

Représentation et contrôle
dans le design interactif des
instruments de musique numériques

Vincent Goudard

2019



Ecole doctorale SMAER (ED 391)
Institut de Recherche en Musicologie (IReMus)
Équipe Lutherie Acoustique Musique - Institut d'Alembert
Collegium Musicæ

Représentation et contrôle dans le design interactif des instruments de musique numériques

Vincent Goudard

Thèse de doctorat en sciences et musicologie, dirigée par Pierre Couprie et Jean-Dominique Polack, co-encadrée par Hugues Genevois.

Soutenue publiquement le 24 janvier 2020, devant un jury composé de :

Brigitte d'Andréa-Novel professeure, Sorbonne Université	examinatrice, présidente du jury
Pierre Couprie maître de conférences, Sorbonne Université	co-directeur
Myriam Desainte-Catherine professeure, Bordeaux INP	rapporteuse
Hugues Genevois ingénieur de recherche, Sorbonne Université	co-encadrant
Jean-Dominique Polack professeur, Sorbonne Université	co-directeur
Laurent Pottier professeur, Université Jean Monnet, Saint-Étienne	rapporteur
Marcelo M. Wanderley professeur, Université McGill, Montréal	examineur

Vincent Goudard

*Représentation et contrôle
dans le design interactif des
instruments de musique numériques*

Ecole doctorale SMAER (ED 391)

Directeurs : Pierre Couprie et Jean-Dominique Polack

Co-encadrant : Hugues Genevois

Version finale, publiée le 21 février 2020.

Sorbonne Université

Collegium Musicæ

Institut de Recherche en Musicologie (IReMus)

Équipe Lutherie Acoustique Musique - Institut d'Alembert

4, place Jussieu 75252 PARIS

Résumé

Les instruments de musique numériques se présentent comme des objets complexes, qui se situent à la fois dans une continuité historique avec l'histoire de la lutherie tout en étant marqués par une rupture forte provoquée par le numérique et ses conséquences en terme de possibilités sonores, de relations entre le geste et le son, de situations d'écoute, de re-configurabilité des instruments, etc. Ce travail de doctorat propose une analyse des caractéristiques émanant de l'intégration du numérique dans les instruments de musique, en s'appuyant notamment sur une réflexion musicologique, sur des développements logiciels et matériels et sur une pratique musicale, ainsi que sur des échanges avec d'autres musiciens, luthiers, compositeurs et chercheurs.

Abstract

Digital musical instruments appear as complex objects, being positioned in a continuum with the history of lutherie as well as marked with a strong disruption provoked by the digital technology and its consequences in terms of sonic possibilities, relations between gesture and sound, listening situations, reconfigurability of instruments and so on. This doctoral work tries to describe the characteristics originating from the integration of digital technology into musical instruments, drawing notably on a musicological reflection, on softwares and hardwares development, on musical practice, as well as a number of interactions with other musicians, instruments makers, composers and researchers.

Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier Jean-Dominique Polack et Pierre Couprie, mes directeurs de thèse, et tout particulièrement Hugues Genevois, mon “co-encadrant” – bien étrange titre pour quelqu’un qui se plaît tant à faire sortir la pensée hors des cadres établis. Merci Hugues de m’avoir permis de poursuivre ces recherches ces dernières années, et à tous les trois de m’avoir laissé errer dans des directions diverses, avec une méthodologie souvent plus proche de l’improvisation que de la partition, tout en me faisant confiance dans ce cheminement sinueux!

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury, d’avoir accepté d’examiner cette thèse: Brigitte d’Andréa-Novel, Myriam Desainte-Catherine, Laurent Pottier et Marcelo Wanderley, ainsi qu’à Catherine Pélachaud pour sa bienveillance lors du comité de suivi. Vos conseils avisés sont précieux pour la suite de ce travail.

Je remercie chaleureusement le Collegium Musicæ, en particulier Cécile Davy-Rigaux, Benoît Fabre et plus particulièrement Agnès Puissilieux, pour sa dynamique et agréable compagnie dans notre bureau commun au LAM. Au-delà du soutien financier que m’a apporté le Collegium pour ces trois années de recherche, les séminaires rassemblant des chercheurs de ses différentes composantes ont été, chaque fois, des moments de rencontre très enrichissants dans cette perspective d’inter-disciplinarité, qui sous-tend le présent travail. C’est bien souvent au détour d’une conversation, si anecdotique parût-elle, avec des personnes extérieures à son domaine de recherche, que des connexions s’opèrent que l’on cherchait vainement ailleurs, ou que des théories que l’on croyait solides montrent leurs failles. C’est un plaisir d’avoir pu travailler dans un contexte où l’inter-disciplinarité est ainsi encouragée.

Mes remerciements vont également à mes collègues de ONE, pour le plaisir à jouer avec eux autant que pour ce qu’ils ont apporté aux réflexions et à l’élaboration de certains outils : Pierre et Hugues qui, en plus de superviser ce travail de recherche, ont été des partenaires de jeu, Laurence Bouckaert, Jean Haury, György Kurtág Jr. dont la rencontre il y a maintenant plus de quinze ans a largement contribué à la poursuite de certaines intuitions et Serge de Laubier, pour son inspirante habileté à emmener les lutheries numériques, les musiques expérimentales et les questions théoriques qu’elles posent sur les terrains très concrets du spectacle de rue, ou à confronter les aspects techniques de la latence informatique à l’impatience d’un groupe d’enfants.

Je remercie également ceux qui m’ont généreusement offert leur temps et leurs idées durant les entretiens : Nicolas Bernier, Nicolas Collins, Serge de Laubier, François Dumeaux, Adrien Mamou-Mani, Luca Turchet, Bruno Zamborlin, Patrick Saint-Denis et José-Miguel Fernandez. Merci également à Pascale Criton, Muriel Colagrande, Maurin Donneaud, Guillaume Evrard, Thor Magnusson, Rémy Müller, Bernard Sève, Paul Stapleton (et quelques autres!) pour les discussions informelles sur les lutheries numériques qui ont également nourri cette recherche, ainsi qu’à mes collègues du LAM (en particulier le groupe “nouvelles lutheries”): Christophe d’Alessandro, Michèle Castellengo, Louise Condi, Boris Doval, Claudia Fritz, Jean-Marc Fontaine, Manuel Gaulhiac, Jean-Théo Jiolat, Brian Katz, Jean-Loïc Le Carrou, Grégoire Locqueville, Thomas Lucas, Marie-France Mifune, David Poirier-Quinot, Laurent Quartier, Benoît Navarret, David Théry, Xiao Xiao, avec des remerciements particuliers à Gabriela Patiño-Lakatos, pour son art de (me) poser de bonnes questions. Merci à Simona Otarasanu, Sandrine Bandeira, Pierre-Yves Lagrée et Manuel Mayer pour leur soutien lorsqu’il s’est agi de trouver en urgence une salle où jouer une performance audiovisuelle la veille de ma soutenance, en pleine période de grève.

Merci à Dušan Barok et Alexandra Elbakyan pour la diffusion des ressources nécessaires lors d’un travail de recherche, auxquelles il est parfois difficile d’accéder dans un monde académique scindé en spécialités. Enfin, c’est une évidence qui mérite d’être explicitée, je suis redevable à toutes les personnes citées dans ce manuscrit, même lorsque leurs idées y sont critiquées, d’avoir nourri ma propre réflexion sur ce sujet. Je salue donc ici la leur, à laquelle j’espère humblement participer.

Un immense merci aux ami.e.s qui m’ont accueilli durant mes nombreux aller-retours à Paris: Ingrid, Maï, Guillaume, Karolina, Hugues, Marylise, Guillaume, Hilla, Gaëlle, Ignazio, Fabrizia, Jérôme, Agathe, Agnès, Charlotte, Fred; merci à Bertrand Gibert, pour le volume de Leroi-Gourhan qu’il m’a offert au début de ce doctorat, je l’ai bien usé! Merci à Agnès Gallet, Juliette Danjon et François Goudard pour leur relectures et regards extérieurs. À toutes celles et ceux que j’ai oubliées dans cette liste incomplète, qui ont soutenu ce travail, et enfin, un remerciement chaleureux aux collègues et ami.e.s qui, à ma grande surprise, ont fait de moi l’heureux possesseur d’un anthologique synthé analogique à la fin de ma soutenance!

À ma famille, pour leurs soutien et encouragements; à Olga et Anatole, pour leur patience autant que pour leur impatience et leur curiosité stimulante; à Gladys Brégeon, pour tout ce qu’elle sait.

Vincent Goudard, 20 février 2020.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Une thèse transdisciplinaire	5
1.2	Qu'entend-on par	6
1.2.1	Représentation...	6
1.2.2	...et contrôle...	6
1.2.3	...dans le design interactif...	7
1.2.4	...des instruments de musique...	7
1.2.5	...numériques?	9
1.3	Problématique	10
1.4	Enjeux et hypothèses	11
1.5	Interviews	12
1.6	Contributions de cette thèse	14
1.7	Structure de la thèse	15
2	Instances éphémères d'agencements modulaires	17
2.1	Paysage des DMIs	18
2.1.1	Les origines	18
2.1.2	Différents types de DMIs	20
2.1.3	Musical organics	24
2.2	Une critique de la longévité	25
2.2.1	DMI will survive	25
2.2.2	Longévité, adoption, succès	26
2.2.3	Longévité versus stabilité	28
2.2.4	Éphémérité dans le contexte musical	28
2.3	Articulation du pérenne et de l'éphémère	32
2.3.1	Les DMI comme agencements instables et sauvages	32
2.3.2	Cuisiner des instruments à la volée	33
2.3.3	Une relation tri-partite : répertoire, musicien, contexte	35
2.4	Jouer d'un DMI éphémère	36
2.4.1	Composer, concevoir, apprendre et jouer en parallèle	36
2.4.2	Entrer dans l'avenir à reculons	37
2.4.3	Trouver les résonances	37
2.4.4	Pratique modulaire de la stabilité	38
2.4.5	Entomologie musicale	39

2.5	Conclusion	41
3	L'instrument et le geste	43
3.1	Introduction : L'étude du geste en musique	44
3.2	Geste instrumental et geste musical	45
3.2.1	La musique et ses instruments	45
3.2.2	Aspects du geste	46
3.2.3	Spécificités des DMIs	48
3.3	Le modèle ergotique et l'héritage acoustique	52
3.3.1	Continuum énergétique : typologie de Cadoz	52
3.3.2	Intérêts et limites du modèle ergotique	53
3.4	Expressivité et sémiologie du geste nu	54
3.4.1	Du fonctionnel au symbolique : typologie de Delalande	54
3.4.2	Imaginaire du geste et du son	55
3.5	Geste programmé, geste re-sonné	56
3.5.1	L'outil comme externalisation de la mémoire	57
3.5.2	Le geste programmé	57
3.5.3	Le geste de re-sonnance	60
3.5.4	Résonance entre gestes re-sonnants et programmés	63
3.6	Subversion sonore, subversion gestuelle	64
3.6.1	Geste produit, capté, perçu	64
3.6.2	Une critique de la transparence	65
3.6.3	Stratégies expressives d'interaction gestuelle	67
3.6.4	Inférences perceptives et soudure subversive	72
3.6.5	La subversion comme soudure de perceptions	79
3.7	Conclusion	79
4	Interfaces sensibles / hardware	81
4.1	Différentes faces de l'interface	82
4.1.1	Interface gestuelle ou interface sensible?	82
4.1.2	Un support pour <i>musiquer</i> ?	83
4.1.3	Instruments acoustico-électronico-numériques	84
4.1.4	Facteurs de formes : héritages et transpositions	84
4.2	Matériaux	88
4.2.1	Matériaux structurels	89
4.2.2	Feed-in : capteurs	91
4.2.3	Ordinateurs et DSP	94
4.2.4	Feed-back : actionneurs	95
4.3	La part acoustique de l'interface des DMIs	97
4.3.1	Captation : microphones et transducteurs piezo	97
4.3.2	Diffusion : haut-parleurs et transducteurs tactiles	98
4.3.3	Boucler la boucle	99

4.4	Ergonomie, ergodynamisme	100
4.4.1	Portabilité de l'interface	100
4.4.2	Disponibilité de l'interface	102
4.4.3	Se repérer dans l'interface	103
4.4.4	Ergodynamie	108
4.5	Un exemple pratique : phylogénèse d'interfaces de type tablette . . .	109
4.5.1	Origine : la tablette graphique (2005)	109
4.5.2	Le Filigramophone : une tablette augmentée (2013)	111
4.5.3	Xypre : écran multitouch augmenté (2015, 2018)	114
4.5.4	Bilan et perspectives	120
4.6	Conclusion	120
5	Algorithmes interactifs / software	123
5.1	Matériaux numériques	124
5.1.1	Le son synthétique	124
5.1.2	Contrôle de la synthèse, synthèse du contrôle	125
5.2	Modèles intermédiaires dynamiques	126
5.2.1	Du mapping aux modèles intermédiaires dynamiques	127
5.2.2	Rôle des modèles intermédiaires	129
5.2.3	Exemples	132
5.3	MP : polyphonie modulaire et expressive	133
5.3.1	Une note sur les polyphonies	133
5.3.2	Motivations et revue des protocoles existants	135
5.3.3	Description générale	139
5.3.4	MP-events	140
5.3.5	MP-blocks	143
5.3.6	Exemples	146
5.3.7	Limitations et optimisations	149
5.4	Sagrada : extension de MP au DSP	150
5.4.1	Motivations et contexte	150
5.4.2	Implémentation	151
5.4.3	Performances comparées	155
5.5	Conclusion	157
6	Représentations visuelles	159
6.1	Aspects visuels du design d'instrument	160
6.1.1	Adaptation à la production du son	160
6.1.2	Adaptations ergonomiques	161
6.1.3	Représentations liées à la théorie musicale	161
6.1.4	Représentations liées au contexte de performance	162
6.1.5	Représentations liées à l'expérimentation	162
6.1.6	Aspects esthétiques : l'instrument œuvre d'art	164

6.2	L'écran comme interface de jeu	165
6.2.1	L'écran, cockpit du musicien?	165
6.2.2	L'écran comme interface tangible	167
6.2.3	Topologie dynamique	169
6.3	La librairie MP.TUI pour Max	170
6.3.1	Motivations	172
6.3.2	Utilisation de MP pour le contrôle <i>multitouch</i> de GUI	174
6.3.3	Les composants de la librairie MP.TUI	174
6.3.4	Outils pour l'interaction multitouch	175
6.3.5	Groupement d'objets graphiques	176
6.3.6	GUI composites	176
6.3.7	Instanciations dynamiques	177
6.3.8	Performances	179
6.3.9	Travaux futurs	179
6.4	Conclusion	180
7	Notations	183
7.1	Notes sur la partition	184
7.1.1	La notation comme instrument mnémonique	184
7.1.2	Des partitions symboliques aux partitions graphiques	185
7.1.3	Œuvres ouvertes, intension, improvisation	187
7.1.4	Partitions animées sur écran	188
7.1.5	La notation comme instrument performatif	189
7.2	John, un instrument pour la improvisation	191
7.2.1	Genèse d'une notation	191
7.2.2	Description technique	194
7.2.3	John en pratique	195
7.2.4	Perspectives	198
7.3	Conclusion	199
8	Conclusion	201
	Appendices	205
A	Interview : Serge De Laubier	207
B	Interview : François Dumeaux	209
C	Interview : Lucas Turchet	211
D	Interview : Bruno Zamborlin	213
E	Interview : Nicolas Collins	215
F	Interview : Adrien Mamou-Mani	217

G Interview : Patrick Saint-Denis	219
H Interview : Nicolas Bernier	221
I Interview : Jose-Miguel Fernandez	223
Glossaire	225
Artistes et œuvres cités	237
Bibliographie	241
Table des figures	263
Liste des tableaux	265

Introduction

” MUSIQUE. *Petit orchestre en train de s'accorder doucement.*

PAROLES. — Pitié! (*Orchestre. Plus fort.*) Pitié!
(*L'orchestre faiblit, se tait.*) Combien de temps
encore à moisir ici dans le noir? (*Avec dégoût.*)
Avec toi! (*Un temps.*)

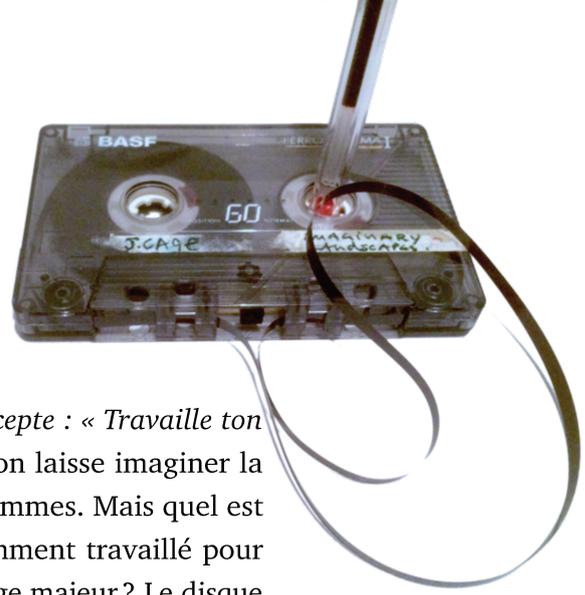
— **Samuel Beckett**

paroles et musique, Pièce radiophonique, 1962.

