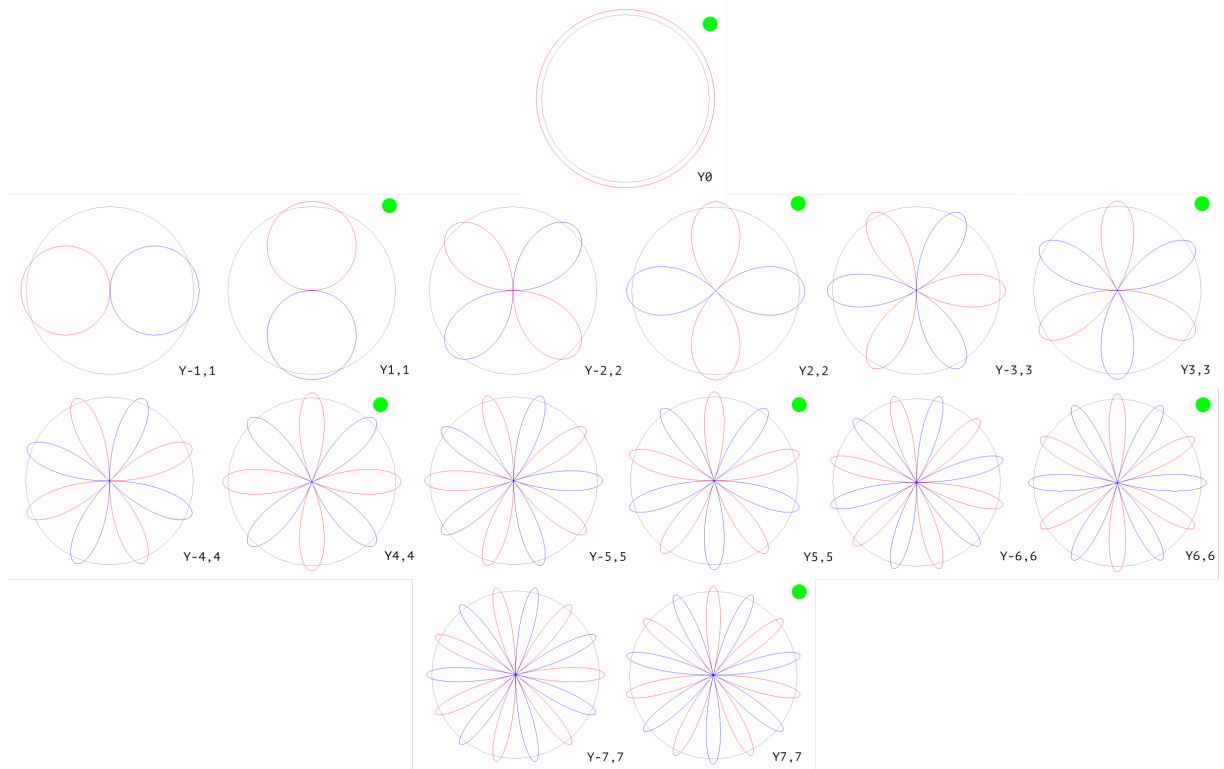


FIGURE 6.1 – Tracé des quinze premières fonctions circulaires $Y_{m,n}$

Afin de comprendre l'intérêt du deuxième point, prenons un exemple simple. Imaginons un encodage directionnel d'un Dirac² à l'ordre 1 en 2D à 0° d'azimut, appliquons une décorrélation avec un facteur de 1 et une fenêtre de décorrélation de trois secondes, puis nous décodons pour quatre HP (0° , 90° , 180° , 225°). La première harmonique (Y_0) aura une seconde de retard, la deuxième ($Y_{-1,1}$), deux secondes et la troisième ($Y_{1,1}$) trois secondes. Dans ce cas précis, seules les première et troisième harmoniques contribuent à la description du champ sonore³. Si nous analysons ce qui se passe sur le HP à 0° ,

2. La fonction Dirac vaut l'infini quand x vaut 0 et 0 en tout autre valeur de x .

3. Le gain d'une harmonique circulaire pour l'encodage d'une source en 2D est la valeur de la fonction circulaire dans la direction d'encodage. Pour l'encodage d'une source située à 0° , $Y_0 = \cos(0.\theta)$, $Y_{-1,1} = \sin(1.\theta)$, $Y_{1,1} = \cos(1.\theta)$, donc la fonction correspondant à l'harmonique 2 ($\sin(0)$) vaut 0, et la représentation intermédiaire du champ sonore correspondra à la fonction combinant la première et la troisième harmonique. Son tracé ressemblera à un patron polaire de microphone cardioïde pointant vers 0° .

nous entendrons une impulsion au bout d'une seconde, puis une autre au bout de trois secondes.

Maintenant, prenons la même situation, nous encodons et traitons la source à l'ordre 7. Les harmoniques d'ordre azimutal négatif ($Y_{-1,1}, Y_{-2,2}, \text{ etc.}$) ne contribueront pas à la description du champ sonore. La première impulsion qui correspondra à Y_0 , arrivera à 0,2 seconde, la seconde à $Y_{1,1}$ à 0,6 seconde, $Y_{2,2}$ à 1 seconde, $Y_{3,3}$ à 1,4 seconde, $Y_{4,4}$ à 1,8 seconde, $Y_{5,5}$ à 2,2 secondes, $Y_{6,6}$ à 2,6 secondes et $Y_{7,7}$ à 3 secondes. La figure 6.1 présente le tracé des harmoniques utilisées pour un encodage à l'ordre 7 en 2D, les harmoniques avec un point vert sont celles en jeu pour une source encodée à 0° . Cet exemple nous permet par ailleurs de souligner que la position de la source impacte nécessairement le résultat du traitement. En effet, le nombre d'harmoniques utilisées pour décrire le champ sonore et leur gain évoluent en fonction de la position. Donc, pour maximiser l'importance d'un traitement, il peut être intéressant de positionner une source dans une direction qui nécessite plus d'harmoniques.

Les harmoniques permettant de décrire le champ sonore dans des directions sans HP pour le restituer ne seront pas entendues alors qu'elles impactent la profondeur du traitement appliqué à toutes les harmoniques. Rappelons que la profondeur des traitements est pondérée par un coefficient attribué à chaque harmonique et correspondant au rapport entre le numéro de l'harmonique avec le nombre total d'harmoniques. Nous pourrions imaginer une optimisation qui tendrait à ne prendre en compte, pour l'encodage et le calcul de la distribution du traitement, uniquement les harmoniques qui pourraient être entendues sur un système de restitution cible. L'inconvénient d'une telle optimisation serait qu'elle rendrait le flux ambisonique dépendant d'un système de restitution particulier. Or, l'avantage des opérations musicales dans le domaine ambisonique est justement la dissociation entre les traitements et le système de restitution.

6.1.2 Décorrélation DHC-DOP

Dans cette section, nous présentons une approche du traitement spatial réalisé à la fois dans le domaine des harmoniques circulaires (DHC) et le domaine des ondes planes (DOP) à partir d'une situation concrète. Entre 2022 et 2023, nous avons participé en tant que conseiller technique et artistique au projet de recherche *LICHENS* dirigé par

Diane Schuh (doctorante au CICM). Ce projet était centré sur la culture de la symbiose dans une communauté constituée autour de l'entretien du jardin de la MSH PN. Nous avons pour objectif de générer des dynamiques symbiotiques en partant de l'attention, de l'écoute et de l'autonomie poétique des participants⁴.

Dans ce contexte, plusieurs ateliers ont été organisés tant au jardin qu'au studio du laboratoire durant lesquels nous avons réalisé des captations sonores au *format B* afin d'effectuer des transformations avec les outils d'*abc.lib*. Les ateliers en studio mettaient en jeu deux participants contrôlant des traitements au moyen de capteurs musculaires électromyogramme (EMG). Pour capter le signal EMG, nous utilisons le dispositif développé dans le cadre de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) *Body Brain Digital Musical Instruments* (BBDMI)⁵ et constitué d'une carte électronique⁶ et de six électrodes nous permettant d'avoir deux entrées indépendantes du potentiel électrique musculaire⁷.

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 4 quatre composantes spatiales sont en jeu au *format B* (W, X, Y, Z). De fait, lorsque nous appliquons des traitements dans le domaine des harmoniques sphériques, seuls quatre processus de traitement s'effectuent en parallèle. Le rendu sonore n'ayant pas la granularité satisfaisante pour nos attentes musicales, nous avons dû trouver des stratégies pour atteindre le rendu souhaité. Nous

4. Le projet a regroupé des jardiniers de l'Établissement et Service d'Aide par le Travail (ESAT) *Vivre autrement*, des écoliers de Saint-Denis, l'intervention de Simon Blanckaert paysagiste conseiller technique sur la partie paysage, David Fierro doctorant CICM et nous-même en tant que conseiller technique et artistique.

5. BBDMI est un projet ANR porté par la MSH PN et dirigé par Anne Sèdes et Atau Tanaka interrogeant trois axes : (1) Faire de la musique à partir des signaux électriques du muscle et du cerveau en s'appuyant des technologies EMG et Électro-Encéphalogramme (EEG) (2) Produire des prototypes instrumentaux de manière ouverte (*open software* et *open hardware*) et les documenter dans le cadre des sciences ouvertes (3) Développer une méthodologie centrée utilisateur incluant aussi bien les musiciens expérimentaux que les praticiens de la pédagogie musicale, les publics empêchés par le moyen de la pratique et de la médiation artistique. L'équipe est constituée de Alain Bonardi, Gabriel Delattre, Francesco Di Maggio, David Fierro, Martin Klang, Anne Sèdes, Atau Tanaka, Stephen Whitmarsh. <https://anr.fr/Project-ANR-21-CE38-0018> Atau TANAKA et al., « Brain-Body Digital Musical Instrument Work-in-Progress », dans : *ISEA 2023 - 28th International Symposium on Electronic Art*, Le Cube Garges and Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs and Forum des Images, Paris, France, mai 2023.

6. Carte EAVI développée par Martin Klang de la compagnie *Rebel Technology* <https://www.rebeltech.org> Balandino DI DONATO et al., « EAVI EMG board », dans : *New Interfaces for Musical Expression*, Porto Alegre, Brazil : UFRGS, juin 2019.

7. Chaque entrée est constituée de 3 électrodes, deux pour capter la différence de potentiel et une correspondante à la terre.

avons choisi de faire les traitements dans le DOP, en l'occurrence sur les signaux envoyés aux HP. Ce choix a deux inconvénients majeurs :

1. Appliquer des traitements dans le DOP revient à appliquer des traitements dans des directions données. Dans un premier temps, nous avons réalisé les traitements sur les signaux en suivant l'ordre des HP (voir la figure 6.2 haut), seulement cela induisait une régularité qui ne nous intéressait pas musicalement. Afin d'éviter une distribution du traitement suivant l'ordre des HP, nous avons distribué les retards de façon arbitraire parmi les HP (voir figure 6.2 bas).
2. Le traitement devient dépendant du système de diffusion. En effet, lorsque nous faisons des traitements sur les signaux envoyés aux HP, le résultat sera dépendant du système de diffusion. Afin de garder la flexibilité que procure le traitement dans le domaine ambisonique, une stratégie possible est de faire l'opération de projection du domaine sphérique vers le DOP, faire le traitement dans le DOP tout en brouillant les pistes quant à la régularité spatiale du traitement puis encoder de nouveau en ambisonie le résultat.

Dans la dernière version du patch utilisé pour le projet *LICHENS* les deux traitements spatiaux sont réalisés dans le DOP en distribuant les traitements de façon arbitraire parmi les onde plane (OP). Pour chacun des deux traitements, une variable est accessible pour les participants des ateliers : le facteur.

Concrètement, les ateliers se divisent en trois phases (pouvant s'étaler sur plusieurs séances). Une première phase qui consiste à réaliser des enregistrements au jardin de la MSH PN dans le cadre d'un atelier sur l'attention - autant sur le plan du paysage que de l'écoute -. Une deuxième phase qui consiste à écouter et à comparer le rapport à l'écoute *in situ* et l'écoute des enregistrements en studio. Une troisième phase qui consiste en une initiation au traitement électroacoustique durant laquelle deux participants sont équipés avec les capteurs EMG pour manipuler les traitements.

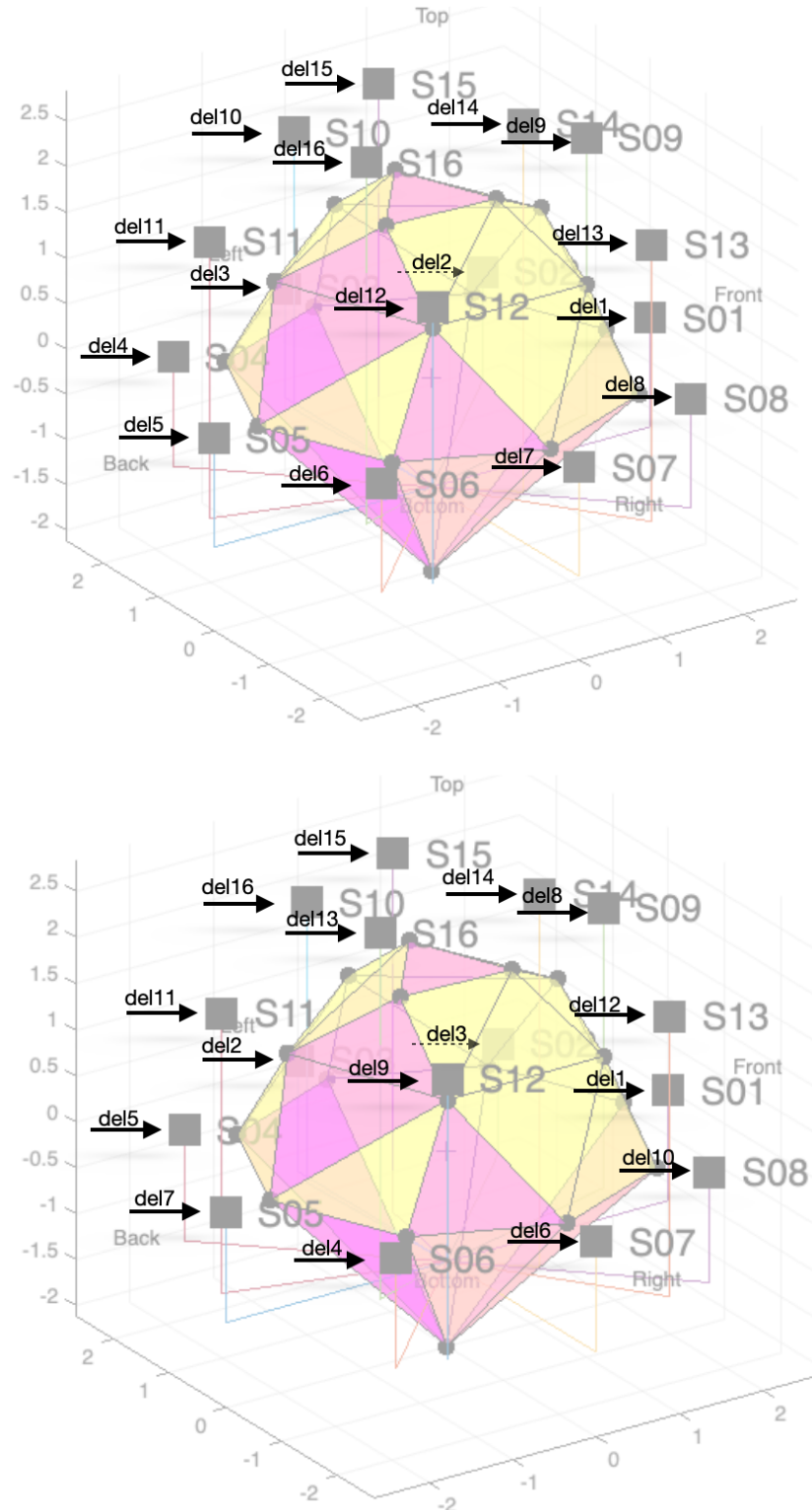


FIGURE 6.2 – Distribution des retards dans les signaux envoyés aux HP (a) par numéro du canal (b) ordre arbitrairement choisi

Nous avons prolongé cette exploration du traitement dans le DOP en appliquant un étage de décorrélation dans le DHC et un autre dans le DOP sur le même flux. Nos essais ont été réalisés avec les objets `hoa.2d.projector~` et `hoa.2d.recomposer~`, car ils n'ont pas encore été transcodés en FAUST. Ces objets permettent respectivement de passer du DHC au DOP et du DOP au DHC. Nous pouvons considérer l'étape de projection dans le domaine des ondes planes comme un décodage régulier pour un système de haut-parleur virtuel (HPV), puis l'étape de recomposition dans le domaine circulaire d'une projection en ambisonie de chacun ces HPV. Nous avons alors un facteur de diffusion sur l'intervalle $[0, 2]$, contrôlant le facteur diffusion de l'étage de traitement sur les harmoniques entre 0 et 1, puis celui de l'étage des OP entre 1 et 2. Le résultat perceptif est notable et semble augmenter la diffusion⁸ (voir figure 6.3).

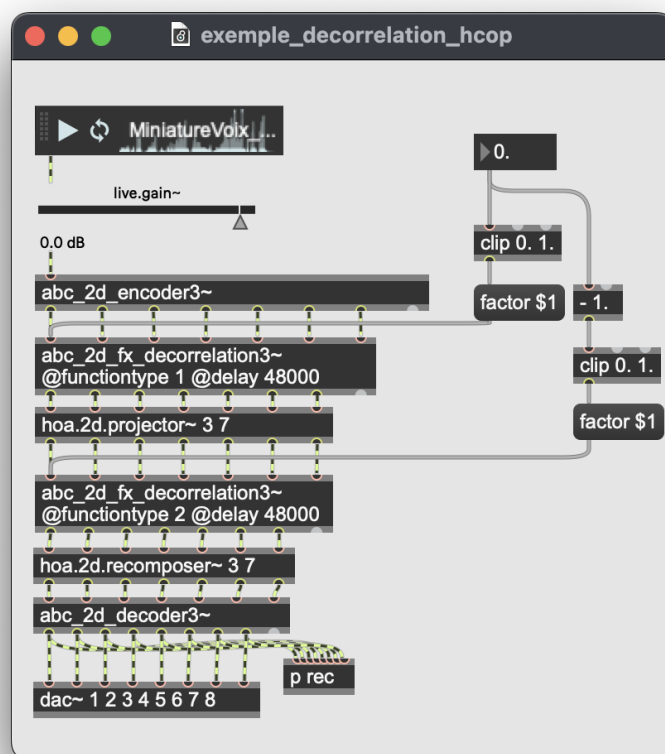


FIGURE 6.3 – Exemple d'une décorrélation en série DHC-DOP

8. Nous verrons en 6.3 l'analyse du résultat avec les descripteurs spatiaux.

6.1.3 Multidécorrélation - Méta-décorrélation - Strate

Nous avons vu en 5.1.3 que H.Vaggione superposait les « couches » de décorrélation afin de composer ce que le compositeur appelle des tissus de décorrélation. Inspiré par cette idée et cherchant à produire un résultat perceptif à la granularité dense, nous avons expérimenté des situations musicales avec plusieurs modules de décorrélation sur un même flux ambisonique. Nous faisons alors l'hypothèse que l'ajout de multiples modules de décorrélation avec des réglages sensiblement différents nous permettrait d'atteindre de nouvelles qualités spatiales composites.

L'enjeu est alors de concevoir un traitement avec des variables locales à chaque module et globales pour l'ensemble du moteur sonore. Ces choix dépendent du traitement bien sûr, mais surtout des objectifs musicaux. En effet, ils détermineront la façon dont le traitement opérera et la façon dont nous pourrions interagir avec lui. Une fois de plus, cela nous permet de souligner les enjeux musicaux contenus dans la conception de nos interfaces avec le sonore.

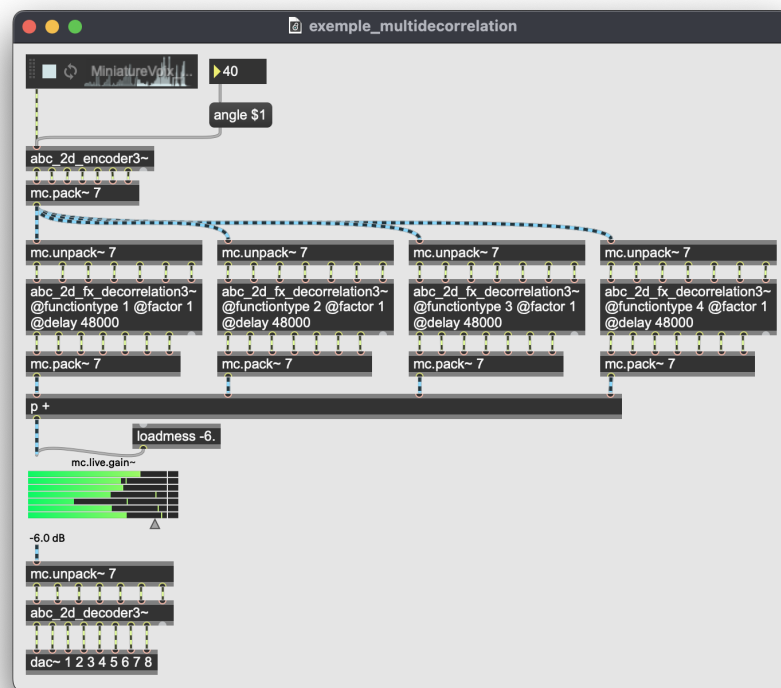


FIGURE 6.4 – Exemple de multidécorrélation avec quatre modules

Par exemple, dans la figure 6.4 un encodeur *High Order Ambisonics* (HOA) 2D envoie

les sept signaux associés aux harmoniques circulaires vers quatre modules de décorrélation ayant tous sept entrées et sept sorties. Ces quatre modules ont un facteur de diffusion au maximum, une même fenêtre de décorrélation, mais des types de distribution de retards différents. Une fois les sept signaux ambisoniques fusionnés et envoyés vers un seul décodeur 2D, la multiplicité des lignes à retards engendre une complexification du résultat largement perceptible. Ce choix d'application de valeurs locale ou globale aux variables est arbitraire. En effet, le changement local de fenêtre de décorrélation, de *feedback* ou même de facteur aurait aussi un impact sensible, néanmoins la variation du type de distribution semble être la plus adaptée à notre objectif sonore : augmenter la granularité du traitement, la polyphonie spatiale, et trouver des qualités spatiales composites.

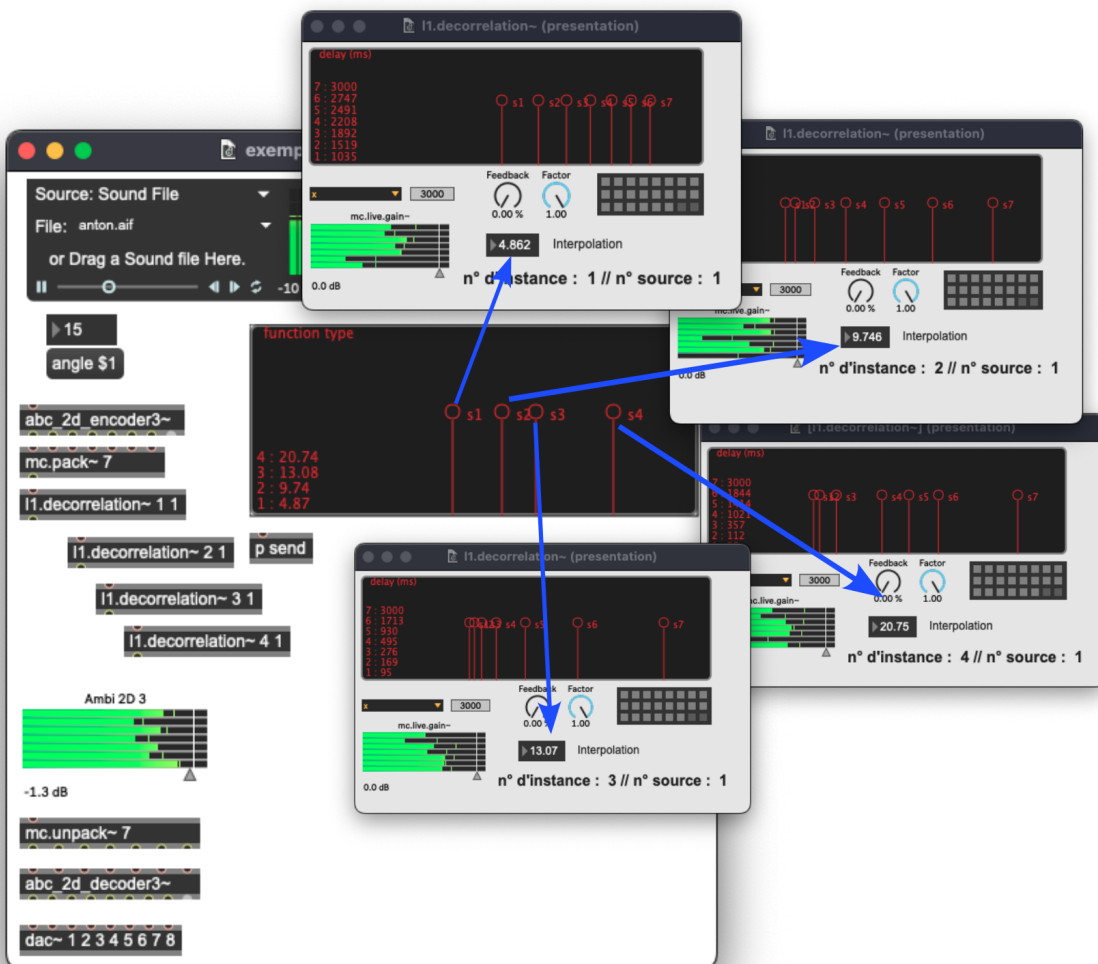


FIGURE 6.5 – Exemple de métadécorrélation avec quatre modules

Le fait d'instancier plusieurs fois le même traitement sur un même flux nous a conduits à expérimenter différentes distributions des variables pour chaque instance, ce qui a un impact perceptif utilisable musicalement. Seulement, ne pourrions-nous pas trouver un moyen de contrôler cela à un plus haut niveau ? Repartant de l'idée que le type de distribution des traitements au sein des canaux ambisoniques nous a permis d'ajouter une variable sensible à la décorrélation, ne pouvons-nous pas appliquer une logique analogue à la distribution des variables au sein des modules de décorrélation ? Ainsi, nous avons essayé de contrôler les types de distribution des différentes instances à partir d'un type de distribution de plus haut niveau.

Nous appelons alors une instance de décorrélation « de contrôle » dont certaines variables définiraient de façon globale les valeurs des modules contrôlés, alors que d'autres variables permettraient de définir un type de distribution au sein des modules. C'est ce que nous appelons ici la métadécorrélation, une situation dans laquelle le type de distribution d'un module de décorrélation contrôle le type de distribution de chacun module. Nous pensons à ce niveau comme une décorrélation de contrôle pour déphaser des modules de décorrélation entre eux. Nous parlons de métadécorrélation, néanmoins, nous n'utilisons que l'interface graphique permettant de contrôler le type de distribution des autres modules parmi les vingt-deux types de distributions. En utilisant l'objet `preset` et `patterstorage` ainsi qu'un script dans `jsui`, nous faisons des interpolations entre chaque type de distribution pour chacun des n modules de décorrélation. En l'occurrence, chaque ligne de la métadécorrélation ne correspond plus à une ligne à retard qui appliquera un retard à un flux, mais à un type de distribution d'un module de décorrélation.

Lorsque nous implémentions une couche de VBAP pour le décodeur irrégulier de *hoa.lib*, la jeune compositrice italienne Giulia Francavilla était en résidence de création dans les studios du CICM. Lors de cette résidence, la compositrice utilisait les bibliothèques *hoa.lib* et *abc.lib*, qui n'ont pas de décodeur ambisonique 3D générique. De fait, pour composer les sensations d'élévation, la compositrice réalisait des interpolations avec des opérations de mixage entre les différentes couronnes du dôme de seize HP.

Inspiré par ses essais et des travaux avec notre collègue Adrien Zanni doctorant au CICM, nous avons souhaité expérimenter une approche du traitement spatial en 3D comme une superposition de plans 2D. La projection de sources sonores ponctuelles avec

des algorithmes utilisant différents plans de HP est bien connue⁹. Toutefois, nous souhaitons explorer les possibilités musicales du traitement 3D à partir de cette contrainte de superposition. Notre première investigation consista à utiliser autant de chaînes de traitement-décodage que de couronnes de HP dans le dispositif. Ainsi, chaque couronne détermine un plan de traitement dans lequel nos sources peuvent être envoyées. Avec cette logique, le choix de la couronne vers laquelle les signaux associés à la source sont envoyés permet de jouer avec son élévation. C'est ce que nous appellerons *Layer Based Ambisonics Processes* (LBAMP).

L'idée est d'utiliser un encodeur, d'envoyer les harmoniques circulaires vers autant de chaînes de traitement que de strates de HP, puis faire des chaînes de traitement et décodeurs 2D pour chaque strate¹⁰. Le patch présenté en figure 6.6 montre une implémentation de ce processus. Nous souhaitons ainsi profiter de variables aussi bien locales que globales. L'idée était de voir dans quelle mesure les relations entre les différentes strates pourraient nous amener à construire des morphologies spatiales intéressantes.

Un avantage de cette technique est la grande facilité pour la réduction 2D : comme les canaux ambisoniques sont sommables, si différents traitements ont été composés pour chacune des strates, les signaux de chaque strate peuvent être sommés puis envoyés vers un même décodeur avec une adaptation de gain. Dans sa mise en œuvre, nous avons dans un premier temps utilisé une loi sinus pour calculer le gain des signaux ambisoniques envoyés vers chaque chaîne de traitement¹¹. La figure 6.7 montre les facteurs de gain utilisés pour le flux ambisonique envoyé au décodeur de la première couronne (en bleu), de la deuxième (en vert) et de la troisième (en rouge) en fonction de l'élévation. Quand l'élévation de la source est proche de zéro, seule la première chaîne de traitement-décodeur (première couronne) reçoit le flux ambisonique, si l'élévation de la source augmente progressivement, la deuxième chaîne de traitement-décodeur (deuxième couronne) reçoit le flux ambisonique, et ainsi de suite.

Dans un deuxième temps, nous avons associé des traitements à des plans de HP qui ne

9. Algorithme implémenté dans le *spat*, *Holophonix* et documenté par Ivica BUKVIC, « 3D Time-Based Aural Data Representation Using D4 Library's Layer Based Amplitude Panning Algorithm », dans : *International Conference on Auditory Displays*, Canberra, Australia, juill. 2016.

10. Dans notre papier aux JIM 2023, nous utilisons trois encodeurs, mais nous pouvons tout à fait réaliser le procédé avec un seul.

11. Nous utilisons maintenant un module de VBAP.

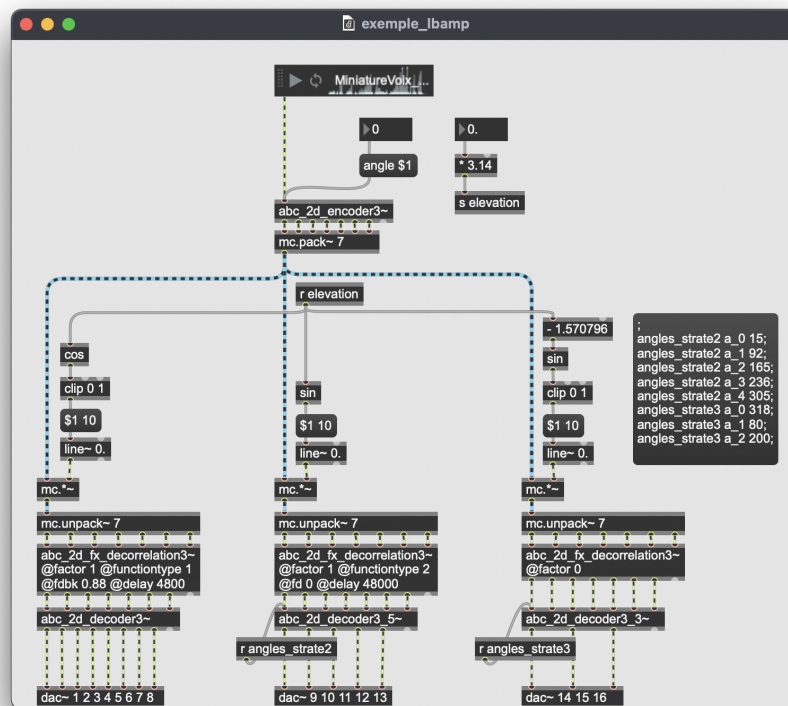


FIGURE 6.6 – Exemple d'utilisation de trois strates de décorrélation

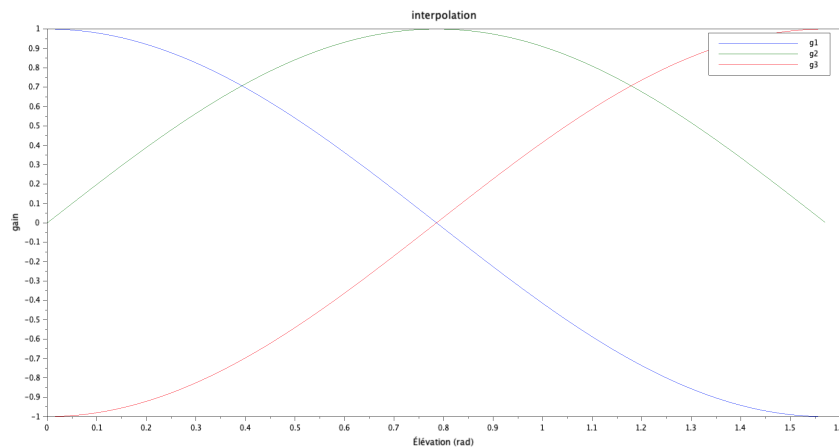


FIGURE 6.7 – Facteur de gain par flux ambisonique en fonction de l'élévation

respectent pas les couronnes. Nous avons considéré des plans ayant une certaine « courbure ». Cette approche, tout en étant contraignante pour une pratique de la spatialisation, a l'avantage de nous inviter à imaginer des figurations spatiales (trajectoires, strates de traitements, *etc.*) pouvant être intégrées dans un système de composition. Celle-ci est inspirée par la lecture de Poincaré et notamment de l'approche de Riemann présentée dans

la section 1.2.3. Par exemple, si nous encodons une source monophonique en ambisonie 2D d'ordre 3, appliquons une rotation cyclique puis décodons pour un système de 8 HP. Seulement, au lieu d'envoyer les signaux aux HP situés sur le plan horizontal, nous les distribuons de façon arbitraire.

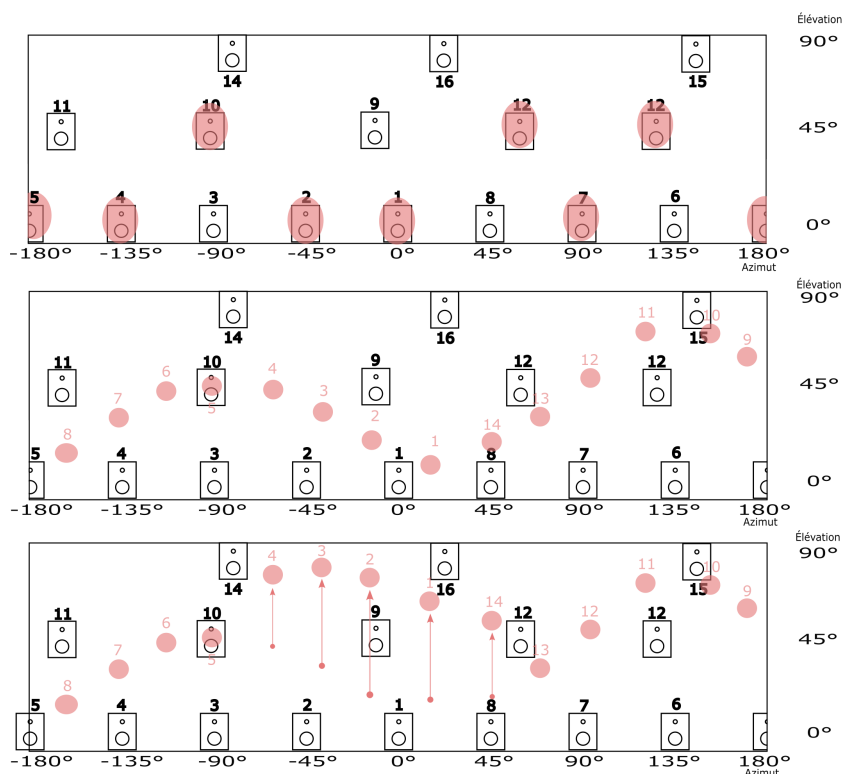


FIGURE 6.8 – Représentation schématique de la courbure d'une strate de traitement 2D

Par exemple, dans le schéma situé en haut de la figure 6.8, nous représentons une distribution prenant tantôt un HP situé sur la première couronne, tantôt un HP situé sur la deuxième couronne. En l'occurrence, la source ne décrira pas une trajectoire circulaire, mais une courbe plus complexe. Le plan sur lequel nous projetons et traitons la source n'est plus un plan à courbure nulle. Et maintenant, si nous n'envoyons plus directement les signaux issus du décodage à des HP mais que nous les ré-encodons en ambisonie comme de nouvelles sources, nous pouvons décrire des plans encore plus complexe, et jouer avec leur courbure de manière dynamique. Cette idée est ce que nous représentons dans les deux schémas de la figure 6.8. Nous effectuons hypothétiquement un décodage pour 14 HPV que nous projetons comme de nouvelles sources sur le dispositif de diffusion. Cette idée, bien que très restrictive par certains côtés, a l'avantage de nous inviter à décrire des

archétypes de traitements, de plans, de courbures de plan et de trajectoires et d'opérer avec. Nous pouvons penser ces opérations comme un changement de paradigme : au lieu de composer les trajectoires dans l'espace, nous composons la courbure de l'espace. Nous faisons l'expérience de penser avec la trajectoire, car elle nous permet de facilement se le représenter, mais *quid* des traitements spatiaux 2D dans ce type de dispositif ?

En développant cette idée, nous pouvons considérer l'espace des traitements comme un espace abstrait à projeter sur le dispositif réel. Cet espace abstrait peut lui-même être une combinaison de différents espaces superposés. Autrement dit, les traitements, rotations, trajectoires ou déplacements de source peuvent être pensés dans des plans (2D) qui ne sont pas nécessairement coplanaires avec des plans que nous pourrions former avec les HP. La conception de traitements 2D comme des plans abstraits à projeter dans un espace 3D réel permet d'imaginer des contraintes spatiales et ouvre un terrain opératoire à explorer pour la composition de la spatialité du son.

6.1.4 Enveloppe

Pour finir, nous cherchions à avoir un contrôle global sur le résultat de la décorrélation dans l'espace acoustique. Plus particulièrement, nous souhaitons pouvoir contrôler le gain dans chaque direction de chaque instance de traitement. Comme nous l'avons présenté en 5.2, l'utilisation de l'objet `hoa.2d.process~`, a deux modes : le mode *harmonics* et le mode *planewave*. En mode *planewave* le flux multicanal correspondant à un ensemble d'OP. Une fois cette opération réalisée, les traitements peuvent être associés à des directions.

L'objet `hoa.space`, présenté dans la figure 2.1.2, est un *multislider* circulaire pensé pour contrôler les valeurs de certaines variables dans des directions données. Un des traitements ambisoniques de la bibliothèque est le contrôle de gain dans le DOP. Nous souhaitons expérimenter un contrôle de ce traitement avec une approche de plus au niveau . Ainsi, nous avons écrit un script *spatialEnv.js*, permettant de contrôler le traitement avec deux variables que nous nommerons Q le facteur de qualité et θ l'angle du filtre.

L'idée est de donner l'angle du point autour duquel nous commencerons à atténuer le gain de part et d'autre. De façon empirique, nous avons trouvé que prendre une valeur bien supérieure à Q^2 nous permettait d'avoir un facteur allant d'une source omnidirectionnelle

à un hypercardioïde au facteur de directivité élevé. Le script que nous avons écrit prend en premier argument le nombre de canaux, en deuxième argument la borne supérieure de la liste en sortie, ainsi qu'une variable diffusion et renvoie une liste de valeurs.

La figure 6.9 présente deux situations d'utilisation du script *spatialEnv.js* : dans celle de gauche, nous avons un facteur de filtrage spatial relativement élevé (0.7), ce qui correspond à une atténuation du gain suivant un diagramme polaire proche de l'hypercardioïde, alors que dans la situation de droite, le facteur est de 0.15, ce qui générera une atténuation du gain suivant un diagramme cardioïde large.

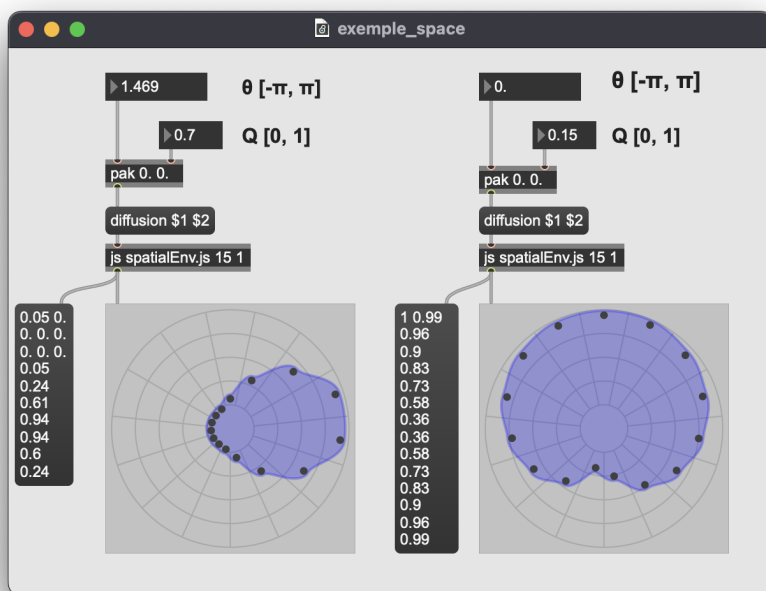


FIGURE 6.9 – Exemple d'utilisation du script *spatialEnv.js* avec *hoa.space*

Nous venons de présenter différentes approches de mise en œuvre et extension de la décorrélation prenant racine dans des projets de recherches et compositions personnelles (voir 8 et 9). Nous avons vu dans un premier temps qu'il pouvait être pertinent de sur-encoder les sources afin d'avoir une granularité de traitement plus importante. Confronté à une situation de traitement pour le *format B* nous avons présenté une utilisation du traitement dans le DOP et plus particulièrement le traitement en série DHC-DOP pour accroître la diffusion des sources. Cherchant à faire un pas supplémentaire vers la granularité, nous avons présenté une mise en œuvre de multidécorrélation et métadécorrélation,

correspondant respectivement à la mise en parallèle du processus et à la télécommande globale de décorrélation. Enfin, nous avons présenté une approche du traitement en 3D comme une superposition de traitements 2D émanant d'un travail sur le VBAP pour un décodeur irrégulier. Pour finir, nous avons présenté une forme de filtre spatial, traitement global du champ acoustique.

6.2 Généralisation

Prenons maintenant du recul par rapport aux extensions proposées pour la décorrélation et demandons-nous si la conception d'un code générique incorporant les spécifications discutées dans la section précédente est possible. Qu'est-ce que cette étape de généralisation impliquerait comme choix musicaux et choix d'implémentation? Et surtout, quel est l'interaction entre ces deux pans? Ainsi, dans cette section, nous tenterons dans un premier temps de généraliser la mise en série et en parallèle de traitements à partir de l'approche du traitement DHC-DOP présentée en 6.1.2 et la multi/méta-décorrélation présentée en 6.1.3. Dans un deuxième temps, nous interrogerons les conditions de possibilité d'une couche de contrôle de haut niveau. Dans un troisième temps, nous nous focaliserons sur l'approche du traitement par strate présentée en 6.1.3. Pour finir, nous nous intéresserons à l'application de ces différents principes dans le cadre d'un traitement fréquentiel, la modulation en anneau.