[Bec14]

Rewind / Record / Fast-Forward

J'ai commencé l'étude d'un "vrai" instrument de musique – le saxophone – en école de musique à l'âge de 12 ans, mais n'ai réalisé que des années plus tard que le premier instrument de musique que j'avais pratiqué avait six touches et deux contrôleurs continus : REC, PLAY, PAUSE, STOP, RWD, FWD, un contrôle de volume et un sélecteur de fréquences radio. Né au moment de la commercialisation du Walkman™ et de la "libération des ondes", j'ai rapidement eu entre les mains cet objet que peu auraient appelé "instrument de musique" à cette époque (sauf peut-être dans certains lieux qui m'étaient encore inconnus à cet âge), qui permettaient pourtant de jouer des sons, des sons venant d'ailleurs ou des sons personnels, enregistrés "à la main". Le baladeur, comme son nom l'indique, permettait d'emmener sa musique partout (à la condition d'avoir des piles chargées), chez soi comme à l'extérieur, de se plonger comme par magie dans des paysages sonores au beau milieu de la forêt ou de la ville, durant les "déplacements", trajets en bus ou en voiture dont il fournissait la bande-son. L'écoute au Walkman a probablement constitué la pratique musicale principale de toute ma génération en nombres d'heures passées sur son instrument.



Une dizaine d'années plus tard, la dédicace de Pierre Schaeffer à son père que je découvre à l'ouverture de l'imposant *Traité des objets musicaux* fait écho à cette question : "À la mémoire de mon père, violoniste, dont je transmets le précepte : « Travaille ton instrument »". Ce précepte qui prend la forme d'une injonction laisse imaginer la scène du père qui ordonne au jeune Pierre d'aller faire ses gammes. Mais quel est donc l'instrument que Pierre Schaeffer semble avoir suffisamment travaillé pour reprendre à son compte ce précepte en ouverture de son ouvrage majeur ? Le disque à sillon fermé ? Le *Phonogène* ? Le son lui-même ? Où s'agirait-il davantage de sa propre perception auditive, dont il entreprend l'étude systématique pour en déchiffrer les "modes d'écoute" comme on parle de "mode de jeu" ?

Le présent travail de recherche a commencé après plus de 15 années passées à concevoir, fabriquer, programmer, pratiquer et écouter des instruments de musique à l'aide d'ordinateurs. J'ai créé durant ces années diverses sortes d'applications, d'instruments, d'installations, d'outils, dans différents contextes : spectacle vivant, installations multimédia, ateliers pédagogiques, expositions muséographiques, émissions de radio, projets de recherche, etc. Il est sûrement vain de vouloir discriminer parmi tous ces objets lesquels constituent des instruments de musique et lesquels n'en sont pas, mais il me semble intéressant de constater que ces développements posent à chaque fois, sous différents angles, la question du rapport de musicalité avec la machine. C'est ce constat qui m'a amené à réfléchir sur ma pratique et sur la notion d'**Instrument de Musique Numérique (DMI)**¹ pour essayer d'en cerner les contours, ou du moins, d'en percevoir les lignes de fuite.

Poser la question de sa représentation, quand le médium numérique fait voler l'objet en éclat ainsi que les traditions musicales qu'il sous-tend, pose inévitablement celle des motivations pour lesquelles nous construisons des instruments, et par suite, des raisons pour lesquelles nous inventons, pratiquons, écoutons la musique. De cela découlent les multiples manières dont nous jouons avec le réel, avec les objets, avec les sons pour produire cet étrange – et si familière – vibration de l'air.

La notion de **DMI** embrasse ces problématiques, complexes sur le plan technique, mais davantage encore sur le plan sociologique, esthétique et philosophique. La façon dont nous créons la musique et la manière dont nous l'écoutons a tellement changé en un siècle qu'il semble désuet de tenter de l'aborder sur un plan purement technique, tant celle-ci semble promise à bouleverser encore davantage nos usages dans l'avenir. Le travail présenté dans cette thèse ne prétend pas répondre à ces vastes questions mais tâchera, autant que possible, de ne pas perdre de vue les raisons profondes du désir musical, pour en expliciter les conséquences sur certains

1. Les acronymes utilisés dans cette thèse sont définis dans le glossaire. Ils apparaissent en **rouge-brun** et sont clickables (dans la version numérique de ce document !) pour y accéder directement.

choix de design – perspective nécessaire qui s’inscrit, de toute évidence, dans le travail de “mon” instrument.

1.1 Une thèse transdisciplinaire

Cette thèse a été l’objet d’un contrat doctoral soutenu par le Collegium Musicæ², dont la mission est de promouvoir l’interdisciplinarité entre différents acteurs institutionnels œuvrant dans le champ de la musique et de la recherche. En l’occurrence, cette thèse a été co-dirigée par Pierre Couprie, professeur et chercheur à l’**Institut de Recherche en Musicologie (IReMus)**, Jean-Dominique Polack et Hugues Genevois, respectivement professeur et ingénieur de recherche du Ministère de la Culture, chercheurs au sein de l’équipe **Lutherie, Acoustique, Musique (LAM)** de l’Institut d’Alembert. En se situant entre les champs disciplinaires distincts des sciences et de l’ingénierie d’une part et de la musicologie d’autre part, cette thèse est la tentative d’une étude des **DMIs** prenant ces deux dimensions en compte, scientifico-technique et humaine.

Par ailleurs, ce travail de recherche théorique est soutenu par des développements techniques disponibles librement sur Internet et dont j’espère qu’ils pourront profiter à la communauté des musiciens intéressés par ces outils.

Enfin, elle s’appuie sur des performances musicales mettant en œuvre ces développements pour confronter la théorie à la pratique tout autant que pour affiner la théorie sur la base de l’observation de ces pratiques. Elle constitue donc un travail de recherche à la fois basé sur la pratique et dirigé par la pratique.

Cette transdisciplinarité propre à la musique, qui convoque les sciences acoustiques, cognitives, informatiques, l’ingénierie de l’instrument, l’histoire de son évolution, la sociologie, l’esthétique, la philosophie (...) a donné lieu à l’émergence de communautés illustrant l’échange nécessaire entre les disciplines pour tenter de comprendre la manière dont elle se construit et se manifeste dans des pratiques situées aux esthétiques multiples. Le Collegium Musicæ en est un parfait exemple, ainsi que le sont les conférences sur les nouvelles lutheries – notamment numériques – telles les **Journées d’Informatique Musicale (JIM)**, **New Interfaces for Musical Expression (NIME)** ou **International Conference on Live Interfaces (ICLI)** qui rassemblent chercheurs en sciences exactes et humaines, musiciens, luthiers, pédagogues et compositeurs présentant leurs réflexions, leurs pratiques, leurs œuvres, leurs instruments, leur outils dans le but de partager les points de vue autour de ces questions.

2. Le *Collegium Musicæ* de Sorbonne Université est un institut qui rassemble musiciens, chercheurs et enseignants-chercheurs autour de la création, la recherche, la conservation et la pratique musicale. Il rassemble dix organismes de recherche et de formation spécialisés dans le domaine musical. Site <http://www.collegium.musicae.sorbonne-universite.fr>

1.2 Qu'entend-on par ...

Il s'agit ici de donner quelques éléments permettant de préciser la signification donnée à un certain nombre de termes dans ce document.

1.2.1 Représentation...

Le terme “représentation” recouvre un très vaste champ sémantique. Si son étymologie évoque le fait de “rendre de nouveau présent”, la représentation passe aussi par l'image – réelle ou mentale –, distincte de l'original représenté, que l'on se fait de quelque chose. La question de la représentation (ou plutôt, des représentations) dans les lutheries numériques est envisagée sous différents angles, et présente ainsi des significations variables dans ce document :

- la représentation organologique des **DMIs**, en particulier les manières variées dont il se présente comme agencements modulaires (ch. 2) en contraste avec les représentations plus monolithiques de l'instrument classique ;
- la représentation de ce que l'on appelle communément “le geste musical” du point de vue des **DMIs** (ch. 3) ;
- la représentation physique du **DMI** en tant qu'interface entre la continuité analogique du monde physique et l'espace discret de son inscription algorithmique (ch. 4) ;
- la représentation proposée par le langage informatique dans lequel s'exprime le design de l'interaction musicale dans les **DMI**, en particulier la manière dont s'articulent les messages venant représenter les données (gestuelles, audio, visuelles, etc.) à l'œuvre dans un **DMI**, sous forme de signaux continus ou d'événements discrets (ch. 5) ;
- la représentation visuelle de l'interface de jeu, et en particulier son aspect dynamique lié à l'usage de l'infographie (ch. 6) ;
- la représentation des éléments de vocabulaire musical dans le cas de l'improvisation électroacoustique jouée avec ces instruments numériques, en vue de leur notation (ch. 7).

1.2.2 ...et contrôle...

Le contrôle est éminemment lié à la question de la représentation, ce couple formant deux versants complémentaires – action et perception – du phénomène d'interaction. En l'occurrence, si dans le cas des instruments acoustiques, on agit sur l'instrument dans le but de contrôler le son qu'il produit, on agit dans le cas des **DMIs** sur des représentations de sons et de gestes encodés sous la forme de données numériques. La

question du geste instrumental y tient une place centrale et nous verrons notamment comment la causalité entre gestes et sons, se ré-articule dans le cas des **DMIs**.

1.2.3 ...dans le design interactif...

Ces aspects de représentation et de contrôle sont ici étudiés dans la perspective concrète de leur prise en compte dans le travail de lutherie numérique. Le terme “design interactif” est un emprunt à l’anglais “*interactive design*”, généralement traduit par “design de l’interaction”, c’est-à-dire la conception et la réalisation des fonctions qui assurent l’aspect interactif de l’objet que l’on conçoit. Cependant, sa version anglaise laisse entendre l’aspect interactif du processus de design lui-même, ce qui reflète dans une grande mesure la manière dont le développement d’un **DMI** (et des instruments de musique, de manière plus générale) se passe : dans un jeu permanent d’aller-retours entre la fabrication, la programmation, la pratique et l’écoute.

1.2.4 ...des instruments de musique...

La signification du terme “instrument” est chargée d’une double polarité, d’objet qui sert à la fois à agir sur le monde (l’instrument-outil) et à augmenter notre capacité à le percevoir (l’instrument de mesure). Son étymologie, *instrumentum*, du terme latin *instruo* (instruire, former), lui-même issu de la racine *struo* (construire, empiler), articule ces deux aspects en assimilant l’action permise par l’instrument à un moyen de former sa propre connaissance, musicale en l’occurrence, du monde.

Une définition simple et efficace des instruments de musique serait alors la suivante : “tout dispositif dont on se sert pour jouer de la musique”. Cette définition qui peut paraître un truisme présente l’intérêt de ne pas définir les instruments en fonction de leur nature ou de leur caractéristiques techniques, mais en fonction de leur usage. En particulier, le terme “jouer” vient préciser que, si de nombreux objets techniques permettent depuis le **xx^e** siècle de “produire” de la musique à partir d’enregistrement, il ne sont envisageables en tant qu’*instruments de musique* que s’ils sont “joués”, et non simplement “utilisés”. Ainsi, la platine vinyle est un instrument de reproduction sonore quand elle est utilisée par le mélomane dans son salon, mais le même objet sera un instrument de musique s’il est joué par un **Disc Jockey (DJ)**, qui déploie des techniques expressives de *mix*, de *cut*, de *scratch*, etc. – la frontière entre ces deux postures pouvant ici être associée à l’engagement du musicien dans la performance.

Il nous restera alors à définir ce qu’on entend par musique... La tâche n’est pas simple et aucune définition ne semble faire consensus, sinon que le champ qu’elle recouvre semble s’élargir, comme le dit le musicologue Pierre Billard en introduction de la définition donnée par l’encyclopédie Universalis : “*plus notre connaissance de la*

musique est étendue et moins nous savons, en fin de compte, ce qu'elle est". Tenter de la définir par son contenu risque d'être une opération vaine ne reflétant que l'opinion de la personne qui la définit de cette manière. Ainsi, Edgar Varèse et John Cage qui semblent en donner une définition très ouverte quand ils proposent de la définir comme une "organisation des sons"³, échouent ici à caractériser la vivacité de son interprétation au profit d'une perspective qui reste davantage celle des compositeurs qu'ils sont.

Christopher Small contourne habilement la question en proposant de définir non pas le nom "musique" mais le verbe "musiquer" pour mettre en évidence la dynamique d'une pratique vivante et incarnée : *"Musiquer, c'est prendre part, quelqu'en soit notre capacité, à une performance musicale. Cela signifie non seulement jouer, mais aussi écouter, fournir des matériaux pour la performance – ce que nous appelons composer –, se préparer pour une performance – ce que nous appelons répéter ou pratiquer – et tout autre activité connectée à la performance musicale. Nous devons certainement inclure le fait de danser, si quelqu'un danse, et nous pourrions même étendre la signification à l'occasion pour inclure ce que fait la dame qui prend les tickets à l'entrée, les gros bras qui déplacent le piano, ou les roadies qui préparent les instruments et portent le matériel de son, étant donné que leurs activités affectent également la nature de l'événement qu'est une performance musicale."*⁴

La définition de Small, bien que vivifiante, semble toutefois dépasser le cadre de ce que nous entendons par "instrument de musique". Car justement, nous ne faisons pas que les entendre : nous les écoutons d'une manière tout à fait particulière, et différente de la manière dont on écoute les "instruments" employés dans toutes les activités humaines qui entourent la performance musicale dans la définition de Small – une "écoute musicienne", que Pierre Schaffer prend soin d'analyser et de décrire dans son Traité, *"active, comme si nous écoutions un orchestre en essayant de viser toutes les sources à la fois"*⁵, et qui s'exerce sur un ensemble d'objets sonores choisis⁶ par le musicien pour être écoutés.

3. "I decided to call my music 'organized sound' and myself, not a musician, but 'a worker in rhythms, frequencies, and intensities.'" [VW66]; "If this word, music, is sacred and reserved for eighteenth- and nineteenth-century instruments, we can substitute a more meaningful term : organization of sound." [Cag61], p 3. Notons toutefois que cette définition, concordante en apparence, occulte des positions divergentes entre Cage et Varèse, qu'on retrouve dans cette note de Cage : "(...) Varèse is an artist of the past. Rather than dealing with sounds as sounds, he deals with them as Varèse.", *ibid.*, p 84.

4. cf. [Sma98]

5. Cf. [Sch66], p 332.

6. Objets sonores que Pierre Schaffer appelle "convenables" : "Ces objets sonores convenables répondant à une invention musicienne, nous prendrons soin cependant de les identifier tout comme les objets sonores les plus généraux"(italiques de l'auteur). *Ibid.*, p 339.

1.2.5 ...numériques ?

On parle souvent, par métonymie, des “musiques électroniques” ou “musiques numériques” pour désigner des productions musicales où l’empreinte de ces médias caractérise de manière prononcée une certaine esthétique. Mais le terme “numériques”, dans le titre de cette thèse, est au pluriel car c’est bien le caractère numérique des instruments auquel je m’intéresse dans ce travail et ses conséquences en terme de lutherie. Ces spécificités seront analysées plus en détail dans la perspective propre à chaque chapitre, mais j’en évoquerai ici les traits principaux :

- **le découplage énergétique** : introduit par l’utilisation de l’électricité ;
- **le représentation symbolique** : qui permet de manière générale l’enregistrement et l’agencement sur un médium commun de données aussi diverses que des échantillons sonores, des algorithmes ou des structures de représentation de données ;
- **les capacités de stockage en mémoire** : qui permettent notamment le temps différé (davantage que le “temps réel”) et l’élaboration d’écritures dynamiques
- **la computation** : le traitement algorithmique qui permet – ou impose – une reconfiguration permanente des modèles et des représentations ;
- **le réseau** : l’inscription des **DMIs** dans l’écosystème du numérique, qui permet la distribution, l’échange, la mise en commun, la duplication des ressources sur des modules et plateformes en réseau.

J’utiliserai parfois le terme de “musicien numérique” au sens où le définit Andrew Hugill comme *“quelqu’un qui a saisi les possibilités ouvertes par les nouvelles technologies, en particulier le potentiel de l’ordinateur pour explorer, stocker, manipuler et traiter le son, ainsi que le développement de nombreux autres outils et dispositifs numériques qui permettent l’invention et la découverte musicale”*⁷.

Dans ce contexte, on pourrait être amené à envisager les **DMIs** comme des **Interface Humain-Machines (IHMs)**, tel que cela a pu être le cas au moment de leur apparition. Cependant, la performance musicale a cela de particulier qu’elle ne possède pas de cahier des charges préalables (la partition ne saurait être considérée comme telle !) et que loin de se plier à la nécessité d’exécuter une tâche précise, comme il pourrait être le cas dans le design d’autres **IHM**s, les instruments sont des objets techniques dont les musiciens *abusent* (plus qu’ils en usent), dont les artefacts peuvent être appréciables et souhaitables, dont la compréhension n’est pas un préalable requis pour leur utilisation, pas davantage que leur fiabilité n’est garante d’une performance musicale intéressante. Le design des **DMIs**, ainsi que le design des outils-mêmes du luthier numérique, doivent être informés de ces particularités propres à la création artistique si l’on souhaite qu’ils se prêtent à une interprétation

7. Dans son ouvrage *The Digital Musician* [Hug08]

vivante du répertoire, à la création de musiques nouvelles et à l'exploration de territoires sonores inexplorés.