6.2.1 Traitements en série et en parallèle

Les principes de multidécorrélation et de décorrélation DHC-DOP peuvent être résumés par la mise en parallèle et la mise en série de modules de traitement. Leur mise en œuvre a soulevé des questions analogues à celles que nous rencontrons lorsque nous adaptons un traitement monophonique en multicanal. En effet, nous devons nous interroger sur le nombre de processus en parallèle/série, sur les variables qui changent pour chaque instance ou encore sur les conditions de ces changements. Une condition pour que l'utilisation de plusieurs modules de traitement en parallèle soit audible est qu'il y ait des différences entre ces modules. Nous allons donc partir de la décorrélation temporelle telle

que nous l'avons utilisée puis nous passerons en revue chaque variable afin d'élaborer un pseudo-code reprenant les éléments syntaxiques du langage FAUST.

local	global	pondérée
$fx_1(var1_n)$	$fx_1(var_n)$	$fx_1(var_n.coe f_1)$
$fx_2(var2_n)$	$fx_2(var_n)$	$fx_2(var_n.coe f_2)$
$fx_3(var3_n)$	$fx_3(var_n)$	$fx_3(var_n.coe f_3)$
3 Degrés de liberté locaux	1 DDL global	1 DDL global + 3 DDL locaux

TABLE 6.1 – Trois modes de distribution de la variable (var_n) dans un traitement (fx) instancié en parallèle

Lorsque nousinstancions plusieurs fois le même module de traitement, les variables peuvent être locales à chaque instance, globales à toutes les instances ou pondérées. Ce choix aura un impact sur notre manière d'interagir avec les traitements ainsi que le nombre de degrés de liberté. La décorrélation ambisonique 2D telle que nous l'avons implémentée a quatre variables : le facteur de diffusion (*factor*), la fenêtre temporelle de décorrélation (*delay*), le type de distribution des retards parmi les harmoniques (*functiontype*) et le niveau de réinjection (*fdbk*).

Le *factor* contrôle le nombre d'harmoniques qui seront déphasées et affecte le calcul du temps de retard de chaque harmonique. Sur le plan perceptif, il permet de passer d'une source ponctuelle localisable à du son venant de partout. De fait, si le facteur est différent pour chaque instance du traitement, certains modules produiraient un champ diffus, alors que d'autres n'altéreraient pas le signal. Cette situation ne va pas dans le sens de ce qu'est le facteur de diffusion et il nous apparaît de fait comme une variable devant rester globale lors de la mise en parallèle de décorrélations. Dans l'idée de créer un module de traitement lui-même constitué de plusieurs modules de traitement, il nous

semble judicieux d'appliquer le même facteur à toutes les instances de telle sorte que leur profondeur évolue de façon synchrone et que nous ne percevions pas de distinction entre les instances. Cette logique peut s'appliquer à divers traitements. En effet, de nombreux traitements ont un facteur de profondeur, par exemple le facteur de modulation pour la famille des modulations ou le taux de raréfaction pour la famille des granulateurs.

Le *delay* détermine la fenêtre temporelle à l'intérieur de laquelle se situent les différentes lignes. Définir la même fenêtre temporelle pour toutes les instances signifie que le retard maximal appliqué aux harmoniques sera le même pour toutes les instances. Définir indépendamment ou de façon pondérée les fenêtres temporelles revient à assigner des plages temporelles pour chaque instance. Il ne semble pas y avoir de choix à privilégier, les rendus seront différents suivant les relations entre les tailles de fenêtre temporelle et l'échelle globale d'opération. Par exemple, si nousinstancions trois modules et que nous utilisons un facteur de $\frac{1}{3}$ pour déterminer les fenêtres temporelles de chacune d'elles, la première opérera sur $\frac{delay}{3}$ secondes, la deuxième sur $\frac{2.delay}{3}$ et la troisième sur *delay*. Le rendu paraîtra homogène, quelle que soit la fenêtre de décorrélation globale. Toutefois, si nous définissons des relations générant des écarts importants entre les instances deux à deux, dans certaines configurations, l'unité du traitement pourrait être perturbée. Par exemple, si nous définissons $\frac{delay}{100}$ pour la première instance, $\frac{2.delay}{3}$ pour la deuxième et *delay* pour la troisième. Si la fenêtre temporelle est de une seconde, la première instance opérera sur une plage de valeur qui n'induit pas les mêmes qualités sonores que les deux autres et se distinguera *de facto*.

Le *fdbk* est le niveau de réinjection. S'il est différent pour chaque instance tout en ayant les mêmes réglages de *delay* pour les lignes à retard et les mêmes types de distribution, le résultat sera variable en fonction du nombre de modules avec *feedback* et de leur niveau. Plus le rapport entre le nombre de lignes à retard avec et sans réinjection augmente, plus le niveau de la réinjection sera perçu. Toutefois, dans certaines configurations, le réglage de différents niveaux de *feedback* génère une discontinuité dans la réponse sonore du traitement. Dans notre utilisation, il n'a pas semblé pertinent d'en faire une variable locale ou pondérée.

Le *functiontype* permet de définir la fonction de distribution des retards parmi les harmoniques. Si les fenêtres temporelles des différentes instances ont toutes la même durée,

mais que les fonctions de distribution sont différentes, les harmoniques de même degré et même ordre azimutal des différentes instances vont être déphasées. Cette opération est très perceptible et nous a semblé la plus intéressante à travailler pour produire un module de traitement au résultat sonore qui semble cohérent. Le changement du type de distribution permet de densifier le résultat en désynchronisant les mêmes harmoniques spatiales des différents modules.

Comme nous l'avons souligné, l'adaptation des variables des traitements lorsqu'ils sont instanciés en parallèle dépend à la fois des conditions d'interaction que l'utilisateur souhaite avoir avec le moteur sonore et de ses objectifs musicaux. Dans notre cas, nous souhaitons avoir un moteur sonore au résultat donnant la sensation d'une unité et d'une densification. Cela a eu tendance à contraindre nos choix quant au *factor* et au *functiontype*). Nous proposons donc de définir *decorrelationFx(n, del, ft, fa, fdbk)* le module de décorrélation à l'ordre n , et *parDecorrelationFx(m, n)* la mise en parallèle de ce module¹² de décorrélation par :

```
1   parDecorrelationFx(m, n) = par(i, m, decorrelationFx(n, d, ft%i, fa,
      fdbk);
```

Ici, nous instancions un module de décorrélation n fois, en gardant les mêmes variables de contrôle pour toutes les instances, à l'exception du type de distribution des retards (*ft*). La notation *%i* signifie que nous passons la valeur de l'index dans le nom de la variable pour chaque itération. Par exemple pour $i = 0$, la variable *ft* sera *ft0*, pour $i = 1$, la variable *ft* sera *ft1*, et ainsi de suite.

Les remarques quant aux variables de la décorrélation s'appliquent aussi pour la mise en série. Nous avons vu que la mise en série consistait à projeter dans le signal traité DOP puis à faire un étage de traitement et enfin projeter dans le domaine ambisonie le résultat. Définissons cette paire de décorrélation comme un *layer* et supposons que nous avons une fonction de projection *projector(n, o)* avec o le nombre d'OP et avec *recomposer(n, o)* la fonction de recomposition dans le DHC. Nous pouvons définir :

```
1   layer(n, o, i, j) = decorrelationFx(n, d, ft%i, mFa(1, j, fa), fdbk)
      : projector(n, o) : decorrelationFx(n, d, ft%i, mFa(1, j, fa), fdbk) :
      recomposer(n, o);
```

12. Pseudo-code FAUST avec la fonction *par*, l'indice d'instance i et les variables *functiontype* auxquelles nous venons ajouter le numéro de l'indice d'instance.

avec n l'ordre de décomposition, o le nombre d'ondes planes pour la projection dans le DOP, i l'index de la mise en série et j l'index de la mise en parallèle. Toutefois, il nous reste à définir la relation entre les variables des deux étages de décorrélation d'un même *layer*. Dans la pratique, nous avons utilisé un facteur de diffusion de plus haut niveau qui contrôlait l'allumage des différents *layer* tel que :

```
1   mFa(l, j, fa) = min(fa, (j+1)/(2*1))*21;
2
```

avec l le nombre total de *layer* et j l'index de la mise en série. Ainsi, pour un *layer* ($l=1$), nous aurons $j \in [0, 1]$ et $mFa \in [0, 0.5]$ pour $j = 0$ et $mFa \in [0.5, 1]$ pour $j = 1$. L'opération de mise en séquence et en parallèle sera :

```
1   parseqDecorrelationFx(l, m, n, o) = seq(j, l, par(i, m, layer(n, o,
   i, j)));
```

Dans laquelle tous les modules de décorrélation auront les mêmes variables de contrôle sauf la fonction de distribution qui changera pour chaque instance en parallèle. Par exemple, si nous avons $l = 2$ et $m = 2$ nous aurons 4 modules de décorrélation, et sept variables : $fa, d, fdbk, ft0, ft1, ft2, ft3$. Idéalement, il serait intéressant de trouver un moyen de faire varier les fonctions de distribution entre chaque étage de la mise en série pour créer une polyphonie spatiale encore plus riche.

6.2.2 Méta-traitement

Dans la pratique, nous souhaitons avoir un traitement manipulable avec peu de variables. En effet, nous trouvons qu'un bon équilibre entre la modularité et leur maniabilité optimise l'opérabilité. La modularité est ici comprise comme le nombre de degrés de liberté donné à l'utilisateur pour adapter les variables en fonction de son utilisation. Par ailleurs, la maniabilité représente ici l'accessibilité du dispositif pour une utilisation comode. Autrement dit, il nous faut trouver le bon nombre de variables accessibles pour l'utilisateur, la façon dont celles-ci peuvent être adaptées pour une utilisation précise sans toutefois multiplier de façon excessive le nombre de variables. Suivant cette logique, la production d'un objet générique qui incorpore ces différents essais ne doit pas nécessairement multiplier le nombre de variables accessible pour l'utilisateur. De façon analogue à la

logique de l'objet `hoa.process` qui associe à chaque harmonique un coefficient qui déterminera la profondeur du traitement, nous pouvons imaginer des stratégies pour distribuer les variables dans les modules tout en gardant le maximum de variables globales.

Nous proposons alors d'imaginer un module de traitement qui ferait office de chapeau de haut niveau. Un module qui nous permettrait de manipuler toutes les instances des traitements avec des métaparamètres. Par exemple, nous pouvons imaginer un objet de décorrélation, dont les variables permettent de gérer les variables du même nom pour chaque instance tout en ayant soit une profondeur par instance, soit une profondeur globale. Le type de distribution de ce module de décorrélation « chapeau » pourrait affecter (ou ne pas affecter) la distribution des variables *delay*, *functiontype*, *factor*, *feedback* des différentes instances. Et la mise en série pourrait avoir d'une part une variable qui définit le nombre d'enchaînements DHC-DOP, mais ne serait-il pas intéressant de croiser les deux approches ? Est-ce que les variables des modules de la série doivent avoir les mêmes paramétrages ? Quels sont les paramètres les plus sensiblement intéressants à faire varier ?

La figure 6.10 présente une possibilité de paramétrage :

- la fenêtre de décorrélation (*delay*) du module de haut niveau contrôle les fenêtres de décorrélation pour toutes les paires d'instances n allant de 0 à N de toutes les séries m allant de 0 à M ;
- la réinjection de la décorrélation (*feedback*) du module de haut niveau contrôle les réinjections pour toutes les paires d'instances n allant de 0 à N de toutes les séries m allant de 0 à M ;
- chaque module de décorrélation a un coefficient associé¹³ pondéré par le type de distribution du module de haut niveau contrôle. Le résultat de cette pondération déterminera la fonction de distribution utilisée pour les lignes à retards dans les signaux ambisoniques parmi une interpolation entre toutes les fonctions de distribution ;
- Les facteurs de décorrélations vont de 0 à 1 de façon synchrone pour toutes les instances d'une même série, mais les séries « s'allument » progressivement à mesure

13. Rapport du numéro d'instance avec le nombre total d'instance autant pour les processus en parallèle qu'en série.

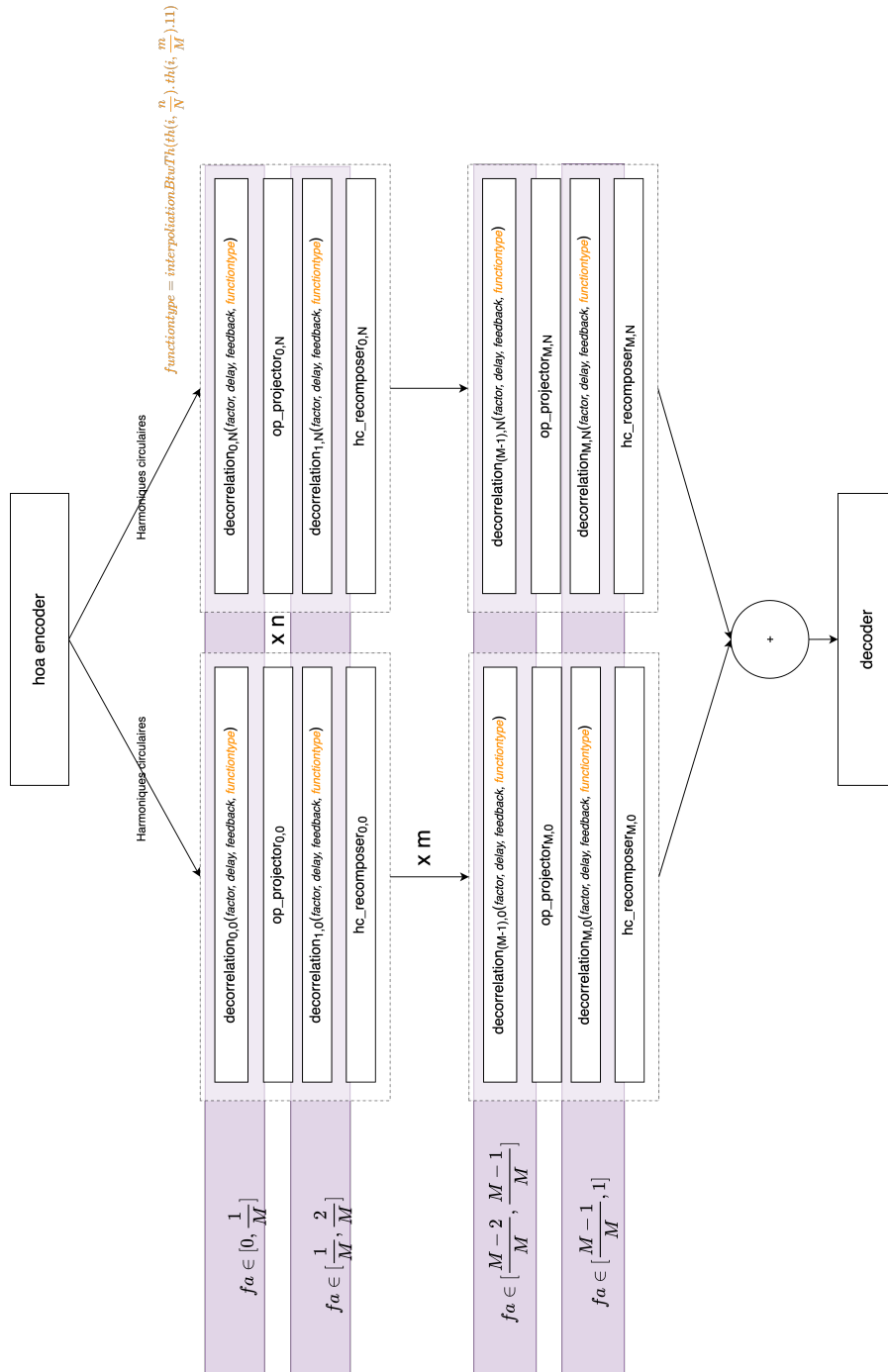


FIGURE 6.10 – Schéma d'une chaîne de traitement à instance multiple

que le facteur du module de haut niveau croît. Pour la première série, les facteurs vont de 0 à 1 pour $fa \in [0, \frac{1}{M}]$, puis restent à 1 au-delà. Pour la deuxième série, les facteurs vont de 0 à 1 pour $fa \in [\frac{1}{M}, \frac{2}{M}]$, sont à 0 en dessous et restent à 1 au-delà, *etc.* ;

6.2.3 Layer Based Ambisonics Processes

En théorie, la conception d'un objet générique de LBAMP inspiré par notre utilisation semble simple. Il nous suffit d'avoir la position des HP du système de restitution, détecter le nombre de plans horizontaux, créer le bon nombre de chaînes de traitement-décodeur, trouver le facteur de gain à utiliser en fonction de l'élévation de la source et l'écart entre les couronnes¹⁴. Cette solution fonctionne pour les systèmes de restitution avec des couronnes de HP positionnées sur des cercles sans irrégularité angulaire en élévation pour chacune des couronnes. Pour simplifier la démonstration, nous ferons abstraction du système de restitution sur lequel le résultat pourrait être projeté¹⁵. Lorsque nous parlerons de HP dans cette section, nous ferons référence à des haut-parleur virtuel, qu'il faudrait ensuite projeter sur un système de restitution réel comme des sources.

Pour réaliser un objet de LBAMP, il suffirait de déterminer le nombre de strates, l'angle entre chacune d'elles, l'ordre ambisonique, le nombre HPV par strate ainsi que le module de traitement associé à chaque strate. Nous pouvons ainsi distinguer deux situations :

- chaque strate a un ou plusieurs modules de traitement indépendants des autres strates. Chaque variable peut être commandée indépendamment, sur toute sa plage de valeurs ;
- chaque strate a un ou plusieurs modules de traitement aux variables liées aux autres strates avec des coefficients d'instance ou des variables globales.

Mais qu'en est-il si nous souhaitons concevoir des strates de traitement qui ne seraient pas coplanaires avec les couronnes de HP du système de restitution, voire produire des strates courbes inspirées par l'approche de Riemann ? Précisons ce que nous entendons

14. Nous pouvons utiliser une couche de VBAP 2D pour contrôler le gain du flux ambisonique en entrée de chaque chaîne en fonction de l'élévation de la source.

15. La projection des strates de traitements sur un système de restitution peut être effectuée en projetant chaque HPV avec un algorithme de projection 3D comme du VBAP 3D ou de l'ambisonie 3D comme une source sonore.

par « strate courbe ». L'opération que nous décrivons consiste à encoder une source en ambisonie et la projeter sur un système de HPV répartis sur un cercle. Ce cercle est inscrit dans un plan horizontal à courbure nulle. Toutefois, lorsque nous projetons ces HPV comme de nouvelles sources sur le dispositif réel, de telle manière qu'elles ne soient pas coplanaires ou simplement inscrites dans un plan à l'orientation autre qu'horizontale, nous faisons une opération de déformation ou translation du plan. Dans cette situation, si nous appliquons une rotation cyclique à notre source initiale, une fois projetée sur le dispositif réel, l'image source ne décrira pas un cercle horizontal. L'opération de rotation ou déformation d'une strate est réalisée au moment de la projection sur le dispositif réel. De fait, si nous souhaitons définir ces rotations et/ou déformations de plan, il nous faut préciser la position de réencodage des HPV pour l'opération de projection sur le dispositif réel.

Par exemple, si nous encodons une source en ambisonie à l'ordre 3, lui appliquons une rotation cyclique et que nous décodons sur un système de HPV. Si nous analysons les vecteurs vitesse et énergie à partir des signaux de ces HPV, la trajectoire de la source virtuelle si elle était entendue serait circulaire. Maintenant, si nous déplaçons un HPV sur deux en le positionnant un peu au-dessus de ses voisins et que nous projetons ces HPV sur un dispositif réel, et que nous analysons les vecteurs à partir des signaux envoyés aux HP réels, la trajectoire ne sera plus circulaire, mais sera une sorte de zigzag. Cette solution apparaît très complexe pour décrire des trajectoires, mais si maintenant, nous appliquons des traitements sur cette chaîne, nous pouvons passer d'une trajectoire complexe à un plan de traitement avec une simple variable. Nous pouvons aussi imaginer courber dynamiquement les traitements, les trajectoires, *etc.* Dans ce paradigme, l'enjeu de toutes ces opérations est la définition d'un espace abstrait aux propriétés de traitement et géométriques singulières.

Lorsque nous abordons la situation d'un dispositif virtuel constitué de cercles inscrits dans des plans à courbure nulle et à des élévations différentes, l'interpolation entre chaque strate correspondait à l'élévation de l'image source sur le dispositif réel. Mais dans le cas d'un assemblage de différents plans à courbure variables et/ou orientation variable, à quoi correspond l'interpolation entre deux plans ? Dans cette situation, nous pouvons nous demander si le plus intéressant serait de déterminer le traitement appliqué en fonction

de la position de l'image source souhaitée ou à l'inverse, la position et traitement de la source en fonction du plan vers lequel nous l'envoyons. Dans le premier cas, les variables de la source seraient ses coordonnées et il faudrait envoyer le signal de la source vers la chaîne de traitement qui correspond à la direction souhaitée pour l'image source. Dans le deuxième cas, les variables pourraient être exprimées sous la forme d'une matrice d'envoi. L'enjeu serait alors de déterminer le comportement de l'envoi du signal source dans les différents plans.

Nous pourrions imaginer une hybridation avec le principe de parallélisation-sérialisation évoquée dans la section précédente et définir pour chaque strate un module de traitement constitué d'un assemblage de modules de traitement. Par exemple, nous pouvons définir une décorrélation à 7 instances en parallèles avec 3 séries de DHC-DOP sur chaque strate LBAMP. Chaque strate pourrait avoir un poids différent dans la profondeur du traitement, dans les types de distribution, ou la fenêtre de décorrélation.

6.2.4 Ring Modulation

Pour mettre à l'épreuve la généralité des différentes extensions proposées pour la décorrélation, nous avons expérimenté une translation vers un traitement fréquentiel dans le domaine ambisonique : la modulation en anneau. La *ring modulation* s'appuie sur la modulation d'un signal bipolaire par un autre signal bipolaire. En ambisonie, elle est la modulation de chaque harmonique par un signal sinusoïdal avec une certaine profondeur dépendant du coefficient de l'harmonique modulée. Ce traitement a deux variables : le facteur de modulation et la fréquence de la modulante. Prenons P le nombre d'harmoniques sphériques, si le facteur est supérieur au seuil :

$$\frac{(P - i - 1)}{P}, \quad (6.1)$$

le i^{eme} modulateur sera actif avec la modulante de fréquence c :

$$c = f_0 \cdot \frac{(i + 1)}{P}. \quad (6.2)$$

Si le facteur est en dessous du seuil, le signal sans traitement sera utilisé. Gardant la logique de la bibliothèque *HOALibrary*, la modulation est de plus en plus importante à

mesure que le facteur augmente. Ce traitement était tel quel présent dans les patches de la bibliothèque. Par exemple, après un encodage à l'ordre 2 en 3D, il y a 9 harmoniques. L'harmonique 0 aura une modulation par une modulante de $\frac{f_0}{9}$, et sera modulée dès lors que le facteur sera dans l'intervalle $[\frac{8}{9}, 1]$. Avec une fréquence de modulation à 10 Hz, pour chaque harmonique, la modulante correspondante aura une fréquence comme dans le tableau 6.2.

Y_{ith}	$freq_{mod}$
Y_0	1.11 Hz
$Y_{-1,1}$	2.22 Hz
$Y_{0,1}$	3.33 Hz
$Y_{1,1}$	4.44 Hz
$Y_{-2,2}$	5.55 Hz
$Y_{-1,2}$	6.66 Hz
$Y_{0,2}$	7.77 Hz
$Y_{1,2}$	8.88 Hz
$Y_{2,2}$	9.99 Hz

TABLE 6.2 – Fréquence de modulation par harmonique en 3D au 2^{eme} ordre

Le résultat sonore peut aller de mouvements complexes à des modifications de timbre de façon analogue à la modulation en anneau au-dessus de 20 Hz. De fait, l'application de différentes fonctions de distribution impacte le rapport entre les différentes fréquences de modulation, ce qui engendre des différences perceptibles et assez marquées pour qu'elles puissent être musicalement explorées. Nous rencontrons le même souci face au mode SYN (voir 5.3.3), c'est-à-dire que dans le cas où le facteur de modulation est égal à 0, toutes les harmoniques ont un gain de 1 et de fait cela correspond à un encodage directionnel. Les différents types de distribution en 3D impactent le résultat sonore aussi. Et le couplage de différentes strates de traitement tout autant que la mise en parallèle de traitement a un impact sonore suffisant pour être explorés musicalement.

6.3 Analyse du résultat

6.3.1 Intercorrélation multicanal : un descripteur spatial

À partir de tests réalisés au studio d'essai son du CICM et des utilisations musicales que nous présenterons aux chapitres 8 et 9, nous pouvons affirmer que les différentes extensions présentées génèrent des variations sur le plan perceptif utilisables musicalement. Pour compléter notre mise à l'épreuve perceptive, nous avons cherché à quantifier l'impact sur le signal de ces extensions. Notre objectif avec l'utilisation de la parallélisation, des fonctions de distribution et de la mise en série DHC-DOP, est la conception d'outils offrant l'accès à des variations d'ordre spatial. Sur le plan perceptif, les variations spatiales sont clairement identifiables tout en étant difficilement qualifiables. Que pouvons-nous chercher à quantifier pour appréhender de façon analytique ces transformations ? La décorrélation en ambisonie permet de passer de façon continue d'un champ sonore constitué de sources localisables à un champ diffus. Notre hypothèse est alors que les traitements DHC-DOP(6.1.2), la multi/métab-décorrélation (6.1.3), et l'ajout des fonctions de distribution (5.3.2) influenceraient le taux de diffusion. La question de l'évaluation des traitements en ambisonie a déjà été posée par Colafrancesco. En effet, l'auteur propose dans sa thèse une extension multicanale à la cross-corrélation que nous avons implémentée puis appliquée à différents types de signaux.

Nous avons vu en 5.1.2 que le coefficient de corrélation entre les signaux envoyés aux HP dans le cas d'une écoute stéréophonique est liée à la perception de certains attributs spatiaux d'une image source¹⁶. Colafrancesco propose de se servir de la fonction d'intercorrélation comme d'un descripteur spatial et généralise l'approche afin d'évaluer le taux de diffusion d'un champ acoustique dans un contexte de restitution multicanal.

Colafrancesco calcule le taux de diffusion d'un champ acoustique dans le DOP pour analyser la diffusion indépendamment du dispositif de restitution. L'idée de ce descripteur est de calculer la fonction d'intercorrélation entre chaque couple possible de signaux, puis de sommer et normaliser le résultat. Ainsi, le résultat de cette opération correspondrait à un taux de corrélation global. Colafrancesco propose une optimisation s'appuyant sur

16. En effet, nous avons vu que Kendall utilisait la décorrélation pour contourner la coloration spectrale et l'effet de Haas, produire des champs diffus (incluant la largeur et la distance de l'image source).

l'algorithme de Glouton et un échantillonnage Gibbs que nous n'utiliserons pas ici dans la mesure où nous proposons une utilisation en temps différé¹⁷.

Si nous repartons de l'équation 5.1, dans laquelle Γ_{s_1, s_2} est l'intercorrélacion entre les signaux s_1 et s_2 , nous pouvons définir la somme des intercorrélacions pour L signaux s_1, \dots, s_L et m_1, \dots, m_L décalages temporels respectifs. Nous avons alors :

$$\Gamma_{s_1, \dots, s_L}[m_1, \dots, m_L] = \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L |\Gamma_{i,j}[m_i - m_j]|. \quad (6.3)$$

Prendre le maximum de cette fonction nous permet de connaître le coefficient de corrélation, autrement dit la ressemblance globale des signaux à un décalage temporel près. Nous présenterons ici des essais réalisés avec une implémentation suivant les recommandations de Colafrancesco, notamment sur l'omission des informations de phase. En effet, l'auteur nous dit :

Nous prenons ici la valeur absolue des différentes intercorrélacions. Ces dernières prennent en effet des valeurs positives aussi bien que négatives. Le signe indique si les signaux ont tendance à être en phase ou en opposition de phase, alors que la valeur absolue de la corrélation croisée indique le taux de corrélation. Dans le cadre de notre application, nous avons intérêt à négliger la polarité des signaux et à nous concentrer sur leur corrélation en valeur absolue. En effet, le concept d'opposition de phase se généralise mal lorsque l'on considère plus de deux canaux, les configurations de polarité que les HP sont susceptibles de prendre n'étant plus binaires.¹⁸

Nous proposons alors d'utiliser le script *Matlab* 6.3.1 pour tracer les fonctions d'intercorrélacion multicanal.

```

1 % Charger le fichier multicanal dans une matrice de dimension (N x L)
2 x = audioread(['./fichierMulticanal.wav']);
3 % Stocker le nombre de lignes et colonnes de la matrice dans N et L
4 [N, L] = size(x);
5 %Calculer le couples
6 numPairs = (L*(L-1))/2;
7 % Initialisation de la matrice de coefficients d'intercorrelation

```

17. Le temps de calcul de la fonction d'intercorrélacion dépend du nombre d'OP utilisées pour l'analyse et de longueur des fichiers. Nos analyses ont été réalisées sur des fichiers WAV comportant 16 canaux d'une durée d'une seconde, le calcul de la fonction d'intercorrélacion et son tracé prenait environ 155ms.

18. COLAFRANCESCO, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », p. 224.

```

8 % Pour un trace entre -N et N echantillons des numPairs
9 Gamma = zeros(2*N-1, numPairs);
10 k = 1;
11 % Calcul de l'intercorrelation pour tous les couples de signaux
12 for i = 1:L-1
13     for j = i+1:L
14         % Calculer la cross-correlation entre les signaux i et j
15         % La normalisation revient a faire R/(N*std(x(:,i))*std(x(:,j)))
16         [R, lags] = xcorr(x(:, i), x(:, j), "normalized");
17         % Stocker la valeur absolue normalisee dans Gamma a la colonne k
18         Gamma(:, k) = abs(R) ;
19         k = k + 1;
20     end
21 end
22 % Somme de toutes les fonctions d'intercorrelation
23 Gamma_multichannel = sum(Gamma, 2)/numPairs;

```

Listing 6.1 – Implémentation utilisée pour calculer la fonction d'intercorrélacion multicanale

Lorsque nous calculons le taux de corrélation dans le DOP pour un encodage directionnel ($\theta = 45$, $\phi = 15$ HOA 3D ordre 3), le maximum de la fonction est environ égale à 0.95 (voir figure 6.11), ce qui signifie que les signaux sont fortement corrélés. Cela constituera notre base de comparaison pour les prochaines analyses.

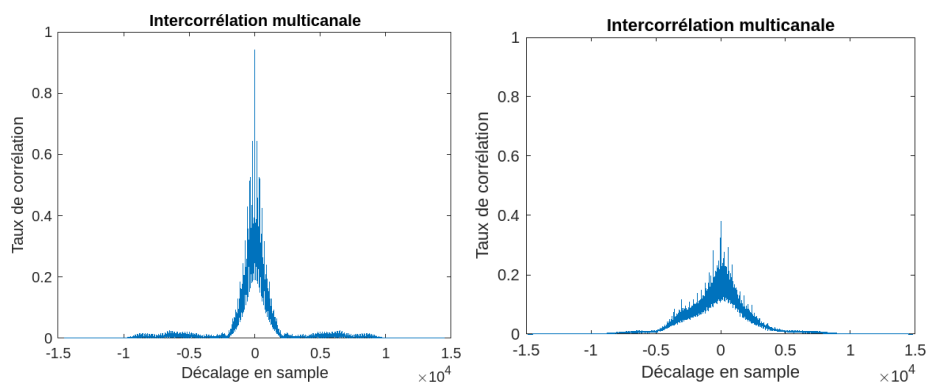


FIGURE 6.11 – Tracée du taux de corrélation pour un encodage directionnel ($\theta = 35^\circ$, $\phi = 10^\circ$), à gauche sans décorrélation, à droite avec décorrélation (delay=100ms)

L'enjeu est maintenant d'appliquer ce descripteur pour quantifier les différentes extensions proposées.

6.3.2 Exemples d'analyse : *functiontype* et multidécorrélation

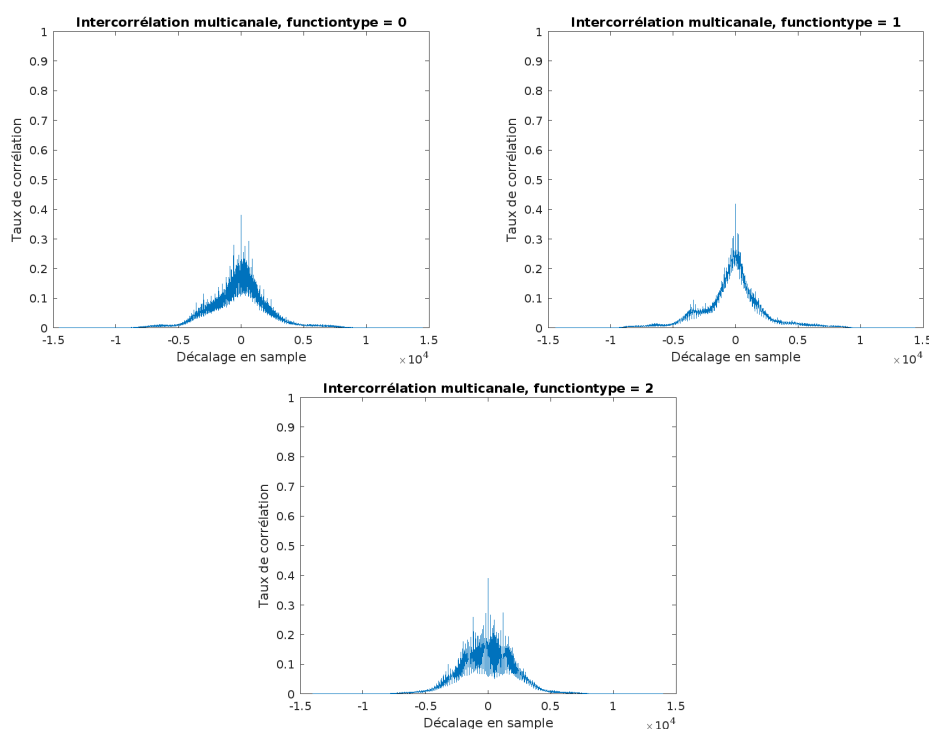


FIGURE 6.12 – Tracées du taux de corrélation multicanal pour un encodage directionnel ($\theta = 35^\circ$, $\phi = 10^\circ$) et de la décorrélation ($fa=1$, $del=100ms$, $tf=0, 1$ et 2)

Lorsque nous comparons les fonctions d'intercorrélacion multicanale sur des fichiers multicanaux auxquels nous avons appliqué de la décorrélacion avec différentes distributions du retard dans les harmoniques (par exemple les trois premières FIGURES 6.12), nous remarquons que le coefficient de corrélation varie de moins d'un dixième. Néanmoins, nous pouvons remarquer que le tracé de la fonction n'est pas similaire. Sur le plan perceptif, nous repérons des différences dans certaines directions. De fait, nous proposons de regarder le résultat du coefficient de corrélation pour chaque couple d'OP, ce qui nous permettra de regarder dans quelle mesure le signal venant d'une direction est corrélaté aux signaux dans chaque direction. Nous percevons alors que les coefficients de corrélation pour chaque couple varient en fonction du type de distribution.

Les différences du taux de corrélation de chaque couple d'OP pour les différents types de distribution de retard sont visibles et nous permettent d'avoir une quantification de la corrélation entre chaque direction. Afin de comparer plus précisément l'effet des différentes fonctions de distribution sur le taux de corrélation des couples d'OP, nous regardons la

différence entre les matrices de corrélation. Ainsi, nous pouvons détecter quelles distributions donnent des résultats les plus éloignés, ainsi que les directions de ces différences. Dans le cadre d'une utilisation musicale, il peut être intéressant de connaître les fonctions les plus éloignées (ou les plus proches) afin de composer avec ces relations.

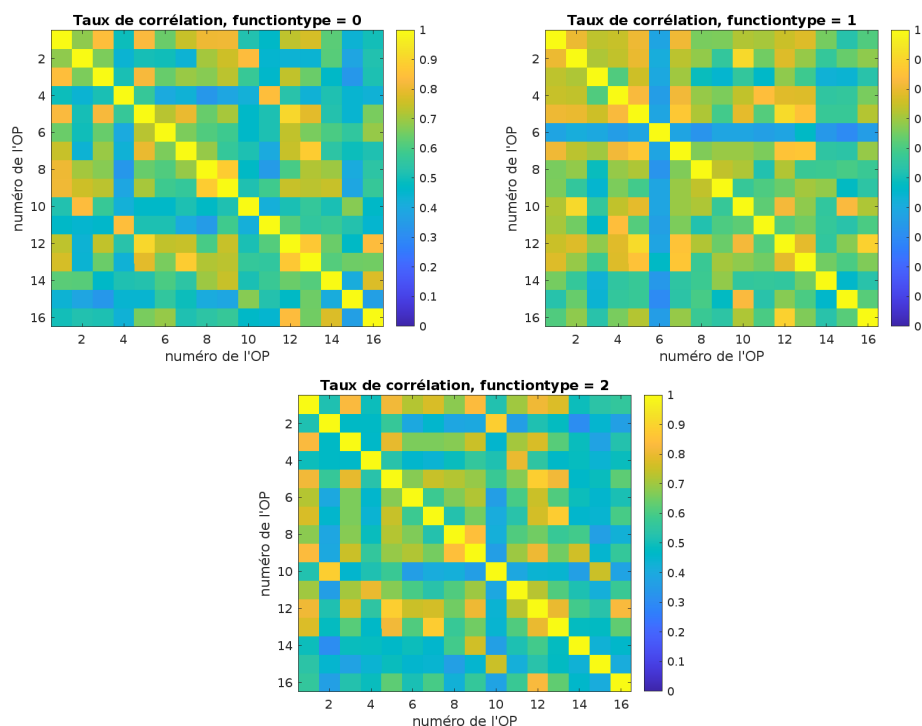


FIGURE 6.13 – Comparaison du taux de corrélation pour les paires d'ondes planes pour trois types de distributions

Dans la figure 6.14 la jauge de couleur ne correspond plus au taux de corrélation entre les ondes planes mais aux différences de taux de corrélation par couple d'OP entre deux types de distribution. Nous remarquerons que les différences n'excèdent jamais la valeur de 0.5. Ces analyses ne font que relever des sensations que nous avons déjà à l'écoute : lorsque nous passons en revue les différentes distributions, certains enchaînements sont clairement perceptibles alors que d'autres beaucoup moins. L'avantage de cette quantification est d'avoir la connaissance des différences précises de toutes les fonctions avec toutes les fonctions. Dans le cas où nous souhaitons utiliser les différences de distribution pour composer de très fines différences, peut-être qu'il serait plus pertinent de passer de la fonction 0 à la fonction 2. Dans le cas où nous souhaitons utiliser ces différences de façon plus marquée, il peut être pertinent de passer de la fonction 0 à la fonction 1, puis à la fonction 2.

Nous concluons à partir de ces analyses et de nos expériences d'écoute qu'il n'y a pas de situation privilégiée pour produire des champs diffus. Il n'y a pas un type de distribution qui produit un champ plus diffus qu'un autre type de distribution, néanmoins il y a des différences de diffusion dans des directions données. Ces différences sont perceptibles, quantifiables et utilisables musicalement.

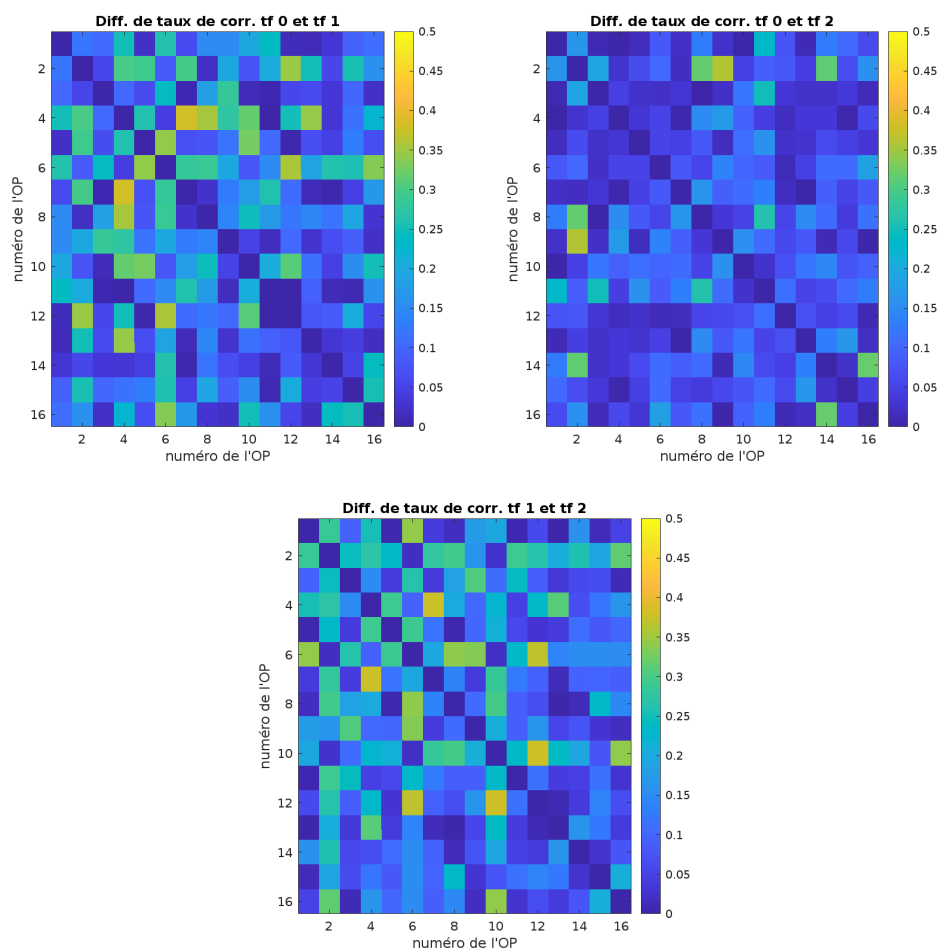


FIGURE 6.14 – Comparaison des différences de taux de corrélation dans le DOP avec trois types de distribution

Nous avons proposé la mise en parallèle de modules de décorrélation pour jouer avec la granularité du résultat. Est-ce que cette approche a un impact sur le taux de diffusion du champ acoustique? Afin de répondre à cette question, nous avons calculé la fonction d'intercorrélation multicanal pour comparer quatre situations : 1 module, 3 modules, 5 modules, 7 modules. Dans les quatre situations, les réglages sont les mêmes à l'exception de la fonction de distribution qui diffère pour chacun des modules lorsqu'ils sont plusieurs.

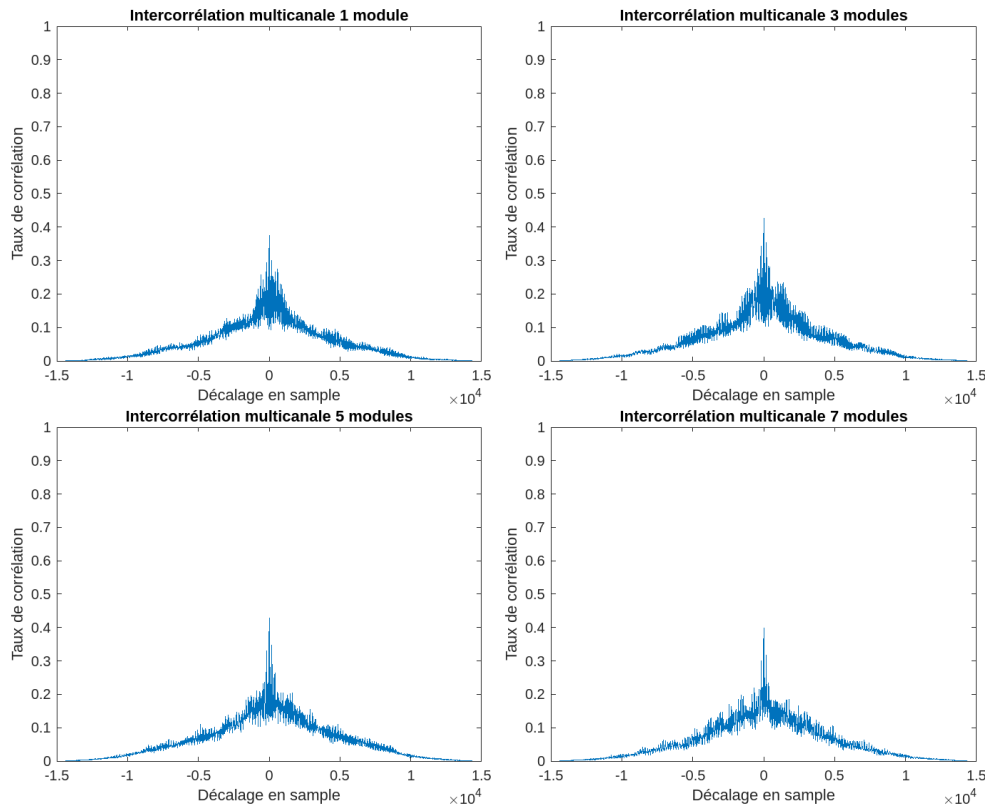


FIGURE 6.15 – Tracés du taux de corrélation multicanal pour un encodage directionnel ($\theta = 30^\circ$) et de la multidécorrélation (1, 3, 5 et 7 modules)

Les tracés de la fonction d’intercorrélacion multicanal ne montre pas une différence marquée du taux de corrélation en fonction du nombre de modules. Toutefois, le résultat est clairement perceptible. Ce descripteur ne semble pas être l’outil le plus pertinent à employer pour quantifier les effets de la mise en parallèle de processus de décorrélacion.

Appliquons maintenant l’analyse aux signaux issus d’une décorrélacion DHC-DOP. Nous avons fait les essais en HOA 2D à l’ordre 3, car nous n’avons pas les moyens de faire efficacement le passage d’un domaine à l’autre en 3D. Lorsque le facteur est à 0, une source ponctuelle est projetée en ambisonie 2D d’ordre 3 à 35° d’azimut. Lorsque le facteur est à 1, un module de décorrélacion (avec une fenêtre temporelle de 100 ms) est appliqué, et lorsque le facteur est à 2, nous ajoutons un module de décorrélacion dans le domaine des OP avec une fenêtre temporelle de 100 ms. Nous pouvons voir que le maximum de la fonction d’intercorrélacion est légèrement inférieur pour un facteur de 2 que pour un facteur de 1, bien qu’il semble y avoir un accroissement assez net du taux de diffusion sur le plan perceptif.

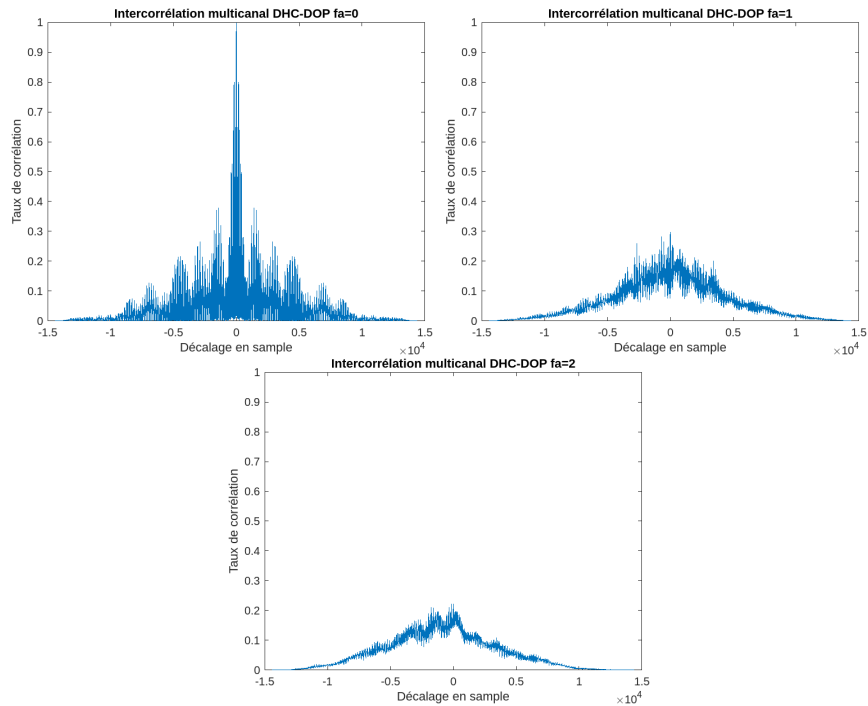


FIGURE 6.16 – Tracées du taux de corrélation multicanal pour un encodage directionnel ($\theta = 30^\circ$) et de la décorrélation DHC-DOP pour un facteur à 0, 1 et 2.

La mise à l'épreuve de ce descripteur nous permet de dire qu'il est intéressant pour appréhender le taux de diffusion global, mais qu'il n'est pas suffisant pour appréhender les variations engendrées par les extensions proposées. Néanmoins, l'affichage des taux de corrélation des canaux deux à deux ou l'affichage des différences de taux de corrélation entre des situations nous permet d'approcher l'impact de ces extensions. Par ailleurs, cet outil d'analyse peut être utilisé à des fins musicales pour trouver les réglages les plus proches ou les plus éloignés de façon procédurale afin de les exploiter.

6.4 Synthèse de la deuxième partie

Dans la seconde partie, nous avons examiné les interactions à l'œuvre dans la conception de représentations opératoires pour le traitement spatial du son en nous concentrant sur les moteurs sonores. Notre objectif était de scruter le trièdre GUI-DSP-composition depuis l'aspect DSP. Il est apparu clairement que la conception du code DSP implique des choix musicaux qui influent sur les modalités d'interaction avec nos environnements de composition.

Nous avons présenté de façon synthétique les outils techniques et théoriques qui composent le modèle ambisonique au cœur de nos travaux. Partant de la chaîne d’encodage-décodage avec un exemple simple en *First Order Ambisonics* (FOA), nous avons ensuite présenté l’extension aux ordres élevés HOA. La bibliothèque logicielle *abc.lib*, héritière de *HOALibrary* pour les traitements en ambisonie, a également été introduite en tant que terrain technologique de notre thèse. Après avoir posé ces bases théoriques et techniques, nous avons plongé dans le domaine du traitement spatial par décorrélation des signaux. En explorant ses origines dans le domaine audio, évoquant son utilisation comme technique de composition par Horacio Vaggione et son intégration dans le cadre ambisonique au sein de *HOALibrary*, nous avons mis en avant les défis liés à son implémentation en langage FAUST. S’appuyant sur des approches musicales personnelles, nous avons proposé diverses stratégies d’extensions pour la décorrélation et les pratiques de traitement en ambisonie, notamment le sur-encodage spatial, la décorrélation DHC-DOP, la multi et méta-décorrélation, les strates de traitement et l’enveloppe spatiale. Enfin, prenant du recul, nous avons tenté de généraliser ces extensions pour concevoir un pseudo-code générique, soumis ensuite à l’épreuve d’outils d’analyse du signal pour évaluer leur efficacité.

Troisième partie

Spatialité composée - spatialité émergente

À l'origine de cette thèse réside une aspiration musicale : celle de diversifier les moyens d'expression avec les qualités spatiales du son tout en les intégrant dans un processus de composition personnel. Cette démarche nous a conduits à examiner les enjeux inhérents à la conception de représentations opératoires pour le traitement spatial du son, en mettant un accent particulier sur les interactions entre leurs différents composants.

Pour explorer ces interactions, nous avons employé une méthodologie de composition-recherche basée sur une boucle itérative. Cette démarche a constamment ajusté les équilibres entre la création et la recherche aussi bien sur le plan musical que technologique. De ce processus émerge une série d'outils technologiques originaux et d'œuvres qui mettent à l'épreuve des concepts musicaux découlant eux-mêmes de cette approche intégrée de composition et de recherche.

Plutôt qu'une dissociation entre les aspects de ces représentations, les trois parties de cette thèse offrent des perspectives distinctes sur un même objet de recherche : les représentations opératoires pour le traitement spatial du son.

Cette partie explore l'évolution de notre approche musicale de l'espace par la pratique de la composition comme une activité de recherche, sa traduction sensible et ses ancrages théoriques. Pour ce faire, nous analyserons les différents terrains musicaux de notre thèse : « Voyage Absolu des Unari vers Andromède » de Iannis Xenakis ainsi que nos trois compositions électroacoustiques *Suspension*, *Compression/dilatation* et *Émergences*. La pièce de Xenakis n'a pas été moteur sur le même plan que nos propres compositions. Le travail réalisé autour de cette pièce nous a permis d'approfondir le rapport au dessin comme moyen de contrôle, le rapport entre composition et instrument, l'interprétation d'œuvres électroacoustique et la mise à l'épreuve d'outils. En ce sens, le chapitre 7 a un statut particulier dans l'organisation de cette partie.

La troisième partie de ce manuscrit s'organisera autour des deux objectifs suivants :

1. interroger la boucle de rétroaction entre notre approche musicale de l'espace et les représentations opératoires pour le traitement spatial du son ;
2. expliciter les fonctions et implications des compositions personnelles dans nos recherches.

Nous intituleons cette partie "Spatialité composée - Spatialité émergente" pour souligner notre intérêt pour une spatialité qui émerge d'un assemblage de dimensions contenues

dans l'écriture. Cette idée met en avant le rôle essentiel de l'écoute dans notre processus de composition. La spatialité du son qui nous intéresse musicalement est celle qui émerge de l'interaction entre différentes composantes présentes dans l'écriture instrumentale, électronique ou électroacoustique. La fragilité inhérente à cette spatialité émergente la rend particulièrement expressive et captivante d'un point de vue musical.

Voyage Absolu des Unari vers Andromède de I. Xenakis

Lors de notre état de l'art, nous nous sommes intéressés aux différentes modalités d'interaction avec les dispositifs audionumériques et à l'écriture des parties électroniques d'œuvres musicales. À la fin des années 70, trois dispositifs ont marqué l'informatique musicale et le domaine des technologies de la musique en France : la station *4X* développée à l'IRCAM, le système *SYTER* au Groupe de Recherches Musicales (INA GRM) et l'UPIC au CEMAMU. Le dernier a particulièrement retenu notre attention du fait de son mode de contrôle. L'UPIC est une station de travail permettant d'utiliser le dessin comme moyen d'écriture. Lorsque nous réfléchissions aux représentations et à l'écriture du traitement spatial du son, nous nous demandions si le dessin ne pouvait pas être un moyen particulièrement opératoire¹.

Dans le cadre du centenaire de la naissance de Iannis Xenakis, de nombreux évènements artistiques et académiques ont eu lieu sur la saison 2021/2022 partout dans le monde. La Philharmonie de Paris a organisé une exposition intitulée « Révolution Xenakis » et de nombreuses œuvres instrumentales du compositeur ont été programmées. La Philharmonie souhaitait aussi programmer des pièces électroacoustiques du compositeur. Le projet de recherche « Habiter (avec) Xenakis »² a permis une collaboration entre la Philharmonie

1. Nous renvoyons le lecteur à la première partie de cette thèse et notamment à la section 3.1.1, dans laquelle nous traitons du prototype *stap.js*, permettant d'utiliser le dessin pour contrôler des traitements.

2. Le projet Habiter (avec) Xenakis est un projet de recherche porté par Makis Solomos et Jean-François Jégo soutenu par l'EUR ArTeC. À l'occasion du centenaire, ce projet propose d'étudier comment habiter les milieux complexes que tisse le compositeur, architecte, artiste multimédia et théoricien Iannis

de Paris, la Cité des Sciences et de l'Industrie, l'École Universitaire de Recherche (EUR) ArTeC et le CICM autour de la pièce *Voyage absolu des Unari vers Andromède*. Celle-ci a été jouée au Planétarium de la Cité des Sciences durant tout le mois de mars 2022 en étant accompagnée d'une création visuelle proposée par l'équipe du Planétarium. Cet évènement intitulé « Regards croisés sur la galaxie d'Andromède » avait pour objectif de croiser les publics du Planétarium et de la Philharmonie. En deuxième partie de l'évènement, le Planétarium diffusait un film sur la galaxie d'Andromède. Par la suite, *Voyage* a été rejoué à l'Université Paris 8 avec des pièces pour piano du compositeur et *Pour la paix*, au conservatoire national d'Athènes, en collaboration avec la fondation Onassis dans le cadre d'un évènement intitulé « Xenakis Alive ».

Dans ce contexte, nous avons travaillé avec Alain Bonardi à la mise en espace de la pièce pour un système de diffusion différent de celui pour lequel elle a été composée et créée. Cette expérience nous a permis de nous familiariser avec un exemple de l'utilisation de dessins pour interagir avec les parties électroniques, notamment en nous concentrant sur l'écriture de la spatialité dans l'œuvre. S'intéresser à l'UPIC, c'est aussi traiter un exemple emblématique d'un instrument lié aux pratiques de composition d'un compositeur. En somme, cela nous permet d'interroger les relations entre l'instrument et la pensée musicale. Pour finir, cela nous permet de réfléchir plus largement à la question de l'interprétation de musique électroacoustique sur des dispositifs de restitution différents de ceux utilisés à la création. Enfin, nous pouvons nous interroger sur la pérennisation de la mise en espace d'œuvres du répertoire. Composée en 1989 pour une exposition internationale de cerfs-volants à Osaka, au Temple Kamejama Hontokuji, *Voyage absolu des Unari vers Andromède* est une pièce stéréophonique devant être jouée en quadriphonie. De fait, comment profiter de la configuration de diffusion du Planétarium pour spatialiser cette pièce tout en respectant l'œuvre du compositeur ?

Xenakis et comment ces milieux nous aident à habiter le monde d'une manière critique, et ceci selon quatre directions : (1) Interpréter/Performer Xenakis : spatialisation d'une pièce UPIC, concert et captation d'une pièce mixte, journées d'études et module de formation ; (2) Performances augmentées autour de son œuvre pour piano : création d'environnements hybrides avec performance du pianiste ; (3) Colloque international Xenakis 22 : International Symposium, dont l'importance fédératrice devrait marquer un tournant dans les études xenakiennes ; (4) Journées d'étude accompagnant la reconstitution du Polytope de Cluny.

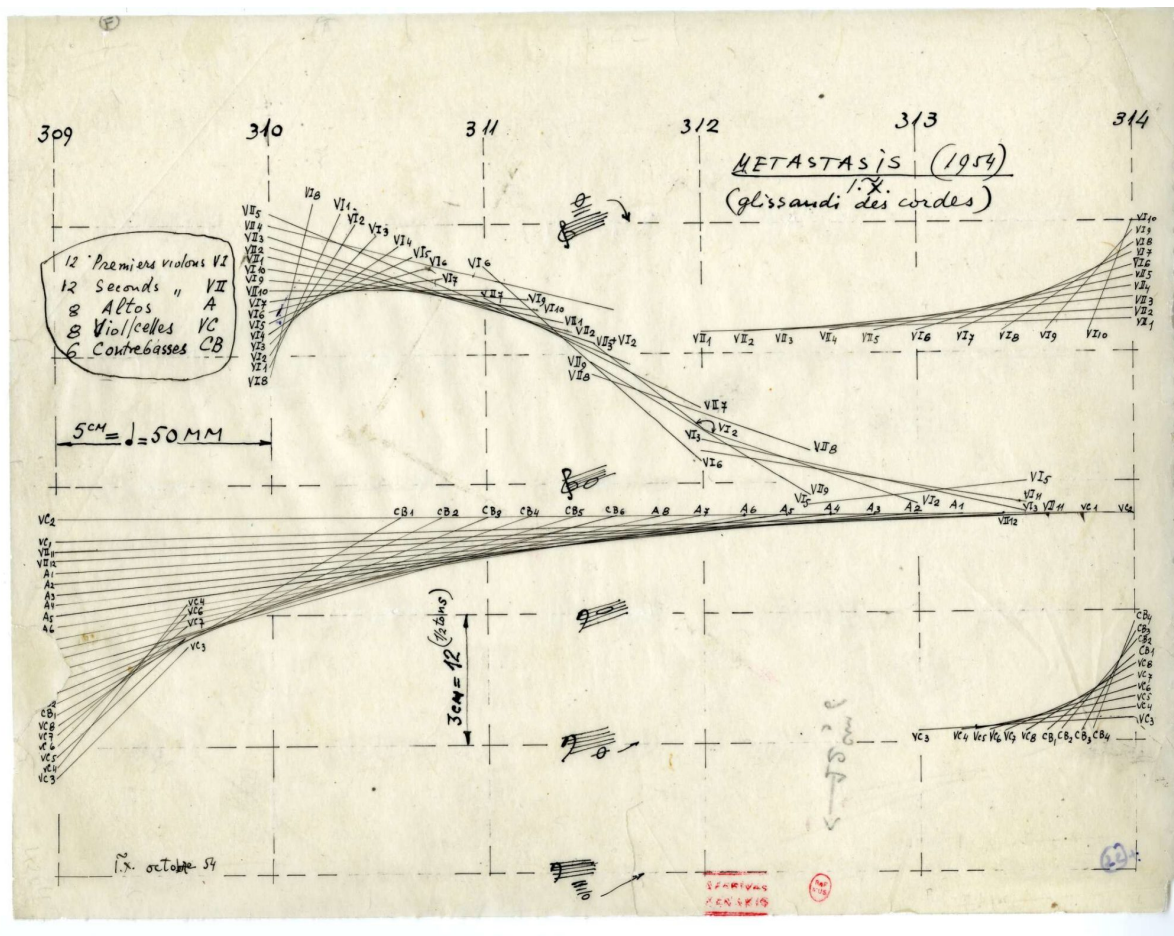


FIGURE 7.1 – Extrait de la partition de *Metastasis* (1953-54) de I. Xenakis

Crédits : Famille Xenakis, <https://www.iannis-xenakis.org/archives/> [Consulté le 04/01/24]

7.1 UPIC : introduction générale

7.1.1 Origines de l'UPIC

Entre 1953 et 1954, Iannis Xenakis compose *Metastasis* pour grand orchestre en utilisant le dessin sur papier millimétré retranscrit ensuite sur des portées. Cette pièce s'inscrit en contre-pied de l'avant-garde de l'époque essentiellement concentrée sur la musique sérielle. En effet, la première partie et la coda sont basées sur l'utilisation de *glissandi* effectué sur des plages temporelles alors inexploitées avec des musiciens individuels (quarante-six instrumentistes à cordes jouent des parties séparées)³. L'UPIC vient de la volonté de

3. Makis SOLOMOS, *Iannis Xenakis*, P.O. Editions, 1996, pp.19-21.

généraliser et de faciliter la composition grâce au dessin⁴ que Xenakis utilise tant dans *Metastasis* que *Pitoprakta*. Notons par ailleurs que les correspondances entre graphisme et synthèse sonore se retrouvent dans de nombreux travaux au XX^{ème} siècle⁵, notamment chez la compositrice Daphné Oram et l’Oramics Machine dès le début des années 60⁶. Développée entre 1968 et 2001 au CEMAMU la première version de l’UPIC a vu le jour en 1977⁷. L’UPIC est une station de composition qui permet aux compositeurs d’utiliser le dessin pour écrire le comportement d’une synthèse additive à différentes échelles. Il s’agit bien d’un dispositif permettant de composer à l’échelle du microtemps (forme d’onde, enveloppe d’amplitude) et macro temps au sens de la composition. Il existe différentes versions de l’UPIC avec des spécifications particulières pour chacune d’elles. Dans cette section, nous nous appuyons sur la version de 1991⁸, première version commerciale décrite dans un article de Gérard Marino, Marie-Hélène Serra et Jean-Michel Raczinski⁹, mais aussi dans les résumés de Rodolphe Bourotte et Henning Lohner^{10 11}.

4. À ce sujet voir l’extrait d’archive Gaumont-Pathé *XENAKIS AUJOURD HUI EN FRANCE N°095* (référence 8200AKDOC00837) et voir Sharon KANACH, « The Ubiquitous UPIC », dans : *From Xenakis’s UPIC to graphic notation today*, sous la dir. de Peter WEIBEL et al., Zeitgenössische Kunst, QR-Codes mit Hörbeispielen, Berlin : Hatje Cantz Verlag, 2020, p. 36-51, ISBN : 9783775747417, p.39

5. Pour un retour sur quelques moments historiques sur le rapport visuel et son voir Andrey SMIRNOV, « UPIC’s Precursors », dans : sous la dir. de Peter WEIBEL et al., Zeitgenössische Kunst, QR-Codes mit Hörbeispielen, Berlin : Hatje Cantz Verlag, 2020, chap. UPIC’s Precursors, p. 96-114, ISBN : 9783775747417

6. Tom RICHARDS, « Oramics : Precedents, Technology and Influence : Daphne Oram (1925-2003) », thèse de doct., 2018.

7. Initialement nommé l’Équipe de Mathématique et Automatique Musicale (EMAMU), devenu le CEMAMU en 1972 puis renommé *Les Ateliers UPIC* en 1985 et enfin le Centre de Création Musicale Iannis Xenakis (CCMX) en 2000

8. Bien qu’il y ait une description assez complète de la version UPIC A, la version de 1977 Guy MÉRIDE, « The Early Days of the Upic », dans : *From Xenakis’s UPIC to graphic notation today*, sous la dir. de Peter WEIBEL et al., Zeitgenössische Kunst, QR-Codes mit Hörbeispielen, Berlin : Hatje Cantz Verlag, 2020, p. 121-139, ISBN : 9783775747417.

9. Gérard MARINO, Marie-Hélène SERRA et Jean-Michel RACZINSKI, « The UPIC System : Origins and Innovations », dans : *Perspectives of New Music* 31.1 (1993), p. 258-269, ISSN : 00316016.

10. Rodolphe BOUROTTE et Cyrille DELHAYE, « Learn to Think for Yourself : Impelled by UPIC to open new ways of composing », dans : *Organised Sound* 18.2 (juill. 2013), p. 134-145, ISSN : 1469-8153.

11. Henning LOHNER, « The UPIC System : A User’s Report », dans : *Computer Music Journal* 10.4 (1986), p. 42, ISSN : 0148-9267.

7.1.2 Description du dispositif

Le dispositif est composé d'une table à dessin¹² avec un stylet électromagnétique, d'un ordinateur¹³, d'un système d'enregistrement et d'un système d'impression. Ce qui est dessiné sur la tablette graphique est affiché sur deux moniteurs à la fois : une représentation graphique et une représentation alphanumérique. En somme, l'UPIC est une station de composition multiéchelle qui permet d'éditer des partitions graphiques et de dessiner à différents niveaux le comportement des oscillateurs. Les compositeurs peuvent dessiner les formes d'onde, les enveloppes d'amplitude, les façons de lire la page et évidemment le comportement des oscillateurs dans le temps. L'ordinateur peut stocker jusqu'à 64 formes d'ondes et 128 enveloppes et quatre pages. La résolution fréquentielle est de l'ordre du centième de ton et la résolution temporelle de six millisecondes¹⁴.

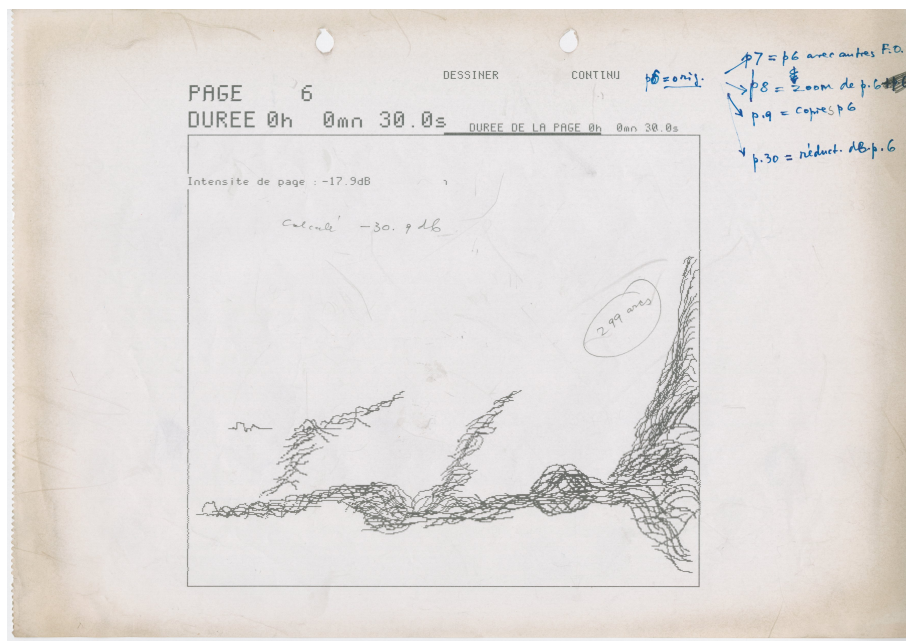


FIGURE 7.2 – Impression UPIC : extrait de partition de *Voyage* page 6

Crédits : Famille Xenakis (OM35-021)

Sur la partition appelée « page » - la figure 7.2 en est un exemple -, chaque segment individuel est appelé un « arc », et chaque arc contrôle des oscillateurs avec une forme

12. Cette table est un tampon conducteur contenant un réseau dense de fibres électriques permettant de traduire et d'envoyer les coordonnées du stylet lorsqu'il entre en contact à l'ordinateur (*ibid.*).

13. PC/AT386 avec Microsoft Windows 3X, la version de 1977 utilisait un SOLAR 16-40.

14. Dans l'article de Marino, les auteurs mentionnent l'existence de 4 tables fréquentielles et d'amplitudes d'une résolution de 16K (16kilo-octets) il nous semble que cela correspond à la résolution pour chaque page.

d'onde spécifique. Chaque arc peut être utilisé pour moduler un autre arc et peut être envoyé sur une sortie physique du *Digital to Analog Converter* (DAC). La vitesse de lecture, le sens de lecture, l'intensité de la page, des sauts dans les pages ou même l'ordre d'enchaînement des pages peuvent être précisés. Ces informations sont enregistrées dans une table appelée « séquence ». Pour chaque arc, nous pouvons définir la forme d'onde convoquée, l'enveloppe d'amplitude, une destination pour la modulation et la sortie physique ¹⁵.

7.2 Analyse de la pièce

Voyage est une pièce stéréophonique qui doit être jouée sur au moins quatre haut-parleurs. De fait, comment transposer la pièce de la configuration de haut-parleurs initialement indiquée par Xenakis dans la partition à la configuration du Planétarium ? Pouvons-nous tirer parti des systèmes de haut-parleurs récents sans aller à l'encontre de la version originale ? Afin de répondre à ces questions et proposer une interprétation, nous devons entrer dans le détail de l'œuvre.

7.2.1 Documents, contexte et montage

Composée avec l'UPIC en 1989, elle a été commandée par Paul Eubel le Goethe-Institut d'Osaka pour une exposition internationale de cerfs-volants. La première mondiale a eu lieu au temple Kamejama Hontokuji, de Himeji (Osaka) le 1^{er} avril de la même année. Elle fait partie des 4 pièces composées par Xenakis avec l'UPIC : *Mycène Alpha* (1978), *Pour la paix* pour chœur et bande (1981), *Taurhiphanie* (1987), *Voyage absolu des Unari vers Andromède* (1989). Aujourd'hui, ce qu'il reste de l'œuvre, ce sont les bandes des deux versions (et leur numérisation), les pages imprimées issues des croquis UPIC, les données correspondantes imprimées à partir de l'UPIC, les diagrammes et quelques notes du compositeur. Comme nous venons de le préciser, il existe deux versions de la pièce : l'une de 12 minutes et 30 secondes utilisée pour la création, et une version plus longue de 15 minutes et 30 secondes, à laquelle Xenakis a ajouté deux pages après la création. En effet, dans une note du compositeur datant 28 mars 1989 (voir figure 7.4),

15. L'UPIC semble avoir seize sorties physiques. Pour autant, nous ne savons pas si l'enregistreur était stéréophonique, quatre, huit ou seize pistes.

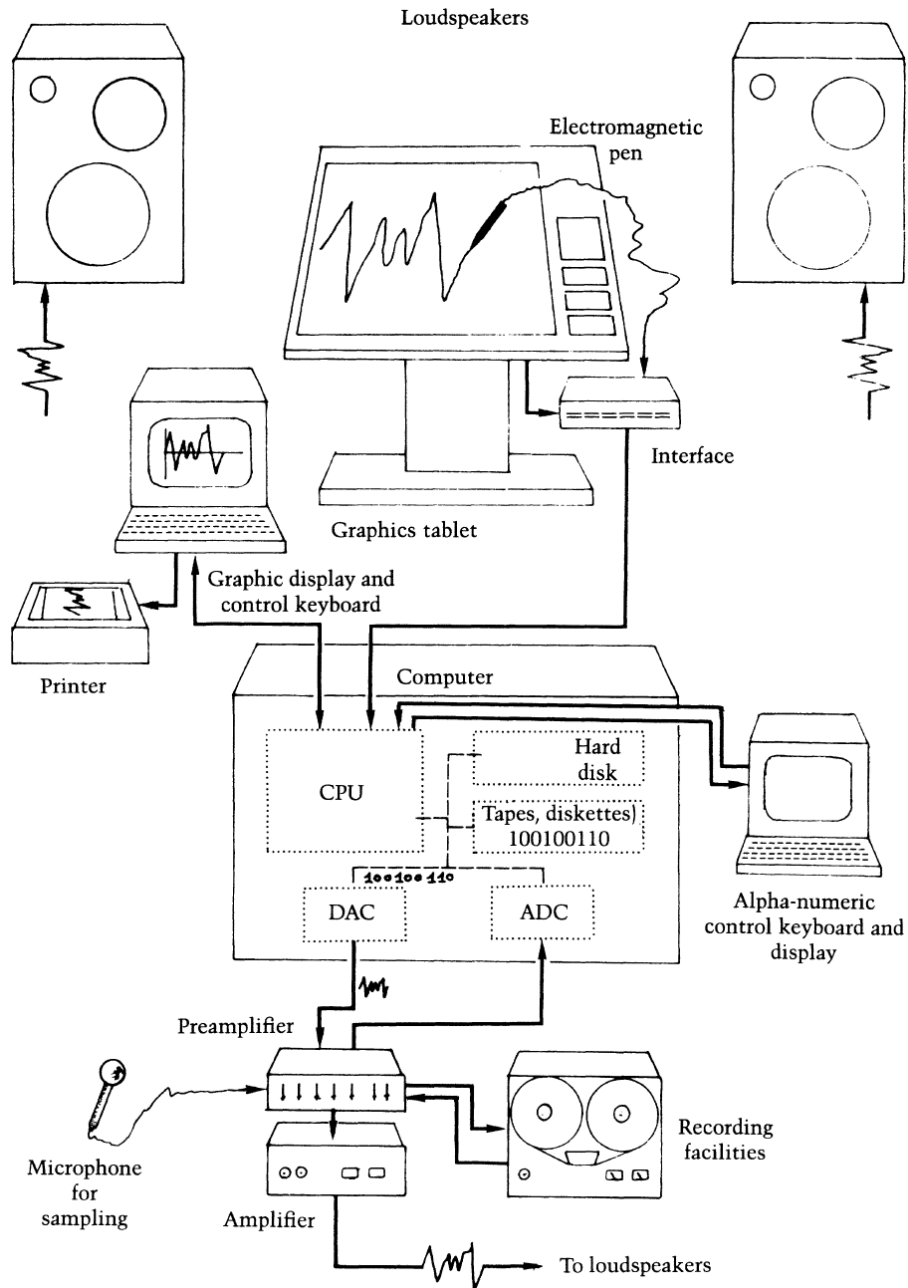


FIGURE 7.3 – Schéma du dispositif de l'UPIC

Crédits : Henning LOHNER, « The UPIC System : A User's Report », dans : *Computer Music Journal* 10.4 (1986), p. 42, ISSN : 0148-9267, p.45

nous pouvons voir l'ordre des pages pour le montage ainsi qu'une spécification « UNARI B - après l'envoi à Osaka j'ajoute + p9 + p 31 ». Nous supposons à partir de cette note que chaque page UPIC a été enregistrée sur bande et que le montage a été réalisé en jouant sur deux magnétophones.

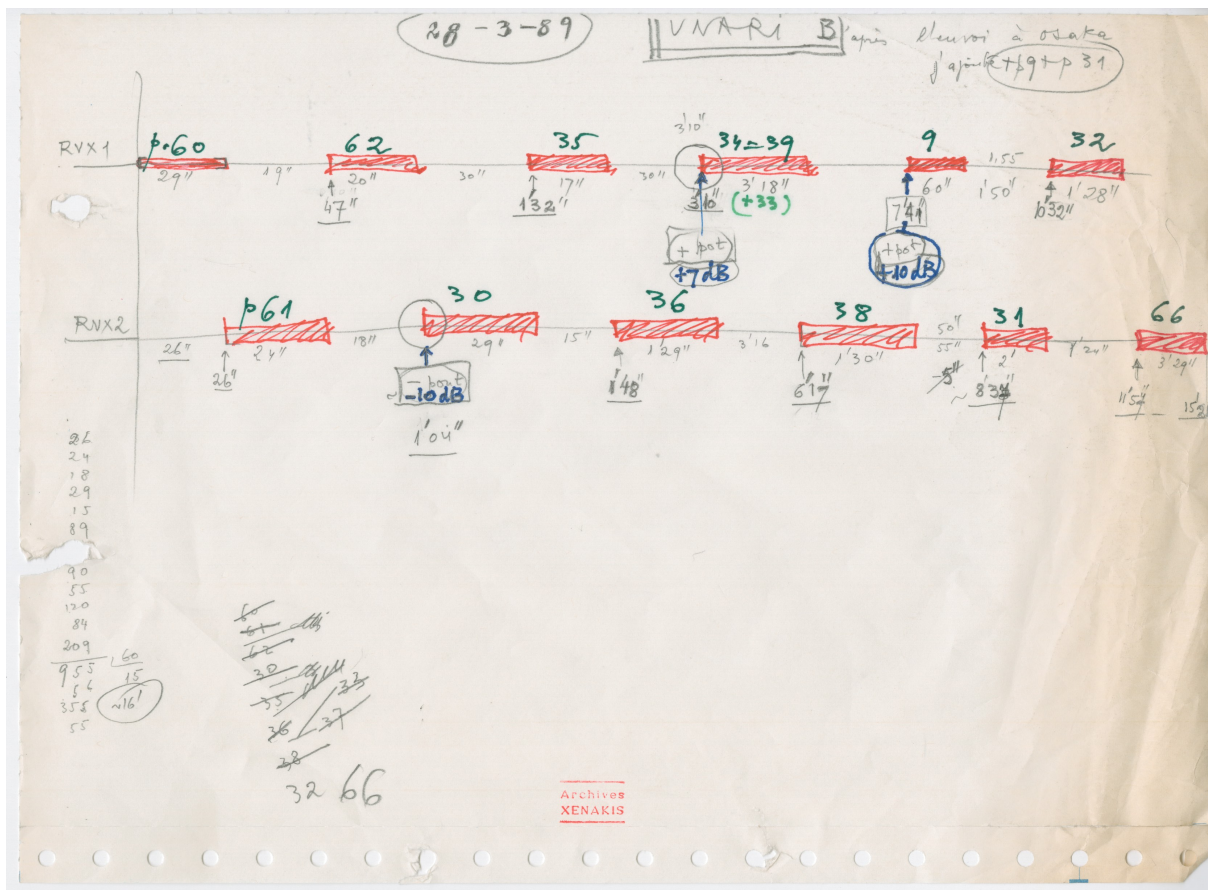
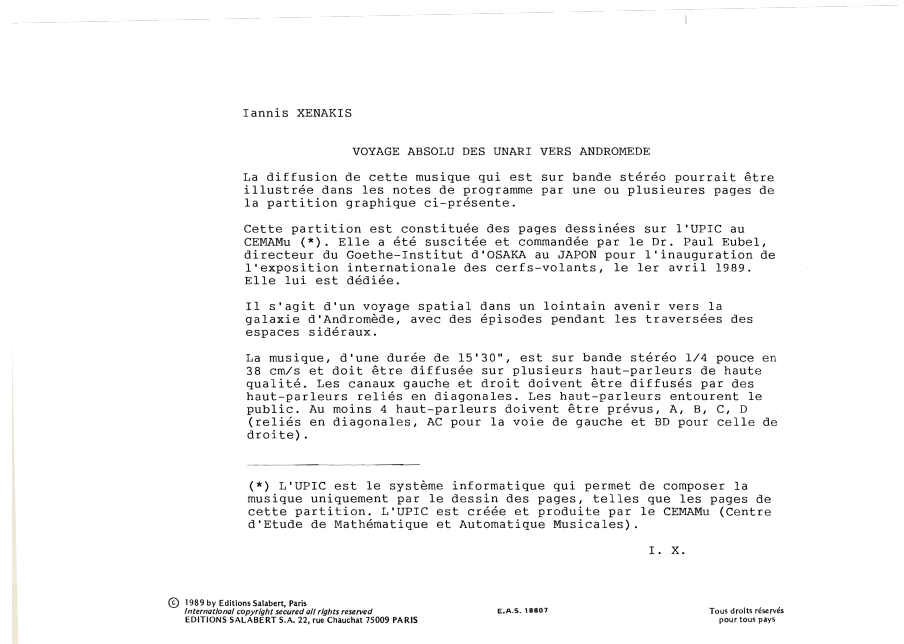


FIGURE 7.4 – Indication de montage pour la version de 15'30"

Crédits : Famille Xenakis (OM35-003)

Par exemple, la bande correspondant à la fin de la page 60 se superpose au début de la page 61. Dans la notice de la partition, Xenakis a demandé que la pièce soit jouée sur un système « quadraphonique »¹⁶. Comme nous pouvons le voir dans la notice (7.5), le compositeur écrit : « Les canaux gauche et droit doivent être joués sur des haut-parleurs disposés en diagonale. Les haut-parleurs entourent le public. Au moins, quatre haut-parleurs doivent être utilisés, A, B, C, D (liés en diagonale AC pour la voix gauche et BD pour la voix droite). »

16. Cette indication se situe dans la notice de l'œuvre pour Osaka.

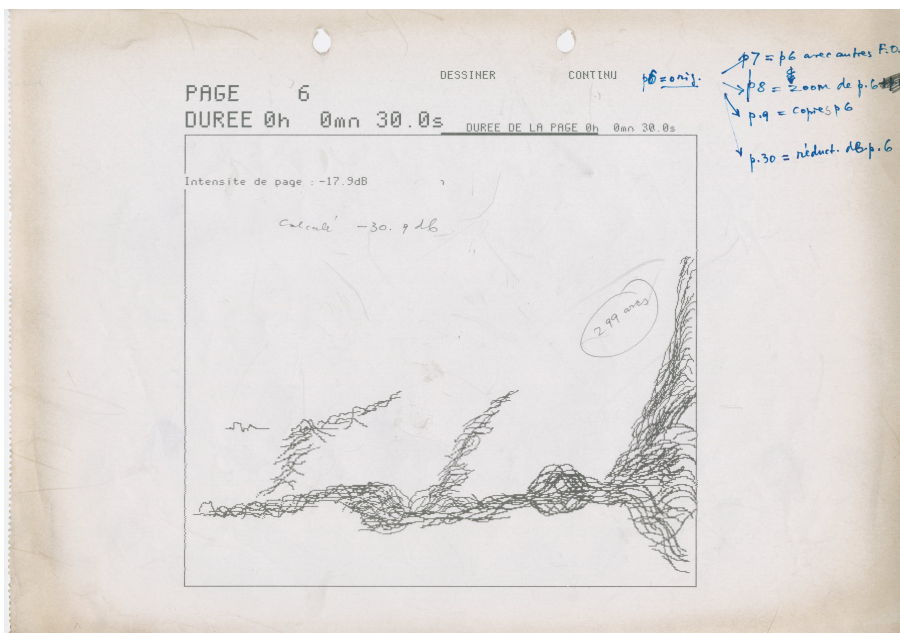
FIGURE 7.5 – Notice de *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* (version de 15'30'')

Crédits : Éditeur Salabert

Au vu de ces indications, nous avons déjà un indice, car Xenakis a écrit « au moins quatre haut-parleurs » et non « sur quatre haut-parleurs ». Lorsque nous avons commencé à travailler sur la pièce, nous nous sommes demandés s'il était possible de trouver des traces d'attributs spatiaux dans la partition, tels que des mouvements, de la profondeur ou de la localisation, même si la pièce est stéréophonique. L'idée était de trouver des éléments pour orienter la nouvelle spatialisation de la pièce.