1.3 Problématique

La conception des **DMIs** rassemble des pratiques qui sont relativement dissociées dans la lutherie acoustique occidentales de ces derniers siècles : les rôles du facteur d'instrument, du compositeur, de l'interprète et de l'auditeur y sont souvent assumés par des personnes distinctes. Les nouvelles lutheries, et particulièrement celles usant de technologies numériques, redistribuent ces fonctions qui bien souvent se retrouvent assumées par une même personne. En particulier, la possibilité de modéliser les savoirs-faire propres à ces différents domaines dans des outils qui prennent en charge tout ou partie de leur mise en œuvre permet de nuancer la part d'implication du *musicien numérique* dans chacun de ces domaines d'expertise.

La question centrale de cette thèse sera donc formulée ainsi : comment s'articulent l'agencement d'un **DMI** et sa pratique, dans cette redéfinition généralisée des interactions entre le geste et le son, le musicien et son instrument, l'écriture et l'interprétation ?

Notamment, en envisageant le geste musical comme phénomène dépassant l'approche fonctionnelle qui lui est souvent conférée dans les études en **IHM** d'une part, et en analysant les **DMIs** en tant qu'assemblages possédant des qualités propres et différentes de celles des instruments acoustiques d'autre part, ce travail vise à étudier comment les différents enjeux qui se posent avec de tels instruments dans la performance musicale se traduisent au niveau de leur conception.

Voilà donc quelques unes des questions initiales qui seront abordées dans ce travail :

- Au-delà des métaphores de la bureautique (menus, sliders, checkbox), quel vocabulaire graphique est envisageable pour le design des éléments d'interaction ?
- Comment gérer les scénarios de déconnexion / reconnexion dynamiques intervenant dans le cours d'une performance ?
- Comment noter la musique (électroacoustique) produite avec de telles interfaces pour le jeu collectif ?
- Quelles interfaces seront pertinentes lors des différentes phases de conception, de composition, de répétition, ou de performance avec l'instrument ?
- Comment s'articulent les différentes phases de conception, de composition, de répétition, ou de performance avec l'instrument ?
- Quelles représentations privilégieront, pour le contrôle de paramètres identiques, tantôt la virtuosité, la précision, l'étendue de la palette sonore, la polyphonie gestuelle ou encore la structure temporelle ?

1.4 Enjeux et hypothèses

L'enjeu de ce travail de recherche est de répondre à cette problématique en vue de discerner des caractéristiques transversales dans les lutheries numériques en l'absence de tradition, de répertoire, de notation et de méthode d'apprentissage clairement établis.

Il s'appuie pour cela sur une étude globale du "cycle de vie" d'un **DMI**, s'étendant de sa conception à sa pratique en concert, en passant par sa réalisation matérielle, sa programmation algorithmique, le design de son interface, la composition et l'interprétation avec cet instrument, avec l'enjeu de confronter au réel de la performance les concepts théoriques et leur implémentation.

Cette thèse se présente donc comme une vue "en coupe" d'un travail de lutherie numérique, dans ce qu'il comporte de réflexions, de choix de matériaux physiques et numériques, d'assemblages, de notations, de pratiques, et comment ces différents aspects interfèrent dans le cas particulier des instruments intégrant le numérique dans le design de leur interaction. La perspective globale que propose ce cycle complet est cependant polarisée par la singularité de choix personnels (il ne s'agit pas ici de concevoir un instrument universel). Cette singularité est précisément envisagée comme des caractéristiques des nouvelles lutheries, dont j'analyserai les raisons.

Afin de croiser l'approche personnelle présentée ici avec celles d'autres musiciens numériques, cette recherche sera complétée par une réflexion plus générale, nourrie des échanges réalisés lors d'interviews, durant lesquelles ressortent la diversité des motivations, ainsi que certaines similarités de pratiques.

Hypothèse 1 : l'instrument atomisé, recomposé

L'instrument est atomisé et se retrouve configuré comme un agencement modulaire évolutif qui se cristallise ponctuellement dans des instances contextuelles. Une mise en parallèle est faite entre l'apparition de l'écriture musicale, il y a un millénaire, et l'émergence contemporaine d'une *écriture de l'instrument*, qui développe à sa manière un *répertoire* de formes, d'associations gestuelles-sonores, de processus dynamiques et de structures de représentation.

Hypothèse 2 : l'instrument est subversif

Si le design des **IHM**s est largement motivé par la recherche de transparence de l'interaction et la poursuite d'une élimination de l'effort et du risque, la création musicale et les instruments qui la soutiennent se fondent sur une subversion des sens afin de redéfinir des continuités (e.g. le *legato*) entre des espaces *a priori* disjoints et d'introduire des ruptures (e.g. rythmiques) dans ce que nous percevons habituellement comme un *continuum*. À l'opposé du dessein poursuivi par les **IHM** conventionnelles, cet acte créatif passe par un effort (physique, attentionnel, mental)

soutenu et une prise de risque qui ne cherche pas à exclure la possibilité de l'accident, parfois recherché en tant que source fertile d'idées musicales nouvelles.

Hypothèse 3 : l'articulation du continu et du discret comme mode de jeu

Si la continuité de la vibration physique semble être une donnée constitutive des instruments acoustiques, qui recréent artificiellement des espaces discrets (tels que les échelles harmoniques et rythmiques), le domaine du numérique part d'une certaine manière dans la direction opposée. Les **DMIs** sont caractérisés par la nature discrète (et même binaire) de l'encodage symbolique sous-jacent aux données traitées. Il s'agit donc davantage de pouvoir retrouver une continuité dans ce monde discret.

Cette bipolarité du continu et du discret traverse ainsi, à des degrés variés, les questions de design qui se présentent dans la conception des **DMIs**, que cela soit au niveau de l'encodage du geste capté ou de celui de la synthèse audio. Les développements présentés dans ce travail sont orientés par les possibilités de passage fluide du continu au discret et inversement, animés par la conviction qu'une partie du jeu musical se joue dans cette ambivalence, en soutenant l'aspect subversif du geste musical.

Hypothèse 4 : les DMIs sont métamorphiques et appellent à d'autres virtuosités

La stabilité de l'instrument présentée comme condition nécessaire au développement d'une pratique musicale s'appuie sur une conception héritée de l'instrument acoustique traditionnel et de son écosystème, dans lequel un musicien professionnel pratique généralement un instrument de manière exclusive et interprète un ensemble varié d'œuvres écrites pour cet instrument, et qui mettent notamment à profit la virtuosité gestuelle qu'il acquiert.

Un certain nombre de facteurs contribuent à l'instabilité des **DMIs** et vient contrarier cette tradition. Mais dans le même temps, cette instabilité consubstantielle au médium numérique est la contrepartie d'un *métamorphisme* (c'est à dire une capacité à la métamorphose) dont il est possible d'utiliser le potentiel expressif pour développer de nouvelles pratiques et d'autres types de virtuosité.

1.5 Interviews

Une caractéristique notable des lutheries numériques est leur diversité et le foisonnement d'approches, de propositions, de positions prises par ceux qui les inventent et les pratiquent. Un certain nombre d'entretiens ont été menés durant ce travail de thèse afin d'élargir le champ de la réflexion à différentes approches sur les **DMIs**.

Ces entretiens ont pris la forme de discussions libres, orientées par un certain nombre de questions concernant les motivations originales ayant amené les per-

sonnes interviewées à concevoir et utiliser des **DMIs**, ainsi que les choix particuliers de design qui ont orienté leur élaboration. Le contenu de chacun de ces entretiens est reproduit intégralement dans les retranscriptions en annexe, accompagnés d'une brève biographie présentant les personnes ayant accepté de présenter leur travail et leurs réflexions.

Personnes interviewées

(Les hyperliens sur les noms renvoient aux annexes correspondantes.)

- **Nicolas Bernier** (né en 1977), compositeur et artiste sonore canadien créant des installations et performances audio-visuelles. Il enseigne la “musique numérique” à l’Université de Montréal ;
- **Nicolas Collins** (né en 1954), compositeur, artiste sonore, professeur au département son à la *School of the Art Institute* de Chicago et auteur notable du livre "Handmade Electronic Music – The Art of Hardware Hacking" ;
- **François Dumeaux** (né en 1978), musicien improvisateur et compositeur de musiques électro-acoustiques, dont la pratique est également ancrée dans celle des musiques traditionnelles ;
- **Serge De Laubier** (né en 1958), musicien, inventeur du Méta-Instrument et directeur artistique de l’association Puce Muse depuis sa création en 1982 ;
- **Jose-Miguel Fernandez** (né en 1978), musicien et compositeur de musiques électro-acoustiques, doctorant en composition à l’*IRCAM* ;
- **Adrien Mamou-Mani** (né en 1980), chercheur et co-fondateur de HyVibes, une startup commercialisant la *SmartGuitar*, un instrument augmenté ;
- **Patrick Saint-Denis** (né en 1975), compositeur et luthier numérique. Il enseigne à l’Université de Montréal.
- **Luca Turchet** (né en 1982), designer sonore, musicien, compositeur et écrivain, co-fondateur de Mind Music Labs, startup créant des instruments augmentés.
- **Bruno Zamborlin** (né en 1984), fondateur et CEO de Mogeas, un capteur intelligent qui “transforme n’importe quelle surface en instrument de musique”, et de HyperSurfaces, entreprise commercialisant cette technologie.

Je me dois toutefois de faire ici une auto-critique : ces entretiens ont été réalisés au fil de ma recherche, sans agenda préalable, ni méthode concernant le choix des interviewés. Il en ressort un biais sociologique manifeste : la surreprésentation des hommes blancs dans le milieu auquel je m’intéresse ici – biais très infortunément amplifié dans cette liste par l’absence de planification préalable de ma part, quand une démarche proactive aurait été nécessaire en ce domaine pour contrebalancer ces inégalités de représentations. A défaut d’avoir eu le temps de conduire de nouveaux entretiens après m’être rendu compte de ce déséquilibre, j’espère que cette auto-critique permettra au lecteur d’avoir conscience de ce biais et de ne pas reproduire mon erreur.

1.6 Contributions de cette thèse

Cette thèse propose plusieurs contributions théoriques dans le domaine de la recherche sur les **DMIs**, ainsi que plusieurs contributions pratiques sous la forme de **Logiciels Libres** et disponibles sur le web.

Contributions théoriques

- une articulation générale des questions de représentation et de contrôle, considérées selon les différentes perspectives qui composent les chapitres de cette thèse, mais où se font écho de manière transversale plusieurs concepts développés au long de cette recherche ;
- une réflexion critique sur la pérennité des **DMIs**, leur cycle de vie, la notion d'assemblage éphémère et ses conséquences sur leur design et leur pratique (chapitre 2) ;
- une caractérisation du geste musical dans la pratique des **DMIs**, en particulier la proposition d'une nomenclature qui s'émancipe du modèle instrumental acoustique (chapitre 3) ;
- la mise en perspective de cette typologie gestuelle avec des stratégies d'interaction intégrant la part subversive de la performance musicale et son inscription dans le design de l'instrument (chapitre 3) ;
- une revue globale des matériaux physiques composant l'interface de jeu et une analyse de leur agencement, étayée par une présentation phylogénétique de trois versions successives d'une interface de jeu développée ces dernières années (cf. chapitre 4) ;
- la proposition d'un modèle de communication asynchrone entre modules de traitements, adapté à une architecture modulaire de processus polyphoniques dynamiques (cf. chapitre 5). Ce modèle est étayé par une implémentation opérationnelle et son application dans des bibliothèques graphiques et audio (MP, MP.TUI, Sagrada, cf. contributions pratiques ci-dessous) ;
- une réflexion sur la notion de partition dynamique sur écran, élaborée dans la perspective d'une pratique de l'improvisation électroacoustique, dans laquelle les éléments de la partition et son design sont repensés pour laisser un rôle central à l'écoute mutuelle (chapitre 4) ;

Contributions pratiques

- **LAM-lib** : un package pour le logiciel Max proposant une collection d'algorithmes utiles pour la lutherie numérique ;
- **MP** : un protocole de communication pour le contrôle de la synthèse, venant palier certaines limitations rencontrées dans le protocole MIDI, ainsi qu'un package Max rassemblant un certain nombre d'objets supportant ce protocole ;

- **MP.TUI** : un package pour Max permettant la création d'interfaces graphiques tangibles personnalisables et polyphoniques, basées sur le protocole MP ;
- **Sagrada** : un package Max de synthèse granulaire modulaire contrôlée par signal audio, reprenant certains principes du protocole MP ;
- **John** : un logiciel pour la composition et la conduite d'improvisations électroacoustiques, éditable collectivement.

1.7 Structure de la thèse

Chapitre 1 - Introduction

Le présent chapitre présentant les motivations, les concepts principaux, la problématique et les enjeux de cette thèse, ses contributions et sa structure.

Chapitre 2 - Instances éphémères d'agencements modulaires

Après un rapide historique de leur évolution depuis leur apparition dans les années 1950 et un panorama succinct de différents types de **DMIs**, le chapitre 2 analyse certains traits qui les caractérisent ainsi que le contexte de leur utilisation. En particulier, la nature éphémère de ces assemblages modulaires, souvent considérée comme un défaut, est ici envisagée comme une des caractéristiques essentielles venant influencer leur design. Les notions de répertoire, de luthier/compositeur/instrumentiste et de contexte de performance sont redéfinis par la manière dont s'articule leur interaction dans la création et la pratique des **DMIs**.

Chapitre 3 - L'instrument et le geste

Le chapitre 3 vient questionner la notion de geste musical dans le cas de la pratique avec des **DMIs**. En particulier, la lisibilité du geste et la transparence de sa relation à la synthèse sonore, souvent considérée comme un critère de design souhaitable, y est remise en question en prenant en compte les fins subversives de l'art musical. L'étude des artefacts qui en résultent et viennent bouleverser la perception de continuité(s) permet d'introduire la notion de morpho-dynamisme des **DMIs**, son intérêt dans la création et la pratique musicale et son intégration dans le corps de l'instrument.

Chapitre 4 - Interfaces sensibles / hardware

Le chapitre 4 passe en revue les différents matériaux physiques avec lesquels sont fabriqués les interfaces de jeu des **DMIs** et les différentes manières dont ils peuvent s'agencer dans l'espace physique en vue de la performance musicale. Un exemple particulier d'interface de jeu conçue par l'auteur est présenté dans la perspective phylogénétique de ses différentes versions, avec ce qu'elles ont de commun et les adaptations et évolutions qui les différencient.

Chapitre 5 - Algorithmes interactifs / software

Après avoir exposé certains traits du contexte dans lequel s'inscrit l'informatique musicale temps-réel, ce chapitre présente des développements réalisés pour la conception du "mapping" de l'instrument, visant notamment à répondre aux problématiques et besoins soulevés dans les chapitres précédents. Sont ainsi décrits dans ce chapitre les concepts de "modèle intermédiaire", ainsi qu'un protocole de contrôle expressif polyphonique, nommé "MP", permettant la communication entre interfaces de jeu, modules de transformation et de synthèse. Une extension des idées de MP dans le domaine du signal et appliqué à la synthèse granulaire, nommé "*Sagrada*", est également présenté, dans la perspective de l'articulation entre les représentations du continu et du discret, évoquée dans les hypothèses.

Chapitre 6 - Représentations visuelles

L'introduction du chapitre 6 passe en revue différents aspects fonctionnels des instruments de musique se traduisant dans leur apparence visuelle. Les écrans tactiles sont ensuite présentés en tant qu'interfaces de jeu permettant l'intégration d'éléments graphiques représentant des modèles dynamiques pour l'interaction musicale. La librairie MP.TUI, développée par l'auteur et basée sur le protocole MP présenté au chapitre 5, propose un ensemble de composants graphiques personnalisables dont des éléments de représentation musicale (forme d'onde, échelle, motifs rythmiques, etc.) ou non-musicale envisagés comme composants interactifs pour le contrôle de modèles intermédiaires et de synthèse. Cette librairie permet également la reconfiguration dynamique de l'interface de jeu qui se prête à la réalisation d'instruments métamorphiques, tels qu'évoqués dans les hypothèses.

Chapitre 7 - Notations pour les DMIs

Le chapitre 7 présente des travaux portant sur la notation musicale dans le domaine de la performance électroacoustique utilisant des DMIs. Les questions de composition collective, d'édition collaborative et d'écologie de l'attention sont abordées et sont mises en œuvre dans "*John, the semi-conductor*", un logiciel permettant la génération automatique et l'édition collective de partitions minimales, utilisé dans l'ensemble d'improvisation électroacoustique ONE.

Chapitre 8 - Conclusion

La conclusion présentera un récapitulatif du travail présenté dans ce document ainsi qu'une ouverture sur les perspectives et questions ouvertes par cette recherche.

Annexes

Les annexes contiennent l'intégralité des retranscriptions d'interviews réalisées. Elles sont des documents bruts, nécessaires à cette recherche et n'ont pas vocation à être publiées.