7.2.2 Écriture de la spatialité

L'écriture de la spatialité dans *Voyage* se trouve en partie dans l'assignation du canal de sortie pour chaque arc. En effet, lorsque nous regardons un extrait de partition, par exemple la page 6, présentée dans la figure 7.6, et que nous essayons de corréler les tracés avec les données alphanumériques, nous voyons que Xenakis utilise différentes sorties pour des motifs proches. Par exemple, à chaque page est associé un tableau de valeurs décrivant toutes les informations liées aux arcs (numéro, forme d'onde, enveloppe, intensité, position du début sur l'axe temps/fréquence, le canal de sortie et la modulation). L'arc n°1 joue la forme d'onde n°36 avec l'enveloppe d'amplitude n°46, à une intensité de -0.3, et son extrémité gauche se situe à [146, 1135], il sortira sur le canal 1. En l'occurrence, nous



PAGE 6							
Arc	F. d'o.	Env.	Int.	X0	Y0	Canal	Arc mod.
000001	36	49	-00.3	000146	001135	1	000000
000002	36	49	-00.3	000397	001178	2	000001
000003	36	49	-00.3	000616	001123	1	000000
000004	36	49	-00.3	000905	001078	2	000000
000005	36	49	-00.3	001221	001071	1	000000
000006	36	49	-00.3	001475	001102	2	000000
000007	36	49	-00.3	001696	001139	1	000000
000008	36	49	-00.3	001832	001223	2	000000
000009	36	49	-00.3	002192	001414	1	000000
000010	36	49	-00.3	000448	001110	2	000000
000011	36	49	-00.3	000515	001254	1	000000
000012	50	18	-00.3	000648	002495	2	000000
000013	50	6	-00.3	001669	002470	1	000000
000014	50	18	-00.3	002125	002495	2	000000
000015	50	18	-00.3	002079	002570	1	000000
000016	50	18	-00.3	002353	002611	2	000000
000017	50	18	-00.3	002408	002498	1	000000
000018	50	18	-00.3	002704	002710	2	000000
000019	50	18	-00.3	002795	002723	1	000000
000020	50	18	-00.3	003038	002855	2	000000
PAGE 6							
Arc	F. d'o.	Env.	Int.	X0	Y0	Canal	Arc mod.
000021	36	49	-00.3	000236	001206	1	000000
000022	36	49	-00.3	001814	002594	2	000000
000023	36	49	-00.3	001941	002631	1	000000
000024	50	49	-00.3	002673	001218	2	000000
000025	50	49	-00.3	002826	001071	1	000000
000026	50	49	-00.3	002778	001039	2	000000
000027	50	49	-00.3	002863	000950	1	000000
000028	50	49	-00.3	002920	000883	2	000000
000029	50	49	-00.3	003117	000911	1	000000
000030	50	49	-00.3	003688	000938	2	000000
000031	50	49	-00.3	003726	000966	1	000000
000032	50	49	-00.3	003946	001083	2	000000
000033	50	18	-00.3	001111	001402	1	000000

FIGURE 7.6 – Impression UPIC (de haut en bas) : page n°6 des pages composées pour Voyage et tableau de données associé

Crédits : Famille Xenakis (OM35-001, OM35-002)

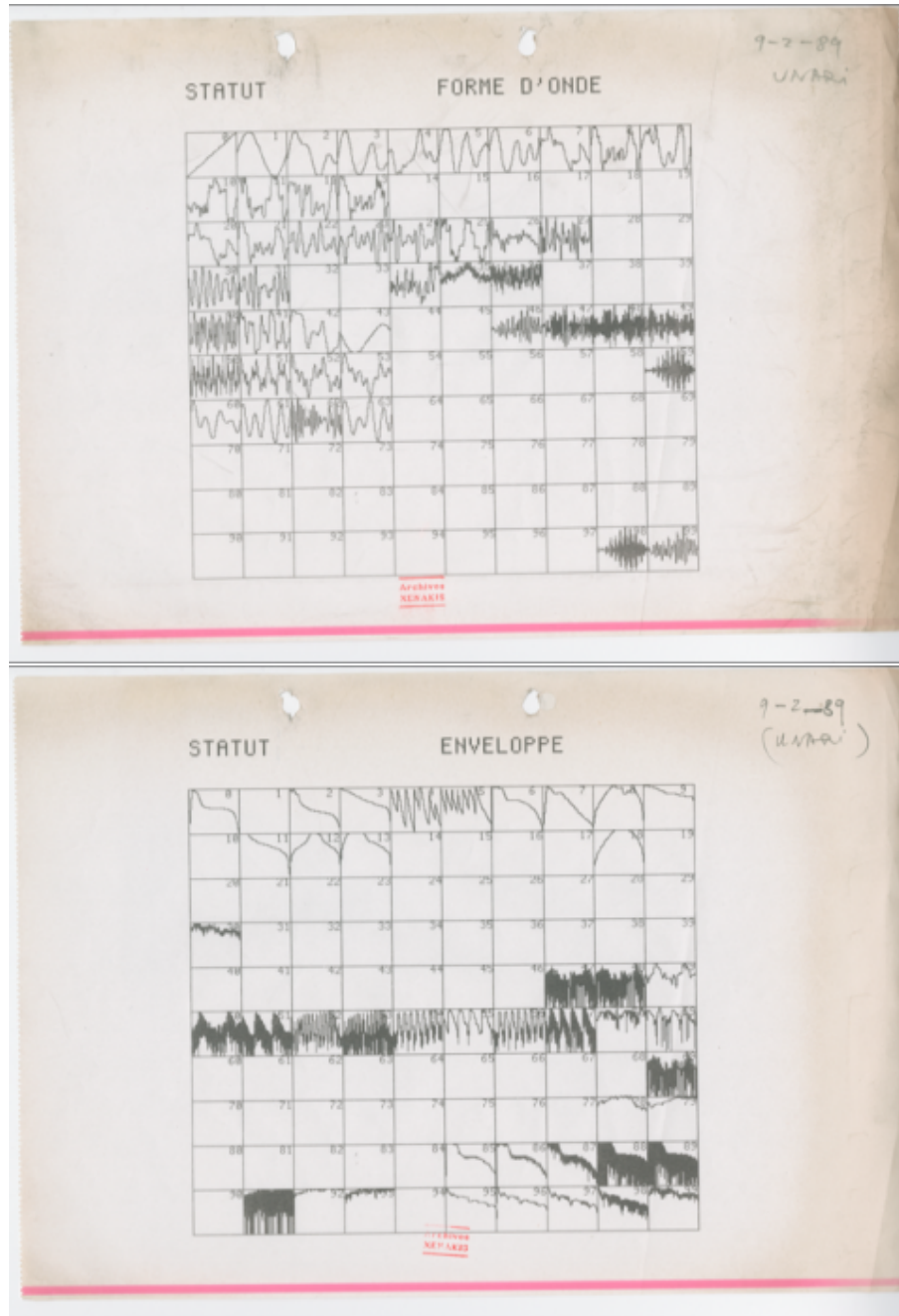


FIGURE 7.7 – Impression UPIC (de haut en bas) : formes d’onde et enveloppes d’amplitude utilisée pour *Voyage*

Crédits : Famille Xenakis (OM35-021, OM35-022)

pouvons voir que le compositeur associe tous les arcs de numéro impair au canal de sortie 1 et tous les arcs de numéro pair au canal de sortie 2. Si nous regardons à quoi chaque arc ressemble, nous pouvons déduire qu'il y a une proximité morphologique entre chaque arc. Sur cet extrait, les arcs de 1 à 11 ont la même forme d'onde et la même enveloppe, de plus si nous regardons de près le dessin, chacun d'eux semble être la variation d'un type. Nous retrouvons ce processus tout au long de la page. À l'échelle de l'arc, un même arc se retrouve à la fois sur l'axe temporel et sur l'axe fréquentiel d'une façon difficilement quantifiable (de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes et quelques hertz), en plus d'être diffusé sur des haut-parleurs différents. D'une certaine façon, nous pouvons considérer qu'il s'agit une forme de décorrélation au sens de Vaggione générant de fait des sensations de spatialité. Celles-ci peuvent-être des mouvements, comme c'est le cas dans les trois premières secondes de la pièce ou des sensations plus difficilement qualifiables. Nous prenons ici en exemple la page numéro 6, qui n'apparaît pas dans la partition finale, que nous pouvons déduire du croquis montrant les indications de montage (voir la figure 7.4), car il s'agit de l'élément fondamental. Nous pouvons lire en haut à gauche « p6=orig », « p8=zoom de p.6 » et ainsi de suite. Un autre tableau réalisé à la main par le compositeur montre les relations de parentés entre les différentes pages. Dans la partition finale, la suite des pages est : 60, 61, 62, 30, 35, 36, 34=39, 38, 9, 31, 32, 66¹⁷. Nous voyons dans la figure 7.8 que la page 60 est composée de la page 8, elle-même étant un zoom de la page 6 (plus une « mélodie »), les pages 61 et 62 sont des rotations de la page 60, la page 30 est la superposition de la page 8 avec une rotation d'elle-même, la page 35 une rotation de la 8, la page 36 est la page 6 avec ce que nous supposons être de la modulation de fréquence (« MF alternée »), la page 34 est la seule à ne pas avoir de relation avec la page 6, la page 9 est une superposition de plusieurs mises à l'échelle de la page 6, les 31 et 32 sont des rotations/superpositions de la page 8 et la 66 nous n'avons pas d'indication. Le musicologue Pierre Couprie dans son analyse de l'œuvre montrait déjà les relations entre les différentes pages : superposition, rotation, inversion, miroir, zoom¹⁸.

17. L'ordre des pages dans les fichiers envoyés par l'éditeur n'est pas le bon, en effet, le document de la « partition » a les pages organisées dans l'ordre croissant.

18. Pierre COUPRIE, « Analytical Approches to Tauriphonie dans *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* by Iannis Xenakis », dans : *From Xenakis's UPIC to Graphic Notation Today, From Xenakis's UPIC to Graphic Notation Today*, sous la dir. de Peter WEIBEL, Ludger BRÜMMER et Sharon KANACH,

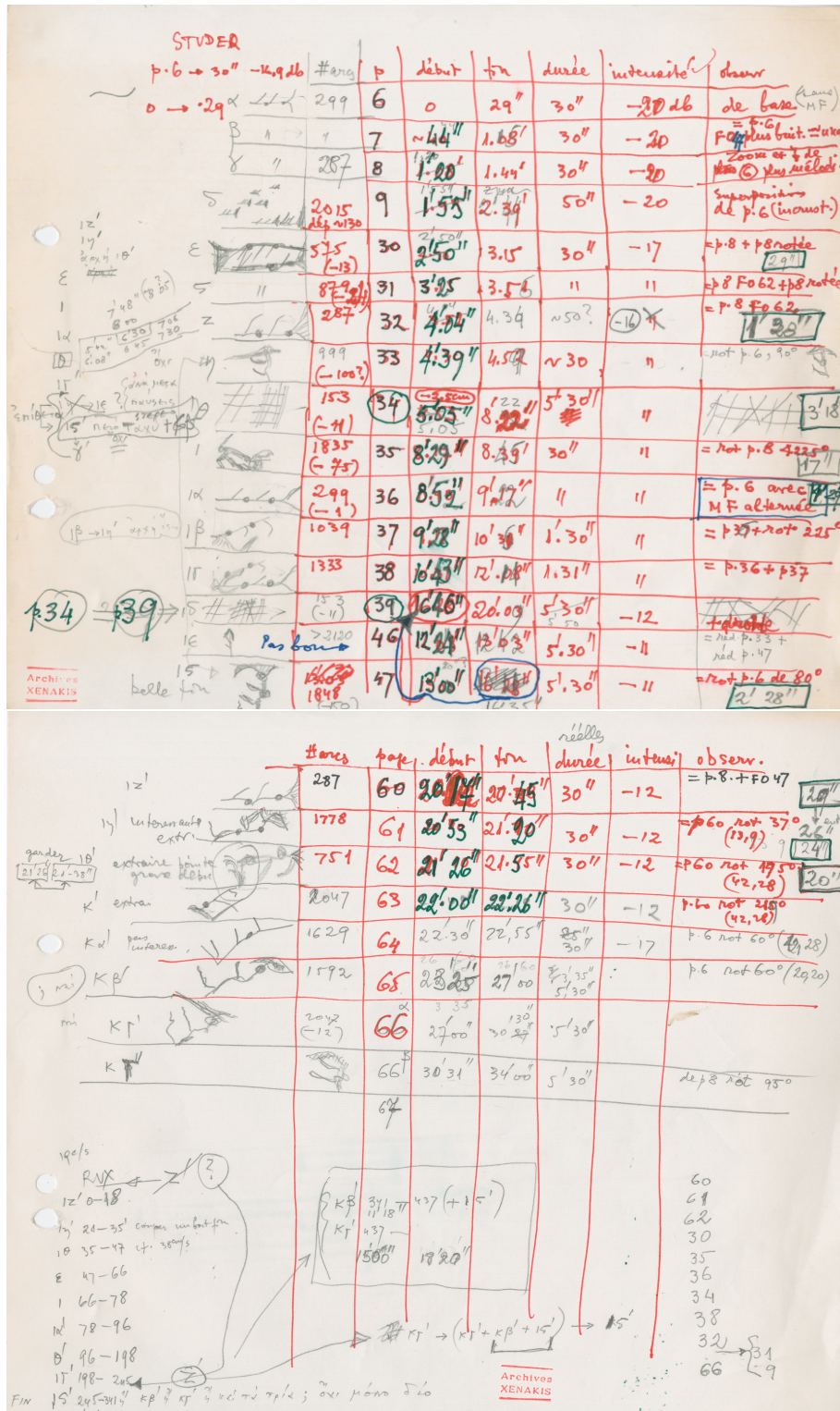


FIGURE 7.8 – Tableau manuscrit indiquant l'origine des pages et quelques spécifications

Crédits : Famille Xenakis (OM35-021 et OM35-022)

7.3 Vers une mise en espace

7.3.1 Planétarium de la Cité des Sciences et de l'Industrie

D'après cette analyse, les indications dans la notice de l'œuvre (entourant le public, avec minimum quatre haut-parleurs), doublées de l'écriture de la stéréophonie et le fait de lier les canaux à des haut-parleurs positionnés en diagonale, nous pouvons dire que Xenakis voulait un rendu enveloppant et qu'il souhaitait une activité spatiale riche. À partir de ce constat, nous avons essayé différentes stratégies de mise en espace pour le dispositif du planétarium. Nous allons ici dire quelques mots sur le dispositif, puis sur notre méthode de travail et enfin sur les stratégies de mise en espace essayées, nous finirons sur l'adaptation pour les autres dispositifs.

Le planétarium est équipé avec un système de onze haut-parleurs et six caissons de basse organisés en une couronne de dix HP sur un même plan, un HP au zénith. Le système a une matrice intégrée que nous n'avons pas pu contourner¹⁹, de fait, nous ne pouvons envoyer que cinq canaux aux haut-parleurs sur le plan horizontal et un canal pour le haut-parleur situé au zénith. Dans notre cas, les caissons de basses recevaient un mélange des canaux envoyés aux HP. Les trois HP en arrière gauche et les trois en arrière droit utilisent le même amplificateur (voir la fig 7.9).

7.3.2 Essais et dispositif de travail

Afin de faire des essais en amont de la diffusion, nous avons fait une simulation du dispositif du planétarium dans le dôme du studio d'essai son du CICM. Nous encodons les deux canaux du *Voyage* en ambisonie, puis nous décodons pour un système 6.1²⁰, chacun de ces cinq haut-parleurs virtuels est projeté en ambisonie 3D comme une source nouvelle source, les signaux associés aux arrières sont triplés et répartis dans l'espace virtuel afin de correspondre à l'implantation du planétarium. *In fine*, nous décodons ce flux ambisonique 3D vers le dôme de seize HP.

Hatje Cantz Verlag, 2020, p. 434-457.

19. Nous avons appris cela à un stade avancé du projet.

20. Compris comme un système 5.1 auquel nous ajoutons un HP au zénith.

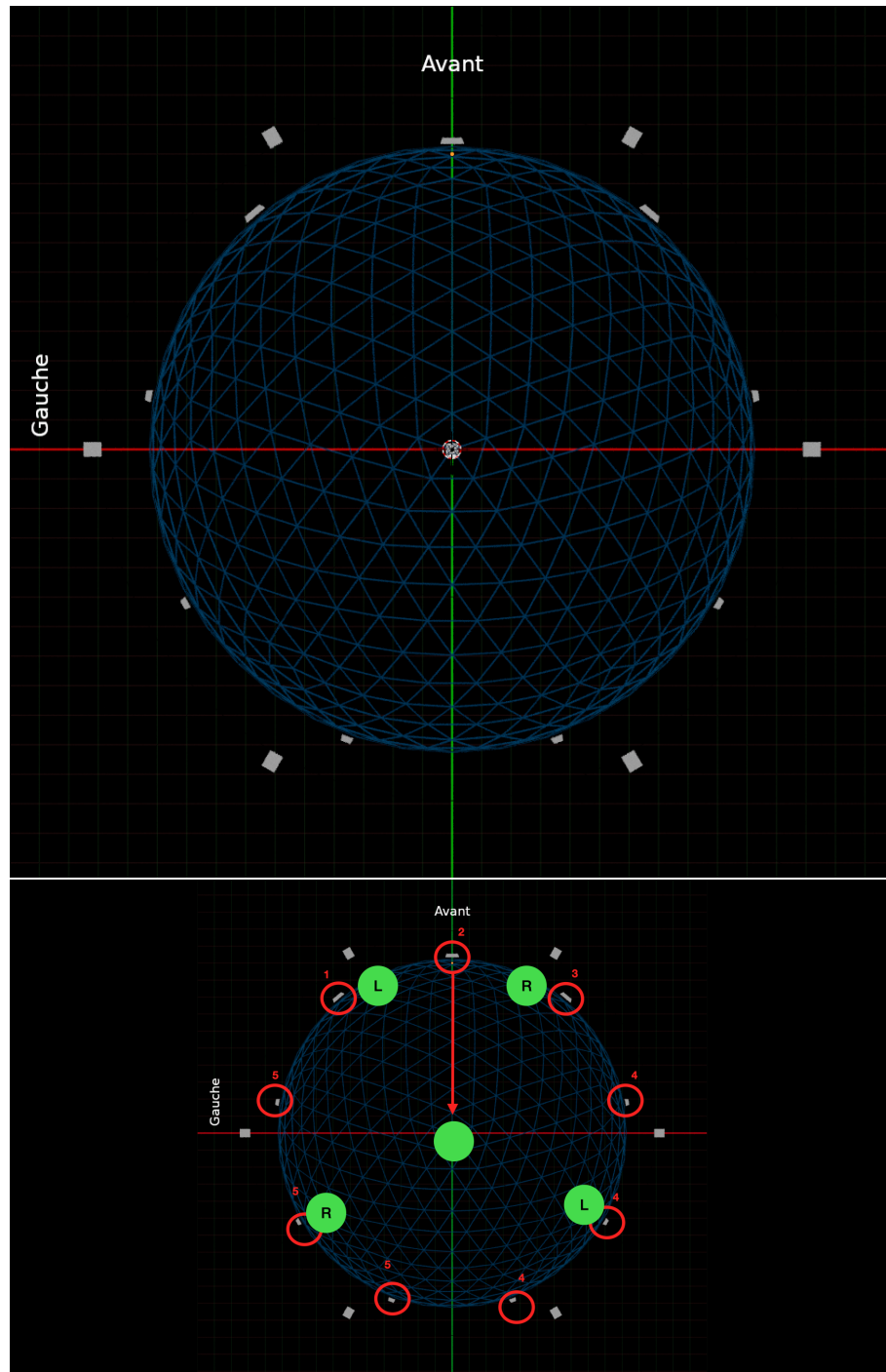


FIGURE 7.9 – Vue orthographique de l’implantation du Planétarium et schéma de projection

Nous avons testé deux techniques afin de faire un effet spatial de l'ordre de l'élargissement des sources : de la diffusion spectrale et de la décorrélation. La diffusion spectrale que nous avons essayée était basée sur la division de la plage fréquentielle de chacun des deux canaux en douze bandes d'un peu moins d'une octave que nous répartissions dans l'espace comme de nouvelles sources. Nous avons utilisé douze filtres à bande dont les bandes passantes se superposent afin de couvrir le spectre sans avoir de trou.

```
1   bandPass(freq) = _~::~fi.bandpass(2, fu , fl)~::~_
2   with{
3   fu = freq - (freq / 4) ;
4   fl = freq + (freq / 4) ;
5   };
6   process = bandPass(190), bandPass(300), bandPass(450), bandPass(675),
           bandPass(1000), bandPass(1500), bandPass(2250), bandPass(3400),
           bandPass(5100), bandPass(7600), bandPass(11500), bandPass(16000);
```

Nous avons essayé deux types de répartitions des vingt-quatre bandes sur le cercle entourant l'auditeur (douze pour le canal gauche et douze pour le canal droit) : les douze bandes correspondant au canal gauche également réparties dans l'hémicycle gauche, en partant de l'arrière avec les basses fréquences et en partant de l'arrière avec les hautes fréquences. Nous avons essayé de mixer cela avec les quatre sources²¹, mais le résultat semblait être une intervention trop importante sur le rendu global, certaines bandes fréquentielles donnaient une place plus importante à certaines morphologies. En somme, nous avons trouvé que le résultat était intéressant, mais qu'il s'agissait d'une opération changeant trop l'équilibre et de fait ne semblait pas pertinent dans une optique de diffusion de pièce électroacoustique. Nous avons par ailleurs essayé d'ajouter de la décorrélation en ambisonie sur chacun des deux canaux avec différents paramétrages (différentes fenêtres de décorrélation, différents taux de réinjection, différents équilibres entre les signaux), mais cela ne nous est pas apparu pertinent.

Par conséquent, nous avons limité la mise en espace à la projection en ambisonie des quatre sources. Dans ce contexte, l'adaptation consiste à adapter les angles d'encodage et

21. Le canal gauche du fichier stéréo est dupliqué et envoyé en avant-gauche et arrière droit et le canal droit du fichier en avant-droit et arrière gauche.

l'équilibre entre les sources situées à l'avant et celles situées à l'arrière de l'auditoire. Le fait de diffuser des fichiers stéréo (ou quadriphoniques) en ambisonie a plusieurs avantages, cela nous permet d'avoir une version adaptable à différents systèmes de HP, et cela a l'avantage de diffuser chacun des canaux sur différents HP, ce qui évite de percevoir un HP comme source.

7.3.3 Adaptations pour *Xenakis Alive*

Cette version a été jouée tous les jours au mois de mars 2022 au planétarium, puis elle a été reprise pour un concert à l'Université Paris 8, et pour finir, nous l'avons jouée au conservatoire national d'Athènes dans le cadre du concert « Xenakis Alive » organisé par la fondation Onassis. L'enjeu de ce dernier concert était le fait d'avoir un système de diffusion octophonique dans une salle qui ne s'y prêtait pas au premier abord. En l'occurrence, la fondation souhaitait que la salle n'ait pas de gradin ni de siège, que le public puisse circuler librement, notamment pour aller se désaltérer auprès d'un bar situé en fond de salle. Le système de diffusion devait donc prendre en compte le fait qu'il n'y a pas d'accroche, que le public soit en mouvement, les différentes colonnes et l'impératif (imposé par le directeur artistique) que les personnes situées au niveau du bar puissent entendre. Dans le patch de concert, nous nous laissions la possibilité de modifier les angles de chacune des sources ainsi que leur gain (voir 7.11).

Cette proposition de mise en espace de *Voyage Absolu des Unari vers Andromène* dans le cadre du centenaire de la naissance de I.Xenakis peut être vue comme une ré-actualisation technique et musicale de l'œuvre. Ce travail sur les archives de *Voyage*, sur l'UPIC en propose des éléments d'analyse et d'interprétation dont la recreation pour le planétarium et le conservatoire ont été des moteurs. Cette ré-actualisation contribue à la présentation de *Voyage Absolu des Unari vers Andromède*, elle est une nouvelle lecture de cette pièce électronique de Xenakis. Enfin, cette expérience musicologique et de réalisation en informatique musicale rejoint par certains aspects notre travail de composition et a enrichi nos recherches aussi bien sur l'interaction des compositeurs avec leur environnement de travail que sur la composition de la spatialité du son.

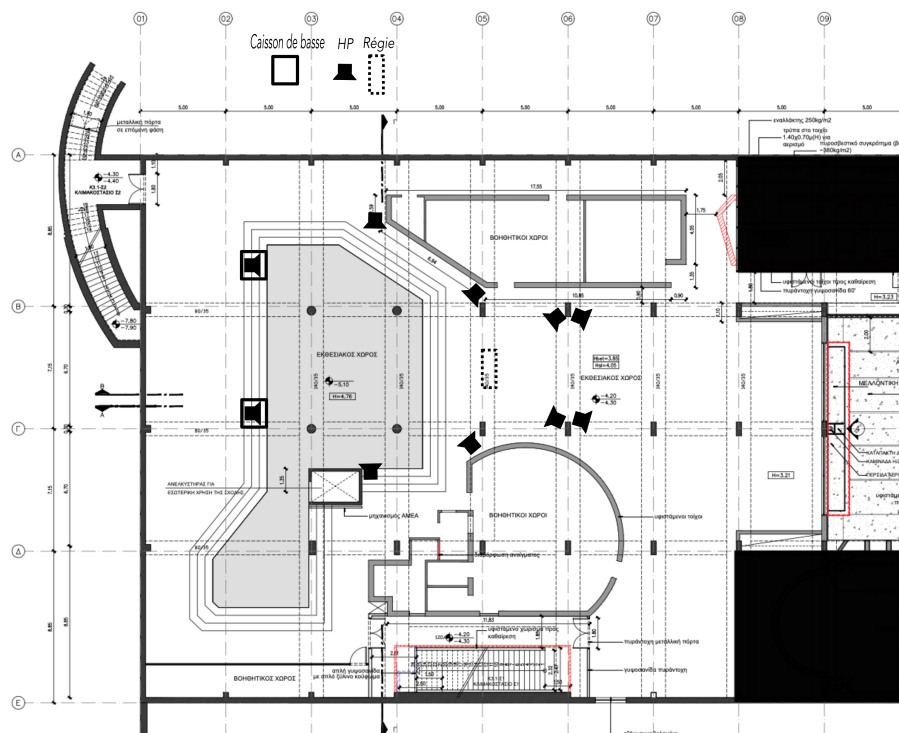


FIGURE 7.10 – Plan d’implantation du système de diffusion pour le concert « Xenakis Alive »

Crédits : <https://www.athensconservatoire.gr/en-polihoros/> [Consulté le 04/01/24]

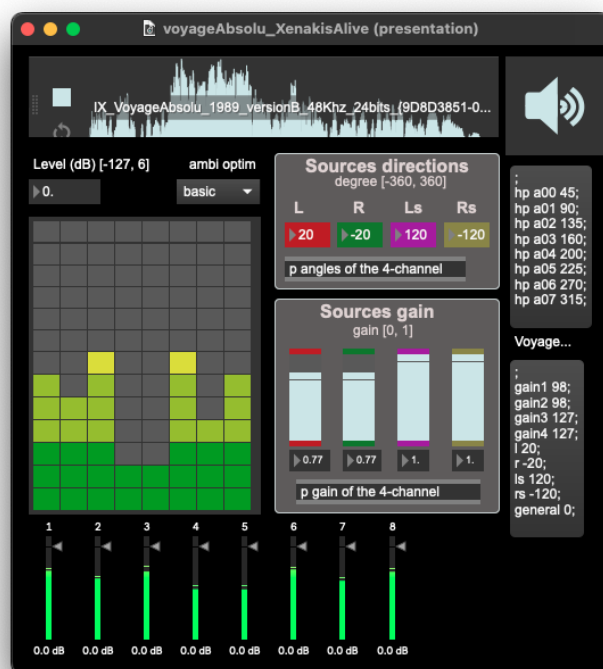


FIGURE 7.11 – Patch de concert pour « Xenakis Alive »

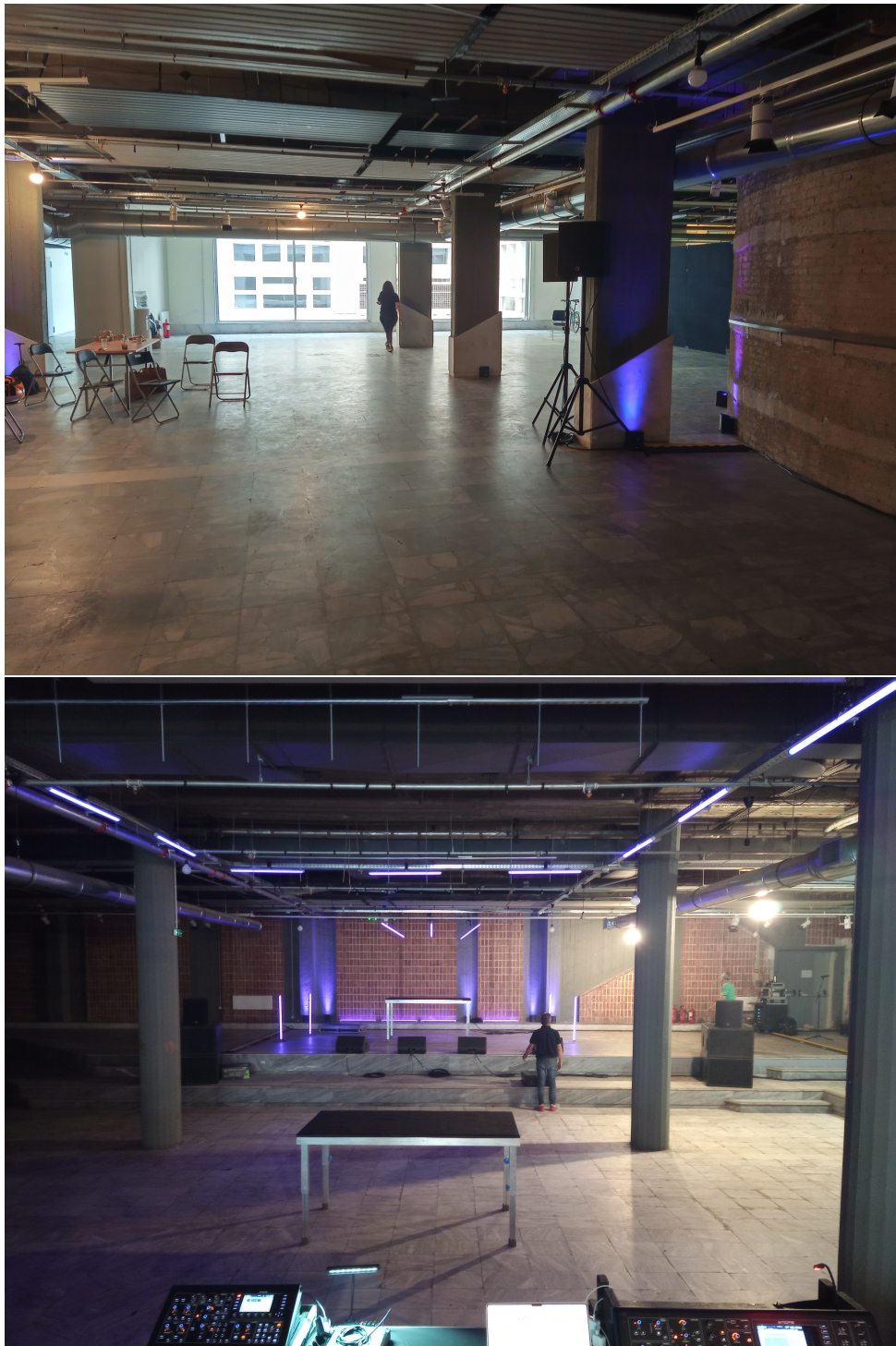


FIGURE 7.12 – Photographie du système de diffusion pour le concert « Xenakis Alive »

De la poiésis aux prototypes

Les trois pièces que nous allons aborder dans ce chapitre sont les terrains musicaux principaux de notre thèse. Nous les considérons comme des prototypes¹ : elles sont la fixation (composée) d'un travail en cours, une manière de rendre sensible des étapes de nos recherches dont la composition a été l'un des moteurs et un moyen de mettre à l'épreuve des considérations technologiques et musicales. Elles correspondent à des stades successifs de nos recherches. *Suspension* nous a permis d'approcher un traitement spatial de façon sensible, *Compression/dilatation* nous a amené à repenser la méthode de mise à l'épreuve des développements technologiques et *Émergences* correspond à un équilibre dans notre pratique de la composition comme une activité de recherche.

Ces trois pièces nous permettent de faire savoir. Cette affirmation a un double sens : produire de la connaissance musicale et sensible puis de la partager. Il nous semble que l'œuvre en elle-même, sans écrit ni discours, simplement par ses potentialités sensibles, en se confrontant à une communauté de pratique, participe de la production de connaissances musicales. Dans les prochaines pages, nous revenons sur ces trois pièces à partir

1. Le proto-type, ou premier type, est historiquement lié aux savoir-faire de l'imprimerie et du moulage (de médaille notamment). Proche de « l'archétype » (gabarit/norme/étalon), et du « modèle » pour des productions en série, il est considéré en sciences et techniques industrielles comme exemplaire premier avant un objet pleinement opérationnel. Dans un sens plus artistique, il est la première démonstration d'effectivité d'une œuvre (à faire) tout en se suffisant à lui-même. Le prototype offre une stabilité provisoire du processus de création tout en étant une démonstration. C'est une coupe, une incursion dans l'atelier, qui stabilise tout en étant un élément de démonstration, car son exhibition est travaillée. Nous employons la notion de prototype artistique en référence à son utilisation par Elie DURING. Le prototype artistique pour DURING comporte une tension entre l'œuvre finie et le processus d'expérimentation. Il s'agit d'une expérimentation dont l'exhibition est travaillée. Il y a pour lui une opposition entre le prototype en art et l'art du processus, car le prototype artistique a une exigence d'effectivité et constructibilité. Voir Elie DURING, « Prototypes », dans : *L'étincelle (Ircam)* 7 (juin 2010), p. 6-12, ISSN : 1952-9864.

du plan poïétique, de nos manières de faire et leur condition d'émergences, afin d'expliquer leur rôle dans nos recherches et les projets musicaux qu'elles concentrent. Sur un plan épistémologique, quels savoirs ces pièces nous permettent de construire ou d'interroger ? Nous venons d'esquisser une première réponse en affirmant qu'elles génèrent, en se confrontant à une communauté d'écoute et de pratique, des connaissances sensibles. Nous tenterons d'y répondre plus précisément en explicitant les différents rôles que ces pièces ont eus dans nos recherches et ce qu'elles nous permettent d'interroger sur le plan musical et technologique.

8.1 *Suspension*

Première pièce composée dans le cadre de cette thèse², *Suspension* cristallise plusieurs problématiques musicales et constitue une première étape d'investigation sensible autour d'un traitement en ambisonie d'ordre élevé : la décorrélation temporelle en ambisonie. Le lecteur pourra se rapporter à l'annexe 9.3 pour écouter la pièce. Dans cette section, nous allons revenir sur le contexte de composition, les techniques employées et les perspectives que cette pièce nous a données.

8.1.1 Contexte de composition

L'aspiration à une spatialité émergente, affranchie d'une dépendance à la localisation de la source et à la trajectoire, nous a orientés vers une utilisation du traitement spatial du son plutôt que vers sa mise en espace. Notre exploration des représentations utilisées pour composer l'espace sonore a révélé l'absence d'interfaces graphiques spécifiques pour ces traitements et souligne la focalisation sur une pensée euclidienne. Ainsi, la concentration des modes de représentation semble créer des angles morts dans la conception de la spatialité du son en musique que nous souhaitons explorer. Afin d'interroger les enjeux musicaux inhérents à la conception de représentations opératoires, nous avons d'abord expérimenté le traitement sur le plan sensible.

2. Création de la version 2D en 2022 dans le cadre d'une séance d'écoute électroacoustique à la MSH PN, puis de la version 3D à la Maison des Métallos pour les Rencontres de l'EUR ArTeC en novembre 2023.

Lors de ces premiers mois de recherche, nous finalisons un modèle de synthèse FM additive écrit en langage FAUST³, c'est avec ce modèle que nous avons amorcé notre investigation. Afin de contrôler la dimension temporelle de ce modèle de synthèse, nous utilisons un décalage entre les différents partiels. Nous souhaitons alors explorer l'idée d'une décorrélation sur le plan horizontal des différents partiels tout autant que sur le plan spatial. La décorrélation en ambisonie s'est présentée de fait comme le traitement auquel nous allions nous intéresser. Elle est très efficace sur des sources avec des transitoires d'attaque marquée, mais *quid* des sons purs tenus? Nous étions très intéressés par ces sons purs et spectres étalés dans le temps, car cela nous permet d'entendre les battements entre les partiels deux à deux. Nous avons alors l'impression que la localisation de sons purs et les battements étaient déjà riches d'ambiguïtés spatiales.

Sur le plan poétique, nous étions inspirés par l'expérience sensible de l'altitude⁴. À partir de ces inspirations et envies musicales, nous souhaitons travailler l'ambiguïté de la localisation, de la distance et de la taille en situation d'écoute enveloppante. Nous cherchions à générer des qualités spatiales du son qui ne soient pas clairement qualifiables, assez ambiguës à identifier, mais tout en percevant quelque chose qui est de l'ordre de l'opération sur la spatialité du son.

8.1.2 Synthèse FM, modèle de Chowning et utilisation

Nous utilisons un modèle de synthèse FM additive implémenté à partir des écrits de John Chowning, nous en présentons ici les fondements. La modulation de fréquence est connue pour son utilisation dans les systèmes de communication depuis le XIX^{ème} siècle.

3. Le code de ce modèle de synthèse se situe en annexe 9.3.

4. En effet, en haute montagne, lorsque nous marchons sur un glacier, il y a une dualité fascinante : à l'échelle humaine, tout est extrêmement grand, loin, ancien, et nous n'entendons que ce qui est très proche. Lorsque nous sommes assez engagés dans un massif et qu'il n'y a ni vent ni autre source acoustique, nous n'entendons que les sons générés par notre corps (les battements de cœur, le souffle) et ceux générés par nos mouvements (frottement des vêtements, pas dans la neige ou dans la glace). Nous pouvons rapprocher cette sensation de l'expérience de l'écoute dans une chambre anéchoïque. Lorsque les parois sont assez éloignées, ces sons nous parviennent avec comme seule réflexion celle du sol. D'un autre côté, nous avons une vue sur des géants de glace et de pierre dont il est difficile pour une personne inexpérimentée d'évaluer la distance et la taille tant les échelles spatio-temporelles nous dépassent. D'une certaine façon, nous n'avons aucun indice d'origine acoustique des géants qui nous entourent et pourtant ce sont eux qui mobilisent toute notre attention visuelle. Contribuant à la perte de repère sensoriel, toutes les odeurs d'origines animales ou végétales très présentes dans la moyenne montagne sont effacées lorsque l'on passe une certaine altitude. Cette dualité entre la perception auditive égocentrée et des indices spatiaux d'origines visuelles est très intéressante.

Les principes théoriques sont attribués à John R. Carson⁵ ingénieur d'AT&T (1922), Balthasar van der Pol (1930). D'un point de vue musical, le compositeur-chercheur John Chowning est reconnu comme un pionnier de la synthèse FM publiant l'article *Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation* en 1973 et brevetant un modèle de synthèse FM⁶. Depuis les années soixante-dix, cette famille de synthèse se retrouve dans de nombreuses productions musicales, notamment au travers de son utilisation dans les synthétiseurs *Yamaha* de la famille *DX*.

La synthèse FM permet de créer un signal complexe avec deux signaux périodiques simples. Ainsi, il est aisé de créer des sons aux timbres riches en composantes fréquentielles et en possibilités de diversifications. Décrit d'une façon très générale, le principe de la synthèse par modulation de fréquence est le suivant : la fréquence d'un signal dit « porteur » est modulée à la fréquence d'un signal dit « modulant » avec une importance proportionnelle à l'amplitude du signal modulant. D'une façon plus formelle, nous trouvons communément l'écriture de l'amplitude de la FM à l'instant t :

$$A_{mf}(t) = A.\sin(\alpha t + I.\sin(\beta t)), \quad (8.1)$$

où α est la fréquence de la porteuse (en rad/s), β est la fréquence de la modulante (en rad/s), $I = \frac{d}{\beta}$ (d la déviation fréquentielle) et A est l'amplitude.

Le spectre résultant comporte des partiels organisés en degré, chaque degré comporte deux partiels à l'exception du degré 0. La fréquence de chaque composante est égale à $c \pm k.m$ pour $k = 0, 1, \dots, n$ où $n \approx I + 2$ d'après Chowning⁷ et k est le degré. Sachant qu'il y a deux composantes par degré, sauf pour le degré 0, nous savons alors que le nombre total de composantes audibles est environ égal à $2.(I + 2) + 1$ ⁸. En suivant cette formulation, les partiels peuvent avoir une fréquence inférieure à 0 Hz⁹. Les composantes

5. John Renshaw CARSON, « Notes on the Theory of Modulation », dans : *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 10.1 (1922), p. 57-64.

6. John CHOWNING, « Method Of Synthesising A Musical Sound. United States patent application », US4018121A, 1977. Par ailleurs, de multiples autres modèles de synthèse FM cohabitent (James BEAUCHAMP, « Will the Real FM Equation Please Stand up », dans : *Computer Music Journal* 16.4 [1992], p. 6, ISSN : 0148-9267).

7. John M. CHOWNING et David BRISTOW, *FM theory & applications, By musicians for musicians*, Tokyo : Yamaha Music Foundation, 1986, 195 p., ISBN : 9784636174823, ch.4.

8. La règle de Carson permet d'évaluer la largeur de bande du spectre généré par une synthèse FM de façon plus précise.

9. En effet, un phénomène périodique peut avoir une fréquence négative, prenons à titre d'exemple le comportement d'une roue, elle peut avoir une rotation dans un sens comme dans l'autre.

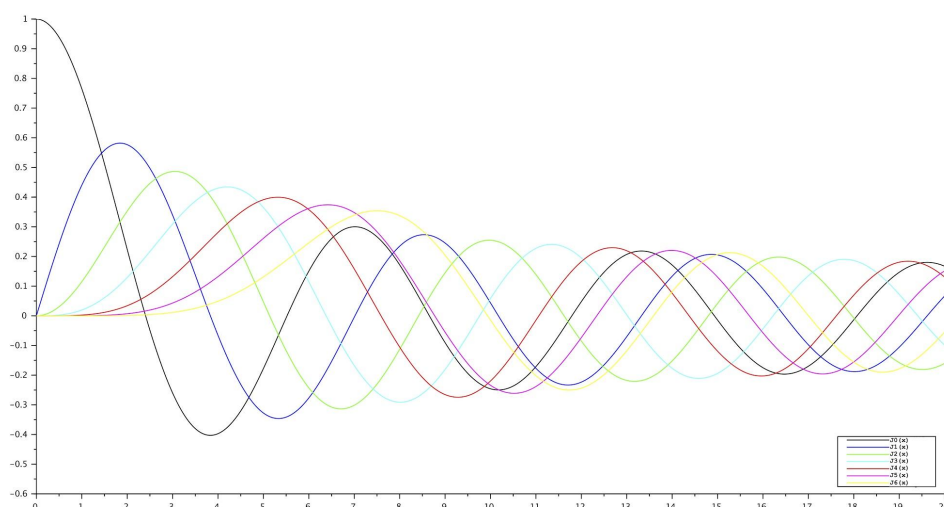


FIGURE 8.1 – Représentation des fonctions $J_n(x)$ jusqu'à l'ordre 6 pour $x \in [0, 20]$

spectrales aux fréquences négatives sont dites reflétées dans la partie positive, c'est-à-dire que nous retrouvons des partiels aux valeurs absolues des partiels inférieurs à 0 Hz. Leurs coefficients d'amplitudes subissent une inversion de signe. Les amplitudes des composantes fréquentielles de la synthèse sont régies par les fonctions de Bessel de première espèce notée $J_n(x)$ et d'ordre n ¹⁰. Ces fonctions ressemblent à des fonctions sinus et cosinus amorties à mesure que la variable augmente. Elles prennent en entrée deux paramètres : le degré et la variable. D'après Chowning¹¹, nous pouvons récrire l'amplitude instantanée de la synthèse FM présenté en 8.1 de la sorte :

$$\begin{aligned}
 A_{mf}(t) = & A[J_0(I)\sin(\alpha t) + J_1(I)[\sin(\alpha + \beta)t - \sin(\alpha - \beta)] + \\
 & J_2(I)[\sin(\alpha + 2\beta)t + \sin(\alpha - 2\beta)] + \\
 & J_3(I)[\sin(\alpha + 3\beta)t - \sin(\alpha - 3\beta)] + \\
 & \dots + \\
 & J_n(I)[\sin(\alpha + n\beta)t + \sin(\alpha - n\beta)].
 \end{aligned} \tag{8.2}$$

10. Lorsque l'on fait de la synthèse FM avec deux oscillateurs, nous n'avons pas besoin de connaître ni de donner à la machine les données correspondantes à ces fonctions.

11. John M. CHOWNING, « The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation », dans : *Journal of the Audio Engineering Society* 21.7 (1973), p. 526-534, p.528.

Comme nous pouvons le remarquer, il y a une alternance entre addition et soustraction des sinus correspondant aux bandes latérales, en effet le signe du coefficient d'amplitude de la bande inférieure des degrés impairs subit une inversion de signe. Si k est impair alors les bandes latérales seront : $partiel_1 = J_k(I) \cdot (-1) \cdot \sin(c - km)$ et $partiel_2 = J_k(I) \cdot \sin(c + km)$. Nous avons alors deux inversions de signes possibles (1) lorsque le degré de la bande inférieure est impair et que la fréquence est positive, (2) lorsque la fréquence d'une composante est négative et que le degré est pair ¹².

Dans cette pièce, nous utilisons le réservoir fréquentiel de deux spectres synthétisés à partir de ce modèle auquel nous appliquons de la décorrélation en ambisonie. Le contenu spectral est déphasé, projeté comme une source directionnelle monophonique en ambisonie puis envoyé vers le module de décorrélation dont la taille de fenêtre varie dynamiquement au cours de la pièce. En ajustant la fenêtre de décorrélation et le niveau de feedback, nous avons observé que certains partiels entraient en résonance, créant des mouvements complexes interagissant avec d'autres partiels dans l'espace.

Nous souhaitons contrôler à la fois le matériau, l'organisation temporelle et les opérations spatiales avec peu de manettes. En l'occurrence, nous avons soixante-trois oscillateurs que nous contrôlons avec la fréquence de modulation, la porteuse et l'index de modulation. Synthétiser des spectres de FM avec une approche additive n'a pas beaucoup de sens, à moins de contrôler la dimension temporelle des partiels de façon indépendante. À partir d'une distribution aléatoire de décalage temporel, nous avons généré plusieurs comportements temporels pour chaque spectre (voir la figure 8.3). Dans chacune de ces situations, nous avons identifié ce qui nous semblait intéressant sur le plan vertical (battements et harmonie) et horizontal (temporalité et contrepoint). Puis, nous définissons des composites entre ces situations, et modifions les valeurs écrites à partir de l'aléatoire.

La pièce est fondée sur deux spectres (voir la figure 8.2) : le premier a comme fréquence porteuse 97.9 Hz, qui est un *sol2* avec un ratio $c : m$ de 1.2 et le deuxième qui est entendu au milieu de la pièce a comme fréquence porteuse 65.4 Hz qui correspond à un *do1* avec un ratio $c : m$ de 3.2. Les partiels du spectre de *do1* sont entendus dans la partie centrale de l'œuvre (de 3' à 4'). Les partiels du spectre de *sol2* sont entendus dans la première et

12. Dans le cas où la fréquence est négative et que le degré est impair, l'amplitude subit deux changements de signe, donc cela revient à ne pas en faire. Cette condition correspond à la fonction *sign* dans le code en annexe 9.3.

dernière partie de l'œuvre. Les partiels des premier et deuxième spectre se superposent de 3' à 4'10''.