Instances éphémères d'agencements modulaires

” *La musique (...) est trop en deçà du monde
et du désignable pour figurer autre chose
que des épures de l'Être, son flux et son reflux,
sa croissance, ses éclatements, ses tourbillons.*

— **Maurice Merleau-Pontry**
L'Œil et l'Esprit, 1964.
[Mer64]

Nous avons exposé dans le préambule le fait que l'instrument de musique ne se laisse pas facilement définir, tant la notion de musique est sujette à des interprétations diverses, et que l'apport du numérique sembler venir brouiller davantage encore les définitions et contours de l'objet. L'expression *digital musical instrument*, dont l'usage croissant depuis le tournant du millénaire a fini par la condenser en l'acronyme “**DMI**”, pourrait nous laisser croire, *a contrario*, qu'une forme certes mal-définie se cristallise. Pourtant, il semble que ce soit l'éphémérité, ou l'obsolescence des **DMIs** – selon la perspective optimiste ou pessimiste que l'on adopte – qui les caractérisent, davantage qu'une stabilité effective, et qui se traduit par un souci croissant de la question de leur pérennité.

Après un rapide historique de l'émergence des **DMI**, j'analyserai dans ce chapitre les termes de leur instabilité, dans la perspective de ce qu'ils impliquent comme choix et méthodes adaptés pour la conception et la pratique.

2.1 Paysage des DMIs

2.1.1 Les origines

Pré-histoire

Les instruments acoustiques héritent d'une histoire vieille de plus de 40 000 ans [CMM09] et la finesse de leur fabrication a atteint une excellence qui fait de certains instruments de véritables pièces d'orfèvres. Les instruments numériques, beaucoup plus récents en comparaison, ne peuvent rivaliser avec ce degré de raffinement. Pour autant, ils ne sont pas totalement déshérités de la tradition et du savoir-faire des instruments acoustiques et, par ailleurs, le développement hautement collaboratif à l'œuvre dans le domaine de la programmation informatique leur confère, malgré leur jeunesse, une grande complexité — les compétences requises pour la fabrication d'un DMI de A à Z dépassant souvent largement ce qu'il serait possible pour un individu seul de concevoir. C'est en effet un trait caractéristique des objets techniques de l'ère post-industrielle que d'être le produit du travail d'un très grand nombre d'individus¹ et d'être assemblés à partir d'éléments de base déjà manufacturés et complexes.

Parmi les diverses caractéristiques des DMIs, la plus notable est probablement le découplage énergétique entre le geste du musicien et le son. Ce découplage et plus généralement, l'extériorisation du travail dans les outils, est un processus ancien qui a été en particulier analysé par le paléo-anthropologue André Leroi-Gourhan [Ler64] et sur lequel je reviendrai dans le prochain chapitre. En ce qui concerne les instruments, on observe des ruptures dans l'histoire de la lutherie au moment de grandes avancées scientifiques et technologiques. Jean-Claude Risset note en particulier dans [GD99] la naissance de l'orgue comme un moment charnière, au regard des questions qui nous intéressent ici : *“L'orgue marque le rôle croissant de la technologie dans l'instrument de musique : il introduit le premier interrupteur, le premier clavier, et dès le xv^e siècle la première synthèse additive (qui ne sera justifiée mathématiquement par Fourier qu'au XIX^e siècle). L'orgue est aussi la première machine informationnelle : l'information donnée par le geste du musicien y est décuplée de l'énergie sonore.”*²

La révolution industrielle est un autre moment charnière, une période de nombreux développements qui anticipent les révolutions technologiques du xx^e siècle. On notera notamment les progrès mécaniques : les machines-outils permettent la réalisation de pièces mécaniques de plus en plus précises et fabriquées en grande série. Cela donnera lieu notamment à des systèmes tels que le clétage de Boehm, qui

1. Un exemple notoire en fut donné par l'économiste Leonard Read (et repris par Milton Friedman) dans l'essai “I, pencil” [Rea58], prenant l'exemple d'un simple crayon à papier pour démontrer que des millions de gens avaient collaboré à sa fabrication.
2. On notera au passage que le terme “décuplé”, qui semble être une coquille (intentionnelle ?) du terme “découplé”, reste tout à fait pertinent !

permet le déport des doigts et révolutionne la famille des instruments à vent. Enfin (et surtout), l'arrivée concomitante de la téléphonie et de l'enregistrement dans la seconde moitié du XIX^e siècle, qui déportent la production sonore dans l'espace et dans le temps et seront les vecteurs d'une transformation profonde de la société, et en particulier pour ce qui nous intéresse ici, des modes de production et de réception de la musique³.

L'arrivée du numérique

Si les premières productions musicales par ordinateur datent du début des années 1950⁴, c'est à Max Mathews, qu'on attribue généralement la paternité de la musique sur ordinateur, en tant qu'auteur du langage Music I en 1957 et de la famille de programmes qui suivront, connue sous le nom générique "Music-N".

Après de nombreuses productions musicales sur synthétiseurs analogiques dans les années 1960, arrivent les premiers développements numériques temps-réel. Au début, la bande passante de l'électronique numérique ne permet pas encore la synthèse audio temps-réel, mais est suffisante pour numériser des signaux de plus basses fréquences tels que ceux issus de boutons et potentiomètres. Les années 1970, époque du "mini-ordinateurs", donnent ainsi naissance à des systèmes hybrides permettant un contrôle numérique (et l'utilisation d'algorithmes), tandis que la synthèse sonore est assurée par des oscillateurs analogiques. C'est le cas par exemple dans le système GROOVE⁵ développé en 1967 par Max Mathews et Richard Moore aux laboratoires Bells, du CEMS⁶ conçu par Joel Chadabe et construit par Robert Moog en 1967, ou encore de la *Sal-Mar Construction* créée par Salvatore Martirano et ses étudiants entre 1969 et 1971 à l'Université d'Illinois.

Durant les années 1970, l'arrivée sur le marché de nouvelles cartes électroniques à accès rapide stimule le développement des stations de calcul audio temps-réel. En France, plusieurs projets de systèmes temps-réels sont lancés simultanément par plusieurs centres de création : à l'**Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM)** Giuseppe Di Giugno développe la série de **Digital Signal Processor (DSP)** temps-réel 4A (en 1976), 4B (en 1977), 4C (en 1978), 4X (en 1981), au **CEMAMu** Iannis Xenakis invente l'**UPIC** en 1977, tandis que Jean-François Allouis développe le système Syter [Ter07] au **Groupe de recherches musicales (GRM)** en 1977. Il est intéressant de noter comment ces différents systèmes de synthèse sonore **DSP**, créés durant les mêmes années, se distinguent déjà fortement, en étant marqués par la philosophie et l'esthétique musicale de leur maison de création : l'influence

3. Sur ce vaste sujet, voir en particulier [Thé97].

4. Elles sont attribuées à Geoff Hill sur l'ordinateur "CSIRAC" à Sydney, Australie, et à Christopher Strachey sur le "Ferranti Mark 1" à Manchester, Royaume-Uni, toutes deux en 1951. Des enregistrements restaurés de la musique de Strachey sont accessibles en ligne :

<https://soundcloud.com/guardianaustralia/first-ever-recording-of-computer-music>
et celle de Hill a été reconstruite par Paul Doornbusch, voir [Doo04].

5. "Generated Realtime Operations On Voltage-controlled Equipment"

6. "Coordinated Electronic Music Studio"

de l'architecture chez Xénakis⁷, le contrôle total de la synthèse chez Boulez⁸, le traitement “plastique” du son au GRM. Outre ces stations de calcul “mainframe”⁹, c'est aussi le début de la commercialisation de synthétiseurs numériques, à des prix plus abordables que leurs prédécesseurs analogiques : le Casio VL-1 (1979), l'E-mu Emulator (1982), le Yamaha DX7 (1983), ainsi que la norme **Musical Instrument Digital Interface (MIDI)** (1983) en sont les exemples les plus significatifs.

Parallèlement à l'IRCAM, Miller Puckette développe “The Patcher” (1985), ancêtre de Max. En 1989, la station **Ircam Signal Processing Workstation (ISPW)/Faster Than Sound (FTS)**, d'abord pilotée par Max, puis intégrée dans Max, annonce l'arrivée de la synthèse audio programmable en temps-réel sur les ordinateurs grand public et, par suite, de la démocratisation¹⁰ des lutheries numériques.

2.1.2 Différents types de DMIs

Depuis lors, les **DMIs** se sont multipliés en des formes hybrides qui germent à la croisée des arts et des pratiques. Je mentionne ci-après quelques directions, en explicitant ce qui les caractérise, mais ces différents axes de développement ne pourraient être tenus pour des catégories étanches.

Contrôleurs et synthétiseurs MIDI

Les instruments **MIDI** sont généralement séparés en deux parties : un “contrôleur” d'une part, uniquement destiné à la captation du geste, et un synthétiseur d'autre part, uniquement destiné à la production du son. Ces instruments sont apparus à partir des années 1980 avec l'arrivée du standard **MIDI** qui permet la communication entre ces deux parties, lui-même inspiré directement du clavier de piano. De manière générale, les interfaces **MIDI** se résument à des claviers et des pads de percussion, c'est-à-dire des instruments à touches de déclenchement, avec une sensibilité plus ou moins fine à la vélocité de déclenchement et à la pression sur la touche.

On peut toutefois distinguer deux générations depuis l'arrivée du **Multidimensional Polyphonic Expression (MPE)** en 2018¹¹, et des interfaces dites “expressives”¹² permettant une modulation indépendante par note.

En dehors de cet usage conforme au standard, le protocole **MIDI** a également sou-

7. L'interface de l'**UPIC** est une tablette graphique d'architecte.

8. Voir notamment les propos de Boulez dans [Alb17] reflétant cette obsession pour le contrôle absolu.

9. On appelle “mainframe” les ordinateurs centraux, de grande puissance et généralement de grande taille, dédiés au calcul spécialisé dans les grandes entreprises et les laboratoires de recherche.

10. Démocratisation relative toutefois, car si elle sort des institutions pour trouver sa place auprès d'un plus large public, elle est avant tout présente dans les pays dits “développés”, ce qui à l'époque représente essentiellement les pays d'Europe de l'Ouest, d'Amérique du Nord, l'Australie, la Nouvelle-Zélande et le Japon.

11. La reconnaissance officielle par la **MIDI Manufacturer Association (MMA)** date de début 2018, mais des instruments existaient déjà depuis 2014.

12. On peut par exemple citer le Seaboard de Roli, le Linnstrument de Roger Linn ou encore le SoundPlane de Madrona Labs.

vent été détourné pour contrôler des synthétiseurs de manière plus expérimentale. Ce détournement est à la fois lié aux limitations du MIDI en regard des possibilités d'expression sonore permises par l'audio-numérique, mais avant tout, en raison de son omniprésence hégémonique sur les outils technologiques audio.

Instruments augmentés

Les instruments augmentés sont caractérisés par un design dont la majeure partie est basée sur un instrument existant, généralement acoustique. En soi, cette définition reste arbitrairement soumise à l'appréciation de cette majorité et la différence entre instrument existant, nouvel instrument et instrument augmenté, discutable (cf. section 2.2.3). Le terme d'instrument augmenté a essentiellement émergé en parallèle du champs plus général de la "réalité augmentée", un terme qui semble avoir été formulé pour la première fois au début des années 1990¹³.

L'augmentation d'instruments recouvre par ailleurs différentes approches, qu'elles consistent à étendre la palette de l'instrument par l'ajout de capteurs tels que dans les *hyper-instruments* [Mac91] développés par Tod Machover au *Media Lab* du **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, ou par l'excitation de l'instrument lui-même¹⁴. Plusieurs projets et équipes de recherches se sont focalisés précisément sur ce sujet depuis cette dernière décennie, tels les projets "Instruments augmentés"¹⁵ à l'**IRCAM** ou l'*Augmented Instruments Lab*¹⁶ à l'université Queen Mary de Londres. Avec l'arrivée de l'**Intelligence Artificielle (IA)**, le terme "*Smart Instrument*" est également employé pour décrire l'augmentation d'instruments à l'aide d'algorithmes d'apprentissage et de génération automatique.

Instruments collectifs

À partir des années 2000 se sont également développés des instruments collectifs, distribués, connectés, avec de rares aboutissements commerciaux¹⁷, mais une recherche active, notamment avec le développement de *Laptop orchestras* (orchestres d'ordinateurs) dans les universités américaines. Citons par exemple le *Plork* de Princeton, le *Slork* de Stanford, le *L2Ork* de Virginia Tech aux États-Unis, ou en France, le développement de plusieurs projets associatifs comme le *GOO* (Grand Orchestre d'Ordinateurs) de **APO33** (voir [APO03]), le *Méta-Orchestre* de PuceMuse (figure 2.1) ou, plus récemment, les projets *SmartFaust* du **Groupe de réalisation et de recherche appliquée en Musique Électroacoustique (GRAME)** et *CoSiMa* de l'**IRCAM**.

Les questions posées par l'utilisation collective d'un médias en tant qu'instrument

13. La première occurrence du terme "réalité augmentée", en 1990, est généralement attribuée à Tom Caudell, chercheur travaillant pour Boeing.

14. On parle alors d'"instruments à contrôle actif" (*actuated instruments*), cf. [OBH11].

15. Voir <https://www.ircam.fr/projects/pages/instruments-augmentes>

16. <http://instrumentslab.org>

17. Notons la *ReacTable* <http://www.reactable.com>

de musique étaient par ailleurs l'objet du workshop "Media Music room" (figure 2.2) que j'ai organisé en 2006 à Sofia (Bulgarie)¹⁸. Davantage que la pratique, qui était au final distribuée sur plusieurs dispositifs, c'est l'élaboration commune de l'instrumentarium qui était questionnée lors de cet atelier/performance et il s'est avéré très intéressant de voir à quelle point la notion d'instrument de musique peut résonner de manière différente selon les individus.



Figure 2.1.: Le Méta-Orchestre de Puce-Muse, jouant collectivement sur le logiciel Méta-Mallette. Photographie ©Puce Muse.



Figure 2.2.: Media Music room, un projet de l'auteur visant à transformer collectivement un lieu en instrument de musique collectif. Photographie : Ivo Ivanov.

DIY-DMI

Le **Do-It-Yourself (DIY)**, en tant qu'approche autonome et empirique, voire sauvage, de la fabrication est associée au mouvement du **circuit-bending**, consistant à détourner des équipements électroniques à des fins musicales, plutôt qu'à concevoir des instruments de toute pièce. Ce mouvement s'est développé dans les années 1970, en raison de la disponibilité croissante d'appareils électroniques domestiques bon marché et l'inaccessibilité économique des synthétiseurs professionnels, donnant lieu conjointement à une nouvelle esthétique musicale, comme le note Nicolas Collins¹⁹ : *"(...) il y a eu une sorte de mouvement, en Amérique, de circuits faits maison et faits à la main pour la musique et la raison en était principalement économique, car les équipements de musique électroniques de l'époque, les synthétiseurs, étaient trop chers pour qu'on puisse les acheter. (...) Mais alors un mouvement a commencé autour d'une sorte de musique électronique alternative, qui n'était pas tant basée sur l'utilisation du son électronique dans la perspective de réaliser une vision préalable que, selon les termes de David Tudor, 'composer à l'intérieur de l'électronique'."*²⁰

Par la suite, l'arrivée au début des années 2000 de micro-contrôleurs facilement

18. Plus d'information sur : <https://vincentgoudard.com/media-music-room>.

19. Auteur de l'ouvrage "Handmade Electronic Music" [Col06] qui accompagna la seconde vague de **DIY** dans les années 2000.

20. *"(...) there was a kind of a movement in America of homemade and handmade circuitry for music and the reason was that it was primarily economic, which is that the electronic music equipment of the time, synthesizers, were too expensive for a person to buy. (...) But then a kind of a movement started about a kind of an alternative electronic music that was based not so much on using electronic sound*

programmables et bon marché²¹ (cf. figure 2.3), ainsi que le développement de forums d'échange d'information sur Internet a renouvelé la pratique **DIY**, avec des cartes électroniques telles qu'arduino²², et des nano-ordinateurs tels que Teensy²³, Raspberry Pi²⁴, Bela²⁵, etc. Ce second mouvement a également été accompagné par l'émergence de **makerspaces** et de **fab-labs**.



Figure 2.3. De haut en bas et de gauche à droite : Eobody, Arduino, Raspberry Pi, Bela.



Figure 2.4. Alex McLean, live-coding avec le langage Tidal Cycles.

Live Coding

Le *live coding* s'est développé au début des années 2000, comme une pratique visant à créer en direct et de manière semi-improvisée des programmes de création musicale. Cette pratique a été rendue possible par l'orientation de certains logiciels dans une optique de performance live, en particulier SuperCollider [McC02] et le développement dans cette même perspective de logiciels tels que Chuck²⁶ en 2003, ou TidalCycles²⁷ en 2009 (cf. figure 2.4), permettant l'interprétation à la volée de code créant et contrôlant des modules de synthèse²⁸. Ce mouvement s'est également structuré dans une communauté d'échange sur Internet soutenue en particulier par l'association TOPLAP²⁹ et depuis 2015 l'**International Conference on Live-Coding (ICLC)**. Le live-coding est une pratique musicale vivante et active, dont le langage de programmation constitue l'instrument [BC05] et dont l'interface de jeu est souvent

to realize an existing vision but as David Tudor called it : 'composing inside electronics'." (cf. Annexe E)

21. La figure 2.3 témoigne de l'évolution fulgurante de l'accessibilité de ces technologies : l'Eobody, interface d'acquisition de capteurs commercialisée en 2003 pour environ 300€ ; l'arduino, programmable et offrant des fonctions similaires, commercialisé en 2005 pour quelques dizaines d'euros seulement ; le Raspberry Pi commercialisé en 2013 propose pour 35€ un nano-ordinateur de la taille d'un arduino ; la plateforme BeagleBone+Bela commercialisée en 2016 permet pour 100€ de disposer d'un nano-ordinateur et une interface audio à latence ultra-faible dans le même facteur de forme.