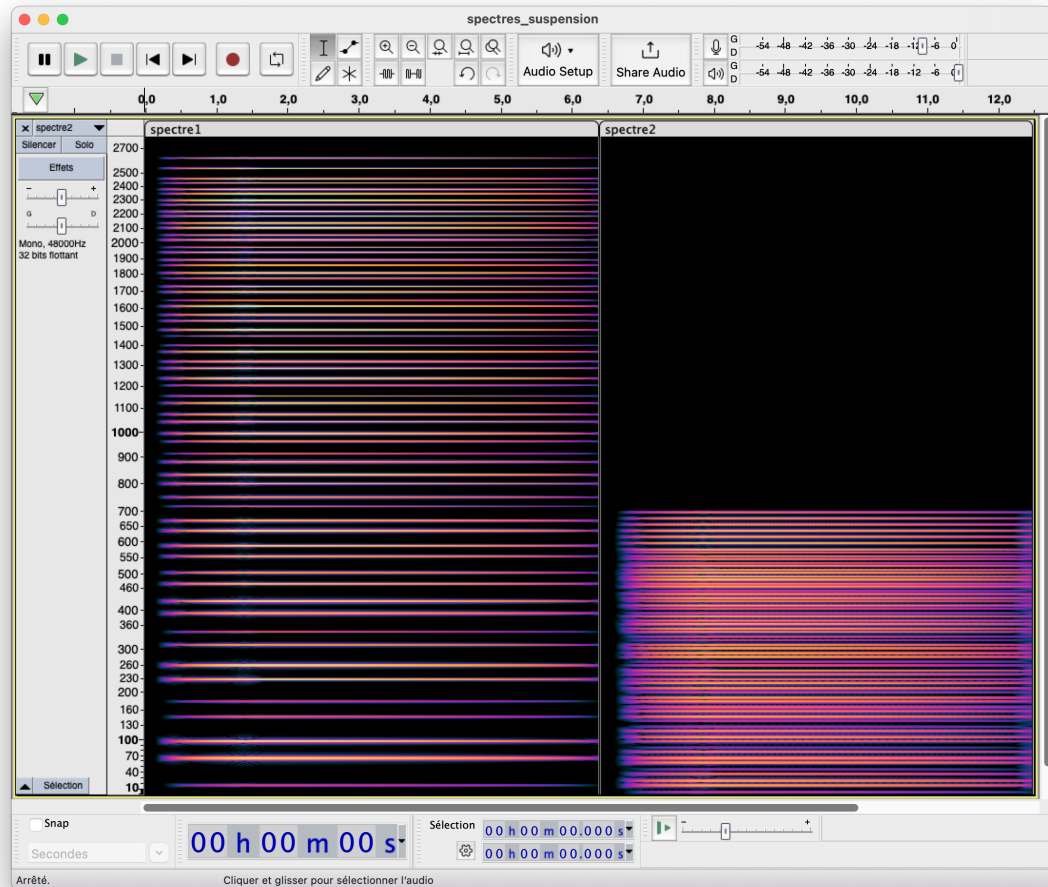
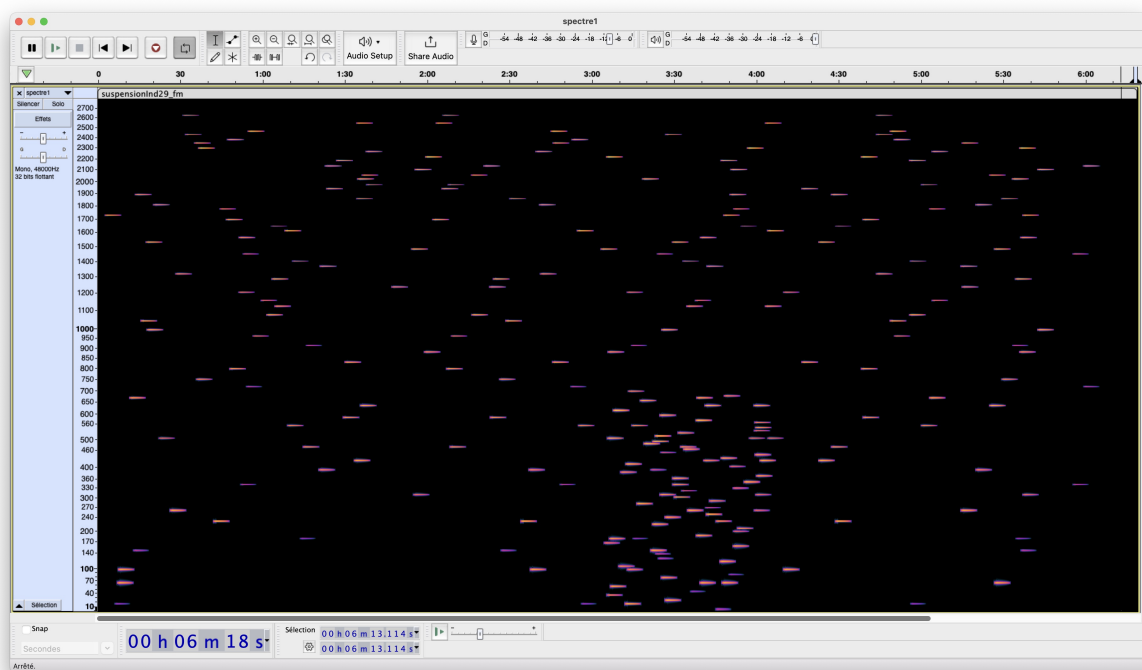


FIGURE 8.2 – Spectrogramme des deux spectres utilisés dans *Suspension*

Dans la dernière partie de la pièce, nous mettons la source en rotation à 392 r/s. Cette fréquence de rotation a pour effet de produire de la modulation en anneau. En effet, l'encodage d'une source en rotation génère des signaux ambisoniques bipolaires, si la fréquence de rotation dépasse un certain seuil, la modulation des signaux ambisoniques a un comportement analogue à une modulation en anneau. Nous avons voulu nous inspirer des traitements dans les deux sens : utiliser la décorrélation comme principe de traitement spatial et comme principe d'écriture temporelle d'une part, utiliser la modulation comme principe de synthèse de matériau et comme principe de traitement spatial. Nous voulions unir de façon quasiment « génétique » le matériau, la composition temporelle et ses traitements spatiaux.

FIGURE 8.3 – Spectrogramme de *Suspension* avec les partiels décalés dans le temps

8.1.3 Bilan

La composition de *Suspension* est intervenue durant les premiers mois de nos recherches. Il s'agissait alors d'éprouver sur le plan sensible les moteurs sonores avant de nous interroger sur les enjeux liés à la conception d'interfaces graphiques. En premier lieu, cela nous a permis de confirmer notre intérêt musical pour la décorrélation en ambisonie. Ensuite, cela nous a donné des intuitions que nous allons développer un peu plus tard : l'étendue des possibilités de la décorrélation, l'interaction complexe entre ses variables et l'importance des plages de valeurs explorées.

La décorrélation temporelle est un traitement très effectif sur les transitoires d'attaques et sur les morphologies comportant des discontinuités. Et pourtant, son utilisation sur des sons purs aux enveloppes d'amplitudes étirées sur plusieurs minutes engendre des transformations spatiales, spectrales et temporelles. En effet, en utilisant de la réinjection et en modulant la fenêtre temporelle dynamiquement, nous arrivons à avoir un rendu aux évolutions spatiales, spectrales et temporelles à partir d'une source monophonique constituée uniquement de sons purs. Bien qu'il soit mieux connu sur des morphologies comportant des formes de discontinuités, le résultat d'une décorrélation est aussi effectif

sur d'autres types de morphologies. Les effets les plus connus de la décorrélation sont la génération du champ diffus et l'élargissement de l'image spatiale que nous avons présenté dans la section 5.1.2, mais ne s'y limite pas. Nous avons pu nous rendre compte que ce traitement a des implications temporelles et spectrales variées. Tout dépend de l'échelle temporelle à laquelle nous appliquons ce traitement, du dynamisme de ses variables (amplitude, vitesse, et direction de variation) et de leur conjonction.

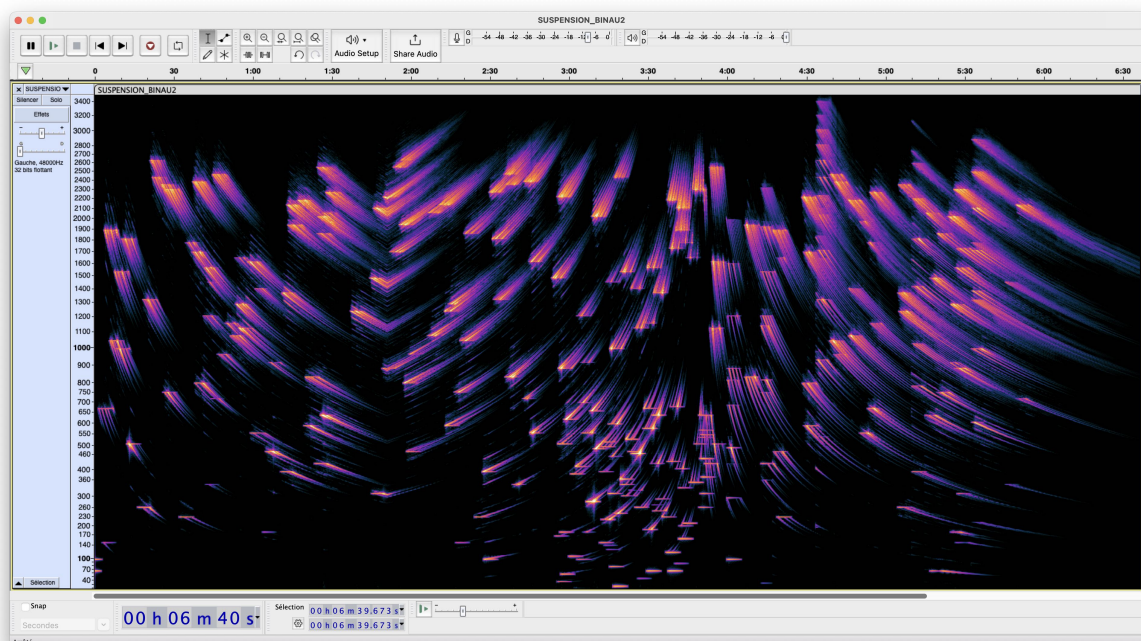


FIGURE 8.4 – Spectrogram de *Suspension* après le passage dans la décorrélation

Le dernier point que ces expérimentations ont permis d'éclairer est l'importance du niveau DSP dans la composition. En saisissant ce traitement jusqu'aux opérations algébriques qu'ils manipulent et leur logique, nous avons eu l'intuition que nous pouvions y insérer des modifications musicalement utilisables et qui prendraient sens sur le plan de la composition.

8.2 *Compression/dilatation*

Composée au cours du printemps et de l'été 2021¹³, *Compression/dilatation* est la deuxième itération du pan création musicale de nos recherches. Elle représente une phase cruciale de nos travaux pour au moins deux raisons. La première est qu'au printemps 2021, nous disposions de presque toutes les maquettes logicielles que nous présentons dans cette thèse (*stap.js*, *2plf.js*, *dtd.js*, décorrélation et *ring modulation* 2D). La deuxième est qu'elle nous a permis de nous rendre compte d'une impasse méthodologique que nous avons pu contourner dans la suite de nos travaux. Le lecteur pourra se rapporter à l'annexe 9.3 pour écouter la pièce. Nous présenterons dans cette section les envies musicales explorées dans cette pièce, le dispositif technique que nous avons utilisé et nous expliciterons l'adaptation méthodologique qu'elle nous a demandé de faire.

8.2.1 Dispositif de composition

Conçue pour mettre à l'épreuve *dtd.js* et les ajouts à la décorrélation en ambisonie, le dispositif de composition n'inclut pas les autres maquettes logicielles que nous avons développées. De fait, ni *2plf.js* ni la *ring modulation* ne sont intégrés au dispositif de composition¹⁴. Contrairement à une approche héritant de la *computer music* dans *Suspension*¹⁵, nous souhaitons pour *Compression/dilatation* nous approcher d'une pratique de composition électroacoustique comportant montage, transformation et écriture du temps sur une *timeline*. Afin d'intégrer les interfaces écrites en *Javascript* pour *Max* dans un DAW, nous nous sommes dirigés vers l'utilisation de l'extension *Max4Live* pour utiliser un patch *Max* comme un maillon de la chaîne de traitement dans *Ableton*.

Sur le plan musical, nous souhaitons explorer deux idées : la production de matières au moyen du *timestretching* et l'opposition source ponctuelle/source diffuse. Nous avons alors décidé d'utiliser un nombre de sources réduit, et de générer toute la matière à partir

13. Créée dans le cadre des *Visites insolites* du CNRS intitulée « Le son du silence, invitation à l'écoute » 4 octobre 2021 à la MSH PN. La pièce a été reprise dans le cadre de la « Séance d'écoute, musiques électroacoustiques » en 2D à la MSH PN le 4 mars 2022 et enfin aux Rencontres de l'EUR ArTeC à la Maison des Métallos en novembre 2023.

14. En ce qui concerne *stap.js*, nous ne l'avons pas intégré, car comme nous avons pu le discuter dans la section 3.1.1, les expérimentations ont relevé des lacunes pour une utilisation musicale. Dans son état actuel, la maquette n'était pas suffisamment robuste pour être utilisée dans une composition.

15. Nous faisons référence ici à l'utilisation exclusive aux sons de synthèses, décrits au niveau du code dsp, au contrôle algorithmique.

d'opérations de compression et dilatation temporelle. Pour façonner et obtenir les autres morphologies, les échantillons ont été étirés et compressés temporellement avec le *SuperVP* de l'IRCAM. Nous avons deux sources sonores, ce sont de courtes séquences enregistrées au synthétiseur *DaveSmith Pro 2*. Elles sont toutes les deux issues d'une improvisation sur le synthétiseur. La différence majeure entre les deux échantillons est la vitesse d'exécution du séquenceur du synthétiseur. Dans l'échantillon n°1, la séquence est jouée relativement lentement à vitesse constante. Dans l'échantillon n°2, la vitesse de lecture de la séquence est la variable avec laquelle nous jouons. Ces deux échantillons sont les seules sources utilisées dans cette pièce.

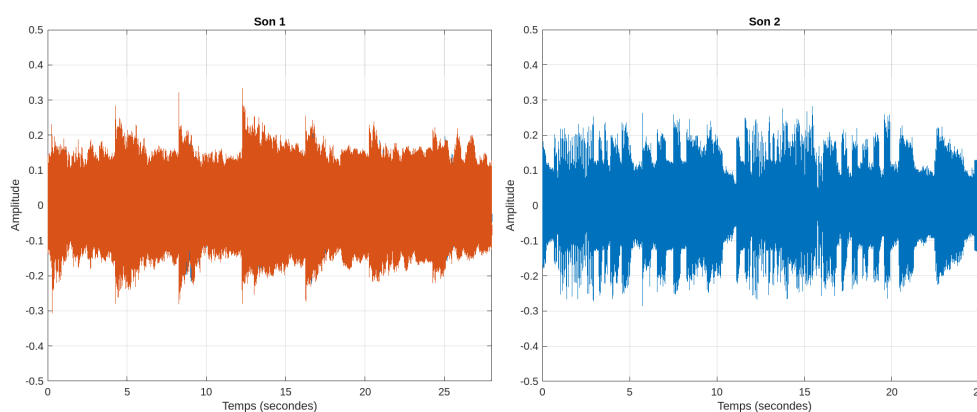


FIGURE 8.5 – Forme d'onde des échantillons audio utilisés dans *Compression/dilatation*

Le patch *Max4Live* visible dans la figure 8.6 est inséré sur la chaîne de traitement des pistes. Le patch est minimaliste : un `abc_2d_map3~` contrôlé par l'objet `pictslider` et un module de décorrélation en ambisonie 2D d'ordre 3 contrôlé par l'interface `ddd.js`.

Dans l'objet `faustgen~` se situe le code de la décorrélation ambisonique. Nous pouvons remarquer que le flux ambisonique est envoyé vers des objets `plugreceive~` de `todecode_1` à `todecode_7`. Le logiciel *Ableton Live* n'est pas pensé pour une utilisation multicanale. De fait, nous avons dû passer par des chemins de traverse pour l'adapter à nos besoins. Tout d'abord, afin d'avoir un retour graphique sur le niveau de sortie du patch dans la session logicielle, nous envoyons l'harmonique 0 vers la sortie de la piste (`plugout~ 1 2`) et par conséquent ses VU-mètres. La sortie de la piste n'est envoyée vers aucune autre piste ni sortie physique de l'interface audio, il ne s'agit que d'un retour visuel. Le flux multicanal est envoyé vers un patch de décodeur *Max4Live* inséré sur une piste (nommée *DECODER* dans la figure 8.7) ne servant que de « couloir » de traitement.

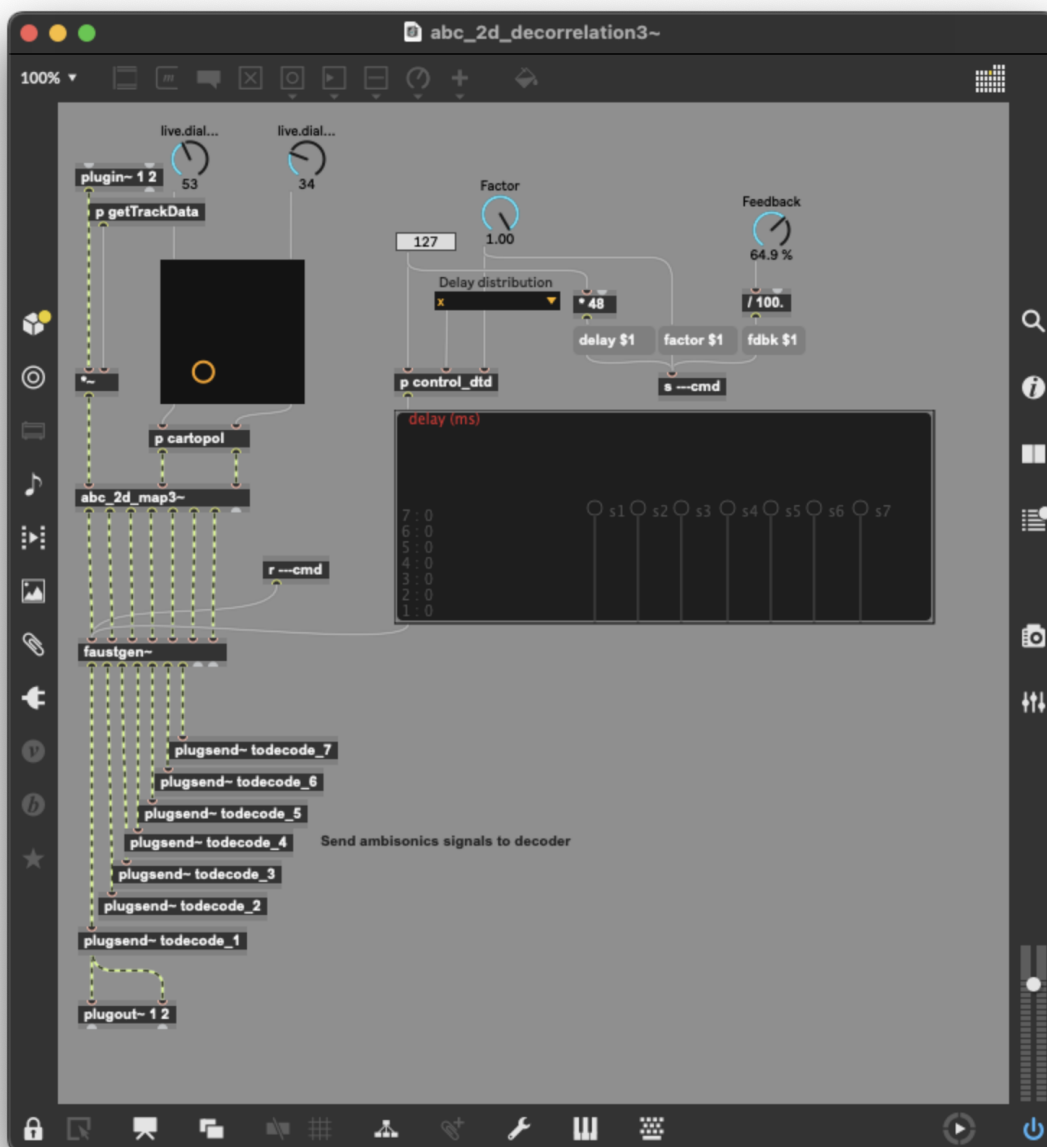


FIGURE 8.6 – Patch *Max4Live* utilisé dans la chaîne de traitement

En effet, comme nous utilisons plusieurs instances de ce patch d’encodage/traitement, nous avons fait un patch de décodage ambisonique. Ce patch réceptionne tous les signaux ambisoniques des différentes pistes, décode le flux ambisonique et envoie les signaux post-décodeur vers autant de pistes que de sorties physiques nécessaires.

Afin de diriger le flux sortant du décodeur vers les haut-parleurs, nous envoyons chaque canal vers des `plugreceive~` que d’autres patches, insérés sur d’autres pistes (nommées *output1*, *output2*, etc.) nous permettrons de diriger vers des sorties physiques de l’interface

audio. Chacune de ces pistes à un patch réceptionnant le signal à envoyer au haut-parleur cible en réglant la sortie de l'interface audio correspondante comme sortie de la piste.

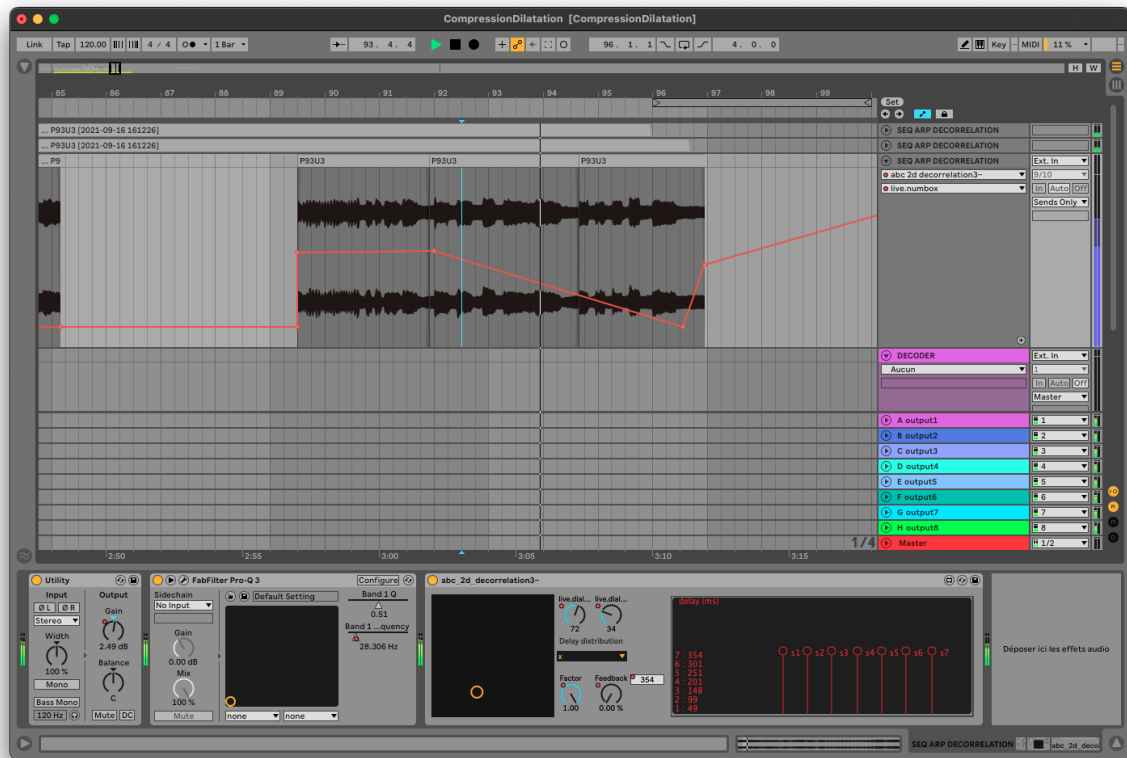


FIGURE 8.7 – Vue de la session *Ableton Live* utilisée pour la composition

La partie située en bas de la figure 8.7 représente la chaîne de traitement de la piste sélectionnée, le flux du signal va de gauche à droite. Notre patch est le module `abc_2d_decorrelation~`. Afin de pouvoir écrire le comportement temporel des variables avec des lignes d'automation dans la *Digital Audio Workstation*, nous sommes obligés d'utiliser les objets de la famille *live* (`live.dial`, `live.gain`).

Revenons sur l'utilisation de l'interface graphique *dtd.js* dans cette pièce. Elle a été principalement employée pour fournir un retour visuel sur l'état du système, négligeant ainsi sa fonction opératoire (définition manuelle de la distribution de retards). Bien que testée sur le plan fonctionnel, nous n'avons pas pleinement exploré ses possibilités. L'absence d'interaction directe avec l'interface graphique a suscité des questionnements que nous résumons ici.

8.2.2 Bilan

La séparation entre le développement et la composition, bien qu'associée à des idées musicales et des moments d'écoute, semble nous avoir conduits dans une impasse. Cela a restreint notre dispositif expérimental, initialement conçu pour explorer les liens entre les représentations opératoires du traitement spatial du son et la composition d'espaces sonores, à une simple épreuve fonctionnelle stérile du point de vue de la recherche. La composition de *Compression/dilatation* nous confronte à un potentiel inexploité, exigeant une redéfinition des binômes composition-recherche et développement-composition.

Si nous nous limitons au constat que nous n'avons pas utilisé l'une des deux fonctionnalités de cette interface, nous pourrions nous demander si cela est parce que l'aspect graphique est superflu ou parce que son potentiel musical est insuffisant. Seulement, le problème semble mal posé, le fait que nous n'ayons pas utilisé activement ces fonctionnalités n'est pas signe d'un problème du côté de l'interface, mais de notre approche de la composition devant évoluer vers une démarche de recherche. En somme, nous n'avons pas pleinement traité la composition comme une activité de recherche ici, nous avons cherché à atteindre nos objectifs sonores sans explorer toutes les potentialités des éléments que nous mettions à l'épreuve. La pratique de la composition comme une activité de recherche nécessite de prendre le temps de l'exploration et de ne pas avoir peur de passer par des étapes de l'œuvre qui ne nous satisfont pas sur le plan esthétique et formelle.

8.3 *Émergences*

Confrontés à la nécessité de repenser nos méthodes de composition, nous décidons de nous constituer un environnement de composition plus modulable et ouvert à la modification à la volée. Nous décidons, à partir de la composition d'*Émergences*, d'utiliser la composition de façon exploratoire et pas seulement pour mettre à l'épreuve de la robustesse technologique de notre environnement. La composition est devenue un des moteurs du développement du patch, des interfaces graphiques, des traitements, et bien sûr des idées musicales. Nous reprenons à notre compte la maxime de Paul Valéry commentant l'héritage de Léonard da Vinci « faire pour comprendre et comprendre pour faire » sou-

vent cité par Jean-Louis Lemoigne¹⁶. Dans cette section, notre objectif est d'explicitier la boucle de rétroaction entre notre approche musicale de l'espace et les représentations opératoires pour le traitement spatiale du son ainsi que les fonctions de nos compositions dans ses recherches. Nous partirons de nouveau du plan poïétique pour aller vers les morphologies spatiales travaillées dans *Émergences*, troisième prototype musical de cette recherche¹⁷. Le lecteur pourra se rapporter à l'annexe 9.3 pour écouter la pièce.

8.3.1 Dispositif de composition

Toute la partie DSP est réalisée dans *Max 8* avec des objets écrits en langage FAUST ou compilés à la volée avec *faustgen*. Les interfaces graphiques utilisées pour manipuler les traitements sont principalement les interfaces graphiques écrites en *Javascript* présentées dans le chapitre 3. La compilation à la volée et l'interprétation de *Javascript* dans l'objet *jsui* permettent la modification du code directement depuis le patch.

La liberté de modifier le patch et toutes ses composantes de manière fluide est fondamentale. En effet, le patch et ses composantes se sont constitués au fur et à mesure de la composition. De fait, nous trouvons pertinent de l'analyser plus en détail que les patch précédents.

Sources

Le matériau initial est composé de trois fichiers audio monophoniques : (1) une suite de sons impulsionsnels générés avec un synthétiseur *Dave Smith Pro 2* (2) une séquence de douze secondes composée comportant des échantillons de voix ralentis et des sons de synthèse (3) un son de vingt-et-une secondes issu du même synthétiseur. Ces sources monophoniques sont lues dans *Reaper* envoyées vers le moteur sonore dans *Max*, les sorties du patch sont dirigées de nouveau vers *Reaper* afin de faire le montage à partir des signaux ambisoniques. Afin de faire une redirection du flux audio d'un logiciel à l'autre, nous avons utilisé la fonction *loopback* du logiciel *TotalMix* de *RME* permettant de rediriger un flux de données d'une sortie vers une entrée du pilote.

16. Jean-Louis LE MOIGNE, « Une fureur sacrée de comprendre pour faire et de faire pour comprendre », dans : *e-Phaïstos IX-1* (avr. 2021).

17. Créée au *Journées d'Informatique Musicale 2023* à la MSH PN en mai 2023, puis reprise aux Rencontres ArTeC à la Maison des Métallos en novembre 2023.

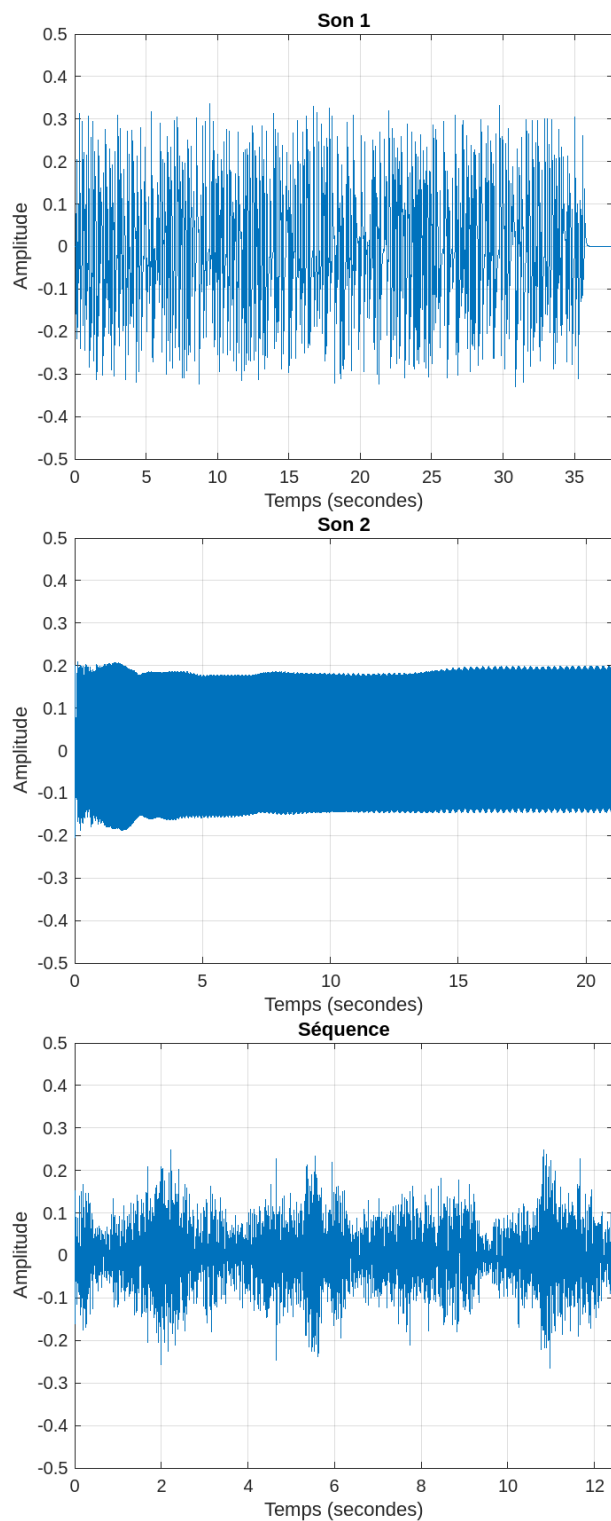


FIGURE 8.8 – Forme d’onde des échantillons audio utilisés dans *Émergences*

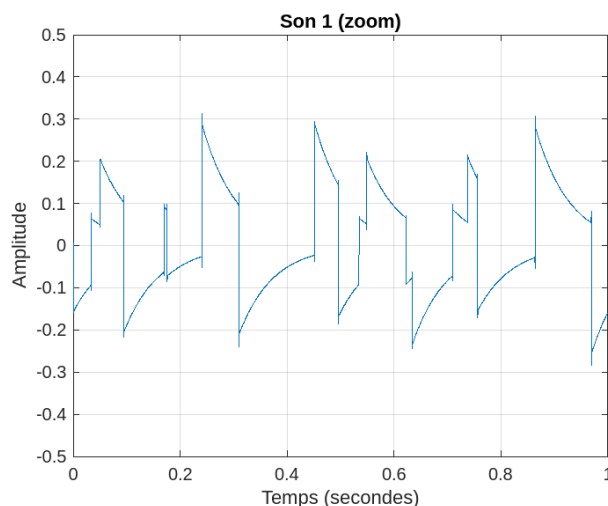


FIGURE 8.9 – Forme d’onde une portion de l’échantillon n°1

Nous souhaitons travailler avec des sons aux transitoires d’attaques abruptes afin d’exciter les modules de décorrélation. Nous cherchions à travailler une texture dense formée par des éléments conçus comme des artefacts en ingénierie du son que nous utilisons comme matériau principal. Afin de générer ces suites de sons impulsionnels avec notre *DaveSmith Pro 2*, nous avons utilisé deux enveloppes de filtre (passe bas) s’appliquant à des générateurs de bruits blancs avec les plus petites valeurs que le synthétiseur permette. Ces enveloppes sont répétées en boucle sur des durées variables et asynchrones ce qui explique l’absence de périodicité dans la forme d’onde (figure 8.9). Les valeurs de *decay* des deux enveloppes sont très légèrement modulées par des LFO aléatoires.

La pièce peut être divisée en trois parties en prenant comme critère le matériau utilisé et les morphologies spatiales travaillées¹⁸. Les sons impulsionnels sont les seuls à être entendus et travaillés jusqu’à 3’50, puis la séquence précomposée prend le devant, subsiste les très hautes fréquences des sons impulsionnels jusqu’à environ 5’20. Puis sont utilisés pour la fin de la pièce, la note tenue, les médiums des sons impulsionnels et une partie de la séquence précomposée. En effet, certains éléments de la séquence sons isolés, étirés ou compressés temporellement, ce sont eux qui génèrent les graves, les impacts et le son étiré tenu jusqu’à la fin de la pièce dans les médiums.

18. Nous reviendrons plus en détail sur la notion de « morphologie spatiale » au chapitre 9, toutefois prenons la pour l’instant comme les morphologies sonores constituées principalement à partir des qualités spatiales du son.

Organisation des fichiers

Une particularité de cette pièce est l'approche de la 3D par une superposition de strates 2D (principe que nous avons détaillé dans les sections 6.1.3 et 6.2.3). Cette approche a supposé un format de fichier particulier, nous avons trois strates 2D à des ordres différents. Dans la mesure où nous composons sur un dispositif avec trois couronnes superposées de HP (huit, cinq et trois), nous avons décidé de composer pour trois strates 2D à l'ordre 3, 2 et 1, respectivement pour la première, la deuxième et la troisième couronnes de haut-parleurs. De fait, pour chaque extrait, nous enregistrons un fichier de quinze canaux (sept harmoniques + cinq harmoniques + trois harmoniques). L'avantage de faire du montage en ambisonie est de pouvoir décoder la pièce pour différents dispositifs. Nous enregistrons de courts extraits improvisés avec le patch puis sélectionnons les parties qui nous intéressaient le plus pour les monter.

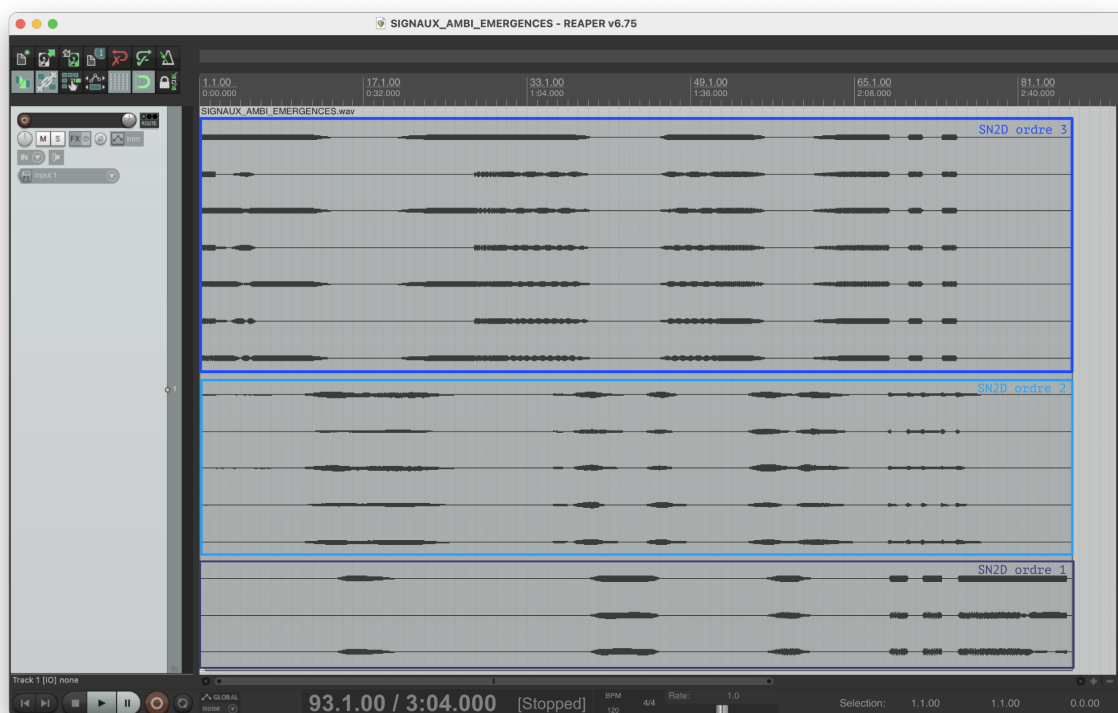


FIGURE 8.10 – Structure des fichiers *wave* pour la composition d'*Émergences*

Les trois flux ambisoniques sont dirigés vers trois décodeurs 2D pour le *monitoring*. À la fin du processus de composition, nous avons décodé chaque strate pour un dispositif de HPV plus dense que celui sur lequel nous avons composé, puis nous avons projeté chacun

de ces HPV en ambisonie 3D à l'ordre 3 (norme SN3D) afin de pouvoir décoder la pièce pour des dispositifs de restitution différents.

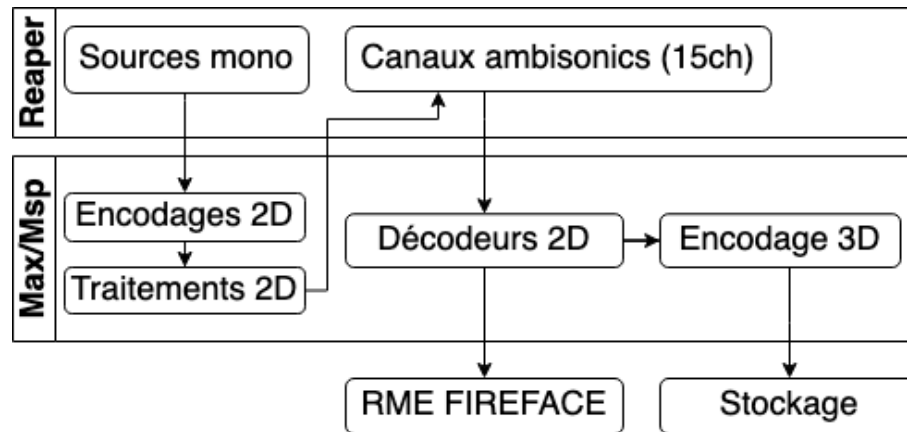
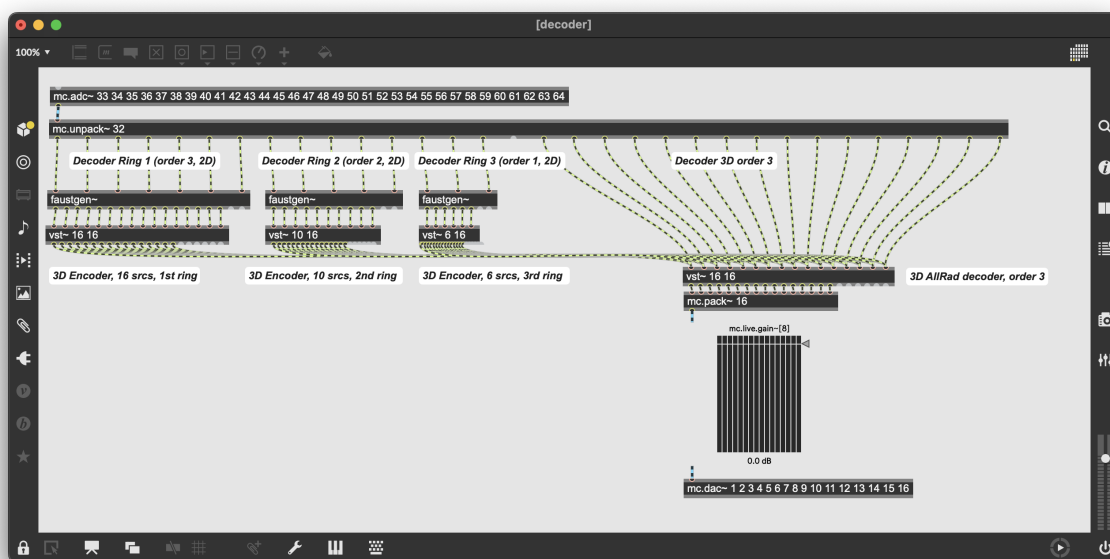


FIGURE 8.11 – Schéma de l'écosystème logiciel utilisé pour la composition d'Émergences

Comme nous l'avons précisé en préambule, le patch et les manières de faire se sont constitués au fur et à mesure de la composition. Aujourd'hui, nous pourrions revenir sur cette approche et aller plus loin : nous pourrions utiliser ce que nous avons appelé le sur-encodage spatial dans la section 6.1.1 pour avoir plus de composantes à traiter sur les strates supérieures, cela nous aurait permis par ailleurs de faire un décodage virtuel sur un réseau de haut-parleurs encore plus dense pour le ré-encodage en 3D. Le montage en ambisonie est intéressant, mais il présente un désavantage important : la place utilisée en mémoire. Par exemple, enregistrer et opérer sur des signaux 24 bits 48 kHz à l'ordre 5 en 2D représente 95 Mb par minute. Si nous superposons plusieurs flux, coupons, jouons à l'envers, *etc.*, nous nous retrouvons très rapidement avec une grosse charge mémoire pour une pièce de dix minutes. Cet inconvénient est le même que celui pour les pièces multicanales, seulement, si nous travaillons avec des ordres élevés et avec des signaux ambisoniques 3D, nous pouvons avoir un nombre de canaux bien supérieur au nombre de canaux pour des pièces électroacoustiques multipistes. Cela suppose aussi de se faire un système de monitoring : il y a la nécessité d'un système de décodage pour du stéréo/binaural/dispositif d'écoute. En effet, suivant la complexité du moteur sonore et le caractère non-conventionnelle des approches, cela nécessitera plus ou moins d'adaptation.