22. <https://www.arduino.cc>

23. <https://www.pjrc.com>

24. <https://www.raspberrypi.org>

25. <https://www.bela.io>

26. créé à l'université de Princeton par Ge Wang and Perry Cook, voir [WC03].

27. créé par Alex McLean, voir [MW10], <https://tidalcycles.org>.

28. Une liste relativement exhaustive de langage de *live coding* est disponible ici : <https://github.com/toplap/awesome-livecoding>.

29. <https://toplap.org>

le clavier d'ordinateur.

Installations sonores et instruments à la frontière

Enfin, dans la prolifération croissante de systèmes sonores et musicaux qui caractérise ce dernier siècle, les installations sonores interactives constituent une autre forme d'expérience participative du sonore, que celle généralement associée à l'idée d'instrument de musique. A mi-chemin entre la composition, la sculpture et l'instrument, elles ne permettent souvent qu'une pratique éphémère et/ou partielle de la musique (ou simplement du son) donnée à entendre. Elles représentent toutefois un axe révélateur des nouveaux termes dans lesquels la musique et l'instrument s'inscrivent dans la société, en rapprochant les rôles de l'instrumentiste et de l'auditeur, en imbriquant la notion d'instrument et de composition, et en déplaçant la notion de concert et de performance.

Ce qu'on appelle généralement "installation sonore" conserve toutefois l'idée d'un lieu et d'un moment consacré à l'écoute (ainsi que l'idée d'un artiste auteur), mais l'autonomie propre à l'instrument électrique l'a progressivement entraîné – depuis un siècle déjà – hors des cadres "concertants", dans des usages personnels hybrides entre instruments d'écoute et de performance (des bandes magnétiques au web-streaming³⁰, en passant évidemment par la platine vinyle) qui se prolongent dans la prolifération des *apps*³¹ audio-musicales sur les ordinateurs mobiles.

2.1.3 Musical organics

On voit que la diversité des lutheries numériques rend leur classification problématique, autant que celle des instruments acoustiques classiques qui se retrouvent augmentés. Pourtant, une telle classification peut être souhaitable, dans la mesure où elle fournit un cadre référentiel d'échange et de discussion entre luthiers, des critères d'analyse pour le musicologue, ainsi que des points de repère pour le compositeur souhaitant travailler avec de tels instruments.

Parmi les différentes proposition d'organologie des **DMIs**, celle proposée par Thor Magnusson dans [Mag17] qu'il nomme *Musical Organics*³² semble particulièrement intéressante en ce qu'elle considère l'organisation des instruments de musique en fonction de l'agencement "organique" de leurs éléments.

30. Voir notamment, dans des perspectives différentes d'utilisations musicales du réseau, les projets *WJ-S* d'Anne Roquigny (<https://www.wj-s.org>), les mashups Youtube de Kutiman (https://youtu.be/WoHxoz_0ykI), les sonifications du web par le collectif d'artistes *Art of Failure* <http://artoffailure.free.fr> ou encore les fragments de code audio-générateurs postés sous forme de tweets du projet *sc140* <https://twitter.com/sc140tweets>. Pour une réflexion stimulante sur la question des pratiques musicales en réseau, voir notamment [Joy09].

31. Comme l'application RjDj, une des premières ayant souligné cette hybridation sur les smartphones.

32. L'expression se traduit difficilement en français, le terme *organics* renvoyant à l'idée d'organologie autant qu'à l'idée d'organicité, i.e. l'organisation d'un être "vivant" et son écologie.

Cette classification propose ainsi d'adopter un modèle rhizomatique, représentant de manière plus adaptée les connexions qui se créent entre différents "organes" constitutifs d'un instrument, qu'ils soient *matériaux* (e.g. plastique, métal, verre, etc.), *capteurs* (e.g. **Force Sensing Resistor (FSR)**, microphones, potentiomètres, etc.), *sons* (e.g. échantillons, synthèse FM, additive, etc.), *mappings* (e.g. fonctions de transfert, apprentissage, stochastique, etc.), *gestes* (e.g. frapper, pincer, froter, etc.), ou tout autre aspect culturel, technique, musicologique ou appartenant à un quelconque domaine entretenant un lien avec la lutherie.

Magnusson note que cette organisation, au-delà de l'aspect descriptif déjà présent dans les organologies traditionnelles, devrait se prêter à une "*organologie interprétative, qui pose les questions du 'pourquoi' et du 'comment', et offre des explications en remplaçant ces questions dans leurs contextes historiques et musicologiques.*"

2.2 Une critique de la longévité

Ce foisonnement dans le paysage des **DMIs** et la difficulté à établir des catégories qui se raccordent avec les classifications classiques coïncident avec une question plus générale portant sur la longévité de ces instruments. En effet, comment établir des catégories si les objets que l'on souhaite classer sont en mutation permanente ? Et comment partager, transmettre, enseigner, pratiquer la musique avec des objets aussi instables ?

2.2.1 DMI will survive

La longévité des **DMIs** est une question complexe qui a été soulevée à plusieurs reprises dans la littérature des **NIME** (et d'autres domaines connexes) et fait l'objet d'un débat croissant au cours de la dernière décennie [Bag14 ; MM17 ; BB08]. Les auteurs qui se sont intéressés à cette question ont identifié un certain nombre de causes de cette situation, qu'elles soient techniques, méthodologiques ou sociologiques, et ont apporté réflexions et propositions pour y remédier, telles que de nouveaux environnements pour concevoir et évaluer les instruments [Jor04 ; MM17], une meilleure documentation, de nouvelles méthodes pédagogiques et la création de communautés, ainsi qu'un travail visant à établir une notation musicale et un répertoire pour ces nouveaux instruments [Mam+14 ; MF14]. Cependant, dans la majorité de ces articles, le manque de longévité des **DMIs** est essentiellement considéré comme un défaut, ou du moins un problème à résoudre.

Dès 1975, des compositeurs de musique électroacoustique au **GRM** réfléchissaient aux questions de préservation soulevées par une musique "*écrite sur du sable*"³³ :

33. Michel Chion emploie cette formule dans [Chi77], en faisant référence aux particules ferromagnétiques des bandes audio, vouées à une dégradation prochaine.

certain compositeurs disaient qu'ils s'en moquaient et faisaient leur musique pour le présent, tandis que d'autres voyaient dans l'ère numérique naissante la possibilité de préserver leurs œuvres dans le futur. Comme nous le savons aujourd'hui, troquer le sable contre le silicium (ou le nuage, maintenant) n'a pas totalement résolu le problème.

Les **DMIs** ayant largement intégré la partie compositionnelle des œuvres musicales, parfois même confondue avec l'instrument, le désir de préserver les œuvres musicales s'est trouvé partiellement transposé dans la question de la conservation des instruments et des outils utilisés pour leur production. Mais quelles sont les raisons de cette quête de longévité ? Et qu'est-ce qui légitime à ce point la longévité d'un instrument pour qu'elle soit d'emblée vue comme une qualité ?

Le désir de longévité est ontologiquement lié à notre propre éphémérité, qui nous pousse à chercher les moyens d'assurer notre survie, notamment par la transmission de nos connaissances et la création de traditions. Le paléanthropologue André Leroi-Gourhan a analysé le phénomène des traditions comme un moyen d'extérioriser et de transmettre notre mémoire à travers la création de systèmes techniques et de "chaînes opératoires" [Ler64]. Plus récemment, Bernard Stiegler s'est appuyé sur cette idée pour définir le concept de "grammatisation", comme processus par lequel le *continuum* temporel des comportements humains est transformé en un spatial discret, ce qui permet de les intégrer dans des outils [Sti10].

Les humains ont ainsi développé des méthodes et des outils, tels que la psalmodie de textes (surtout religieux) ou l'écriture comme moyens à la fois d'enregistrer des informations pour un usage ultérieur et de transmettre des connaissances à ceux qui y survivent. L'écriture a partiellement libéré les humains du besoin de tradition orale en transférant ces connaissances sur un support physique, ce qui lui a également permis de capitaliser et de spéculer sur ses connaissances.

Ainsi, la notion de longévité traverse le champ des arts et des sciences, aux frontières desquels se trouvent les instruments de musique. Dans l'histoire de l'art, il reste principalement les œuvres durables, "gravées dans le marbre", dont sont faites les sculptures. De même, la science aspire à trouver des lois durables pour décrire le monde observable et les formuler dans le langage pérenne des mathématiques. Mais si la longévité évidente d'une œuvre constitue souvent un atout pour sa propre légitimation, lorsqu'il s'agit d'un instrument numérique et plus encore lorsqu'il est conçu comme un moyen interactif de créer une expérience musicale par essence éphémère, la question ne semble pas pouvoir se régler dans les mêmes termes.

2.2.2 Longévité, adoption, succès

Deux aspects semblent être souvent confondus : la longévité d'un instrument d'une part et son "succès" d'autre part. De plus, la notion de succès, éminemment sujette à

la perspective adoptée, semble être souvent considérée comme le taux d'adoption par une communauté d'instrumentistes, au-delà des aspects financiers d'un succès commercial.

Ces trois aspects, longévité, succès et adoption, sont cependant relativement différents, en partie indépendants et parfois même contradictoires. Il existe des exemples notoires de ce décalage : *The Hands* de Michel Waisvisz [TAB16] (Figure 2.5b), le *Lady's Glove* de Laetitia Sonami [Son06] (Figure 2.5a) ou encore le *Méta-Instrument* de Serge De Laubier [Cou18] (Figure 2.5c) sont trois instruments ayant eu une longévité remarquable³⁴, soutenue par une pratique régulière de leur inventeurs, sans toutefois avoir été adoptés par une large communauté d'instrumentistes. Inversement, l'éphémérité d'un outil ne mène pas systématiquement à une absence de popularité³⁵ et encore moins à un manque d'intérêt musical pour les performances réalisées avec ces instruments.

La notion de succès dépend ainsi de la perspective adoptée, selon qu'elle soit



(a) L. Sonami : *Lady's Glove* photographie : Charles Kremenak (b) M. Waisvisz : *The Hands* photographie : Carla van Thijn (c) S. de Laubier : *Méta-Instrument* photographie : Puce Muse

Figure 2.5.: *Lady's Glove*, *The Hands*, *Méta-Instrument* : durabilité n'est pas synonyme d'adoption par un large public.

celle des luthiers qui créent des instruments pour d'autres ou de ceux qui créent des instruments pour eux-mêmes³⁶. Dans ce dernier cas, l'adaptation de l'instrument aux besoins ou à l'esthétique propres de l'instrumentiste peut s'avérer telle qu'il soit difficile pour les autres de l'adopter.

Également, les évolutions techniques ainsi que les modes peuvent amener à la réapparition d'instruments tombés dans l'oubli. On appréciera ici la perspicacité de François-Alexandre Garsault, cité par Malou Haine [Hai18], qui dans sa "Division des instruments selon leurs différentes utilisations" (1761) classait une série d'ins-

34. Plus de 20 ans pour *The Hands* – jusqu'au décès de Michel Waisvisz, 28 ans pour le *Lady's Glove* et plus de 30 ans pour le *Méta-Instrument* dont l'actuelle 4^e version a été finalisée en 2019.

35. Considérons ici tous les gadgets éphémères qui, sous l'influence d'une mode et/ou d'une puissante campagne publicitaire, envahissent le marché, ou encore tous les appareils qui deviennent obsolètes lorsqu'un nouvel appareil les remplace, tels que le smartphone qui, outre le remplacement de nos anciens téléphones, a également balayé d'un coup les lecteurs mp3, les GPS, les consoles de jeux portables, les lampes de poche, les montres, etc.

36. L'étude de Morreale et McPherson [MM17] tend à montrer une majorité des seconds dans les participants à la conférence NIME.

truments, dont la harpe et la “guitare” (sic), dans la catégorie des “*Instruments hors d’usage, mais qui peuvent revenir*”.

2.2.3 Longévité versus stabilité

La question de la durabilité d’un instrument soulève implicitement la question de sa stabilité historique. Ainsi, l’histoire organologique des instruments de musique européens révèle de nombreux facteurs qui conduisent à l’apparition, à l’évolution ou à la disparition des instruments de musique. À cet égard, les nombreuses innovations technologiques de la révolution industrielle s’avèrent intéressantes car cette période bien documentée illustre les débuts des grandes révolutions qui allaient se produire au xx^e siècle, tout en soulevant la question même de la stabilité de la forme des instruments. Ainsi, lorsque le traverso fut équipé du système de cléage inventé par Théobald Boehm en 1832 et devint une flûte traversière, s’agissait-il d’un nouvel instrument ? À quel moment décidons-nous qu’un instrument qui subit des changements n’est plus le même ?

2.2.4 Éphémérité dans le contexte musical

Impermanence du phénomène sonore

Rappelons tout d’abord une évidence : la musique elle-même est intrinsèquement intangible, évanescence et nécessite une énergie entretenue pour exister : le phénomène sonore est en éphémérité permanente. La musique, dans sa forme sensible, n’existe que pendant le temps de sa performance. Bien que les instruments utilisés pour la produire puissent être durables, leur convocation et le son lui-même sont toujours temporaires³⁷.

De la performance

Même lorsqu’elle est notée sur une partition, la musique en tant qu’art vivant est en constante réinterprétation. Cette interprétation permet de transformer une partition notée sous forme symbolique en une expression sensible sujette à variations. On peut objecter que cette interprétation n’existe que lorsque la musique est notée de manière symbolique, laissant aux interprètes la possibilité de la jouer à leur façon dans le contexte de l’interprétation. Mais est-ce toujours le cas lorsque la musique est ‘intégralement notée’ jusqu’au son lui-même, comme c’est le cas sur un disque audio ? Cela signifie-t-il que l’interprétation disparaît ? Les performances de spatialisation en direct de la musique électroacoustique par des musiciens professionnels ou les différentes pratiques de remixes que l’on retrouve dans le hip-hop tendent à prou-

37. À tel point que les pièces qui mettent au défi cette éphémérité, telles que les *Vexations* d’Erik Satie ou encore *Organ²/ASLSP* de John Cage sont des exceptions notoires.

ver le contraire. Toute performance musicale, même la simple écoute d'un disque, convoque inévitablement un nouveau contexte d'écoute, car elle se produit nécessairement dans un moment présent unique. Entre le son enregistré et son écoute, on retrouve la même *différance*³⁸ qu'entre une partition et ses interprétations.

Une esthétique musicale mûe par le mouvement

Par ailleurs, la musique contemporaine occidentale poursuit une quête de la nouveauté et de territoires sonores inexplorés, comme le soulignait Jean-Claude Risset dans son discours invité à Athènes en 2014 : “(...) *la musique contemporaine met en évidence ce qui a été rejeté dans le monde grec : elle capte davantage l'évanescence, l'éphémère, l'ambivalent, l'Erebus, elle favorise la métamorphose sans fin des qualités et des formes ; comme Nietzsche l'a déclaré, la musique occidentale tend vers la libération de la dimension dyonisiaque et l'acceptation du côté inacceptable des mythes*”³⁹.

Partitions dynamiques, ouvertes, ad-hoc

Les partitions musicales sont en partie intégrées dans les DMIs, pour lesquels Norbert Schnell et Marc Battier ont proposé le terme “d'instruments composés” dans [SB02]⁴⁰. La partition elle-même a fait l'objet d'une reconfiguration plus ouverte depuis le milieu du xx^e siècle et les compositeurs ont progressivement intégré les possibilités algorithmiques dans leurs processus de création : des systèmes dynamiques et interactifs mettent en mouvement la stabilité des figures de notes. Plusieurs compositeurs⁴¹ questionnent ainsi la stabilité de la partition en utilisant l'ordinateur pour créer des instances *ad hoc*, soit à l'aide d'algorithmes génératifs, soit en introduisant des parties improvisées dans des formes hybrides pour lesquelles Richard Dudas propose le terme de “comprovisation” [Dud10]. Se pourrait-il que la technologie numérique offre ce support idéal permettant à la fois la préservation des œuvres musicales en même temps que leur mutation ?

Obsolescence de la technologie

Les matériaux utilisés pour les instruments acoustiques semblent vieillir relativement bien. Le matériel électronique vieillit mal en comparaison et le cuivre de ses circuits est plus fragile que celui des trompettes, saxophones et autres cuivres. Par ailleurs,

38. La *Différance* est un concept proposé par Derrida [Der14] pour désigner à la fois l'ajournement (le fait de différer) et la différenciation qui se crée entre un texte et sa signification.