Monitoring et Stockage

FIGURE 8.12 – Décodeurs pour le *monitoring* et l'enregistrement (*sous-patch*)

Chacun des flux ambisonique 2D est décodé pour un système de restitution virtuel : la première strate pour seize HPV, la deuxième strate pour dix HPV et la troisième strate pour six HPV. Chacun des HPV est projeté en ambisonie 3D d'ordre 3, de telle façon que les seize HPV de la première strate soient également répartis sur un cercle et ont tous la même élévation, et ainsi de suite. Puis, le fichier résultant est enregistré. Dans une première version du patch, chaque flux 2D était décodé pour la couronne de HP correspondant dans le dispositif sur lequel nous avons travaillé la pièce, puis nous faisons le processus de projection en ambisonie 3D en parallèle simplement pour enregistrer la pièce. Toutefois, il nous est apparu plus pertinent de pouvoir entendre exactement ce que nous enregistrons¹⁹.

Le flux de 15 signaux aux sorties des chaînes de traitement est envoyé vers *Reaper*, puis la sortie de chaque piste dans *Reaper* est d'envoyer vers les sorties de 33 à 48 de la carte qui sont elles-mêmes réinjectées en entrée avec la fonction *loopback* afin de les recevoir dans *Max 8*. Bien que les fichiers ne contiennent que quinze canaux, *Reaper* ne

19. Le patch associant la chaîne d'encodage 2D - traitement (n fois) - décodage 2D - encodage 3D - décodage 3D prend environ 30 % de CPU (I/O Vector size 32, SR 48kHz, MacBook Pro M1 2020, 16 Go), ce qui ne pose aucun souci pour notre utilisation.

permet de créer des pistes qu'avec un nombre pair de canaux, ce qui explique pourquoi la 48 sortie n'est pas utilisée. Dans la session *Reaper*, il y a aussi un encodeur 3D à l'ordre 3 qui envoie les signaux vers le décodeur (sorties de 49 à 64). À l'avenir, si nous utilisons un système semblable, nous ferons toute la partie décodage dans *Reaper*. L'encodage et le décodage 3D sont réalisés avec les *plug-in* de l'IEM.

8.3.2 Analyse du patch

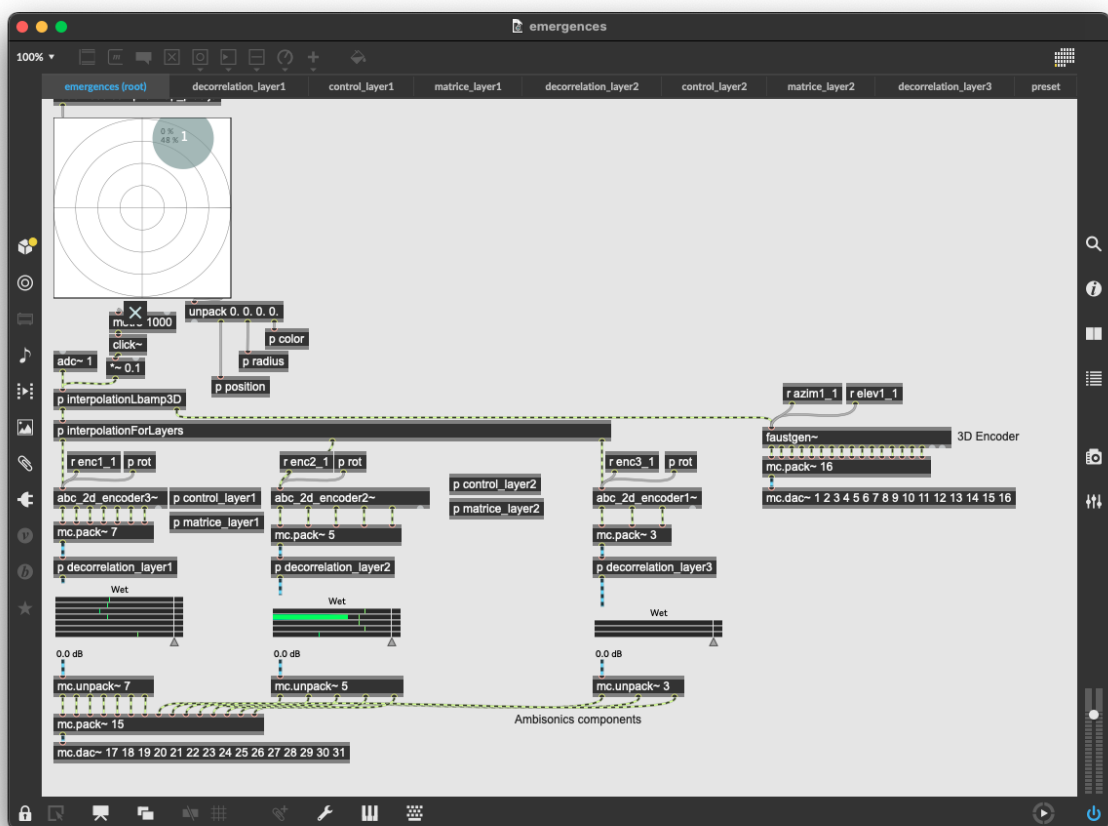


FIGURE 8.13 – Page principale du patch utilisé pour la chaîne de traitement dans *Émergences*

Le patch correspond à la chaîne de traitement pour une source : il prend en entrée un flux audio monophonique, dirige ce flux vers l'une des trois strates d'encodage-traitement, joint les canaux ambisoniques et les envoie vers *Reaper*.

L'interface graphique située en haut à gauche du patch peut être considérée comme un panneau de spatialisation : elle nous permet de manipuler la projection de la source. Les coordonnées du cercle contrôlent l'azimut et le rayon contrôle l'élévation du flux mono. Seulement, la sensation d'élévation est la conséquence de l'interpolation entre les différentes strates. Plus précisément, le rayon du cercle permet de diriger le flux mono vers les différentes chaînes de traitements elles-mêmes correspondant aux différentes couronnes de notre dispositif de restitution. Lorsque le rayon est au minimum, le flux est envoyé vers la première strate et lorsqu'il est au maximum, le flux est envoyé vers la troisième strate (le sous-patch `p_interpolationForLayers`). Quant à l'opacité du cercle, elle nous permet de diriger le flux soit vers la chaîne de traitement par strate, soit vers un encodeur ambisonique 3D (le sous-patch `p_interpolationLbamp3D`).



FIGURE 8.14 – Chaîne de traitement de la première strate (*sous-patch*)

De multiples modules de décorrélation sont appliqués au flux ambisonique 2D de chacune des strates²⁰ : sept modules pour la première couronne, cinq pour la seconde, et trois pour la troisième. Les modules de décorrélation sont manipulables dans l'onglet correspondant, par exemple, dans la figure 8.14, nous voyons les modules pour la première strate (p `decorrelation_layer1`). Chaque module de décorrélation est associé à une chaîne de projection dans le domaine des ondes planes, traitement de gain, puis recombinaison dans le domaine circulaire. L'onglet correspondant aux modules de décorrélation de la première strate comporte sept abstractions, celles-ci prennent en entrée un flux ambisonique et le ressort après traitement. La figure 8.14 représente quatre instances (n°1, 2, 5 et n°6), chacune d'elles a l'interface `dtd.js`, l'objet `hoa.space`, les variables de la décorrélation, ainsi qu'un objet `preset` permettant d'enregistrer et de rappeler la distribution manuelle de `dtd.js`.

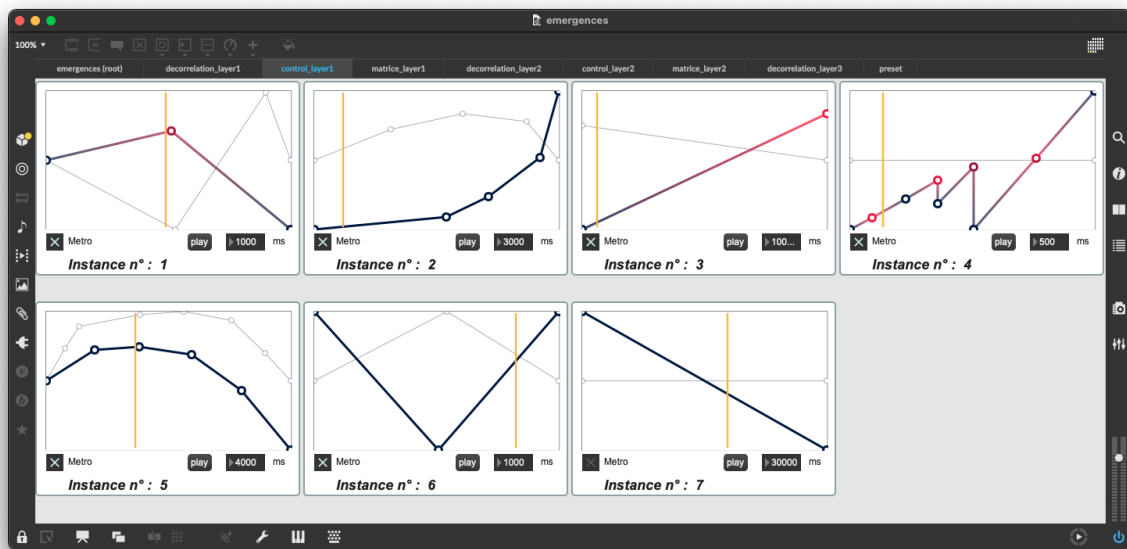


FIGURE 8.15 – Instances de `2plf.js` pour contrôler la première strate de traitement

L'interface `hoa.space` peut être manipulée à la souris et permet de contrôler le gain en fonction de la position. Nous pouvons aussi utiliser les interfaces `2plf.js` pour contrôler le module de contrôle `spatialEnv.js`, filtre spatial que nous avons présenté dans la section 6.1.4. L'idée est d'avoir autant d'instances de `2plf.js` que d'instances du module de traitement, et cela, pour chacune des strates. Chaque instance de `2plf.js` permet de contrôler les

²⁰ À partir de maintenant, nous parlerons de strate plutôt que de couronne car chaque strate de traitement n'est pas nécessairement co-planaire à une couronne. Bien que dans cette pièce elle le soit.

variables de l'instance du module de traitement cible. Les variables de sortie des instances de *2plf.js* sont assignables à toutes les variables du module ciblé avec la matrice située dans le sous patch `p matrice_layer1` (voir la figure 8.17). Les points sur la courbe n°1 (celle avec une graisse plus importante), la courbe n°2 ou la couleur des points sur la courbe 1 (« IN ») peuvent être assignés aux différents paramètres (« PARAMETER ») avec des fonctions de transferts (« F(X) ») en choisissant la plage de valeurs à opérer (« OUT MIN » « OUT MAX »). La présence de la matrice de *mapping* est centrale dans la confection du patch. Nous souhaitions interroger le potentiel de la modularité de nos interfaces. Dans cette composition, nous avons utilisé les trois interfaces que nous avons développées, mais nous n'avons pas « fixé » l'utilisation pour l'une d'entre elles. En effet, lors des séances de composition, cette modularité nous a permis d'explorer le potentiel de l'interface pour contrôler différents traitements, suivant différentes configurations et différentes fonctions de transferts. Finalement, nous n'avons gardé qu'une utilisation : *2plf.js* contrôle le filtre spatial pour écrire des enveloppes d'espace. Toutefois, ce choix est issu des expérimentations et de choix musicaux propres à cette pièce.

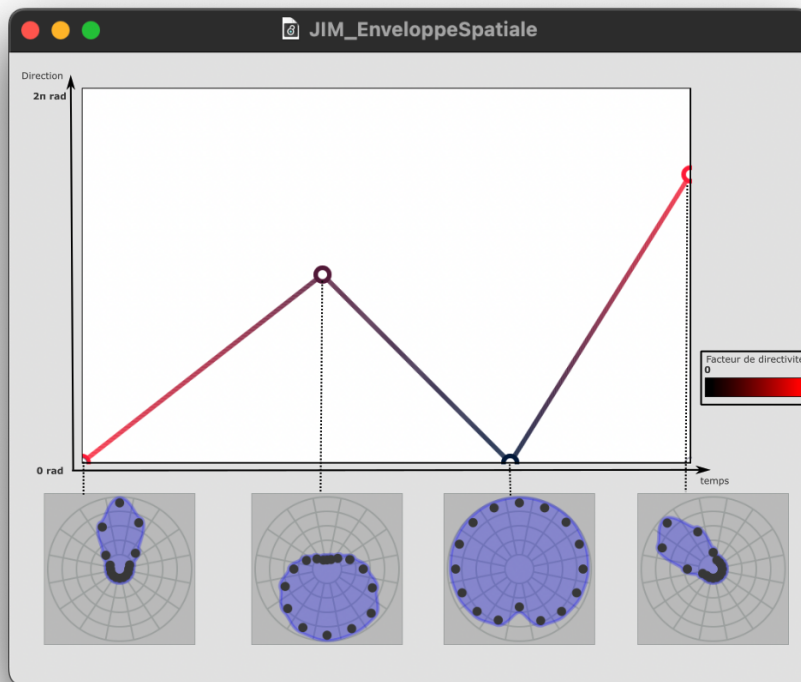


FIGURE 8.16 – Exemple d'une instance de *2plf.js* pour contrôler `hoa.space`

Nous avons donc utilisé la couleur sur la courbe avec la graisse la plus importante pour gérer le facteur de directivité ($space_q$ dans la matrice de *mapping*), et la valeur de y pour la direction du filtre spatial ($space_theta$ dans la matrice de *mapping*). De telle façon que lorsque le point est rouge, nous n'entendons qu'une partie resserrée du champ sonore, et lorsqu'il est noir, nous entendons tout le champ sonore.

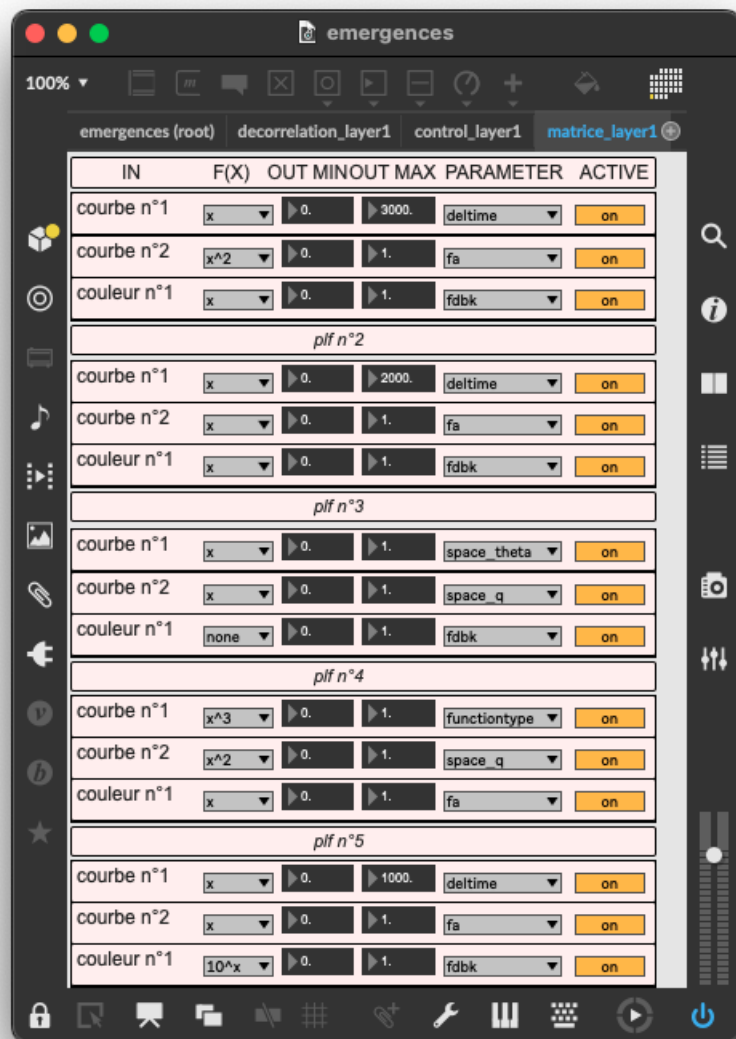


FIGURE 8.17 – Matrice de *mapping* utilisée pour *Émergences*

8.3.3 Montage en ambisonie

La majeure partie du montage de la pièce est fait sur des signaux au format ambisonique. Les seules exceptions sont pour une piste de basse et la partie centrale avec la séquence pré-composée. D'un point de vue pratique, cela n'est pas très différent d'une composition avec des fichiers multipistes ordinaires, seulement les formes d'ondes représentent une autre abstraction : il ne s'agit pas des signaux à envoyer aux haut-parleurs, mais des signaux ambisoniques. Durant les trois premières minutes de la pièce, la dimension verticale n'est pas utilisée. En effet, bien qu'il s'agisse d'un zoom dans la session *Reaper*, nous pouvons voir que les fichiers n'ont du signal que sur les sept premiers canaux. Cela correspond aux sept composantes ambisoniques de la première strate. Dans un souci d'optimisation de la place en mémoire, nous aurions pu supprimer les huit canaux vierges de chaque fichier. C'est ce que nous ferons pour une version d'archive. Les seules opérations réalisées dans *Reaper* sur les signaux ambisoniques sont des opérations de mixage à savoir des niveaux et du filtrage multicanal.

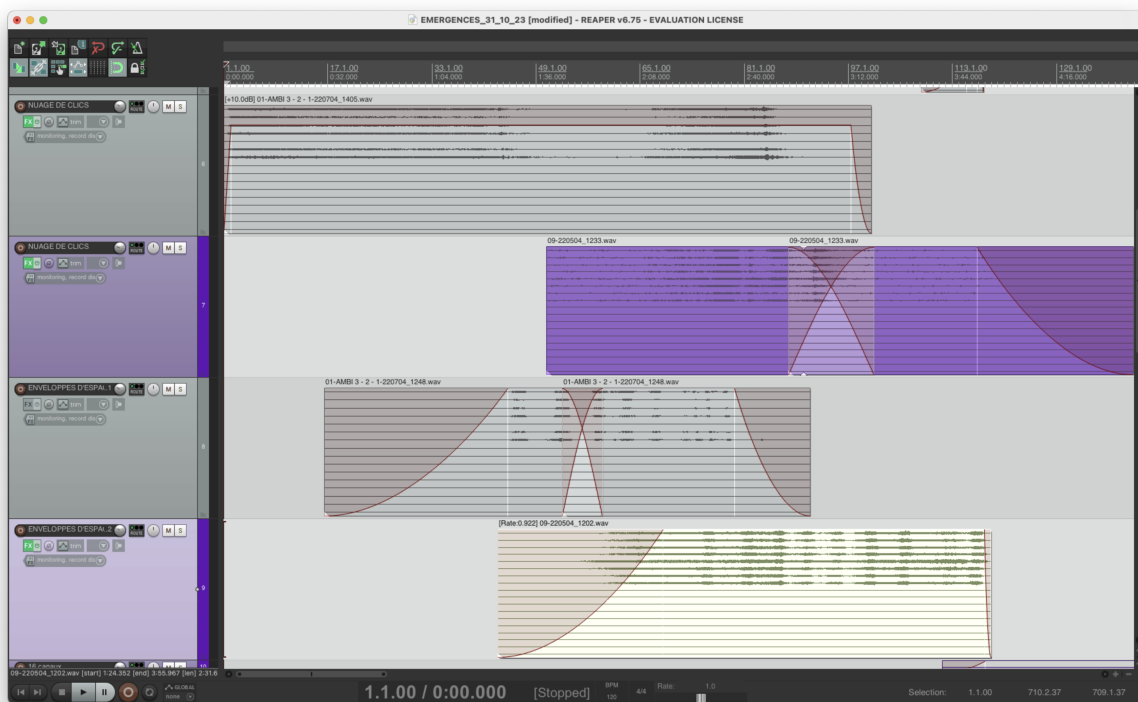


FIGURE 8.18 – Extrait de la session *Reaper* pour la composition d'*Émergences*

Approches compositionnelles

Maintenant que nous avons exposé les différents moteurs sonores et enjeux liés aux trois pièces électroacoustiques *Suspension*, *Compression/dilatation* et *Émergences*, focalisons nous sur les idées musicales déployées dans *Émergences*. Principalement concentrées sur le travail des morphologies spatiales, ces idées musicales participent à la conception de nos représentations opératoires. Nos « manettes » sur le sonore sont à la fois logicielles, techniques et théoriques. L'objectif de ce chapitre est d'explicitier les interactions entre nos idées musicales, nos moteurs sonores et nos maquettes d'interfaces graphiques. Ainsi, nous bouclerons cette investigation sur les interactions entre les différentes échelles de nos représentations opératoires depuis une analyse des idées musicales. Nous débutons ce chapitre par des précisions sur la notion de « morphologie spatiale », puis nous discuterons leurs contours dans *Émergences*, et enfin évoquerons trois appropriations musicales de nos moteurs sonores.

9.1 Morphologies spatiales dans *Émergences*

Pour conduire l'écoute musicale dans *Émergences*, nous utilisons des qualités spatiales du son qui ne se restreignent ni à la position, ni mouvement, ni à la réponse acoustique de salle. En nous concentrant sur les dynamismes spatiaux, nous explorons le potentiel musical de différentes morphologies spatiales. Bien sûr, le travail morphologique n'y est pas limité à la spatialité du son, cependant nous y avons attaché une attention particulière. Parler de « morphologie spatiale » et de « représentation opératoire » n'est pas neutre.

Nous nous saisissons ici de termes bien connus des praticiens et des théoriciens des musiques électroacoustiques et mixtes. Avant d'entrer dans le détail des idées musicales que nous travaillons dans *Émergences*, nous souhaitons préciser l'origine de notre vocabulaire.

9.1.1 De la notion de morphologie

Nous employons la notion de morphologie en référence à l'approche morphologique telle qu'elle est développée par le compositeur Horacio Vaggione. Pour le compositeur, l'approche morphologique est fondamentalement opératoire, transformationnelle¹ et multi-échelle. Les morphologies sont « les termes qui émergent de faisceaux de relations qui sont à leur tour confrontés à des nouveaux faisceaux de relations déterminant des nouveaux termes et ainsi de suite »², elles sont essentiellement « ancrées dans le micro-temps »³, apparaissent comme des objets complexes quand elles sont macroscopiques⁴ et émergent dans l'interaction⁵. Il revient au compositeur de créer et d'articuler ces faisceaux de relations, et c'est en ce sens que les morphologies en musique sont fondamentalement liées aux opérations. En parlant d'approche morphologique dans la composition électroacoustique, Vaggione pointe vers une manière de faire des opérations, vers des « manettes » sur des articulations musicales. Ainsi, en nous saisissant de cette notion et en la déplaçant légèrement pour parler de morphologie spatiale, nous pointons vers des termes composés et articulés qui sont spécifiquement liés à la spatialité du son dans toute son épaisseur.

Le travail morphologique chez Vaggione est finement lié à une approche multi-échelle du sonore et des opérations⁶. Lorsque nous parlons d'opératoire et plus spécifiquement de représentation opératoire, c'est aussi au travail de Vaggione que nous faisons référence. Vaggione utilise la notion de représentation avec prudence et l'éloigne de son utilisation

1. « L'approche morphologique consiste précisément dans la mise en place d'une modalité de travail de type transformationnel, à partir d'opérations portant sur les propriétés formelles - 'morphologiques' porteuses de forme - des données sonores qu'on manipule » Horacio VAGGIONE, « L'approche morphologique », dans : *Musique électroacoustique : expérience et prospective : actes IV*, Bourges, 1998, p. 140-145, p.140.

2. *Ibid.*, p.141.

3. VAGGIONE, « Représentations musicales numériques : temporalités, objets, contextes », p.49.

4. *Ibid.*, p.48.

5. Horacio VAGGIONE, « Composition musicale : représentations, granularités, émergences », dans : *Intellectica* 48.1 (2008), p. 155-174, p.164.

6. « composer de la musique (créer des morphologies musicales) consiste à définir, articuler et mettre en interaction ces différents niveaux » Horacio VAGGIONE, « Some Ontological Remarks about Music Composition Processes », dans : *MIT Press - Journals* 25.1 (mars 2001), p. 54-61, p.59.

en sciences cognitives pour s'en saisir en tant que compositeur :

la condition du 'faire-émerger' - 'to enact' - un quelconque état de choses est, selon Varela, celle de 'travailler sans représentations', parce que 'les représentations renvoient toujours à un monde prédéfini', [dans cette terminologie] seulement un monde prédéfini peut être représenté. [...] Ce qui veut dire, quant aux représentations opératoires que nous utilisons en musiques, que nous sommes dans un cas de figure très différent de celui du représentationnisme cognitiviste, car ces représentations opératoires sont des outils créés (construits) afin d'atteindre un champ d'action morphologique, et non pas pour re-présenter ou trans-coder des processus mentaux, ni pour élaborer des modèles (des formalisations) du 'monde'.⁷

Comme nous l'avons déjà précisé en introduction à partir de cette citation, les représentations opératoires en musique sont « des outils créés (construits) afin d'atteindre un champ d'action morphologique, et non pas pour re-présenter ou trans-coder des processus mentaux, ni élaborer des modèles (des formalisations) du 'monde' ». Par ailleurs, nous avons ressenti la nécessité de pointer vers des morphologies particulières : celles qui émergent des qualités spatiales du son. Par analogie avec la notion de morphologie, il s'agit de termes au caractère spatial, multi-échelles qui émergent de faisceaux de relations qui sont à leur tour confrontés à des nouveaux faisceaux de relations déterminant de nouveaux termes et ainsi de suite. Nous souhaitons définir cette expression de morphologie spatiale pour deux raisons : d'une part la volonté de pointer vers des éléments composés/composables appartenant à la dimension spatiale du son, d'autre part la liaison aux opérations (à l'action du compositeur) et à la notion d'émergence. Dans cette thèse, nous considérons que les idées musicales, tout comme les interfaces graphiques et les moteurs sonores font partie de nos représentations opératoires. Ces trois pôles sont dans une constante interaction agissant les un sur les autres avec des effets de retroactions.

9.1.2 Textures spatiales / texturer l'espace

Dans *Émergences*, nous travaillons quatre morphologies spatiales que nous nommons texture spatiale, enveloppe d'espace, stratification et figure rythmico-spatiale. Précisons dès à présent que nous n'avons pas l'ambition de savoir si celles-ci sont entendues comme telle par l'auditeur, mais simplement de rapporter leur potentiel opératoire sur le plan musical. Nous mettrons donc de côté l'analyse psychoacoustique et la réflexion esthétique

7. VAGGIONE, « Représentations musicales numériques : temporalités, objets, contextes », pp.52-53.

(réception de l'œuvre), afin de nous en tenir au plan poïétique à savoir le projet musical et les conditions d'émergences.

Pouvons-nous composer la texture de l'espace ? En composant une pièce dans un dispositif enveloppant (un dôme de haut-parleurs), nous définissons un environnement acoustique⁸ et ce dispositif d'écoute renforce selon nous la sensation d'une pièce appréhendée comme un microcosme. Partant de ce constant sensible, nous souhaitons explorer l'écoute d'espaces acoustiques dont nous modifierions les structures. En l'occurrence, la modification d'une structure que nous avons imaginée comme étant la texture de l'espace. Par exemple, un espace lisse dans une œuvre serait celui qui donnerait à entendre un déplacement d'une source sonore au pourtour d'une sphère à rayon constant. Les opérations que nous faisons dans cette pièce ne sont pas faites dans l'objectif de projeter une « texture » dans l'espace, mais de texturer l'espace lui-même d'une part, et d'autre part, nous cherchons à produire des variations quant à cet acte de « texturer ». En ce sens, le terme de texture s'éloigne ici un peu du sens traditionnellement attribué en musicologie⁹.

Notre désir de texturer l'espace trouve deux origines : premièrement, le désir de renverser la relation à la composition d'espaces sonores, comme on peut le constater dans l'approche de la synthèse sonore spatiale d'Alain Bonardi qui privilégie la « synthèse spatiale » plutôt que la « synthèse dans l'espace », notamment dans ses œuvres électroniques telles que l'installation *Les songes de la nef* (2018) ou la série de pièces acousmatiques *Dans la nef de nos songes* (début 2019). Deuxièmement, il découle du travail sur des outils générant des morphologies spécifiques. Ces morphologies suscitent en nous des envies musicales que nous cherchons à qualifier, à accentuer, à façonner afin de conduire l'écoute de l'auditoire.

Ce que nous appelons « texture spatiale » pointe vers ce que nous travaillons à partir de la multi-décorrélation en ambisonie et la superposition de plusieurs enregistrements multipistes. Ce que nous cherchons dans le travail de ces textures est de donner à l'auditeur des sensations de variations d'ordre spatial, sans donner la possibilité de pointer aisément vers l'origine de ces variations. Par ailleurs, nous souhaitons trouver des opérations qui

8. Évidemment, la réponse acoustique du lieu d'écoute interfère avec cet « environnement acoustique ».

9. Makis SOLOMOS, *De la musique au son. L'émergence du son dans la musique des XXe-XXIe siècles*, Aesthetica, Presses universitaire de Rennes, juin 2013, p. 227-228. Ici il ne s'agit pas vraiment d'une affaire de timbre, ni de sonorité, peut-être plus de granularité des morphologies spatiales.

gènèrent des sensations d'ordre spatial sur l'espace lui-même et non dans l'espace, c'est bien la globalité qui est texturée.

Bien que ces morphologies spatiales aient une origine idéale, la traduction dans le domaine acoustique et plus encore la boucle de rétroaction « écoute-opérations » présente dans la conception de cette pièce ont orienté les recherches sur ces formes spatiales. La composition d'*Émergences* est étroitement liée à une pratique du studio plaçant l'écoute au centre du processus. L'écoute est pour nous l'un des principaux moteurs de la composition : nous écoutons lorsque nous générons les morphologies, nous écoutons ce que nous avons enregistré, nous les sélectionnons, les transformons et écoutons ce que leur agencement produit.

Concentrons-nous sur quelques-uns des attributs de ces morphologies spatiales : (1) la densité, (2) la distribution spectrale, (3) la profondeur, (4) l'agitation, (5) la verticalité.

- La densité est principalement contrôlée par le nombre de prises que nous superposons, le nombre de modules de décorrélation utilisés en parallèle ainsi que leur taux de décorrélation les uns avec les autres ;
- La distribution spectrale est liée à la bande de fréquence de chacune des prises que nous superposons et le comportement des filtres en amont et en aval des traitements ;
- Nous contrôlons la profondeur par la composition de plans sonores - eux-mêmes émergeant des assemblages de densité et distribution spectrale - ainsi qu'à la superposition de prises avec des opérations à des échelles temporelles différentes ;
- L'agitation est construite là aussi de façon empirique comme la quantité (et la qualité) des variations par unité de temps.
- La verticalité est conçu principalement comme une superposition de strates de traitement avec différentes configurations et des mouvements de ces strates ;

Nous cherchons ici à décrire nos manières de faire et par conséquent, nous segmentons des termes qui ne le sont pas dans leur constitution. La texture spatiale est intimement liée à la stratification de l'espace que nous décrivons plus loin et de fait à la verticalité de la texturation spatiale.

Une limitation de cette approche est l'absence de variable sur des zones précises de l'espace. C'est cette limitation qui nous a conduit à utiliser le gain dans le domaine des

ondes planes afin d'avoir un contrôle sur des zones, des étendues, sur lesquelles nous pourrions opérer. Les expérimentations sur les enveloppes d'espaces que nous présenterons par la suite découlent directement de cette envie de façonner certains contours des textures spatiales. Cette tentative est principalement travaillée dans la première partie de la pièce, avec la superposition de différents flux de décorrélation sur différentes bandes fréquentielles. Nous ne sommes qu'au balbutiement de ces expérimentations, nous n'avons par exemple pas du tout exploré ce que pourraient être les limites de continuité des opérations de texturation de l'espace. En effet, jusqu'alors, nous sommes restés dans une zone relativement homogène pour la constitution de ces textures spatiales, mais qu'en est-il de superposition de textures spatiales hétérogènes ? Quelles sont les limites à l'homogénéité perçue ?

9.1.3 Stratification

La stratification spatiale est une approche compositionnelle de la dimension verticale de l'espace réel qui ne se limite pas à des sensations d'élévation de sources ponctuelles. Nous en avons exploré plusieurs aspects dans des situations statiques et dynamiques liées aux textures spatiales que nous avons présentées en amont.

Dans *Émergences*, la seule occurrence statique met à l'épreuve une interrogation : « quelle sensation l'association de traitements 2D sur des plans horizontaux différents donnerait » ? Pour ce faire, nous avons superposé des modules de traitement 2D comportant des réglages différents auxquelles nous envoyons la même source en entrée (à un filtrage près). Ici la superposition est à comprendre au sens spatial aussi bien que temporel : un ensemble de modules de décorrélation 2D produit un champ diffus joué avec une couronne de haut-parleurs sur un plan, un deuxième ensemble de modules de décorrélation produit un champ diffus avec d'autres propriétés que le premier et joué avec une autre couronne de haut-parleurs située à une certaine élévation par rapport à la première et ainsi de suite.

De 2'50 à 3'50, nous travaillons avec trois réglages différents de multidécorrélation pour les trois strates de traitements. Pour la strate supérieure comportant trois modules de décorrélation, les sons impulsifs ne sont pas filtrés et les modules de décorrélation sont sans réinjection. La deuxième strate comporte cinq modules et la première comporte sept modules, toutes deux avec de la ré-injection. Pour ces deux strates, la source en entrée est

filtrée avec un filtre résonant balayant le spectre afin de générer des saillances spectrales. Nous avons alors dans la « partie basse » deux plans avec une densité et une profondeur relativement importante, des saillances spectrales et des mouvements complexes et dans la « partie haute » des impulsions plus nettes, à large bande spectrale, paradoxalement celles-ci sont au zénith de l'auditoire, zone pour laquelle nous avons un flou de localisation important¹⁰. À cet endroit précis, nous avons comme projet musical de travailler la texturation de l'espace ainsi que la stratification de l'espace réel tout en laissant le choix à l'auditeur d'explorer les différentes échelles des morphologies spatiales : aussi bien la morphologie spatiale globale (la texture spatiale) que chacune des strates, ou les saillances spectrales. Pour les situations dynamiques, nous avons eu deux essais :

- L'association de mouvements complexes à des plans avec la question suivante : « qu'est-ce que l'association de mouvements complexes à des zones de l'espace acoustique génère sur le plan perceptif ? ». Pour cela, nous avons associé à chacune des strates des *ring modulation* en ambisonie, avec des fréquences de modulation assez proches, en dessous de 5 Hz, et une vitesse de rotation de la source variable suivant la strate (la deuxième strate deux fois plus rapide que la première, la troisième strate trois fois plus rapide que la première) ;
- La transformation de la texturation de l'espace comme une catégorie de la verticalité dans l'œuvre. Pouvons-nous donner des sensations de mouvements ascendants de la texture spatiale ? Nous connaissons bien les mouvements ascendants de sources, mais pouvons-nous réaliser des mouvements de plans ? Pour réaliser cela, nous reprenons des réglages de décorrélation assez proches pour chacune des trois strates et faisons circuler une source d'une strate à l'autre progressivement.

Ces idées de transformations spatiales liées à la pensée stratifiée de la verticalité prennent directement racine dans la conception de notre moteur sonore. C'est en grande partie parce que nous avons travaillé sur le LBAMP (*Layer Based Ambisonics Processes*) pour composer l'espace 3D que nous avons eu envie d'explorer ce que les différentes combinaisons de traitements nous permettent de générer comme morphologies. Il y a une continuité directe entre l'appropriation des bouts de codes et algorithmes et ces idées

10. Jens BLAUERT, *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization*, Cambridge, Mass : MIT Press, 1983, ISBN : 0-262-02190-0, p.44.

musicales. Si nous devons prendre une image, ce serait l'escalier à pas décalé, une envie sonore nous amène à avancer sur le plan logiciel (faire de la 3D sans décodeur ambisonique 3D) donc nous trouvons une solution avec une interpolation de plan 2D ; cela nous amène à nous rendre compte de la possibilité de faire des traitements sur des plans 2D ; nous avons tout de suite envie d'explorer le potentiel de superposition de traitements et des sensations de verticalités que cela peut générer.

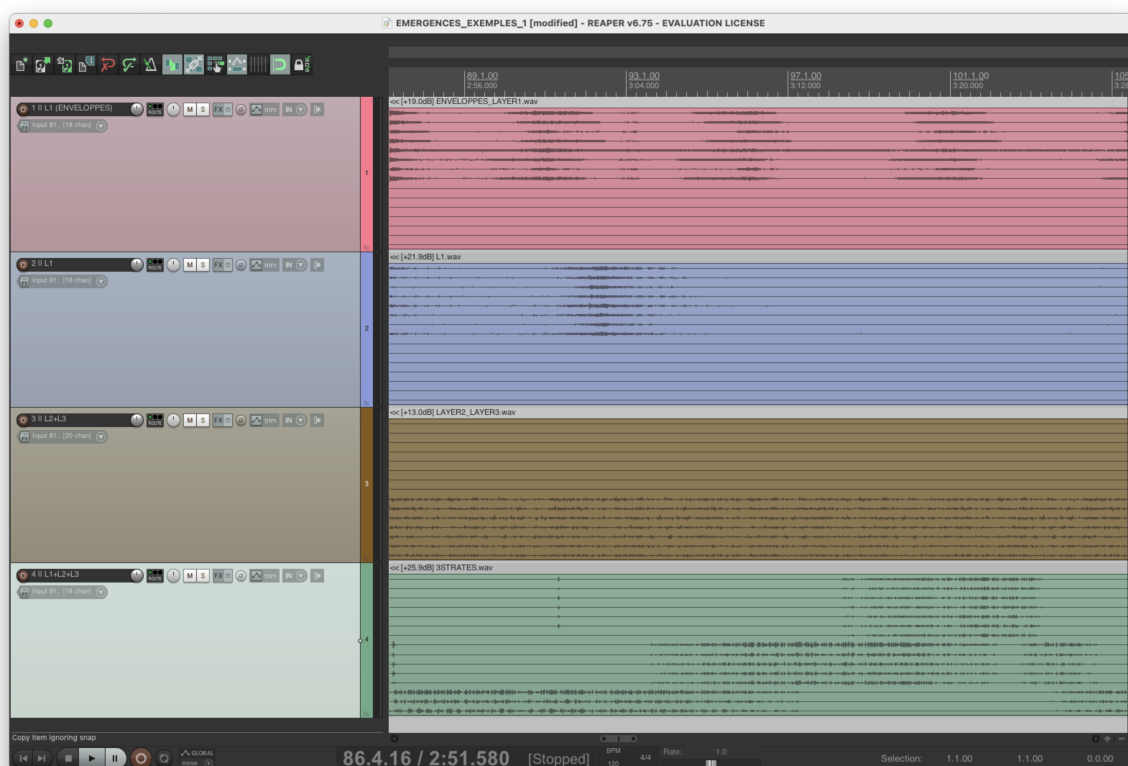


FIGURE 9.1 – Extrait de la *Reaper* utilisée pour la composition d'*Émergences*

La figure 9.1 est une capture d'écran d'une réduction de la session de travail utilisée pour *Émergences*. Les échantillons audio que nous voyons sont les seuls utilisés pour le passage illustré. Nous pouvons voir qu'il y a une superposition (au sens temporel) entre les différentes idées que nous exprimons ici : d'une part les enveloppes d'espace sur la piste n°1, la construction d'une sensation de la verticalité par superposition de matières entre la piste n°2 et n°3, et le travail de sensation de mouvement de texturation de l'espace entre les trois strates sur la piste n°4¹¹.

11. Nous pouvons voir les formes d'onde alternant entre les sept premières pistes, les cinq suivantes et les trois suivantes.

Ces différents termes constituant les morphologies spatiales apparaissent comme dissociés - visuellement et dans l'analyse -, mais sont *in fine* conçus pour être indissociables dans l'œuvre. Cette figure nous permet de souligner la synchronicité des différentes approches morphologiques présentés quelques paragraphes plus haut (approche statique, dynamique, en mouvement, *etc.*).

Dans la pratique, le jeu avec les strates était contrôlé par l'interface *map_plus.js* (voir figure 9.2), qui permettait de diriger le flux vers une strate ou une autre ainsi que la position de la source dans chacune d'elle. La position de la source influence le nombre d'harmoniques qui contribuent au champ sonore, et de fait au résultat de la décorrélation.

Le rayon du cercle permet de contrôler l'interpolation entre les strates. Nous pouvons voir dans la partie haute de la figure 9.2 que le rayon est à 40%, ce qui implique que le gain du deuxième *layer* est presque au maximum alors que celui du premier est presque nul. Dans la partie basse, le rayon est à 100% de ce qui implique que le signal n'est envoyé qu'au dernier *layer*.

9.1.4 Enveloppe d'espace

La troisième morphologie spatiale que nous travaillons dans *Émergences* est ce que nous décrivons comme des enveloppes d'espace (de 2' à 3'50"). Les opérations permettant de les faire émerger consistent à projeter le champ sonore dans le DOP, et écrire temporellement le comportement des gains dans chaque direction (voir la section 6.1.4). Nous utilisons le terme enveloppe pour plusieurs raisons. D'une part, nous faisons référence au critère utilisé notamment pour l'évaluation qualitative de l'acoustique d'une salle : la sensation d'enveloppement (*Listener Envelopment LEV*)¹². Par là, nous cherchons à pointer vers une sensation d'enveloppement variable par le son dont les deux extrêmes pour nous seraient la source ponctuelle et le champ diffus. Nous faisons aussi référence aux enveloppes d'amplitudes, car nous utilisons une interface graphique de type *piecewise linear function* pour contrôler l'objet `hoa.space` en passant par le script *spatialEnv.js*. L'exploration de cette morphologie a pour origine la conjonction d'une envie sonore, de possibilités de traitement spatial et de celles données par l'interface graphique employée.

12. BERANEK, *Concert and opera halls : how they sound*.

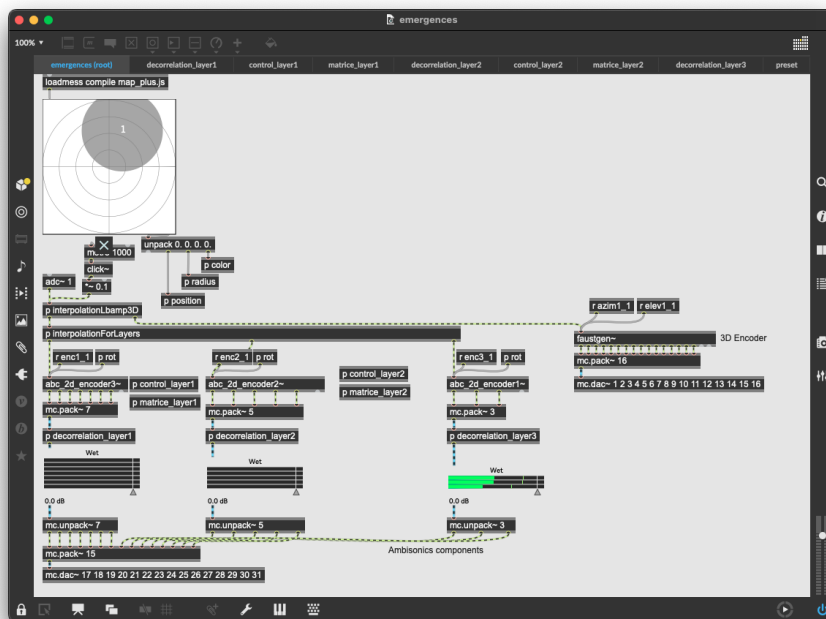
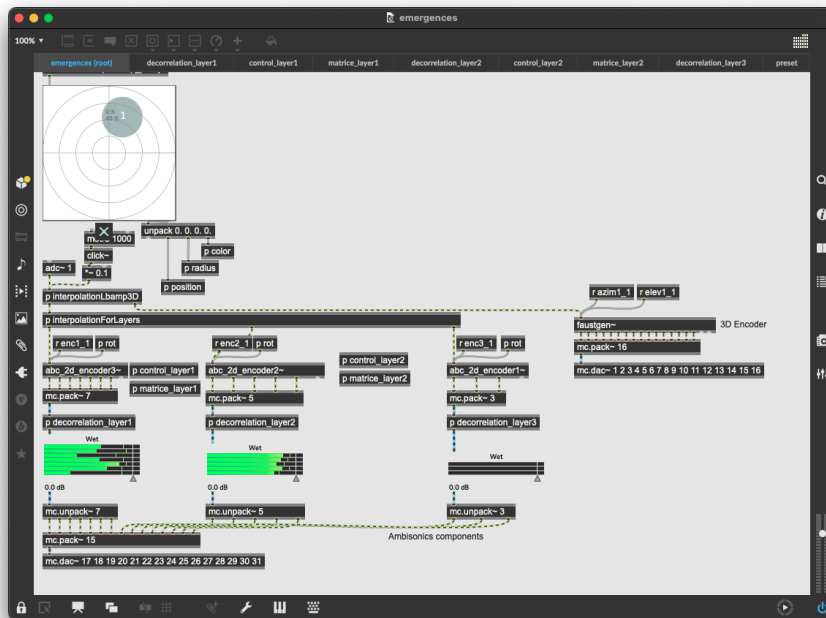


FIGURE 9.2 – Illustration de l'utilisation des strates de traitement

Lorsque nous travaillions à la texturation de l'espace, nous avions envie d'avoir un contrôle sur la globalité. Ainsi, nous avons utilisé une technique de contrôle du gain dans le domaine des ondes planes. Afin de pouvoir contrôler l'interface `hoa.space` à un plus haut-niveau, nous avons imaginé contrôler cela comme un « filtre spatial » permettant de décrire la directivité du champ sonore. C'est ainsi que nous avons ajouté cette « brique », le script *spatialEnv.js* entre l'interface interactive `hoa.space` et l'interface d'écriture. Maintenant, pour écrire le comportement temporel des gains, nous avons utilisé *2plf.js* et avons élaboré des « enveloppes » de façon analogue à l'écriture d'enveloppes d'amplitude. Nous cherchons par ailleurs à composer des morphologies spatiales dont le feuilletage dépasse le seuil d'intelligibilité des éléments qui la constituent tout en laissant à l'auditeur la sensation que quelque chose se passe. Pour cela, nous superposons plusieurs modules d'enveloppement en jouant sur l'écriture de leur comportement temporel. Nous démultiplions les textures, écrivons des enveloppes spatiales pour chacune d'elles, en les mettant en boucle sur des temporalités différentes. Nous cherchons à garder un contrôle sur la globalité, tout en brouillant les pistes de nos actions. En somme, nous cherchons des modalités d'écriture d'un contrepoint spatial.