39. “[Hugues] Dufourt suggest that contemporary music highlights what was rejected in the Greek world : it rather captures the evanescent, the ephemeral, the ambivalent, the Erebus, it favors the endless metamorphosis of qualities and forms ; as Nietzsche proclaimed, western music tends toward the liberation of the dyonisiac dimension and the acceptance of the unacceptable part of myths.” [Ris14]

40. L'idée d'instruments composés est toutefois plus ancienne, voir Harry Partch ou Gordon Mumma (1967) : “My own electronic music equipment is designed as part of the process of composing my music. I am really like the composer who builds his own instruments, though most of my “instruments” are inseparable from the compositions themselves.” [Mum67]

41. Parmi ceux qui ont écrit et analysé des partitions dynamiques, voir les œuvres de Mike Solomon, Georg Hajdu [Haj16], Sandeep Bhagwati [Bha17] ou Jason Freeman [Fre08b].

la miniaturisation extrême des microprocesseurs les rend généralement impossibles à réparer ; ils sont souvent remplacés par de nouvelles versions possiblement incompatibles. Le code informatique, dans sa forme compilée, est tout aussi cryptique que le microprocesseur : un bloc illisible qui incarne le paradoxe de la notation informatisée par rapport au papier traditionnel - “nous écrivons des choses que nous ne sommes plus capables de relire”⁴². Et quand le système d’exploitation sera mis à jour, il y a des chances qu’il ne pourra plus les lire non plus.

Dans un article où il compare les différences ontologiques entre *hardware* et *software*, Nicolas Collins [Col13] résume leur relation au temps avec la formule : “*hardware is yesterday, software is now*”, ce qui pourrait se traduire par le fait que le logiciel est en permanence mis à jour tandis que le hardware est toujours dépassé. Ni l’un ni l’autre ne semble être en mesure d’offrir une continuité fiable entre le passé et l’avenir.

Économie de la nouveauté

A l’obsolescence de la technologie, s’ajoutent les effets de la société de consommation. Depuis plus d’un siècle, l’industrie fait de plus en plus la promotion d’un paradigme jetable en encourageant les consommateurs à “*acheter pour le style, pas seulement pour les améliorations technologiques*” [Sla06] et en organisant une obsolescence programmée.

Ce modèle économique a également affecté celui des arts du spectacle, qui promeut la création bien plus que la reprise d’un spectacle à tel point que, comme le rappelle Georg Hajdu dans [Haj16] : “*Les pièces connaissent rarement plus qu’une seule représentation*”. De même, les résidences d’artistes sont plus souvent destinées à de nouvelles créations davantage qu’à la poursuite d’œuvres antérieures.

Cette économie de l’obsolescence (planifiée ou non) ne favorise pas l’attachement à un instrument et, en ce qui concerne les contrôleurs MIDI commerciaux, le plastique bon marché dont ils sont le plus souvent faits dégrade la valeur qui peut être attribuée à un instrument acoustique traditionnel. L’attachement et l’engagement avec les instruments virtuels sont également remis en question par leur nature immatérielle. La plupart des logiciels commerciaux s’orientent maintenant vers une économie basée sur l’abonnement plutôt que sur l’achat, puisque l’achat ne garantit plus ni la durabilité ni la propriété de l’objet.

L’instrument comme compromis instable

L’instrument de musique est aussi, comme le souligne Bernard Sève dans [Sèv13] : “*un compromis instable entre des qualités non-convergentes*”. Pour les instruments acoustiques, ce compromis entre ergonomie gestuelle et performance acoustique, imposé par la physicalité des matériaux, est généralement fixé dans un assemblage ajusté et collé. Ce montage agit comme un facteur de stabilisation par rapport à

42. Kevin Slavin dans la conférence “Comment les algorithmes façonnent notre monde”, https://www.ted.com/talks/kevin_slavin_how_algorithms_shape_our_world

un environnement numérique dans lequel l'absence de contraintes physiques laisse l'instrument à cœur ouvert, prêt à être modifié à tout instant.

Bill Buxton soulignait la différence entre les spécifications standard, militaires et artistiques pour souligner l'exigence plus élevée de cette dernière [Bux97]. Le design des objets d'art exige une grande finesse, en effet. Accorder les qualités sonores et ergodynamiques⁴³ d'un instrument de musique s'apparente à la quête d'un *inframince*⁴⁴ pour lequel il n'existe pas de spécifications convenues. Cependant, une autre particularité des technologies utilisées pour les performances live est qu'elles sont "dévolues à une expérience, pas à une bande-son, inutiles pour la relecture, la sauvegarde, l'échange ou la duplication", comme le note Nicolas Collins dans [Col13].

Ainsi, la pérennité de l'instrument en dehors de la durée même de la performance n'est pas un critère essentiel et il n'est pas rare que les musiciens numériques⁴⁵ modifient leur instrument quelques minutes avant le début d'un concert, juste pour les besoins du moment présent.

Esthétique du dysfonctionnement

En effet, le risque de dysfonctionnement n'est pas rédhibitoire à de nombreuses performances musicales. Les bugs et artefacts causés par les dysfonctionnements s'avèrent être des sources fertiles de matériaux musicaux et la subversion du fonctionnement cryptique des processeurs en révèle un aspect invisible, faisant ressurgir la nature même du matériau électronique, au-delà de l'objectif pour lequel ils ont été conçus⁴⁶. David Zicarelli⁴⁷ le résumait en ces termes : "Je remarque simplement que dans la plupart des concerts pointus, l'échec a tendance à être beaucoup plus intéressant pour le public que le succès."⁴⁸ On peut lire dans cette remarque une tendance essentielle de l'époque post-moderne, caractérisée par un art qui attribue davantage de valeur à l'intérêt du geste pris dans un contexte *experimental*, qu'à sa *qualité*, pris dans un contexte *normatif* classique.

43. Thor Magnusson a proposé ce terme dans [Mag19a] pour nommer le "pouvoir et la profondeur expressive d'un instrument".

44. Marcel Duchamp [Duc08] a inventé le terme *inframince* dans une série d'exemples décrivant une différence si infime qu'elle ne peut être qu'imaginée, par exemple "La différence entre deux objets faits en série (sortis du même moule) est un *inframince* quand le maximum de précision est obtenu."

45. Andrew Hugill définit un *musicien numérique* dans [Hug08] comme "quelqu'un qui a saisi les possibilités ouvertes par les nouvelles technologies, en particulier le potentiel de l'ordinateur pour explorer, stocker, manipuler et traiter le son, ainsi que le développement de nombreux autres outils et dispositifs numériques qui permettent l'invention et la découverte musicale" soulignant le fait qu'ils sont "non pas définis par leur seule utilisation de la technologie", mais ont aussi "une certaine curiosité, un questionnement et un engagement critique sur ce terrain".

46. Parmi les exemples significatifs, les travaux de Yasuano Tone dans *Solo for Wounded CD*, ceux de Nicolas Collins sur circuits électroniques morts (*The Royal Touch*) ou encore la sonification de données brutes par Carsten Nicolai dans *Unitxt* illustrent clairement cette approche.

47. Zicarelli est le fondateur de *Cycling'74*, entreprise développant et commercialisant le logiciel Max.

48. "I would only observe that in most high-profile gigs, failure tends to be far more interesting to the audience than success." cité par Cascone dans [Cas00].

Plus besoin de tradition ?

L'apparition de la notation musicale ne rend plus nécessaire la performance à seules fins de transmission, l'enregistrement audio ne rend plus nécessaire la performance à seules fins d'écoute, l'existence de banques de sons ne rend plus nécessaire l'apprentissage d'un instrument particulier pour produire le son de cet instrument⁴⁹ et maintenant l'intelligence artificielle rend superflu l'acte même de composition en laissant la possibilité de générer automatiquement des morceaux inédits⁵⁰.

En 1964, André Leroi-Gourhan, qui voyait dans la machine informatique la possibilité sans précédent d'externaliser la mémoire, se demandait alors ce qui adviendrait si les machines devenaient capables “[d’écrire] des pièces de théâtre parfaites, [de peindre] des tableaux inimitables” [Ler64]. En 1992, John Cage semblait lui répondre de façon radicale : “Nous n’avons pas besoin d’avoir des traditions si nous nous libérons de la mémoire.” [Seb92]

Cependant, s’il est possible d’évoluer, comme le décrit la philosophe Christine Buci-Glucksmann dans [Buc03], d’une culture de l’objet à une culture des flux, elle remarque que dans un pays comme le Japon qui valorise positivement l’impermanence, l’éphémère a une place centrale tout en étant profondément ancré dans la tradition.

La résolution de cet antagonisme apparent entre la position de Cage et celle de Buci-Glucksmann semble se situer dans le déplacement des objets (ou des flux, en l’occurrence) soutenus par la tradition, dans la reformulation des motivations de la pérennité et de l’éphémérité. Davantage que ses calcifications stables, c’est l’étude des dynamiques à l’œuvre dans la création musicale qui pourra nous renseigner sur la manière dont s’agencent les instruments : nous risquons sinon de n’avoir que “découpé une tranche d’histoire”⁵¹.

2.3 Articulation du pérenne et de l’éphémère

2.3.1 Les DMI comme agencements instables et sauvages

Le terme même de **DMI**, qui a progressivement envahi la littérature des **NIME**, pourrait nous laisser penser qu’il s’agit d’une catégorie bien définie alors qu’il s’agit en fait d’un méli-mélo d’objets qui n’ont de commun que leur utilisation de la

49. Voir par exemple, le rendu du *Sacre du Printemps* d’Igor Stravinsky par Jay Bacal avec la Vienna Sound Library (VSL) : <https://youtu.be/PB3njyDW8SY>.

50. Voir par exemple les productions du projet *FlowMachines* par François Pachet et al. in [HP16] : “Daddy’s car” (https://youtu.be/LSHZ_b05W7o) ou “DeepBach” (<https://youtu.be/QiBM7-5hA6o>). L’originalité de ces compositions par IA, techniquement basées sur l’imitation d’un corpus existant, reste cependant une question ouverte.

51. Jean Duing livre cet avertissement en introduction de [Dur94] : “De nos jours où s’accumulent les traces tangibles des musiques passées, il faut donc renoncer à nos illusions : on n’appréhende que du changement, du mouvant, de l’instable. On croyait avoir saisi le fond stable, la structure, l’essentiel, les archétypes, mais on avait simplement découpé une tranche d’histoire.”

computation numérique. Le biais qui en résulte dans l'évaluation de l'incapacité des **DMIs** à atteindre une maturité provient du fait qu'un instrument de musique est encore souvent considéré comme un tout cohérent, devant faire preuve de longévité, à l'image des instruments acoustiques pris comme modèles.

Pourtant, la modularité induite par l'électronique et la technologie numérique a "atomisé" l'intégrité de l'instrument. Cette atomisation peut être entendue à la fois dans le sens de "détruit" mais aussi dans le sens de "fragmenté en éléments atomiques". Sur scène, on constate en outre que les **DMIs** s'apparentent souvent à des assemblages prototypiques fragiles⁵² (cf. Figure 2.6), pleins de câbles (physiques ou virtuels) prêts à être intervertis quelques minutes avant le concert, ou même pendant celui-ci. Pourquoi dans ce cas les envisager comme des monolithes durables plutôt que comme les agencements⁵³ éphémères qu'ils sont le plus souvent ?

De ce point de vue, le format académique d'une conférence telle que **NIME** rend difficile la présentation des **DMI** dans leur forme chaotique et leur sélection est biaisée par le fait que leurs auteurs appartiennent souvent au monde académique. Cela favorise la démonstration de critères techniques dûment réfléchis plutôt que la présentation d'un fatras de circuits et d'algorithmes connectés empiriquement et dont on ne comprend rien au fonctionnement, sinon que le musicien qui en joue fait des merveilles.

En se confrontant à un agencement instrumental éphémère, l'instrumentiste, tout virtuose qu'il soit, se retrouve nécessairement en tension avec un instrument "sauvage" qu'il faut apprivoiser. Cela demande une attention gestuelle et auditive intense et la recherche de résonance avec l'instrument. (Sinon, autant composer tranquillement chez soi et fournir à l'auditeur un support sur lequel il n'aura qu'à appuyer sur la touche *play*). Peut-être davantage que la longévité, on pourra y voir un critère de lutherie intéressant : la possibilité que l'instrument dérape et devienne hors de contrôle.

2.3.2 Cuisiner des instruments à la volée

Une autre raison qui contribue à la stabilité des instruments acoustiques est liée à leur physicalité et à leur fabrication, qui demande un travail considérable en regard de l'arrangement virtuel de blocs logiciels - la construction d'un violoncelle requiert plus de deux mois de travail pour un luthier qui connaît son métier ! A l'inverse, John Bowers et ses collaborateurs ont promu l'utilisation d'objets prêts à l'emploi comme "infra-instruments" semi-fabriqués [BA05] et comme instruments "pin-and-play" *ad hoc* [BV06], en repensant le cycle de vie d'un instrument avec ce type de montage éphémère et rapidement assemblé.

52. Pour une réflexion poursuivant à dessein la fragilité – et la destructibilité – des **DMIs**, voir aussi [BK14; Had+17].

53. Adoptant ici le concept de Deleuze et Guattari proposé dans [Del80] ; voir aussi le chapitre "Musical instruments as assemblage" de Paul Theberge dans [Bov+17].



Figure 2.6.: Détail d'un instrument de Pierre Gordeff. Photographie : Pierre Gordeff

Plus généralement, lorsqu'on crée un **DMI** avec un environnement de programmation audio, le logiciel fournit non seulement des fonctions de base mais aussi des bibliothèques, des exemples prêts à l'emploi, complétés par d'innombrables ressources en ligne, prêtes à être téléchargées, copiées et collées.

Cela signifie que la conception d'un **DMI** peut se faire très rapidement, de manière soustractive : plutôt que de partir d'une page blanche, il est possible de chercher une version proche de ce que l'on veut réaliser et de la modifier en partant de là. Nicolas Collins a comparé cette simplicité à la cuisine, en mettant l'accent sur sa démocratisation : *“Ce que ça veut dire, c'est que si tu joues en live, si tu as vraiment besoin d'instruments spécialisés, cela s'apparente presque plus à de la cuisine qu'à de la fabrication d'instruments de musique. Tout le monde cuisine, tu n'as pas besoin d'aller dans une école pour chefs!”* [Collins, communication personnelle, cf. annexe E].

Les évolutions récentes des langages de programmation audio tendent à aborder la question de la durabilité en créant des langages spécifiques à un domaine qui peuvent être exportés vers différentes plateformes cibles. Des cartes électroniques comme *Bela* ou *The Owl*⁵⁴ et des langages comme **Functional AUdio STream (FAUST)** développé par le **GRAME** [OFL08] ou **SOUL** annoncé par Roli⁵⁵ reflètent tous cette tendance. Il est intéressant de noter que **FAUST**, qui a été conçu dans une optique de préservation, facilite en même temps la conception d'instances éphémères en offrant à la fois un compilateur en ligne et une compilation à la volée⁵⁶.

54. *Bela* : <https://bela.io>; *The Owl* : <https://www.rebeltech.org>

55. Announced at the Audio Developer Conference 2018. <https://youtu.be/-Gh1eKNaPdk>

56. La compilation *Just In Time (JIT)* s'appuyant notamment sur l'infrastructure **LLVM**.

2.3.3 Une relation tri-partite : répertoire, musicien, contexte

Si nous cessons de considérer l'éphémérité des instruments seulement comme un problème, nous pouvons envisager la manière dont longévité et éphémérité peuvent s'articuler dans l'agentivité des pratiques liées aux **DMIs**. Celles-ci peuvent être envisagées comme un assemblage tripartite entre un ensemble de matériaux, un musicien et un contexte, chacun des membres présentant un degré différent de stabilité.

Le grand répertoire

Les composants d'un **DMI** peuvent être considérés comme appartenant à un large répertoire patrimonial matériel et immatériel. Ce répertoire comprend notamment tous les matériaux physiques qui peuvent être utilisés dans la construction d'instruments acoustiques : matières premières, pièces usinées ou mécaniques.

Le répertoire immatériel est l'ensemble des connaissances théoriques et du patrimoine culturel sur lesquels on peut s'appuyer lors de la fabrication d'un instrument⁵⁷ : théorie musicale, connaissances scientifiques et techniques, techniques de jeu établies, répertoire musical, etc. Cette connaissance oriente le façonnement des matériaux et guide leurs positionnements relatifs : placement des frettes, accord des cordes, disposition des touches, etc.

Dans le cas des **DMI**, cependant, le répertoire des matériaux physiques est considérablement élargi par des connaissances réifiées disponibles sous forme de matériaux numériques, soit sous forme de code informatique, soit sous forme d'ensembles de données (e.g. échantillons audio, réponses impulsionnelles, séquences de notes, etc.) qui permettent de façonner l'identité et les qualités musicales d'un instrument au-delà de ce qui est possible avec les matériaux physiques. Cet ensemble, aussi hétérogène qu'il puisse paraître, constitue un répertoire partageable dans lequel les luthiers numériques peuvent puiser les ingrédients nécessaires à la conception de leur instrument.

Le musicien *in-progress* / *in-process*

Le deuxième élément de l'agencement est le musicien⁵⁸. Les musiciens sont vivants et sujets au changement : leurs connaissances, leur expérience et leurs désirs, leurs compétences et leur conscience musicale, leurs projets et leurs capacités physiques évoluent tout au long de leur existence. Cette évolution se reflète dans le dispositif

57. Bien évidemment, une part de connaissances liées à l'expérience pratique personnelle est aussi essentielle à la fabrication d'un instrument, même si elle appartient de manière très différente à ce patrimoine *commun* auquel je fais référence ici, dans la mesure où cette connaissance informelle, qui se transmet souvent de maître à apprenti par l'observation continue, n'est pas nécessairement "enregistrable" sur un support.