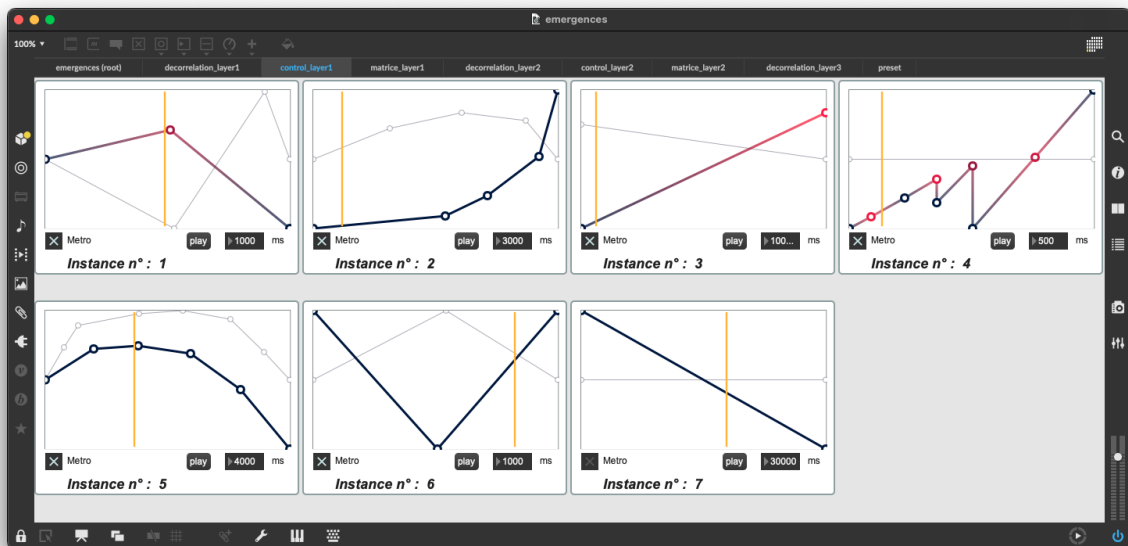


FIGURE 9.3 – Utilisation de *2plf.js* pour l'écriture d'enveloppes spatiales

Par ailleurs, nous confrontons deux pratiques de la décorrélation temporelles. D'une part en ambisonie et d'autre part sur les signaux envoyés directement aux haut-parleurs.

Dans la section allant de 3'50 à 5', nous travaillons avec un échantillon sonore que nous dupliquons et décalons temporellement sur des échelles bien plus importantes que celles utilisées pour la décorrélation en ambisonie. Nous souhaitons explorer les différentes possibilités des approches de la décorrélation, à la fois dans le domaine ambisonique et dans le domaine du multipiste traditionnel.

Cette section sur la décorrélation multipiste se termine par un crescendo vers le climax sur le plan du niveau sonore et du contenu spectral. À l'issue de ce crescendo, nous souhaitons travailler une autre approche de l'enveloppe spatiale, avec l'image métaphorique d'un tissu posé sur le dispositif de HP que nous venons enlever en tirant par un coin du voile. Ainsi, nous avons encodé en ambisonie 3D chacune des pistes associées aux haut-parleurs dans la direction des mêmes haut-parleurs, puis avons écrit un déplacement synchrone le long de la surface de l'hémisphère de chacune des sources vers un point de l'espace. Nous cherchions ici à donner la sensation que l'espace enveloppant jusqu'à présent était chassé au profit d'un autre. Nous pouvons voir sur la figure 9.3 que les instances de 1 à 5 des modules de traitement, et notamment les objets `hoa.space`, ceux-ci sont contrôlés par les instances correspondantes de *2plf.js*. Cette figure est une capture d'écran d'un enregistrement de notre dispositif lors de la production d'enveloppes spatiales. Nous pouvons aussi constater que tous les modules de décorrélation de cette strate ont des fonctions de distribution différentes.

9.2 Appropriations musicales

9.2.1 *Fil de Soi 3* de A.Bonardi

Le cycle *Fil de Soi* est composé de trois pièces pour guitare acoustique et électronique temps réel. Démarré en 2016 avec la guitariste Amélia Mazarico, *Fil de Soi* explore minutieusement les possibilités des alliages entre guitare et électronique. Ce cycle est inspiré par les instruments métalliques d'Asie, d'Inde et les relations entre deux mondes (acoustique et électronique). Le compositeur écrit à propos du titre :

Le fil de soie suggéré dans le titre évoque les tissus colorés indiens ; en perdant son 'e' final, en devenant un 'fil de soi', il renvoie à la fois à une idée de parcours introspectif dans le labyrinthe personnel de chacun –comme un fil d'Ariane, mais aussi à la musique mixte pour

guitare et électronique en temps réel : les fils/cordes de la guitare reliés aux fils/câbles de l'électronique.

Les deux premières pièces du cycle créées en 2016 et 2018 sont composées à partir du même instrument électronique : un réseau de seize lignes à retard et de transpositeurs écrits en langage FAUST. Celles-ci permettent des transformations timbrales, des événements temporels et la continuation du son. Les trois pièces du cycle utilisent comme unique matériau le son capté de la guitare en temps réel, il n'y a aucun son fixé. Le fait d'utiliser le même instrument électronique sur les deux premières pièces de ce cycle n'est pas anodin, cela correspond à une volonté chez le compositeur de travailler à « épuiser » les possibilités de celui-ci.

Pour *Fil de Soi 3* créée par Amélia Mazarico le 25 mai 2023 dans le cadre des JIM 2023 à la MSH PN, le moteur sonore et les modes de jeu convoqués changent complètement. L'écriture instrumentale se concentre sur les *glissandi* avec l'ongle sur la corde et des jeux derrière le sillet (pièce présente à l'extrémité supérieure du manche). Ce mode de jeu engendrant un matériau granulaire et riche sur le plan spectral est choisi par le compositeur pour exciter la réponse de l'électronique. Le moteur sonore est basé sur trois modules de décorrélation en parallèle et un module de synthèse physique.

Comme nous pouvons le voir sur le *blockdiagram* en FIGURE9.4, le signal du microphone est sommé au son de synthèse, puis le résultat est envoyé vers trois chaînes de traitements : *delay*, *harmonizer*, encoder, décorrélation puis gain. La sortie de chacun des modules est au format ambisonique. Lorsque nous analysons l'écriture de la partie électronique, nous pouvons nous rendre compte que les trois modules de décorrélation ont des réglages différents avec des fonctions de distributions différentes. Il s'agit pour le compositeur de créer de la diversité rythmique à différentes échelles temporelles. Au cours de la pièce, la fenêtre de décorrélation des différents modules et les fonctions de distributions sont fixes. Toutefois, le nombre de modules actifs, les facteurs de décorrélation et les taux de ré-injection des modules ont une partition. Un des deux modules a une fonction de distribution suivant la fonction « racine carrée » alors que les deux autres ont une fonction de distribution linéaire. Tout le moteur sonore est écrit en FAUST et compilé sous la forme d'un objet *Max (fildesoi3soundprocess~)* ce qui donne un patch de concert très épuré : seuls les contrôles de *preset*, gain et options d'entrée du signal sont accessibles.

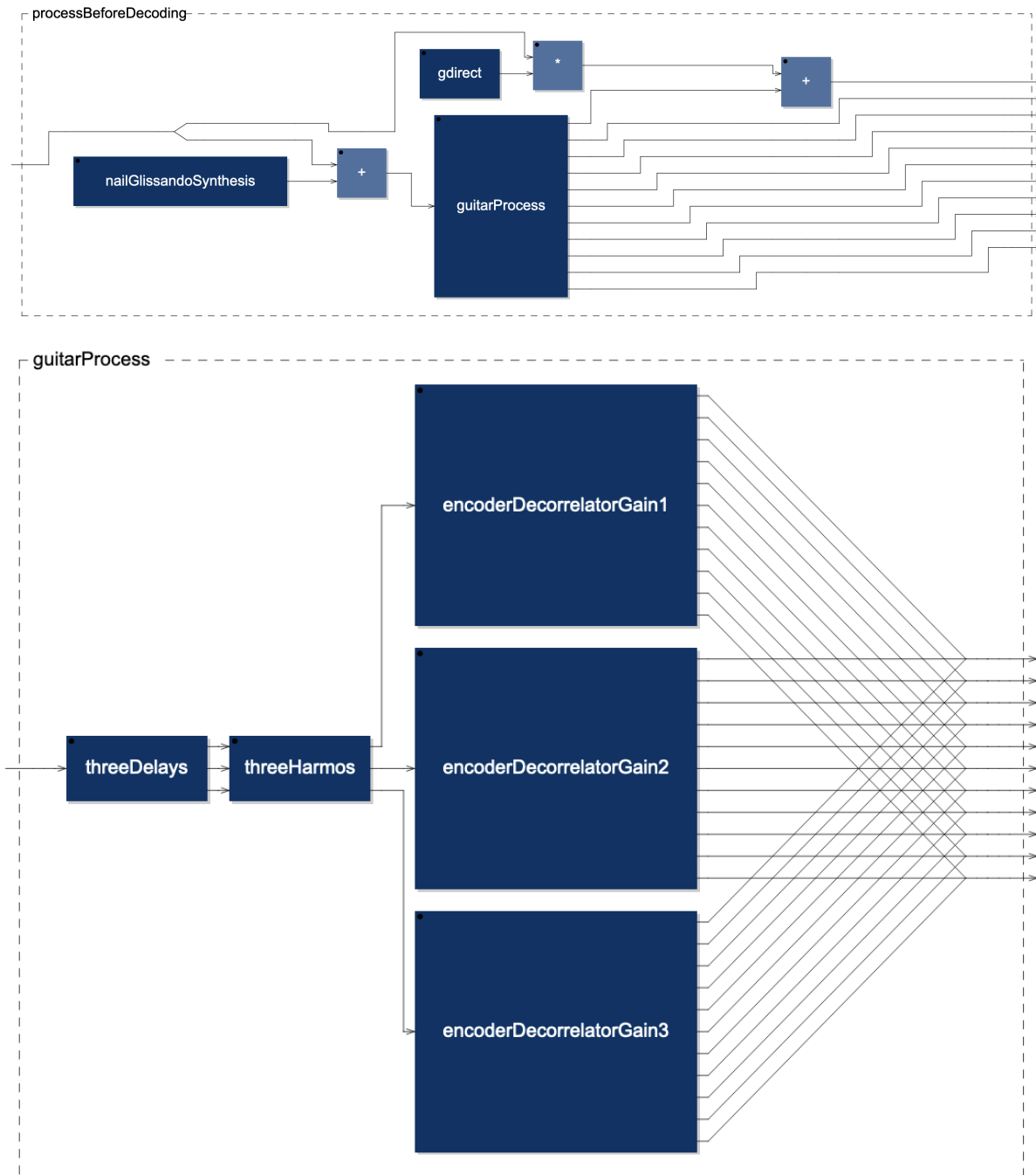


FIGURE 9.4 – Blockdiagram du code FAUST de *Fil de Soi 3* A.Bonardi

événement	5	30 sec	6	30 sec	7	15	15	8	30 sec
décorrélateur 1	ON		ON		ON			ON	
-9 dB	-		-9 dB		-60 dB			-60 dB	
tr-200	-		tr-200		tr-200			tr-200	
fa 0.5	-		fa 0.5		fa 0.9			fa 0.9	
speed 10.	-		speed 10.		speed 10.			speed 1.	
fdbk 0	-		fdbk 0		fdbk 0.5			fdbk 0.5	
décorrélateur 2	ON		ON		ON			ON	
0 dB	-		0 dB		0 dB			0 dB	
tr-600	-		tr-600		tr 1200			tr 1200	
fa 0.9	-		fa 0.9		fa 0.9			fa 0.9	
speed -9.1	-		speed -9.1		speed -9.1			speed -0.91	
fdbk 0.1	-		fdbk 0.1		fdbk 0.5			fdbk 0.5	
décorrélateur 3	ON		ON		ON			ON	
0 dB	-		0 dB		0 dB			0 dB	
tr 1200			tr 2400		tr 2400			tr 2400	
fa 0.5			fa 0.9		fa 0.9			fa 0.9	
speed 0.01			speed 1.1		speed 1.1			speed 0.11	
fdbk 0.	-		fdbk 0.		fdbk 0.5			fdbk 0.5	
synthèse	OFF		OFF		ON			ON	
-127 dB	-		-127 dB		-60 dB			-45 dB	
fafreq 0.05	-		fafreq 0.05		fafreq 0.05			fafreq 0.05	
faamp 0.1	-		faamp 0.1		faamp 0.1			faamp 0.1	
son direct guitare	OFF		OFF		OFF			ON	
amp 0	-		amp 0		amp 0			amp 0	

6 **5** *Transpo 3 de 1200 à 2400
Facteur de décorrélation 3 de 0.5 à 0.9
Speed 3 de 0.01 à 1.1 ts-1*

Guit. *f* Durée : environ 20 secondes

8 **6** *Facteur de décorrélation 1 de 0.5 à 0.9
Transpo 2 de -600 à 1200
Feedback 1, 2, 3 de 0 à 0.5* **7** *Synthèse de -60 à -45 dB
Ralentissement rotation :
Speed 1, 2, 3 divisées par 10*

Guit. Durée : environ 20 secondes

10 **8** *La synthèse prend le relais
de la guitare* Terminer un dernier glissando

Guit. *ff* Durée : environ 20 secondes

FIGURE 9.5 – Évolution des paramètres de contrôle et partition entre les mesures 6 et 11

Crédits : Alain Bonardi (compositeur) pour la conduite de suivi des paramètres et BabelScores pour la partition.

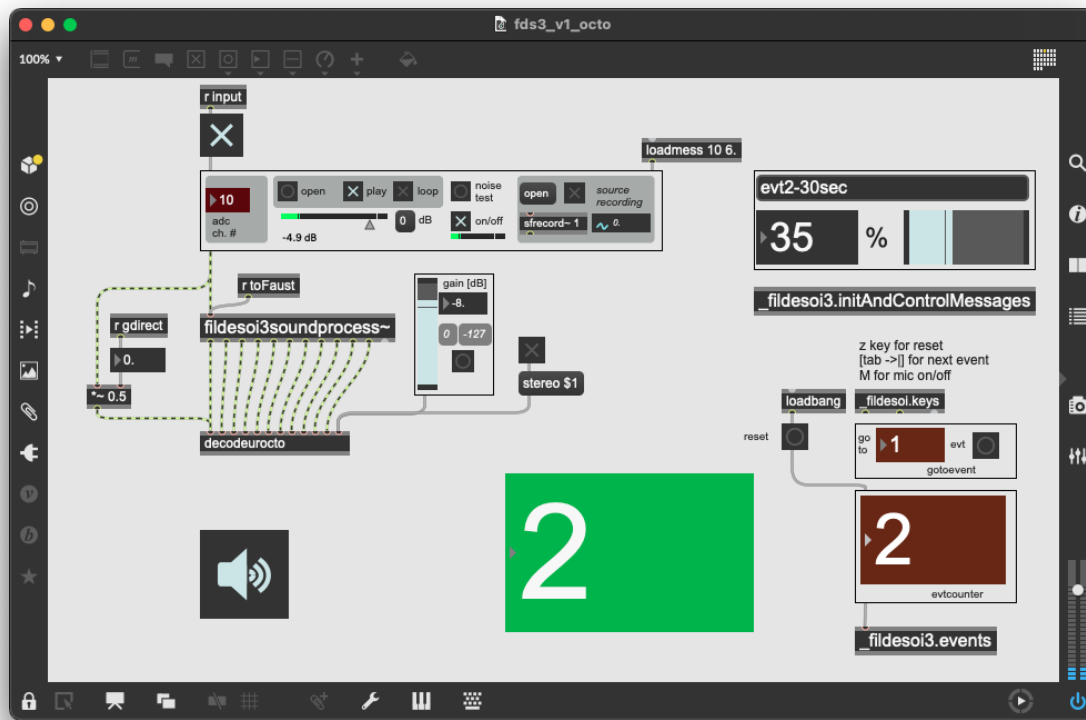


FIGURE 9.6 – Patch de concert de *Fil de Soi 3* d’Alain Bonardi

9.2.2 *Mycelium Garden* de D.Schuh

Dans le cadre d’un projet de recherche de l’EUR ArTeC intitulé *Mycelium Garden* porté par Diane Schuh, la compositrice-chercheuse a conçu une installation interactive qui utilise l’activité électrique du mycelium¹³ pour interagir avec la partie électronique d’une composition et générer de l’image au moyen d’un modèle *Generative Adversarial Network* (GAN) appelé « *Vector to pix* »^{14 15}. Par cette interaction interspécifique, la compositrice cherche à rendre attentif à l’altérité par des moyens sensibles et poétiques. Cette installation vise à explorer sur le plan artistique les potentialités de la reconnaissance de l’altérité des organismes non-humains et non-animaux affranchis de l’anthropocentrisme et de la personnification.

La réalisation de *Mycelium Garden* a démarré par l’attention au vivant présent dans le

13. Le mycelium est un organisme souterrain dont les fructifications sont les champignons.

14. Diane SCHUH, « Mycelium Garden », dans : *ISEA 2023 - Symbiosis - 28ème Symposium International de la création numérique*, ISEA international and Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs and Le Cube Garges and Forum des Images, Paris, France, mai 2023.

15. L’ingénieur de recherche qui a travaillé sur le modèle est Salim Mohamed Aissi.

jardin de la MSH PN. En effet, D.Schuh a recueilli un champignon *in situ*, Stephen Whitmarsh l'a cloné afin de produire du mycélium et Roberto Dell'orco du collectif *SPORA* l'a cultivé. Une fois le mycélium cultivé, l'enjeu était d'approcher son activité électrique. En collaboration avec David Fierro, la compositrice a utilisé les technologies du projet ANR BBDMI (voir 6.1.2) afin d'utiliser le potentiel électrique du mycélium comme pilote du moteur sonore.

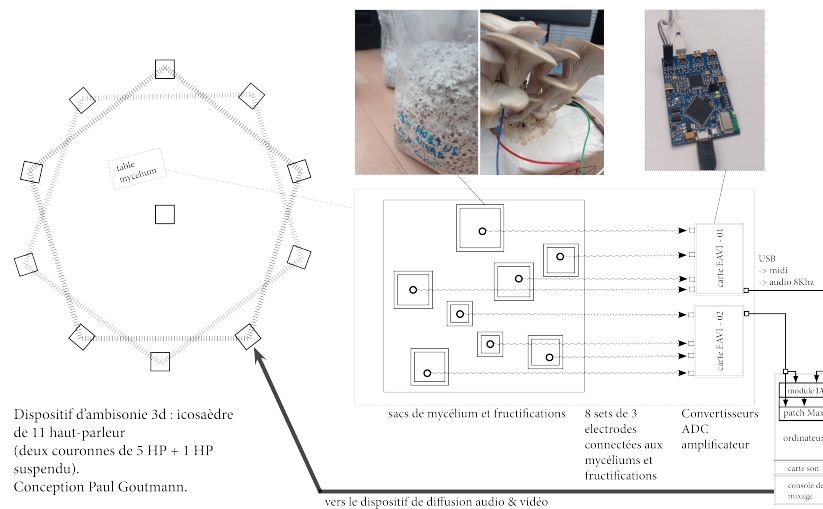


FIGURE 9.7 – Schéma de l'installation proposée aux Rencontres de l'EUR ArTeC

Crédits : Diane Schuh.

Le signal issu du mycélium est utilisé à deux niveaux : il déclenche la lecture d'échantillons sonores d'une part, et contrôle des modules de décorrélation ainsi que la spatialisation des échantillons d'autre part¹⁶. Dans la version créée lors des Rencontres de l'EUR ArTeC à la Maison des Métalloles en novembre 2023, l'installation comprenait la projection de vidéo synthétisée en temps réel par un modèle « *Vector to pix* » entraîné à partir d'une base de données originale.

Dans cette version de l'installation, la compositrice s'est inspirée de l'approche du traitement par strate (LBAMP) telle que nous l'avons présentée en 6.1.3, ainsi que l'utilisation des fonctions de distributions ajoutée à la décorrélation. En effet, nous pouvons voir dans la figure 9.8 que la compositrice utilise deux modules de décorrélations par couronne de

16. Diane SCHUH et David FIERRO, « Mycelium Garden », dans : *Journées d'Informatique Musicale JIM*, Centre de recherche en Informatique et Création Musicale, Saint-Denis France, 2023.

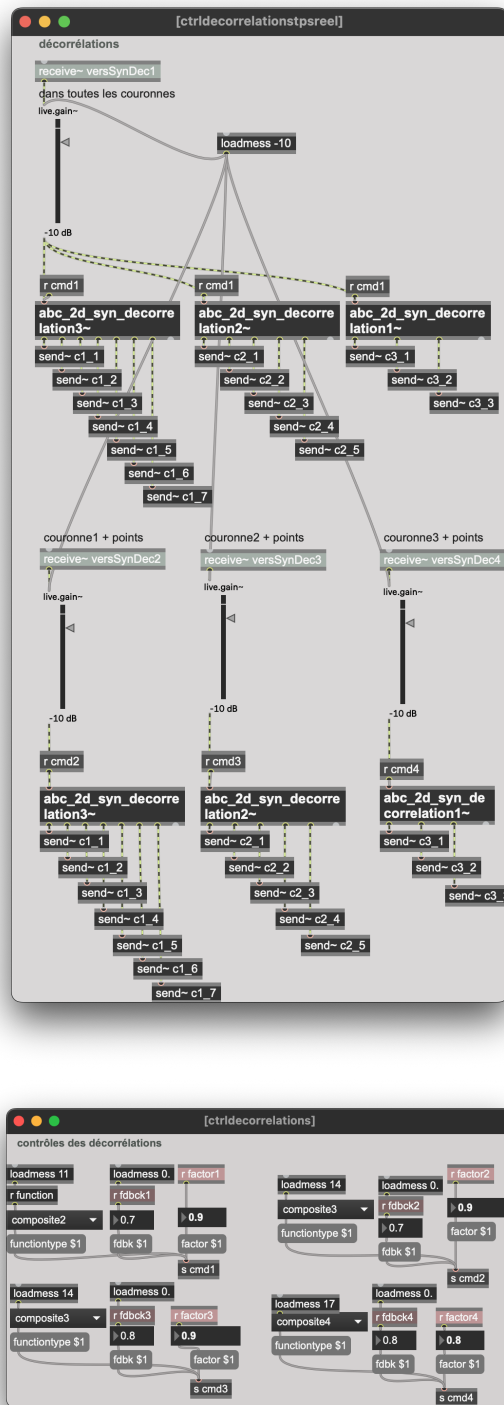


FIGURE 9.8 – Sous-patch du moteur sonore de *Mycelium Garden* : à gauche les modules de décorrelation, à droite les contrôles.

haut-parleurs. En l'occurrence, il s'agit de couronnes de haut-parleurs virtuels. Chaque flux de ambisonique 2D issu des modules de décorrélation est décodé pour un dispositif virtuel. Chacun de ces HPV est encodé en ambisonie 3D puis projeté sur le dispositif de diffusion réel. Cet ajustement est lié au fait que l'installation a été initialement pensée pour un dispositif de diffusion à trois couronnes de HP.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 9.8, trois modules de décorrélation aux flux dirigés vers trois couronnes reçoivent les mêmes réglages (`r cmd1`). Alors que trois autres modules aux flux dirigés vers trois couronnes reçoivent différents réglages. La figure 9.8 nous permet de voir que la compositrice utilise des fonctions de distribution différentes pour la couronne 1, 2 et 3. De fait, la compositrice s'est saisie de l'idée d'un traitement organisé en strate et de la confrontation de différentes fonctions de distribution lorsqu'elle utilise différents modules de décorrélation.

L'objectif musical de la compositrice est ici de créer de la diversité pour chaque strate horizontale et pour chaque source. Quarante-deux échantillons sonores sont projetés dans l'espace et pour chacun d'eux, la compositrice confronte une projection ponctuelle et un flux décorrélé. Ce réseau de décorrélation en plusieurs strates et le rapport entre source ponctuelle/champ diffus est directement lié à cette recherche musicale de la diversité et l'écoute de l'altérité.

9.2.3 *Azúcar salomónica con estrías* de G.M.Monteagudo

La pièce *Azucar salomonica con estrias* pour alto et électronique a été composée dans le cadre de l'atelier de composition de José Manuel Lòpez Lòpez pour l'altiste de l'ensemble *Sinkro*, Imanol Martinez Hervias en 2023. Dans cette pièce, le compositeur travaille le flux et reflux entre la partie électronique et la partie instrumentale, cherchant à faire émerger des points de rencontre. Les deux parties sont pensées dans une continuité morphologique : la partie électronique, en l'occurrence une bande, n'a comme matériau initial que des morphologies proches de celles jouées par l'alto.

En effet, la bande est basée sur des sons enregistrés au violon, essentiellement des *col legno battuto*, sons écrasés, des trilles d'harmoniques et des jetés. Le compositeur a réduit au maximum les morphologies initiales, afin de choisir les éléments fondamentaux pour construire et développer d'autres morphologies. Les différentes parties de la pièce explorent

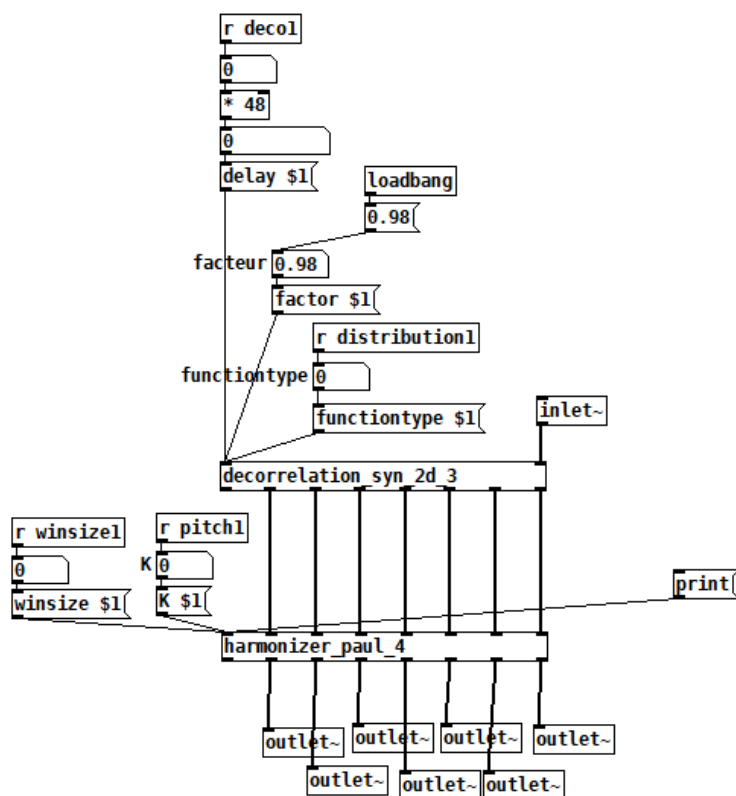


FIGURE 9.9 – Patch PureData utilisé pour la composition des figures

les quatre morphologies précédemment citées tout en gardant une organisation entre les plans et morphologies fluides. En effet, Gil Miguel Monteagudo s’appuie sur la notion d’hétéarchie, afin de tisser l’organisation entre les morphologies dans un mouvement continu.

La composition de la bande s’appuie sur deux approches : le micro-montage et la décorrélation temporelle. Nous allons nous concentrer sur les premières secondes de la pièce afin d’entrer dans le détail. La pièce débute par un jeu avec des *col legno* : le compositeur a créé des figures rythmico-mélodico-spatiales avec la décorrélation ambisonique et un *harmonizer*. Il a généré un réservoir de figures ascendantes et descendantes avec différentes distributions de décorrélation.

Ainsi, le son original (en l’occurrence un *col legno*) est envoyé dans un module de décorrélation ambisonique puis les composantes ambisoniques sont envoyées dans un *harmonizer*. Les sorties de l’*harmonizer* sont enregistrées afin de faire le montage dans *Reaper*.

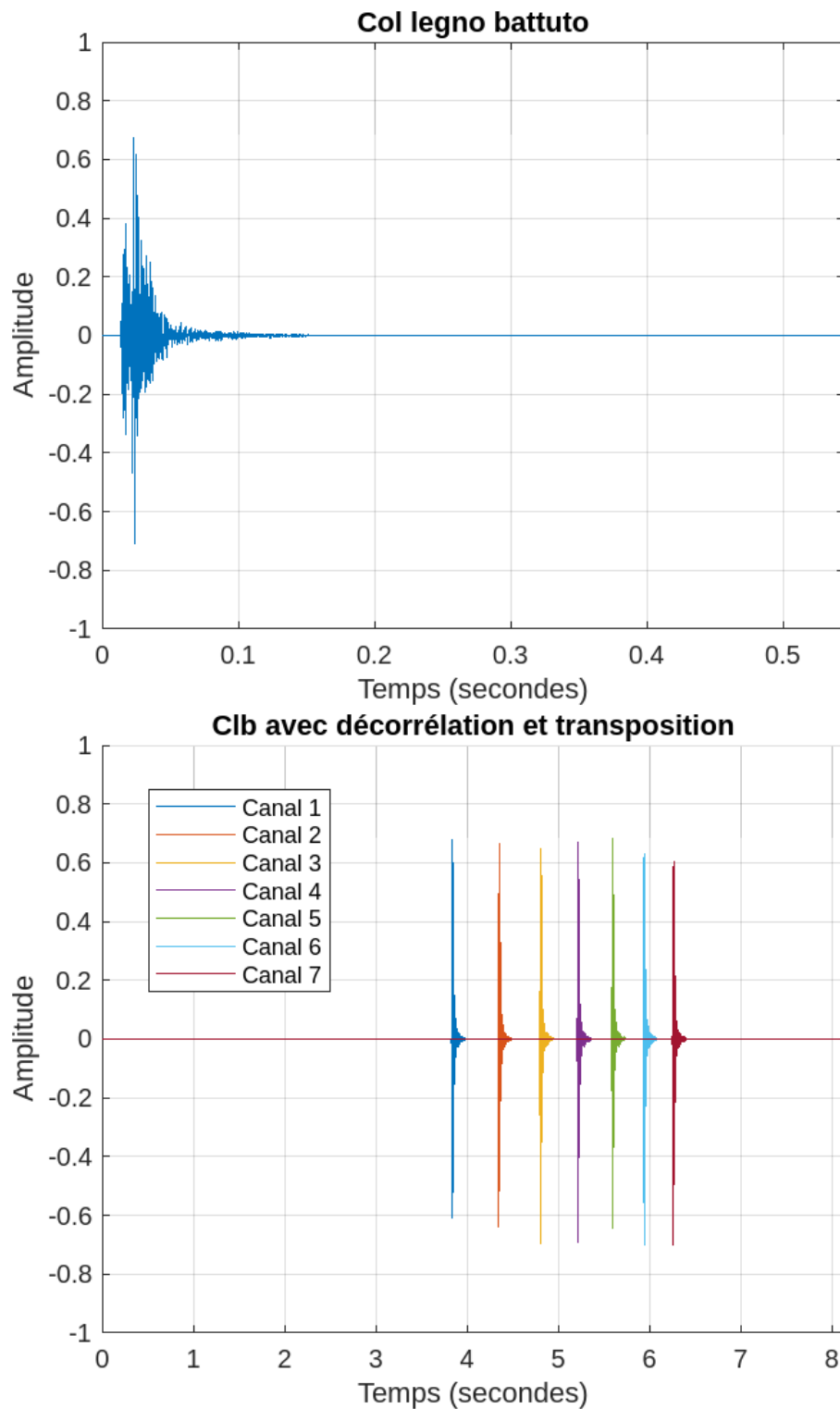


FIGURE 9.10 – Forme d’onde du son initial et du fichier multipiste résultant

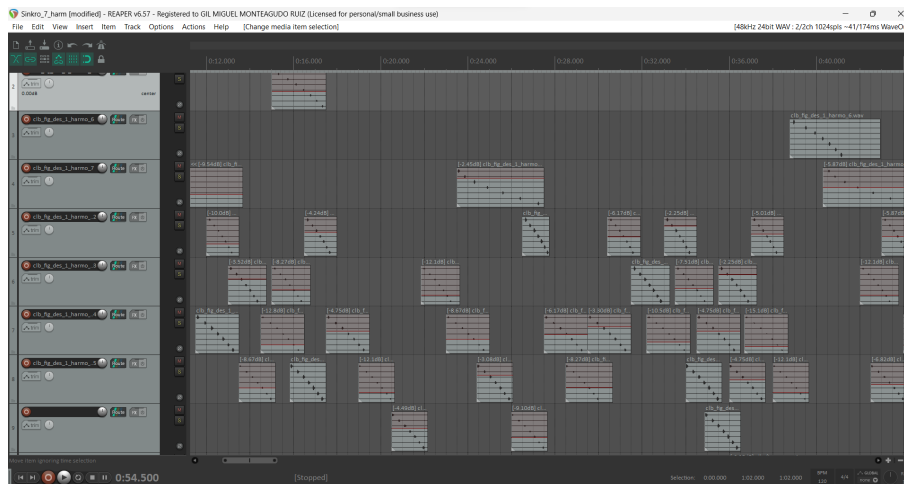


FIGURE 9.11 – Extrait de la session *Reaper* utilisée pour le montage

Ce qui nous semble intéressant de souligner ici, c’est que le compositeur a non seulement exploité particulièrement les fonctions de distributions comme moyen expressif, mais il l’a aussi importé dans son approche des hauteurs. En effet, Gil Miguel Monteagudo a utilisé les fonctions de distribution implémentées dans la décorrélation pour la distribution des transposition de l’*harmonizer* multicanal. En regardant le code FAUST de plus près, nous pouvons voir que sept *harmonizer* sont mis en parallèle, et leur premier paramètre (la valeur de transposition) est un produit dans lequel le compositeur a inséré une fonction de distribution :

```
1 process = par(i, 7, _) : par(i, 7 harmonizer(K * (10*(6/5)) * (sqrt((i
    +1)/7))*100, winsize, 1));
```

Monteagudo se sert d’une part d’un facteur (noté K) permettant de contrôler la transposition de façon globale à toutes les instances, un facteur $6/5$ qui correspond à un rapport harmonique utilisé dans un cycle de pièce du compositeur et la fonction racine carrée.

La décorrélation a une autre fonction dans la pièce, en effet, le compositeur l’utilise pour faire de la mise en espace diffuse. Par exemple, certaines morphologies sont considérées comme des chœurs antiphoniques, comme les sons d’archet écrasés. Le compositeur souhaitait les projeter dans l’espace afin qu’ils occupent une zone sans pour autant être localisables. Les différentes interventions d’archet écrasé sont envoyées vers des décorrélations à la fenêtre et la distribution différente, engendrant de fait un résultat spatial très différent.

Dans ces trois approches singulières, nous constatons que les compositeurs se sont

saisis de différentes extensions que nous avons proposées pour la décorrélation à des fins expressives et musicales. Ce que nous trouvons particulièrement intéressant, c'est qu'ils ne sont pas simplement utilisateurs, ils saisissent, transforment et intègrent dans leur moteur sonore, dans leur système de composition. Ainsi, nous remarquons qu'en proposant des représentations opératoires, nous n'instituons pas nécessaire de paradigme opératoire.

9.3 Synthèse de la troisième partie

Nous amorçons la troisième partie par la mise en espace de la pièce *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* de Iannis Xenakis, une contribution dans le cadre centenaire de la naissance du compositeur au Planétarium de la Cité des Sciences et de l'Industrie. Cette expérience nous a offert l'opportunité d'analyser en détail un instrument issu d'une approche musicale, utilisant le dessin comme moyen d'écriture et de questionner l'interprétation d'œuvres électroacoustiques. Par la suite, nous avons revisité notre trièdre GUI-DSP-composition en partant de l'aspect poétique de nos prototypes artistiques, apportant ainsi un nouvel éclairage depuis notre perspective musicale. Nos trois compositions, *Suspension*, *Compression/dilatation* et *Émergences*, ont servi de catalyseur à nos expérimentations technologiques et musicales. Nous avons explicité les conséquences et implications de nos choix musicaux dans les différentes dimensions de nos représentations opératoires. La première, *Suspension*, aborde de manière sensible la décorrélation, entraînant des ajustements que nous avons ensuite généralisés. *Compression/dilatation* a constitué un point de bascule méthodologique, exigeant une refonte de notre dispositif de composition et de recherche. Enfin, *Émergences* a permis de tester la modularité, les maquettes d'interfaces, et a été à l'origine des extensions développées pour la décorrélation ainsi que de nos idées musicales. Pour explorer ces idées musicales, que nous regroupons sous la notion de « morphologie spatiale » un approfondissement de la notion de morphologie a été nécessaire. Ainsi, en nous appuyant sur la pensée du compositeur Horacio Vaggione, nous sommes partis de la notion de morphologie dans la tradition électroacoustique pour aborder les questions d'opératoire et de multiéchelle. Après une discussion de cette notion, nous avons présenté les quatre morphologies spatiales explorées dans *Émergences*. Enfin, nous avons mis en lumière les appropriations musicales de nos outils

par Alain Bonardi, Diane Schuh et Gil Miguel Monteagudo. Celles-ci nous permettent d'affirmer que nos approches sont partageables.

Conclusion

Dans cette thèse, nous défendons l'idée que la conception et la réalisation de représentations opératoires pour le traitement spatial du son, associées à une pratique de composition, engendrent une approche singulière de l'espace tant sur le plan logiciel que musical. Cette thèse est structurée en trois parties, conçues comme des coupes dans un même objet d'étude : les représentations opératoires pour le traitement spatial du son. Les distinctions entre ces coupes ne doivent pas empêcher le lecteur de les penser comme fondamentalement interconnectées. En explorant les enjeux musicaux de la création de représentations opératoires, nous avons examiné les constituants de nos « manettes » sur le composable à différentes échelles. Dans la pratique, nous avons développé une méthode de recherche-crédation permettant de manipuler ces trois coupes de façon non linéaire et bien souvent superposée. Ces représentations opératoires étant complexes, leurs parties ne peuvent être considérées indépendamment les unes des autres sans les altérer. Ainsi, la segmentation proposée dans le manuscrit vise non pas à isoler définitivement les parties, mais à opérer une dissociation momentanée pour naviguer dans ce système complexe.

Dans la première partie, nous définissons la pensée euclidienne de l'espace en établissant une analogie entre le point et la ligne chez Euclide et l'approche de la spatialité en musique. Cette approche classique trouve ses limites pour appréhender la composition de la spatialité fondée sur des approches opératoires comme le paradigme granulaire, révélant ainsi son insuffisance pour appréhender la complexité de la spatialité du son en musique. L'analyse des solutions logicielles montre une prédominance de la pensée euclidienne, créant ainsi des angles morts dans la pensée de l'espace en informatique musicale.

Face à cela, nous explorons en pratique les enjeux liés à la conception de représentations pour le traitement spatial du son. Cette approche exploratoire analyse différents types d'interfaces, mettant en lumière leur interconnexion avec les moteurs de traitement et les approches musicales. La deuxième partie se focalise sur le trièdre (interface, traitement, composition) depuis les moteurs de traitement, démontrant que la conception du code DSP implique des choix musicaux qui influent directement sur les modalités d'interaction avec les environnements de composition. Après une présentation des outils techniques et théoriques du modèle ambisonique, nous plongeons dans le traitement spatial par décorrélation des signaux en ambisonie dont nous proposons des extensions. Prenant du recul, nous généralisons ces extensions avec un pseudo-code générique et présentons des outils d'analyse du signal pour évaluer leur efficacité. La troisième partie éclaire notre trièdre depuis l'aspect poïétique de nos prototypes artistiques. Nos compositions, *Suspension*, *Compression/dilatation* et *Émergences*, nous permettent d'explicitier les conséquences de nos choix musicaux dans la conception de nos représentations opératoires. En nous appuyant sur la pensée d'Horacio Vaggione, nous présentons les quatre morphologies spatiales explorées dans *Émergences*. Enfin, nous soulignons les appropriations musicales de nos outils par les compositeurs Alain Bonardi, Diane Schuh et Gil Miguel Monteagudo, affirmant ainsi que nos approches sont partageables.

Dans le chapitre 1, nous interrogeons les origines mathématiques des représentations de l'espace convoquées en musique. À partir des *Éléments* d'Euclide, nous définissons la notion de « pensée euclidienne de l'espace » puis la discutons au prisme d'une pièce électroacoustique emblématique du XX^{ème} siècle : *Concret PH* de I.Xenakis. Nous élargissons ensuite le spectre de la pensée de l'espace à partir d'un panorama d'approches opératoires rassemblant le paradigme granulaire chez Curtis Roads et Barry Truax, l'utilisation de champs vectoriels, de matrices ou de la géométrie hypersphérique. Nous exposons enfin les bases géométriques essentielles pour appréhender les interfaces graphiques et opérations couramment utilisées dans les logiciels présentés au chapitre suivant.

Dans le chapitre 2, nous faisons un état de l'art de la partie graphique des logiciels liés à l'espace sonore. Celui-ci nous permet de constater qu'une large majorité des outils est dédiée à la spatialisation du son, projection sonore de sources ponctuelles dans l'es-

pace. Notre analyse montre que l'hégémonie de la pensée euclidienne dans les outils de spatialisation du son génère des angles morts dans la pensée de l'espace en musique. Les travaux qui ont conduit au développement de la bibliothèque *HOALibrary* sont à notre connaissance les seuls à développer une approche profondément affranchie de la source ponctuelle. Ceux-ci nous invitent à définir un nouveau paradigme opératoire : le traitement spatial du son. Nous prenons alors l'approche du traitement spatial du son hérité de *HOALibrary* comme point de départ.