58. Ici, le terme générique de "musicien" représente principalement l'instrumentiste, mais comme rappelé précédemment, les frontières entre les rôles d'instrumentiste, de compositeur et de luthier sont poreuses.

instrumental, par l'ajout ou le retrait de composants, ou par le développement de nouveaux instruments liés à un nouveau projet musical. Ainsi, de même que l'on peut apprendre à conduire un vélo à l'aide de roues latérales et les enlever plus tard, les **DMIs** se prêtent à une assistance évolutive pour un apprentissage progressif. Cette relation co-dynamique avec l'instrument peut aider à améliorer l'intimité⁵⁹ entre le musicien et l'objet technique qui devient instrument.

Le *hic et nunc* de la performance

Enfin, le **DMI** peut être adapté au contexte de la performance, qui est généralement plus éphémère que les deux aspects mentionnés ci-dessus. En composant son propre répertoire musical à partir du grand répertoire susmentionné et de sa propre expérience, le musicien sélectionne un sous-ensemble d'éléments dans la perspective d'une performance particulière, pour une proposition artistique singulière et pour s'adapter aux conditions spatiales et temporelles de la performance, ainsi qu'au public. À titre d'exemple, le code qui se duplique sans peine offre des possibilités de redimensionner un instrument soliste en instrument collectif, en distribuant le contrôle sur plusieurs interfaces. De nouveaux projets peuvent impliquer de repartir de zéro, mais les projets existants n'impliquent souvent que des ajustements contextuels plutôt qu'une reprogrammation complète de son propre système. Chris Kiefer et Thor Magnusson ont proposé le terme de "pre-gramming" [KM19] pour décrire ce type particulier de préparation⁶⁰.

2.4 Jouer d'un DMI éphémère

Comme nous pouvons le voir, la création d'un **DMI** peut être un processus très rapide, consistant en l'assemblage d'éléments déjà pré-construits. Mais une fois l'assemblage terminé, comment apprendre à en jouer ?

2.4.1 Composer, concevoir, apprendre et jouer en parallèle

Les instruments acoustiques traditionnels sont soutenus par des méthodes et un répertoire qui peuvent à leur tour s'appuyer sur la stabilité de l'instrument. Mais pour un nouveau **DMI**, possiblement unique, possiblement éphémère, de telles ressources ne sont guère disponibles. Les logiciels sont au mieux livrés avec des manuels, mais ceux-ci expliquent généralement comment faire fonctionner le logiciel, pas comment jouer de la musique avec.

59. Sur la question du rapport d'intimité entre le musicien et un nouvel instrument, voir notamment les articles de Sydney Fels, e.g. [Fel04].

60. Dans le contexte du live-coding qui est le leur, Kiefer et Magnusson détournent en fait le terme "pre-gramming" pour désigner l'action de coder en live, face à un public, tandis que le "pre-gramming" est l'activité de programmation préalable à la "pro-grammation".

De là, le processus d'apprentissage peut suivre deux directions apparemment opposées : trouver les bons gestes pour jouer les sons désirés et trouver les bons sons pour les gestes choisis. En conséquence, l'apprentissage d'un nouveau DMI commence souvent dès sa conception et est un processus co-dynamique qui accompagne son développement jusqu'à la *pré-grammation* de l'instrument, avec des allers-retours entre les moments de jeu et les moments de réglage. Ces allers-retours nécessitent de stopper le développement de l'instrument pour se consacrer entièrement au jeu comme le notait Michel Waisvisz : *“La seule solution qui a fonctionné pour moi est de geler le développement technique pour une période de parfois presque deux ans, puis de me consacrer exclusivement à la composition, la performance et l'exploration/exploitation des limites [de l'instrument].”*⁶¹

2.4.2 Entrer dans l'avenir à reculons

Les DMIs et leurs pratiques héritent du savoir-faire des musiques électroacoustiques thésaurisé depuis le milieu du xx^e siècle. La pédagogie de la musique électroacoustique s'est essentiellement appuyée sur les théories musicales de l'écoute [Sch66] et des métaphores pour composer [Bay93], mais celles-ci furent conçues à une époque où la musique électroacoustique ne pouvait qu'être composée sur support, avant que les pratiques audio en temps réel ne permettent leur performance en live. En conséquence, ces théories étaient plus orientées vers la composition musicale que vers l'interprétation en tant que telle.

En l'absence d'une notation musicale établie pour le son, la performance électronique expérimentale s'est en partie inspirée des techniques de l'improvisation libre, qui implique un lâcher prise permettant à l'instrument d'exprimer ses potentialités et une pratique de “l'auralité”⁶² pour “entrer dans l'avenir à reculons” [Sav10] et réagir à ce qui sort de l'instrument plutôt que le maîtriser complètement.

2.4.3 Trouver les résonances

L'apprentissage d'un instrument (au-delà de l'apprentissage des idiomes établis pour cet instrument) nécessite donc une recherche de résonance. On peut faire l'expérience de cette résonance à un niveau acoustique, mais plus généralement comme une résonance empathique, qui consiste à s'immerger dans l'instrument pour trouver les espaces qui vont (re)sonner de manière satisfaisante, pour trouver les

61. “The only solution that worked for me is to freeze tech development for a period of sometimes nearly two years, and then exclusively compose, perform and explore/exploit its limits.” dans [WB00].

62. Décrite par Alain Savouret comme une théorie musicale pour l'audible.

*sweet spots*⁶³ où ce que nous entendons rencontre ce que nous cherchions, parfois sans le savoir. La linéarité mathématique étant rarement satisfaisante au niveau perceptuel, cette exploration impliquant la coordination entre le jeu et l'écoute critique est essentielle pour ajuster les fonctions de transfert qui vont définir le comportement de l'instrument.

2.4.4 Pratique modulaire de la stabilité

Si l'agencement éphémère d'un DMI peut sembler trop instable pour pouvoir établir des méthodes pédagogiques pérennes, ses composantes individuelles peuvent offrir des points d'accroche plus stables. Par exemple, si la performance est basée sur une partition écrite, l'instrumentiste peut apprendre l'enchaînement des gestes appropriés nécessaires à sa réalisation⁶⁴.

En ce qui concerne le comportement du DMI, on peut en partie transférer sa connaissance d'autres DMIs à une nouvelle instance qu'on essaie d'apprendre. Par exemple, l'intégration d'une synthèse FM dans un DMI peut aider une personne familière avec ce type de synthèse à naviguer dans son espace timbral. Elle y retrouvera l'espace sonore caractéristique de la FM⁶⁵, indépendamment de l'interface de contrôle qui y est branchée, en s'appuyant sur ses propres connaissances et représentations de l'espace de paramètres de la synthèse FM. L'espace de timbre de diverses synthèses audio peut également être redistribué sur un espace perceptif commun et plus stable (en s'appuyant par exemple sur des paramètres perceptifs tels que la hauteur, le volume, la brillance, etc.) qui dissocie leur contrôle des différents espaces de paramètres respectifs, tels que présentés dans [Wes79], [Arf+02], [Sch12] ou [TD14].

En 1999, Jean-Claude Risset écrivait dans [GD99] : *“La disponibilité ‘d'accès’ gestuels tout à fait différents des accès instrumentaux risque de rester lettre morte, dans la mesure où il est improbable que des interprètes réalisent l'investissement considérable que représente l'apprentissage d'un instrument complètement nouveau s'ils n'ont pas l'assurance que cet instrument va durer et qu'un répertoire va se développer pour lui.”* On comprend aisément l'avertissement de Risset quand on le met en perspective de l'investissement des musiciens classiques, ainsi que des traditions instrumentales parfois pluri-centenaires. Son analyse omet toutefois de considérer la métamorphose que traverse la notion de répertoire, que Risset semble associer à la tradition de

63. Il n'existe pas de véritable équivalent français pour cette expression anglaise, désignant un équilibre optimal, un réglage bien ajusté, une zone idéale. Les ingénieurs du son l'utilisent notamment pour désigner l'emplacement d'écoute idéale par rapport à la position des haut-parleurs.

64. La pièce “Aphasia” de Mark Applebaum (<https://youtu.be/wWt1qh67EnA>), où la performance repose sur des gestes et une bande sonore totalement notés, en est un exemple radical de ce point de vue là.

65. J'entend par là non seulement les différents timbres (cloches, sirènes, cuivres, etc.) caractéristique de cette synthèse, mais également la topologie de leur répartition dans l'espace paramétrique.

l'œuvre notée sur partition et destinée à un instrument spécifique, dont la pratique sera enseignée dans un conservatoire, et qui connut son apogée à l'époque romantique.

Pourtant, on voit les pratiques se développer malgré cette situation incertaine et instable, et une expertise peut être acquise sur une nouvelle interface sensible⁶⁶, qui invite à des gestes et des déplacements spécifiques⁶⁷ ; cette expertise repose sur une mémoire spatiale incorporée, qui reste en partie indépendante des synthèses ou effets audio contrôlés par l'interface. La stabilité comportementale de l'instrument peut également être de nature virtuelle, par exemple en utilisant des modèles intermédiaires dynamiques [Gou+11] (cf. 5.2), qui peuvent servir de référence stable entre diverses synthèses et interfaces en évolution. Dans l'ensemble, cette connaissance transposée et "modulaire" ne peut fournir que les grandes lignes de ce qui est nécessaire à la pratique subtile d'un instrument. Le diable se cache évidemment dans les détails.

2.4.5 Entomologie musicale

L'exploration musicale d'un **DMI** fait surgir des formes musicales inconnues, comme des papillons éphémères. L'apprentissage d'un **DMI** implique donc souvent une tâche similaire à celle de l'entomologiste, qui consiste à épingler ces créatures sonores et à leur donner un nom (cf. figure 2.7). Ce nommage permettra d'y revenir plus tard (en les sauvegardant dans des *presets* par exemple) ainsi que de discuter avec d'autres musiciens d'une performance qui, en l'absence d'idiomes musicaux établis sur lesquels s'appuyer, comme les gammes ou la signature temporelle, peut cruellement manquer de références. Une telle tâche a été menée dans le développement de "John, le semi-conducteur", un système de partition ouvert décrit dans [Gou18] et dans le chapitre 7.

Les **DMIs** s'apparentent ainsi à des vaisseaux hétérogènes, chargés de souvenirs de nos expériences d'interprétation, de composition ou de fabrication d'instruments. Les sons que nous recueillons, les algorithmes de synthèse que nous développons (ou téléchargeons), les paramètres que nous ajustons, les recettes de cuisine et les fonctions de transfert que nous élaborons avec soin, contribuent à l'évolution d'un

66. Sur la notion d'interface sensible, cf. chapitre 4

67. Par exemple, la scène musicale du *launchpad* s'est développée autour d'une interface particulière, le *launchpad* de Novation, qui doit en partie son succès à son prix abordable et sa simplicité d'usage (absence de vitesse **MIDI**, une seule prise **USB**, dédié au logiciel Ableton Live). Cette interface qui consiste uniquement en une matrice d'interrupteurs On/Off – à la différence des Pads de batterie, sensible à la vitesse et prévus pour des gestes percussifs – a connu l'appropriation de toute une communauté d'utilisateurs. Les affrontements de virtuosité rythmique et la possibilité de programmer dynamiquement les couleurs (et le mapping) du *launchpad* en a fait un phénomène Internet, à travers la publication de *remixes* et de *mashups* virtoses sur YouTube (e.g. *Marble Soda* de Shawn Wasabi <https://youtu.be/qAeybdD5UoQ>). L'émergence de cette scène a donné lieu à un certain nombre de tutoriels vidéos pour apprendre à jouer, ainsi qu'à des logiciels pédagogiques dédiés (e.g. *Melodics*, "a desktop app that teaches you to play MIDI keyboards, pad controllers, and MIDI drum kits." <https://melodics.com>)

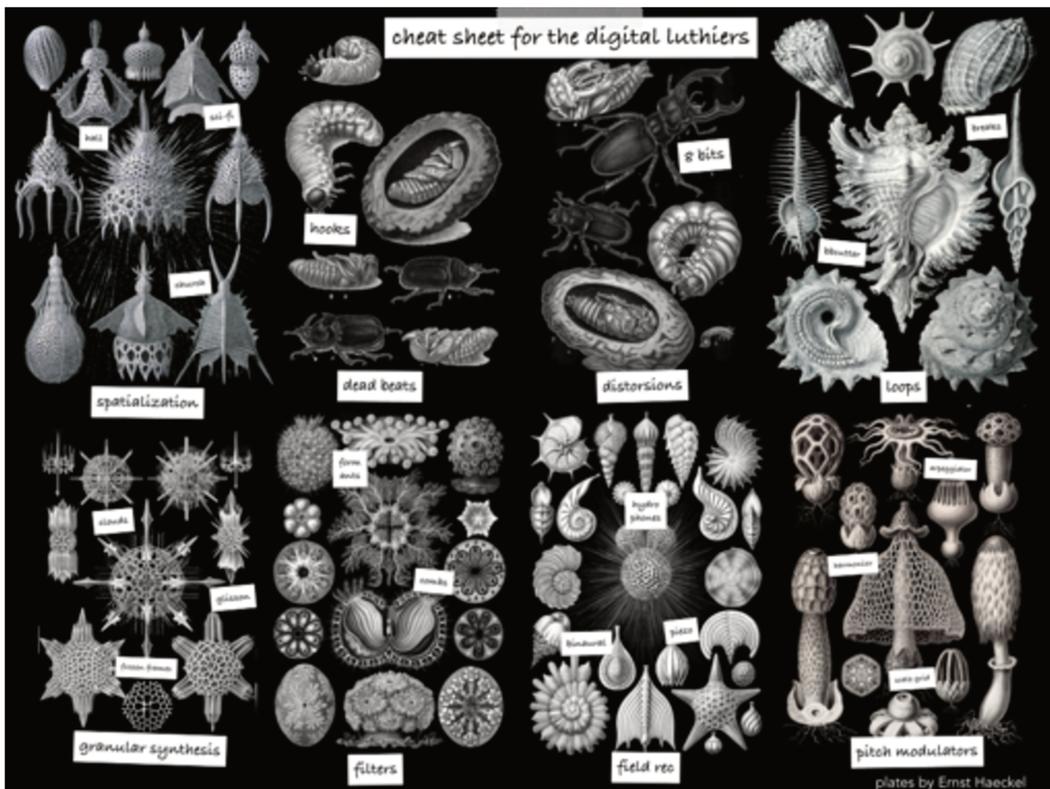


Figure 2.7.: Entomologie musicale : le travail du luthier numérique passe par une tâche de nommage de matériaux émergents, qui peut s'apparenter à celle des entomologistes face à des espèces inconnues.

répertoire personnel où se cristallisent des instances éphémères. Thor Magnusson a proposé le terme “d’outil épistémique” pour décrire les **DMIs** comme “*un outil conçu avec un tel degré de pertinence symbolique qu’il devient un système de connaissance et de pensée dans ses propres termes*” [Mag09].

Ainsi, les **DMIs** se présentent comme des assemblages évolutifs de ces matériaux enregistrés et impliquent souvent des activités qui ne sont généralement pas associées à la pratique instrumentale, comme la gestion de fichiers, le versionnage du code, le recensement de ressources en ligne ou l’organisation de banques de sons, afin de pouvoir convoquer ces ressources aussi rapidement que possible pour la performance. L’identification de ces ressources contribue à l’élaboration d’un répertoire commun de matériaux, et d’une certaine manière au développement de ce qu’on pourrait appeler une “notation” voire une “grammatologie instrumentale”⁶⁸.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les **DMIs** à travers la notion d’assemblage éphémère qui les caractérise, en la considérant non pas seulement comme un problème, mais comme une modalité intrinsèque de leur ontologie. Loin d’exclure leur longévité, elle éclaire au contraire la conception technique des environnements propices à leur développement et à leur durabilité.

L’éphémérité des outils n’empêche pas la production de musique passionnantes, ni la réalisation de performances musicales captivantes. Au contraire, elle peut à la fois favoriser l’adaptation des assemblages musicaux à des contextes essentiellement éphémères et défier la capacité de l’être humain à répondre à un dispositif musical fugace et indompté.

Il y a un millénaire, l’émergence de la notation musicale a entraîné une multiplication du nombre de compositions, dont un grand nombre connurent une vie éphémère en terme de performances. Le numérique nous amène peut-être aujourd’hui à une situation similaire en ce qui concerne l’instrument : la possibilité de le “noter” sous forme de code donne lieu à une multiplication du nombre de nouveaux instruments. En mettant cette révolution en perspective de celle que fût l’écriture musicale il y a un millénaire, et de qu’elle permit en terme de création de forme (de *l’ars antiqua* à l’écriture symphonique), on peut espérer que la *notation instrumentale* soit aussi fertile.