Au cours du chapitre 3, nous exposons quatre prototypes d'interfaces graphiques qui ont été utilisés pour explorer en pratique les enjeux musicaux et technologiques liés à la conception d'interfaces dédiées au traitement spatial du son. D'abord *stap.js*, interface modulaire permettant de contrôler nos moteurs sonores au moyen de dessin, nous a permis de mettre à l'épreuve notre première hypothèse : la modularité des interfaces permettrait de donner les avantages du contrôle sans instaurer de paradigme opératoire. Constatant la nécessité de réduire notre champ d'investigation, nous avons ensuite travaillé sur *2plf.js*, interface d'écriture permettant de contrôler trois variables au cours du temps. Les expérimentations musicales avec cette interface nous ont permis de montrer la fine relation entre les interfaces graphiques, les moteurs sonores et la psychoacoustique. En effet, ces expérimentations nous ont amenés à explorer les notions d'échelles et de seuils perceptifs d'un traitement afin d'adapter son contrôle à nos envies musicales. Nous nous sommes ensuite concentrés sur une approche locale à un traitement avec *dtd.js*, interface de contrôle pour la décorrélation ambisonique. Enfin, nous avons adopté une approche de contrôle générique avec *map_plus.js* permettant de manipuler quatre variables dans un espace à deux dimensions, applicable à n'importe quel traitement. Les tests utilisateurs ont montré la robustesse technologique de trois d'entre elles. Nous constatons par la même occasion que celles-ci peuvent devenir des instruments dans certaines circonstances, notamment lorsqu'elles donnent une sensation de contrôle, de surprise dans le rendu sonore et qu'elles permettent d'atteindre un projet musical.

Dans les trois chapitres suivants, notre exploration se concentre sur les moteurs sonores, avec une attention particulière portée sur un traitement spatial : la décorrélation en ambisonie. Nous entamons le chapitre 4 par une synthèse des éléments fondamentaux du modèle ambisonique. Après une introduction historique, nous explorons l'ambisonie

de premier ordre à l'aide d'un exemple en guidant le lecteur à travers les étapes cruciales de l'encodage et du décodage en ambisonie. Par la suite, nous abordons l'extension du modèle aux ordres élevés, ses différentes normes, techniques de décodage, et examinons les descripteurs spatiaux vecteurs énergie et vitesse. Nous clôturons ce chapitre en nous concentrant sur les origines et les perspectives de la bibliothèque qui constitue un des terrains de notre thèse : *abc.lib*. Ces fondements préparent le terrain pour une compréhension approfondie des outils présentés dans les chapitres 5 et 6 et de leur mise en œuvre musicale présentée aux chapitres 8 et 9.

Le chapitre 5 se focalise spécifiquement sur la décorrélation. Nous commençons par une introduction générale avec l'approche de Gary Kendall, puis évoquons son utilisation en tant que technique de composition dans le travail de Horacio Vaggione. Enfin, nous mettons en lumière son intégration dans le domaine ambisonique dans le cadre de la bibliothèque *HOALibrary*. Après cela, nous décrivons les enjeux de son implémentation en langage FAUST et précisons les raffinements apportés lors du transcodage dans *hoa.lib* et *abc.lib*.

Le chapitre 6 expose les différentes extensions de la décorrélation ambisonique que nous avons déployées. Cela englobe des approches telles que le sur-encodage spatial, la multi-décorrélation, la méta-décorrélation, le LBAMP, et l'enveloppe spatiale. Après la présentation de ces extensions, nous tentons de généraliser ces approches en proposant un pseudo-code générique applicable à tout traitement ambisonique. Pour tester la robustesse de la généralisation, nous l'appliquons à un autre traitement, la modulation en anneau. Enfin, nous examinons le potentiel d'un descripteur spatial proposé par Julien Colafrancesco, la corrélation multicanal, pour analyser de façon quantitative les extensions que nous avons proposées.

Dans le chapitre 7, nous interrogeons la possibilité d'adapter la diffusion de la pièce quadriphonique *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* de I.Xenakis à un système de diffusion différent de celui prévu lors de sa création dans le cadre d'une interprétation à la Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris. Cette question nous permet de nous familiariser avec l'UPIC, dispositif de composition basé sur l'utilisation d'une table à dessin imaginé et conçu par le compositeur. De fait, avec un exemple significatif d'une machine émanant d'une approche de composition. Par ailleurs, les recherches effectuées sur l'UPIC

et *Voyage Absolu des Unari vers Andromède* ont nourri nos expérimentations sur *stap.js* présentées dans la section 3.1.1. Ainsi, nous avons exploré les archives pour nous interroger sur les possibilités d'adaptation concernant la dimension spatiale de l'œuvre, puis avons mis à l'épreuve certaines de nos maquettes logicielles. Ce travail nous a permis d'interroger l'importance de la spatialité dans l'interprétation des pièces électroacoustiques du répertoire sur des systèmes récents.

Dans le chapitre 8, nous faisons état des trois prototypes artistiques de cette thèse : *Suspension*, *Compression-dilatation*, *Émergences*. Nous nous appuyons sur nos pièces pour étayer les interactions avec les autres dimensions des représentations opératoires. Notre méthodologie de recherche-crédation est basée sur une boucle itérative de développement-composition et chacune de ces pièces en est une itération. *Suspension* nous a permis d'explorer de façon sensible un traitement spatial, *Compression-dilatation* nous a permis d'interroger notre dispositif expérimental et notre méthodologie exploratoire, *Émergences* s'est constituée comme un équilibre nous permettant d'explorer et mettre en valeur les rétroactions réciproques entre les différentes pratiques de cette thèse : développement, composition, réflexions musicales. Pour chacune des trois pièces, nous avons analysé le contexte de composition, le dispositif technique et ses utilisations.

Dans le chapitre 9, nous définissons la notion de *morphologie spatiale* à partir de l'approche morphologique de Vaggione. Nous avons ensuite exploré les différents types de morphologies spatiales travaillées dans *Émergences* : textures spatiales, figures rythmico-spatiales, strates d'espace, enveloppes spatiales. Ces notions sont les dernières strates de nos représentations opératoires. Pour finir, nous avons analysé trois pièces utilisant les outils sur lesquels nous avons travaillé : *Fil de Soi 3* d'Alain Bonardi, *Mycellium Garden* de Diane Schuh et *Azucar con Estria Salamonica* de Gil Miguel Monteagudo. Ces trois exemples nous permettent d'affirmer que les traitements que nous avons proposés sont partageables, tout autant que les idées qu'ils cristallisent. De plus, nous remarquons que lorsqu'ils sont saisis par les compositeurs, ils sont modifiés. De fait, nous n'instaurons pas de paradigme opératoire tout en contribuant à l'accessibilité et la diversité des modes d'expressivité de la spatialité du son.

À partir de cette synthèse, nous concluons que la conception et la réalisation de représentations opératoires pour le traitement spatial associées à une pratique de composition permettent l'émergence d'approches singulières, généralisables, partageables, et génératives de la spatialité du son tant sur le plan logiciel que musical. Les trois parties de cette thèse sont associées à des maquettes logicielles ou des prototypes musicaux, témoignant des rétroactions fertiles entre la composition musicale et la conception des représentations opératoires. Le chapitre 3, associé à quatre maquettes d'interface graphique est à mettre en relation avec le chapitre 6, associé à un ensemble de code DSP, ainsi qu'avec le chapitre 8, associé à trois compositions électroacoustiques personnelles. Tout au long du manuscrit, nous avons détaillé les conséquences des rétroactions à l'œuvre entre les trois pans de nos travaux.

Cette pratique exploratoire nous a permis de proposer de nouvelles approches de l'espace audio 3D, ainsi qu'à diversifier et raffiner des modules de traitement spatiaux dans le modèle ambisonique. Par exemple, l'approche de l'espace audio 3D par superposition de strates de traitement (LBAMP, voir 6.2.3) est à la fois liée à une contrainte technique et une envie musicale. Cette rencontre a fait émerger de nouvelles morphologies spatiales composables (voir 9.1.3) et permet la conception d'un modèle de synthèse spatiale 3D original à partir d'une approche musicale. En suivant le sillon creusé par la bibliothèque *HOALibrary*, nous avons montré dans le chapitre 6, que les expérimentations réalisées sur la décorrélation nous ont conduit à étendre ses possibilités et peuvent être généralisées à d'autres modules de traitements. Ainsi, afin de diversifier les moyens d'expressivité avec la spatialité du son, il conviendrait de continuer à contribuer en tant que musicien au développement des traitements spatiaux du son. Ces contributions ne se cantonnent évidemment pas à la sphère de la technique. En donnant des moyens pour composer des qualités spatiales du son, ces contributions sont surtout musicales. En effet, se définissant comme de nouvelles interfaces pour le traitement spatial du son, elles nous permettent d'atteindre des dimensions de la spatialité du son encore inexplorées sur le plan musical. Par exemple, les pièces de Bonardi, Schuh et Monteagudo illustrent des utilisations originales mettant à l'œuvre des transformations personnelles de nos outils qui leur permettent d'atteindre les morphologies souhaitées. Ainsi, nous constatons que ces approches sont non seulement partageables, mais aussi génératives de nouvelles possibilités.

Par ailleurs, les potentialités ouvertes par les interfaces graphiques spécifiques pour des modules de traitement spatial en ambisonie ainsi que la conception de modules de contrôle centrés sur une pratique de compositeur montrent l'existence d'un terrain presque vierge pour la création et la recherche en informatique musicale. Enfin, l'interface d'écriture à trois degrés de liberté *2plf.js* (voir 3.1.2) et l'interface de contrôle à quatre degrés de liberté *map_plus.js* (voir 3.2.2) nous ont permis de défricher les façons dont nous pouvons faire des interfaces interactives pour des environnements à plusieurs variables. Nous avons concentré notre regard sur les interfaces pour le traitement spatial du son, toutefois, ces expérimentations ouvrent la porte pour approfondir les investigations en augmentant le nombre de variables et en examinant d'autres aspects de la création en environnement audionumérique.

La position critique que nous avons adoptée au sujet des approches euclidiennes de l'espace nous a conduit à nous intéresser aux géométries non euclidiennes, notamment au travers de la lecture de *La Science et l'Hypothèse* d'Henri Poincaré. Cette balade mathématique ne fut qu'une introduction au vaste sujet que représentent les géométries non euclidiennes. Pour autant, cela nous a donné l'intuition qu'un terrain inexploré dans le domaine du traitement spatial du son en musique était à notre portée. L'écho de cette réflexion se trouve dans notre travail sur les strates de traitement au moyen du LBAMP (6.2.3). Nous nous sommes concentrés sur la composition de plans horizontaux à courbure nulle, tout en évoquant la possibilité de jouer avec leur courbure. Ces réflexions balbutiantes nous invitent à explorer le potentiel opératoire des géométries non euclidiennes pour le traitement spatial du son et leur traduction dans un espace acoustique. Pouvons-nous imaginer des modèles de spatialisation et de traitement spatial du son fondés sur des géométries non euclidiennes ? Quelles pourraient-être les opérations associées ? *Quid* de leur potentiel musical ?

En ce qui concerne les interfaces graphiques, il nous semble y avoir au moins trois perspectives fertiles : la généralisation, l'application à la 3D et la translation dans des milieux immersifs. Nous n'avons produit qu'une seule interface spécifique à un traitement, *dtd.js*, initialement pensée pour la décorrélation en ambisonie et dont nous avons vu qu'elle était utilisable pour la modulation en anneau en ambisonie. Le potentiel de cette interface graphique autant dans sa réalisation que son utilisation nous laisse à penser qu'il serait

intéressant d'étendre la conception d'interfaces à tous les autres traitements (granulation, rotation, *pitchshifter* spatial, *etc.*). Par ailleurs, il conviendrait de porter une réflexion sur la spécificité des traitements 3D ainsi que sur les interfaces pour le traitement spatial du son en milieu immersif, par exemple dans les environnements de réalité virtuelle.

La méthodologie employée pour analyser la décorrélation, amenant à des raffinements et des extensions, a *de facto* généré de nouvelles approches. Il serait intéressant de poursuivre les investigations pour étendre les possibilités du traitement spatial dans le domaine ambisonique à d'autres traitements avec une approche musicale. Par exemple, aucun traitement n'est développé dans le domaine fréquentiel. Par ailleurs, nos travaux se sont essentiellement concentrés sur les traitements dans le domaine ambisonique, néanmoins, nous avons réalisé quelques expérimentations dans d'autres modèles de synthèse spatiale, notamment en WFS en collaboration avec Adrien Zanni. En effet, nous avons fait des essais d'application de décorrélation dans le domaine temporel et fréquentiel en WFS en réfléchissant aux particularités de celui-ci. Ces essais furent trop brefs pour être traités dans le document tout en présageant d'un potentiel musical. Dans ce sens, il serait urgent d'étendre l'approche du traitement spatial du son à d'autres modèles de synthèse spatiale.

Ainsi, notre thèse interroge le rapport entre les compositeurs et leurs instruments dans le studio de composition électroacoustique du début du XXI^{ème} siècle, elle nous invite à nous approprier le code, les modèles, les approches de l'espace en tant musicien afin d'étendre le champ des possibles. Si nous gardions en tête un précepte pour nos futurs travaux, cela serait : « façonne ton instrument ! ».

A. Annexes

A.1 Logiciel

Les contributions qui ont été faites dans le cadre de cette thèse sont regroupées dans les bibliothèques *abc.lib* et *hoa.lib* disponibles sur les serveurs *GitHub* : <https://github.com/alainbonardi/abclib> et <https://github.com/grame-cncm>. Nous listons ci-après les contributions par catégorie.

DSP

1. décorrélation (2D/3D, SYN/FX) ;
2. ring modulation (2D/3D, SYN/FX) ;
3. décodeur irrégulier 2D ;
4. vecteur energie et vélocité (2D/3D) ;
5. fonctions de distribution ;
6. patchs d'aide *Max* et *Pd* de *abc.lib*.

Interface graphique

1. *dtd.js* ;
2. *map_plus.js* ;
3. *2plf.js* ;
4. *spatialEnv.js*

Synthèse

Modèle de synthèse FM :

```

1 //-----//
2 //CHOWNING'S FM SYNTHESIS WITH AN ADDITIVE APPROCH UNTIL AN INDEX OF 30
3 //THE SYNTHESIS IS ORGANIZED BY ORDER, EACH ORDER N CONTAINS TWO
   PARTIALS EXCEPT THE 0 ORDER
4 //AMPLITUDE COEFFICIENTS ARE DEFINED BY BESSEL'S FUNCTIONS OF ORDER N
5 //BECAUSE OF BESSEL'S FUNCTIONS IMPLEMENTATION WE NEED TO DO THE
   COMPUTATION OF THE 0
6 //AND 1ST ORDERS ON ONE SIDE THEN THE HIGHER ORDERS ON THE OTHER SIDE
7 //SIGN OF AMPLITUDE COEFFICIENTS OF LOWER PARTIALS ARE REVERSED FOR ODD
   ORDERS
8 //IF THE FREQUENCY IS POSITIVE AND FOR EVEN ORDERS IF THE FREQUENCY IS
   NEGATIVE
9 //EACH PARTIAL COULD BE TRIGGERED INDEPENDENTLY
10 import("stdfaust.lib") ;
11 //-----//
12 //CONTROL PARAMETERS
13 //-----//
14 carrier = hslider("carrier", 220, 20, 10000, 0.1) ;
15 modulante = hslider("modulante", 0, 0, 10000, 0.1) ;
16 index = hslider("index", 1, 0, 30, 0.01) ;
17 attack = hslider("attack", 1, 0, 60, 0.001) ;
18 release = hslider("release", 1, 0, 60, 0.001) ;
19 //-----//
20 //COMPUTATION OF AMPLITUDES AND POSITIONS OF PARTIALS
21 //-----//
22 freqLo(c, m, n) = ( ( c - n * m < 0 ) * - 1 * ( c - n * m ) ) + ( ( c -
   n * m > 0 ) * ( c - n * m ) ) ;
23 //
24 freqHi(c, m, n) = c + n * m ;
25 //
26 amplitude(n, I) = n, I : ma.Jn : _ ;
27 //

```

```

28 sign(n, c, m) = ( ( ( ( c - n * m > 0 ) & ( n % 2 == 1 ) ) | ( ( c - n *
      m < 0 ) & ( n % 2 != 1 ) ) ) * -2 ) + 1 ;
29 //
30 J_0(I) = I : ma.J0 : _ ;
31 //
32 J_1(I) = I : ma.J1 : _ ;
33 //-----//
34 //COMPUTATION OF EACH ORDER
35 //-----//
36 partials(n, a, b) = order
37   with {
38     partialLo = sign((n + 2), carrier, modulante) * amplitude((n + 2),
      index) * os.osc(freqLo(carrier, modulante, (n + 2))) * (button("gate%
      a"):en.ar(attack, release):si.smooth(ba.tau2pole(0.005)));
39     partialHi = amplitude((n + 2), index) * os.osc(freqHi(carrier,
      modulante, (n + 2))) * (button("gate%b"):en.ar(attack, release):si.
      smooth(ba.tau2pole(0.005)));
40     order = partialLo, partialHi :> _ ;
41   };
42 //-----//
43 //COMPUTATION OF THE SPECTRUM
44 //-----//
45 p0 = J_0(index) * os.osc(freqHi(carrier, modulante, 0)) * (button("gate1
      "):en.ar(attack, release):si.smooth(ba.tau2pole(0.005)));
46 p1 = J_1(index) * sign(1, carrier, modulante) * os.osc(freqLo(carrier,
      modulante, 1)) * (button("gate2"):en.ar(attack, release):si.smooth(ba
      .tau2pole(0.005)));
47 p2 = J_1(index) * os.osc(freqHi(carrier, modulante, 1)) * (button("
      gate3"):en.ar(attack, release):si.smooth(ba.tau2pole(0.005)));
48 //
49 spectrum(N) = spectre
50   with {
51     numbPartials = 2 * (int(index) + 1) ;
52     spectre = par(i, N, partials(i, ((i + 2) * 2), ((i + 2) * 2) + 1)),
      p0, p1, p2 :> _ ;
53   };
54 //

```

```
55 //WARNING: IF ALL THE HARMONICS ARE TRIGGERED AT THE SAME TIME A LEVEL
    ATTENUATION IS NEEDED
56 process = spectrum(30) ;
```

A.2 Œuvres musicales

1. *Suspension* (2020), 7'15", HOA 3D

Lien : https://www.dropbox.com/scl/fi/r1uib6y6iwx85n8ssov4r/SUSPENSION_BINAURAL.wav?rlkey=sc3qq7p4fvg8b0ojytoaj4m2t&dl=0

Note de programme

Inspirée par l'altération de la perception du temps et de la spatialité engendrée par l'expérience sensible de la haute montagne, *Suspension* a été composée au cours des premiers mois de recherches. Sa composition m'a permis d'explorer un traitement spatial sur lequel je portais mon attention : la décorrélation en ambisonie d'ordre élevée. À partir d'un modèle additif de synthèse FM réalisé en langage Faust, des spectres sont générés sans que leurs partiels soient entendus en phase. Toutes les composantes sont décalées sur une fenêtre temporelle de plusieurs minutes. Nous appliquons à cette source mono des opérations de décorrélation sur une fenêtre temporelle modulant continuellement, générant ainsi des glissandi, des mouvements complexes et des sensations de profondeurs variables.

2. *Compression/dilatation* (2021), 3'15", HOA 3D

Lien : <https://hal.science/hal-03642163>

Note de programme

Miniature électroacoustique qui met à l'épreuve mes premières maquettes d'interfaces graphiques pour le traitement spatial du son. Je fais varier ici la projection des sons entre sources ponctuelles localisables et champs diffus. Toute la pièce est organisée autour d'un son de synthèse analogique filtré, compressé et dilaté temporellement.

3. *Émergences*, 8'28", HOA 3D

Lien : <https://hal.science/hal-04084391>

Note de programme

Composition électroacoustique dans laquelle je travaille à faire apparaître des morphologies spatiales de trois types : strates, textures spatiales et enveloppes d'espace. Son titre fait référence à la notion d'émergence dans la théorie des systèmes complexes. Les morphologies spatiales émergent d'un ensemble d'opérations à différentes échelles temporelles et spatiales tout en étant irréductibles à la somme des opérations originelles. À partir de sons impulsionnels filtrés, d'une note tenue et d'une séquence pré-composée de quelques secondes, le matériau sonore est principalement travaillé avec des traitements spatiaux originaux développés dans le cadre de mes recherches.

Bibliographie

- BEAUCHAMP, James, « Will the Real FM Equation Please Stand up », *dans* : *Computer Music Journal* 16.4 (1992), p. 6, ISSN : 0148-9267.
- BEAUDOUIN-LAFON, Michel, « Interaction homme-machine », *dans* : *CNRS - Cahiers IMABIO* (1992).
- BERANEK, Leo, *Concert and opera halls : how they sound*, Woodbury, NY : Published for the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1996.
- BLAUERT, Jens, *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization*, Cambridge, Mass : MIT Press, 1983, ISBN : 0-262-02190-0.
- BLUMLEIN, Allan, « Improvements in and relating to sound-transmission, sound-recording and sound-reproducing systems », brev. amér. GB394325A, 1931.
- BONARDI, Alain, « Composer l'espace sonore », *dans* : *Revue Francophone Informatique et Musique* 7-8 Culture du code (2020), ISSN : 2261-8589.
- « La librairie abclib : un ensemble de codes Faust rassemblant 20 ans de recherche, enseignement et création en musique mixte », *dans* : *Journées d'Informatique Musicale 2021*, AFIM, Visioconférences, France, juill. 2021.
- BONARDI, Alain et Pierre GUILLOT, « Concevoir des traitements ambisoniques en 2D et en 3D : l'exemple de Pianotronics 2 », *dans* : *Journées d'Informatique Musicale 2015*, sous la dir. d'université de MONTRÉAL, université de Montréal, Montréal, Canada, mai 2015, p. 8.
- BOSSEUR, Jean-Yves, *Du son au signe : histoire de la notation musicale*, Paris : éd. Alternatives, 2005, ISBN : 2862274399.

- BOUROTTE, Rodolphe et Cyrille DELHAYE, « Learn to Think for Yourself : Impelled by UPIC to open new ways of composing », dans : *Organised Sound* 18.2 (juill. 2013), p. 134-145, ISSN : 1469-8153.
- BOUVIER, Alain, Michel GEORGE et François LE LIONNAIS, *Dictionnaire des mathématiques (4 éd.)* Presses Universitaires de France, 2013, ISBN : 978-2-13-060951-3.
- BRIDOUX-MICHEL, Séverine, « Musique architecture, un projet multimédia : le Pavillon Philips de l'exposition internationale de 1958 », dans : *Musiques, arts et technologies, Pour une approche critique*, sous la dir. de Roberto BARBANTI et al., Harmattan, 2004, p. 420, ISBN : 2-7475-6691-9.
- BRINGOUX, Lionel, « Cadres de références spatiaux : des espaces formels à l'espace représenté », HDR, Université d'Aix Marseille, 2018.
- BUKVIC, Ivica, « 3D Time-Based Aural Data Representation Using D4 Library's Layer Based Amplitude Panning Algorithm », dans : *International Conference on Auditory Displays*, Canberra, Australia, juill. 2016.
- CARPENTIER, Thibaut, « Réduction horizontale d'un flux Ambisonic 3D », dans : *16ème Congrès Français d'Acoustique*, Marseille, France, avr. 2022.
- « Spat : A Comprehensive Toolbox For Sound Spatialization in Max », dans : *Ideas Sonicas*, Electroacoustic Space - Reflections - Tools for its design 13.24 (2021), Guest editor : Dr. Luis Naón Bilingual publication of the Mexican Centre for Music and Sonic Arts (CMMAS), p. 12-23.
- CARPENTIER, Thibaut et Andrew GERZSO, « Champs vectoriels pour le contrôle de la spatialisation », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2019*, LaBRI, Bayonne, France, mai 2019.
- CARSON, John Renshaw, « Notes on the Theory of Modulation », dans : *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 10.1 (1922), p. 57-64.
- CARVALHO, Guilherme, « Représentations musicales d'idées mathématiques », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1- arts, philosophie, esthétique, 2007.
- CASSIRER, Ernst, *Trois essais sur le symbolique*, Le Cerf, 1997, p. 180, ISBN : 978-2204055673.

- CASTELLENGO, Michèle, *Ecoute musicale et acoustique : avec 420 sons et leurs sonagrammes décryptés*, Paris : Eyrolles, 2015, ISBN : 9782212138726.
- CHABERT, Jean-Luc, « Les géométries non euclidiennes », dans : *Repères-IREM*, 1, Instituts de recherche sur l'enseignement des mathématiques, 1990, p. 69-91.
- CHOWNING, John, « Method Of Synthesising A Musical Sound. United States patent application », US4018121A, 1977.
- CHOWNING, John M., « The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation », dans : *Journal of the Audio Engineering Society* 21.7 (1973), p. 526-534.
- CHOWNING, John M. et David BRISTOW, *FM theory & applications, By musicians for musicians*, Tokyo : Yamaha Music Foundation, 1986, 195 p., ISBN : 9784636174823.
- COLAFRANCESCO, Julien, « Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis, 2015.
- COUPRIE, Pierre, « Analytical Approches to Tauriphonie dans Voyage Absolu des Univers Andromède by Iannis Xenakis », dans : *From Xenakis's UPIC to Graphic Notation Today, From Xenakis's UPIC to Graphic Notation Today*, sous la dir. de Peter WEIBEL, Ludger BRÜMMER et Sharon KANACH, Hatje Cantz Verlag, 2020, p. 434-457.
- CRAVEN, Peter Graham et Michael Anthony GERZON, « Coincident microphone simulation covering three dimensional space and yielding various directional outputs », EN, 4042779, 1977.
- D'ALEXANDRIE, Euclide, Bernard VITRAC et Maurice CAVEING, *Les éléments. Volume I, Livres I-IV : Géométrie plane / Euclide d'Alexandrie ; introduction générale par Maurice Caveing ; traduction et commentaires par Bernard Vitrac*, Paris : Presses universitaires de France, DL 1990, 1990, ISBN : 2 13 043240 9.
- DANIEL, Jérôme, « Representation de champs acoustiques, application a la transmission et a la restitution de scenes sonores complexes dans un contexte multimedia », thèse de doct., 2000, p. 361.
- DANIEL, Jérôme, Jean-Bernard RAULT et Jean-Dominique POLACK, « Ambisonics Encoding of Other Audio Formats for Multiple Listening Conditions », dans : (jan. 1998), p. 30.

- DI DONATO, Balandino et al., « EAVI EMG board », *dans* : *New Interfaces for Musical Expression*, Porto Alegre, Brazil : UFRGS, juin 2019.
- DUCHEZ, Marie-Elisabeth, « La représentation spatio-verticale du caractère musical grave-aigu et l'élaboration de la notion de hauteur de son dans la conscience musicale occidentale », *dans* : *Acta Musicologica* 51.1 (jan. 1979), p. 54.
- DURING, Elie, « Prototypes », *dans* : *L'étincelle (Ircam)* 7 (juin 2010), p. 6-12, ISSN : 1952-9864.
- ELLBERGER, Emile et al., « A Paradigm for Scoring Spatialization Notation », *dans* : *Proceedings of the First International Conference on Technologies for Music Notation and Representation* (Paris, France), Institut de Recherche en Musicologie (IReMus), mai 2015, p. 98-102.
- ELLBERGER, Emile et al., « Spatialization Symbolic Music Notation at ICST », *dans* : *International Conference on Mathematics and Computing*, 2014.
- ELLBERGER, Emile et al., « Taxonomy and Notation of Spatialization », *dans* : *TENOR 2016 : International Conference on Technologies for Music Notation & Representation*. Cambridge UK, jan. 2016.
- GABOR, Dennis, « Acoustical Quanta and the Theory of Hearing », *dans* : *Nature* 159.4044 (mai 1947), p. 591-594, ISSN : 1476-4687.
- GASTON GRANGER, Gilles, *La Pensée de l'espace*, Paris : Odile Jacob, 1999, ISBN : 9782738107329.
- GERZON, Michael A., « General Metatheory of Auditory Localisation », *dans* : *Journal of The Audio Engineering Society* (1992).
- « Periphony : With-Height Sound Reproduction », *dans* : *J. Audio Eng. Soc* 21.1 (1973), Presented March, 1972, at the 2nd Convention of the Central Europe Section of the Audio Engineering Society, Munich, Germany, p. 2-10.
- GOUTMANN, Paul, « Traitement spatial du son par décorrélation des signaux en ambisonie d'ordre élevé », *dans* : *Journées d'Informatique Musicale 2021*, AFIM, Visioconférences, France, juill. 2021.
- GOUTMANN, Paul et Alain BONARDI, « Approaching Spatial Audio Processing by Means of Decorrelation and Ring Modulation in Ambisonics », *dans* : *Sound and Music Computing*, sous la dir. de Romain MICHON, Laurent POTIER et Yann ORLAREY, Uni-

- versité Jean Monnet, Saint-Étienne and GRAME and INRIA, Saint-Étienne, France, juin 2022.
- GUILLOT, Pierre, « La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1 - arts, philosophie, esthétique, déc. 2017.
- JAMMER, Max, *Concepts d'espace : une histoire des théories de l'espace en physique*, Paris : Librairie philosophique J. Vrin, 2008, ISBN : 2711619826.
- KANACH, Sharon, « The Ubiquitous UPIC », dans : *From Xenakis's UPIC to graphic notation today*, sous la dir. de Peter WEIBEL et al., *Zeitgenössische Kunst, QR-Codes mit Hörbeispielen*, Berlin : Hatje Cantz Verlag, 2020, p. 36-51, ISBN : 9783775747417.
- KENDALL, Gary S., « The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery », dans : *Computer Music Journal* 19.4 (1995), p. 71.
- KIM-BOYLE, David, « Spectral and Granular Spatialization with Boids », dans : *ICMC*, Michigan Publishing, 2006, p. 139-142.
- KUHN, Thomas, *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion, 1962, ISBN : 2081396017.
- KUROZUMI, Kohichi et Kengo OHGUSHI, « The relationship between the cross-correlation coefficient of two-channel acoustic signals and sound image quality », dans : *The Journal of the Acoustical Society of America* 74.6 (déc. 1983), p. 1726-1733.
- LE MOIGNE, Jean-Louis, « Une fureur sacrée de comprendre pour faire et de faire pour comprendre », dans : *e-Phaïstos* IX-1 (avr. 2021).
- LECOMTE, Pierre, « The Spatbox : An Intuitive Trajectory Engine to Spatialize Sound », dans : *Sound and Music Computing Conference*, Saint-Étienne, France, juin 2022.
- LEDOUX, David et al., « Vers une approche immersive de la composition musicale par le développement d'outils de spatialisation sonore : ControlGRIS et ServerGRIS », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2019*, LaBRI, Bayonne, France, mai 2019.
- LOHNER, Henning, « The UPIC System : A User's Report », dans : *Computer Music Journal* 10.4 (1986), p. 42, ISSN : 0148-9267.
- MAKITA, Yuko, « On the Directional Localisation of Sound in the Stereophonic Sound Field », dans : *12th Meeting of the Technical Committee of the E.B.U*, Monte Carlo, oct. 1962.

- MARINO, Gérard, Marie-Hélène SERRA et Jean-Michel RACZINSKI, « The UPIC System : Origins and Innovations », *dans : Perspectives of New Music* 31.1 (1993), p. 258-269, ISSN : 00316016.
- MATTHIAS, Geier et al., « Software tools for object-based audio production using the Audio Definition Model », *dans : International Congress on Spatial Audio*, Graz, Austria, sept. 2017.
- MERIC, Renaud, « Concret PH, un espace mouvant », *dans : Journées d'Informatique Musicale 2005*, Association Française d'Informatique Musicale and Centre de recherche en Informatique et Création Musicale, Saint-Denis, France, juin 2005.
- MÉRIDE, Guy, « The Early Days of the Upic », *dans : From Xenakis's UPIC to graphic notation today*, sous la dir. de Peter WEIBEL et al., *Zeitgenössische Kunst, QR-Codes mit Hörbeispielen*, Berlin : Hatje Cantz Verlag, 2020, p. 121-139, ISBN : 9783775747417.
- PARIS, Eliott, « Des interfaces pour la mise en espace du son avec la bibliothèque HOA », *mém. de mast.*, Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1- arts, philosophie, esthétique, 2013.
- PENG, Wei et al., « Hyperbolic Deep Neural Networks : A Survey », *dans : IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 44.12 (2022), p. 10023-10044.
- PENHA, Rui, « Spatium, Tools for Sound Spatialization », *dans : Proceedings of the Sound and Music Computing Conference 2013*, juill. 2013.
- PETERS, Nils, Trond LOSSIUS et Jan SCHACHER, « SpatDIF : Principles, Specification, and Examples », *dans : Proceedings of the 9th Sound and Music Computing Conference (SMC)*, Copenhagen, Danemark, jan. 2012, p. 500-505.
- PICCIOLA, Daniel, « Espaces sonores paradoxaux : Approche des harmoniques hypersphériques et implémentation logicielle, pour une pratique créative de la spatialisation immersive du son en free-party », *dans : Sound and Music Computing*, sous la dir. de Romain MICHON, Laurent POTIER et Yann ORLAREY, Université Jean Monnet, Saint-Étienne and GRAME and INRIA, Saint-Étienne, France : Zenodo, juin 2022.
- PIHLAJAMÄKI, Tapani, Olli SANTALA et Ville PULKKI, « Synthesis of Spatially Extended Virtual Source with Time-Frequency Decomposition of Mono Signals », *dans : J. Audio Eng. Soc* 62.7/8 (août 2014), p. 467-484.
- POINCARÉ, Henri, *La science et l'hypothèse*, Paris : Flammarion, 2017, ISBN : 2081404362.

- RABARDEL, Pierre, *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*, Armand Colin, 1995, p. 239.
- RICHARDS, Tom, « Oramics : Precedents, Technology and Influence : Daphne Oram (1925-2003) », thèse de doct., 2018.
- ROADS, Curtis, *Composing Electronic Music : A New Aesthetic, A New Aesthetic*, Oxford University Press, 2015, p. 510, ISBN : 978-0-19-537323-3.
- « From grain to cloud », dans : *Iannis Xenakis, la musique électroacoustique*, sous la dir. de Makis SOLOMOS, L'Harmattan, 2015, ISBN : 978-2-343-06696-7.
- *Microsound*, Cambridge, Mass : MIT Press, 2001, ISBN : 9780262182157.
- SALAÜN BERTET, Stéphanie, « Formats audio 3D hiérarchiques : caractérisation objective et perspective ces systèmes Ambisonics d'ordres supérieurs », Thèse de doctorat dirigée par E.Parizet, INSA Lyon, thèse de doct., 2009, p. 151.
- SCHACHER, Jan et al., « Authoring Spatial Music With SpatDif Version 0.4 », dans : *13th Sound And Music Computing Conference*, Hamburg, Allemagne, sept. 2016, ISBN : 978-3-00-053700-4.
- SCHACHER, Jan C, Chikashi MIYAMA et Trond LOSSIUS, « The SpatDIF library – Concepts and Practical Applications in Audio Software », en, dans : *40th International Computer Music Conference & 11th Sound and Music Computing Conference*, Athènes, Grèce : Unpublished, sept. 2014.
- SCHUH, Diane, « Mycelium Garden », dans : *ISEA 2023 - Symbiosis - 28ème Symposium International de la création numérique*, ISEA international and Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs and Le Cube Garges and Forum des Images, Paris, France, mai 2023.
- SCHUH, Diane et David FIERRO, « Mycelium Garden », dans : *Journées d'Informatique Musicale JIM*, Centre de recherche en Informatique et Création Musicale, Saint-Denis France, 2023.
- SÈDES, Anne, « Approche musicale de la decorrelation microtemporelle dans la bibliothèque HOA », dans : *Journées d'Informatique Musicale 2015*, sous la dir. d'université de MONTRÉAL, Université de Montréal, Montréal, Canada, mai 2015.
- *Espaces sonores, actes de recherches*, Ed. Musicales transatlantiques, 2003, ISBN : 2-903933-08-1.

- SÈDES, Anne, « L'espace sonore du Prometeo de Luigi Nono », *dans : L'opéra éclaté - La dramaturgie musicale entre 1969 et 1984*, sous la dir. de Giordano FERRARI, L'Harmattan, 2006, p. 223-238, ISBN : 2-296-01702-9.
- SÈDES, Anne, Pierre GUILLOT et Eliott PARIS, « The HOA library, review and prospects », *dans : International Computer Music Conference / Sound and Music Computing*, Proceedings ICMC|SMC, Athènes, Greece, sept. 2014, p. 855-860.
- SHANNON, Claude Elwood, « Communication in the Presence of Noise », *dans : Proceedings of the IRE* 37.1 (1949), p. 10-21.
- SILVEIRA CARVALHO, Guilherme et Anne SÈDES, « Nouvelles écritures compositionnelles et informatique musicale », *dans : "Écritures et re-productions : Techniques compositionnelles et méthodes de ré-écriture"*, INHA, Paris, 8-9 décembre 2008, Paris, France, 2008.
- SMIRNOV, Andrey, « UPIC's Precursors », *dans : sous la dir. de Peter WEIBEL et al., Zeitgenössische Kunst, QR-Codes mit Hörbeispielen*, Berlin : Hatje Cantz Verlag, 2020, chap. UPIC's Precursors, p. 96-114, ISBN : 9783775747417.
- SOLOMOS, Makis, *De la musique au son. L'émergence du son dans la musique des XXe-XXIe siècles*, Aesthetica, Presses universitaire de Rennes, juin 2013.
- *Iannis Xenakis*, P.O. Editions, 1996.
- STROPPA, Marco, « Accorder musicalement un espace réel et un espace inventé », *dans : Paris : Presses universitaires de France*, 2007, ISBN : 9782130562221.
- SVIDZINSKI, João, « Modélisation orientée objet-opératoire pour l'analyse et la composition du répertoire musical numérique », thèse de doct., Université Paris 8 - Vincennes-Saint-Denis UFR 1- arts, philosophie, esthétique, sept. 2018.
- TANAKA, Ataru et al., « Brain-Body Digital Musical Instrument Work-in-Progress », *dans : ISEA 2023 - 28th International Symposium on Electronic Art*, Le Cube Garges and Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs and Forum des Images, Paris, France, mai 2023.
- THEUREAU, Jacques, « Les entretiens d'autoconfrontation et de remise en situation par les traces matérielles et le programme de recherche « cours d'action » », *dans : Revue d'anthropologie des connaissances* Vol 4, 2.2 (2010), p. 287.

-
- TRUAX, Barry, « Composition and diffusion : space in sound in space », dans : *Organised Sound* 3.2 (1998), p. 141-146.
- VAGGIONE, Horacio, « Composing Musical Spaces By Means of Decorrelation of Audio Signals », dans : *Proceedings of the DAFx Conference on Digital Audio Effects*. University of Limerick, University of Limerick : Limerick (Irlande), déc. 2001.
- « Composition musicale : représentations, granularités, émergences », dans : *Intellectica* 48.1 (2008), p. 155-174.
- « L'approche morphologique », dans : *Musique électroacoustique : expérience et prospective : actes IV*, Bourges, 1998, p. 140-145.
- « Représentations musicales numériques : temporalités, objets, contextes », dans : *Manières de faire des sons*, sous la dir. d'Antonia SOULEZ et Horacio VAGGIONE, Paris : L'Harmattan, 2010.
- « Some Ontological Remarks about Music Composition Processes », dans : *MIT Press - Journals* 25.1 (mars 2001), p. 54-61.
- « The Making of Octuor », dans : *Computer Music Journal* 8.2 (1984), p. 48-54, ISSN : 01489267, 15315169.
- WIEDEMANN, Julius, *M. C. Escher (Icons S.)* Taschen, 2006, p. 191, ISBN : 978-3-8228-3869-3.
- ZOTTER, Franz et Matthias FRANK, *Ambisonics : A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*, Springer, 2019, p. 224, ISBN : 978-3-030-17206-0.
- ZOTTER, Franz et Matthias KRONLACHNER, « Spatial transformations for the enhancement of Ambisonic recordings », dans : *2nd Int. Conf. on Spatial Audio (ICSA)*, jan. 2014.

Index

- Alberti, Leon Battista 33
- Barrett, Natasha 78
- Barron, Bebe 42
- Beltrami, Eugenio 40
- Berio, Luciano 76
- Blanckaert, Simon 177
- Blauert, Jens 50, 51
- Blondeau, Sacha 78
- Blumlein, Alan 131
- Bolyai, Janos 40, 46
- Bonardi, Alain ... 59, 143, 167, 177, 214,
262, 282, 284, 287, 288
- Boulez, Pierre 36, 55
- Bourotte, Rodolphe 216
- Carpentier, Thibaut 43
- Carson, John R. 236
- Carvalho, Guilherme 35
- Cassirer, Ernst 34
- Castellengo, Michèle 106
- Chen, Ching-Wei 42
- Chowning, John 55, 235–237
- Colafrancesco, Julien .36, 38, 39, 59, 200,
201, 286
- Couprie, Pierre 224
- Da Vinci, Léonard 246
- Daniel, Jérôme 132
- De Campo, Alberto 42
- Delattre, Gabriel 177
- Dell’orco, Roberto 275
- Di Maggio, Francesco 177
- Duchez, Marie-Élisabeth 75, 76
- During, Elie 233
- Einstein, Albert 46
- Ellberger, Émile 82
- Escher, Maurits Cornelis 47
- Eubel, Paul 218
- Euclide, d’Alexandrie 31, 34, 35, 124, 284
- Fechner, Gustav 105
- Fellgett, Peter 131
- Fierro, David 177, 275
- Fober, Dominique 59

- Gauss, Carl Friedrich 40, 46
- Gerzon, Michael 131
- Gerzso, Adrew 43
- Granger, Gilles Gaston 34, 36
- Grisey, Gérard 76
- Guillot, Pierre 44, 59, 167
- Haller, Hans Peter 55
- Helffer, Mireille 75
- Hilbert, David 40
- Jammer, Max 34, 40
- Jego, Jean-François 213
- Kendall, Gary 151–154, 156–158, 286
- Kim-Boyle, David 41
- Klang, Martin 177
- Kurozumi, Kazuhiko 151
- Lachenmann, Helmut 76
- Le Corbusier 36
- Leipp, Emile 106
- Lemoigne, Jean-Louis 247
- Letz, Stephane 59
- Ligeti, György 41, 76
- Lobatchevski, Nikolai Ivanovitch . 37, 40,
46, 47
- Lohner, Hening 216
- López López, José Manuel 277
- Manoury, Philippe 78, 143
- Marino, Gérard 216, 217
- Martens, William 153, 154
- Martinez Hervias, Imanol 277
- Mazarico, Amèlia 270, 271
- Meric, Renaud 38, 39
- Monteagudo, Gil Miguel .. 278, 280, 282,
284, 287, 288
- Nono, Luigi 25, 55
- Ohgushi, Kengo 151
- Oram, Daphné 216
- Orlarey, Yann 59, 143
- Panofsky, Erwin 33, 34
- Paris, Elliott 59
- Picciola, Daniel 48
- Poincaré, Henri .. 34, 35, 40, 45, 47, 124,
289
- Rabardel, Pierre 122
- Raczinski, Jean-Michel 216
- Riemann, Bernhard 40, 46, 47, 196
- Risset, Jean-Claude 49, 55
- Roads, Curtis . 41, 42, 105, 108, 109, 284
- Scelsi, Giacinto 76
- Schuh, Diane 274, 275, 282, 284, 287, 288
- Schönberg, Arnold 76
- Serra, Marie-Hélène 216
- Solomos, Makis 213
- Stockhausen, Karlheinz 36, 55, 76, 78
- Stroppa, Marco 78
- Sèdes, Anne 59, 149, 161, 162, 177
- Tanaka, Atau 177
- Theureau, Jacques 120
- Truax, Barry 41, 42, 284

-
- Vaggione, Horacio . . . 25, 26, 59, 78, 106,
149, 150, 152, 157–159, 181, 208,
260, 281, 284, 286
- Valéry, Paul 246
- Van Der Pol, Balthasar 236
- Varèse, Edgar 36, 41, 76
- Weber, Ernst 105
- Whitmarsh, Stephen 177, 275
- Wilde, Martin 153, 154
- Xenakis, Iannis 25, 33, 36–39, 41, 42, 55,
124, 211, 213–216, 218, 220, 221,
226, 229, 281, 284, 286
- Zanni, Adrien 183, 290