En fin de compte, les œuvres musicales (et les instruments) semblent trouver leur chemin, qu’on les appelle “répertoire classique”, “standard de jazz” ou “airs traditionnels”, mais ce n’est pas tant la pérennité de leur notation qui les fait survivre – elles pourraient rester *lettre morte* –, que l’intérêt que leur portent les vivants, qui soutiennent par leurs soins et leur travail celles qu’ils reconnaissent comme chefs-

68. Cette référence à Derrida [Der67] sera développée au chapitre suivant.

d'œuvre. Elles peuvent résister à l'épreuve du temps en étant dispersées, distribuées, transformées, recomposées, réinterprétées ou même renommées, par tous ceux qui y attacheront de l'importance. Ce soin attentionné, mû par notre désir de musique, appartient probablement à la partie de notre mémoire que nous ne pouvons pas externaliser dans un outil et qui redéfinit la tradition et la préservation en dehors du cadre technologique.

Dans le sable évoqué par Michel Chion, nous pouvons voir une autre métaphore intéressante pour les **DMIs** : à l'origine, le sable est une roche, qui s'est progressivement atomisée, fragmentée en particules infimes. La même chose semble s'être produite pour les instruments de musique, atomisés en petits modules numériques. Nous pouvons jouer avec le sable comme un matériau fluide, ou lui ajouter de l'eau, voire du ciment, pour lui donner une forme concrète.

Si les technologies numériques arrivent un jour à maturité, nous pourrions peut-être compter sur des instruments numériques stables et durables. Dans ce cas, et faisant suite à la prémonition de Garsault, il ne faudra pas oublier de classer tous les instruments éphémères qui les ont précédés dans la catégorie des *“instruments hors d'usage, mais qui peuvent revenir”*.

L'instrument et le geste

” *La percussion de ce pseudo-gong est illusoire : rien ne tape sur rien dans l'ordinateur. Schumann qualifiait le legato au piano de “trompe-l'oreille” : la musique est aussi un art du mirage, de l'illusion.*

— **Jean-Claude Risset**

Discours invité aux JIM, 2010.

[Ris10]

Poursuivant des évolutions organologiques latentes, telles que présentées dans la section 2.1, les **DMIs** finissent d'opérer un découplage énergétique, une “dislocation du contrôle” (*control dislocation* [MW06b]), rompant avec plus de 40 000 ans de tradition musicale [CMM09] et avec l'unité de temps, de lieu et d'action, érigée en règle par le théâtre classique, mais qui reflète la relation qui existait entre l'auditeur et le phénomène sonore, comme le rappelle Hugues Genevois dans [CGD12].

L'introduction de la mémoire et de la computation numérique permet une reprogrammation complète de l'interaction, rendant leur fonctionnement à la fois complexe et cryptique. Cet aspect peut se révéler être un inconvénient, dans la mesure où il prive le public d'une lecture possible de la performance musicale. Cela peut cependant s'avérer être un avantage, si l'on considère que la performance musicale comporte une part scénographique dans laquelle l'illusion a toute sa place.

Nous allons voir dans ce chapitre comment le geste instrumental s'en trouve affecté, par un examen critique des catégories gestuelles déjà proposées, la proposition de nouvelles catégories prenant en compte l'aspect subversif de l'art musical et les conséquences que nous pouvons en tirer en termes de conceptions des **DMIs**.

3.1 Introduction : L'étude du geste en musique

Si l'étude du rythme et plus encore, des hauteurs, a été particulièrement importante dans la culture classique occidentale, l'étude du geste a longtemps été négligée voire méprisée, comme le rapporte Jean-Marc Warszawski¹ : *“La tradition savante occidentale, grâce à l'écriture, dématérialise le geste créatif musicien, et impose une ligne de démarcation entre musique écrite et non écrite, en quelque sorte une frontière entre le primitif et le civilisé.”*

Peut-être faut-il également y voir une autre raison : le geste ne se laisse pas aussi facilement mesurer, encore moins définir, que la hauteur. Si cette dernière peut se réduire en première approximation à une grandeur physique mesurable – sa fréquence fondamentale² – le geste ne se laisse pas aussi facilement simplifier. Il entraîne depuis sa production jusqu'à sa réception toute la complexité du vivant : sa multidimensionalité, son instabilité, sa relativité, sa combinatoire et l'ensemble des aspects culturels qui lui confèrent ou non une signification dans un contexte donné.

L'étude du geste se développe dans le courant du XIX^e siècle, sous l'effet de la révolution industrielle, de l'analyse mécanique du mouvement et la création de conservatoires qui développent des techniques d'apprentissage où le geste est pris en compte³. L'étude du geste a progressivement gagné en importance, d'une part avec l'émergence de l'anthropologie au début du XX^e siècle, et d'autre part suite à l'explosion des technologies de télécommunication, lorsque sa compréhension et sa modélisation sont devenues nécessaires pour le développement des IHM dans la seconde moitié du siècle, jusqu'à devenir un domaine d'étude à part entière, les *gesture studies*, soutenu notamment par l'**International Society for Gesture Studies (ISGS)** créée en 2002.

Dans le domaine de la musique, c'est l'arrivée du “temps-réel” et l'émergence des DMIs dans les années 1980, qui entraînent la parution croissante d'articles traitant de la question du geste instrumental. Au tournant du siècle (du millénaire), le geste devient un objet d'étude majeur dans le domaine de l'informatique musicale, se traduisant notamment par la parution d'ouvrages collectifs dédiés⁴, ainsi par que l'apparition de la conférence NIME en 2001, qui lui accorde une place importante.

Plusieurs projets de recherche interdisciplinaires ont également été menés,

1. Texte publié d'après la conférence “La musique et le geste” en octobre 2012, disponible en ligne : http://www.musicologie.org/18/la_musique_et_le_geste.html.
2. La perception de la hauteur est évidemment plus complexe que l'évaluation de la fondamentale et un des sujets d'étude de la psycho-acoustique, voir notamment les travaux de Michèle Castellengo [Cas15]. L'écriture musicale classique s'est toutefois largement construite sur cette réduction, que Robert Francès nomme “abstraction notale” [Fra84].
3. Voir en particulier la collection rassemblée sur le site de la Bibliothèque Nationale de France : <https://gallica.bnf.fr/html/und/partitions/oeuvres-theoriques-et-pedagogiques>. L'intérêt pour le geste à cette période de développement industriel donne lieu par ailleurs à l'invention d'étonnants systèmes mécaniques servant à guider, contraindre et fortifier les gestes, en particulier pour le piano, tels que le “chiroplaste” ou le “dactylion”, mais qui s'avèrent être davantage des instruments de torture, endommageant parfois les mains de manière irréversible.
4. Voir en particulier : [GD99], [WB00] et [GL10]

comme le projet ConGAS⁵, ou plus récemment le projet Gemme⁶ et la chaire thématique pluridisciplinaire GeAcMus⁷ créée à Sorbonne-Université.

3.2 Geste instrumental et geste musical

3.2.1 La musique et ses instruments

La définition du geste musical pose le double problème de définir ce qu'on entend par "geste" et par "musique". Pour ce qui est de la musique, j'adopterai ici la définition proposée par Christopher Small, non pas du nom "musique", mais du verbe qu'il invente : "musiquer" [Sma98] : *"Musiquer, c'est participer, à quelque titre que ce soit, à une performance musicale, que ce soit en jouant, en écoutant, en répétant ou en pratiquant, en fournissant du matériel pour la performance (ce qu'on appelle "composer"), ou en dansant. Nous pourrions même parfois en étendre le sens à ce que font la personne qui prend les billets à l'entrée, les gros bras qui déplacent le piano et les tambours, les roadies qui installent les instruments et font les balances ou les personnes qui nettoient après que tout le monde soit parti. Ils contribuent tous, eux aussi, à la nature de l'événement qu'est une performance musicale."*

Si j'adopte ce néologisme, ce n'est pas pour l'exhaustivité que semble conférer une définition aussi large mais essentiellement pour deux raisons : la première est le choix d'utiliser un verbe plutôt qu'un nom, c'est-à-dire d'identifier une pratique plutôt qu'un objet, ce qui dans le cas de la performance musicale semble mieux adapté. La deuxième raison est liée au contexte technico-culturel dans lequel ces pratiques s'inscrivent : la reconfiguration des modes de production et de réception de la musique⁸ qu'ont entraînées les évolutions technologiques du XX^e siècle ont rendu poreuses les frontières entre les différentes pratiques liées à la création musicale. Je restreindrai toutefois le champ de cette définition aux pratiques qui gravitent directement autour de l'instrument de musique, tel que présenté dans le chapitre précédent.

Partant de cette définition et reprenant une proposition d'Hugues Genevois [Gen99], on peut distinguer plusieurs phases au cours desquelles se manifeste un geste musical :

- **la composition** : la production de structures musicales hors-temps de leur rendu sonore ;

5. "Gesture Controlled Audio Systems", projet financé entre 2003 et 2007 dans le cadre de la Coopération Européenne en Sciences et Technologies (COST Action 287)

6. "Geste musical : modèles et expériences", projet de recherche financé par l'ANR de 2012 à 2016, dont un carnet de recherche en ligne est disponible : <https://geste.hypotheses.org/gemme>

7. La chaire "Geste - Acoustique - Musique" a été créée en 2015 à Sorbonne Université <http://www.sorbonne-universites.fr/actions/recherche/chaieres-thematiques/geacmus.html>

8. Voir sur ce sujet l'ouvrage de Paul Théberge [Thé97]

- **la lutherie** : la réalisation de l'instrument et sa préparation pour le jeu ;
- **la performance** : le jeu instrumental qui produit, modifie, mélange, dans le temps même de l'écoute, la matière sonore, les gestes de l'instrumentiste, du chef, de l'ingénieur du son ;
- **l'écoute** : qui construit l'intelligibilité de notre environnement sonore et se mobilise sans répit pour en garantir la cohérence ;
- **la pédagogie** : durant laquelle la complexité du geste musical se transmet progressivement, en étant guidée, soutenue, encouragée, critiquée, en se pratiquant parfois sous la forme d'exercices idiomatiques et systématiques (e.g. faire ses gammes), et à travers des allers-retours entre performance et écoute.

Le concept de geste a ainsi été utilisé pour décrire différents aspects de la relation qu'entretiennent le mouvement, l'instrument, l'intention, la morphologie et la signification du son ou encore les formes d'écritures compositionnelles. L'instrument de musique se trouvant à la croisée de ces différents chemins, la notion de "geste instrumental" a souvent été liée voire confondue avec celle de "geste musical". Dans la pratique, ces différents gestes se superposent souvent mais pourront se traduire par différentes formes de configurations instrumentales, adaptées aux spécificités de chaque situation.

3.2.2 Aspects du geste

Dans sa définition générale, le Littré, le Larousse ou le dictionnaire de l'Académie Française s'accordent à le définir comme "*un mouvement du corps, principalement de la main, des bras, de la tête, porteur de sens ou non*" (Larousse). Plusieurs aspects s'en dégagent selon l'angle d'étude adopté que nous allons détailler ci-après.

Aspects phénoménologiques

Un premier aspect du geste est sa nature de mouvement, son déploiement temporel, dont les qualités spatiales, cinématiques, cinétiques, synchroniques, fréquentielles, balistiques font écho à la mémoire de tous les mouvements dont nous faisons l'expérience : battements, ondulations, chutes, éclosions, envols, éruptions, roulements, contractions, extensions, sursauts... Le geste possède une force expressive, en dehors de toute interprétation sémiotique, génératrice de sensations dont la logique ne peut être décrite que par la métaphore⁹.

Ce mouvement est l'expression même du vivant et il reflète à la fois la relation du corps à son environnement externe (force de gravité et cinétique, contournement

9. C'est en particulier l'entreprise de Gaston Bachelard dans l'ensemble de ses œuvres constituant une "phénoménologie de l'imagination", dont par exemple "L'air et les Songes, Essai sur l'imagination du mouvement" [Bac43]. C'est également le projet, mené de manière plus systématique, du [Laboratoire Musique et Informatique de Marseille \(MIM\)](#) dans l'élaboration des [Unités Sémiotiques Temporelles \(UST\)](#) [Del+96].

d'obstacles, frictions sur les matériaux, contraintes formelles chorégraphiques...) et l'expression des mouvements internes du corps (vigueur ou mollesse, souple ou crispé, émotion se traduisant par des gestes tels que haussement d'épaule, sursaut de surprise, grimaces diverses, etc.). La maîtrise de ces mouvements est un aspect fondamental de la danse qui, comme la musique le fait avec le son, met en œuvre le corps dans des intensités, des rythmes, des trajectoires. Si les gestes de la danse ne sont pas *a priori* instrumentaux, les DMIs rendent plus que jamais possible leur utilisation à des fins d'interaction musicale, comme nous le verrons plus loin (cf. notamment [BSF11 ; Ala+ 12 ; Sil+ 14 ; HAM19]).

Aspects sémiotiques

Un deuxième aspect du geste est indiqué par le curieux épithète de la définition précédente : "porteur de sens ou non". S'il a semblé utile d'évoquer une qualité potentiellement absente, c'est précisément parce les différentes définitions attribuées au geste dépendent en partie de cet aspect sémiotique, qui reste soumis à une interprétation subjective et contextuelle dans un système de valeurs. Les significations d'un geste peuvent en effet être attribuées par l'auteur du geste ou bien par celui ou celle qui observe ce geste, sans qu'il n'y ait nécessairement de correspondance, ni en terme de signification, ni sur la part du mouvement considérée signifiante. La signification d'un geste peut également être attribuée par la machine, en particulier dans les systèmes d'apprentissage, comme nous le verrons plus loin.

Cependant, par rapport aux théories de la sémiologie du geste communicationnel développées notamment par David McNeil [McN05] ou Adam Kendon [Ken04], le geste musical semble davantage se situer à un niveau pré-sémiotique¹⁰, qui permet aux gestes de se déployer de manière créative en condensant d'innombrables plans de significations possibles¹¹ et permet leur interprétation esthétique¹² à de multiples niveaux.

Aspects ergotiques

Une autre définition du geste relève sa dimension manipulative : "*Manière de mouvoir le corps, les membres et, en particulier, manière de mouvoir les mains dans un but de préhension, de manipulation*" (Larousse). Cette définition met l'accent sur la relation possible entre le geste et un objet, un outil, un instrument, et s'applique par conséquent particulièrement bien à la situation instrumentale. Un aspect qui lui

10. Guerino Mazzola propose une analyse conséquente de cet aspect pré-sémiotique du geste dans le troisième volume de *Topos of Music* [Maz+18] pp. 859-865.

11. Umberto Eco évoque cette idée à propos de l'œuvre d'art dès la préface de *L'œuvre ouverte* : "*L'œuvre d'art est un message fondamentalement ambigu, une pluralité de signifiés qui coexistent en un seul signifiant.*" [Eco15], et Maurice Merleau-Ponty résume élégamment cette force créative par la formule "*La parole est un geste et sa signification un monde*" dans [Mer76].

12. Jean-Jacques Nattiez développe une sémiologie de la musique qui s'appuie notamment sur les concepts d'analyse poïétique, concernant les processus de fabrication, et esthétique, concernant ceux de leur réception.

est lié est la fonction épistémique du geste¹³, qui permet de prendre connaissance de son environnement, des matériaux, de se situer et de s'ajuster en permanence. C'est à ces aspects que s'intéresse, en particulier, la typologie gestuelle proposée par Claude Cadoz que je discuterai plus loin.

Aspects (dia)grammatiques

Enfin, si le geste *ex-prime* (du latin *ex-premo* : “faire sortir en pressant”) des mouvements internes du corps, il *im-prime* et laisse une trace dans la matière, dans la machine, dans les esprits. C'est parfois cette trace résultante qu'on nomme geste, par métonymie et analogie avec les qualités de mouvement qui sont à son origine, lorsqu'on parle par exemple du *geste de composition*. Les capacités des machines à enregistrer le geste dans sa dynamique – auparavant éphémère et seulement visible sous la forme de traces statiques : littérature, peinture, partition – confèrent à cet aspect *diagrammatique* du geste une importance particulière à l'époque de sa reproductibilité technique¹⁴, qui sera analysée à la lumière de la notion de (dia)gramme proposée par Gilles Deleuze et Bernard Stiegler.

3.2.3 Spécificités des DMIs

Les DMIs ne sont pas (que) des instruments acoustiques

Dans le contexte particulier des lutheries numériques, un certain nombre de problèmes se posent par rapport au geste instrumental sur les instruments acoustiques, liés à des spécificités du numérique que nous avons déjà en partie évoquées dans le chapitre précédent¹⁵ :

- **le découplage énergétique** : ce découplage est la différence la plus saillante par rapport aux lutheries acoustiques. Certains de ses aspects sont déjà présents dans les instruments électriques et électroniques, mais l'informatique numérique ajoute un découplage de plus : les signaux (gestuels, sonores) n'y existent plus sous forme analogique et se présentent sous la forme de représentations numériques du signal, c'est-à-dire encodés dans un alphabet ;
- **la mémoire et le temps différé** : si le terme de “temps réel” est abondamment utilisé quand on parle des DMIs, il ne faut pas oublier que l'informatique intro-

13. La fonction épistémique sera par ailleurs évoquée dans le chapitre suivant, en ce qui concerne ses implications sur le design de l'interface de jeu, cf. 4.4.3.

14. L'expression utilisée ici renvoie bien évidemment à l'œuvre de Walter Benjamin [Ben13] qui analyse, pour sa part, les conséquences de cette révolution technique sur la réception des œuvres d'art, selon une perspective socio-politique.

15. De manière plus globale et sociologique, les révolutions technologiques électroniques ont également modifié les modes de production et de réception de la musique à l'échelle industrielle, entraînant d'autres conséquences que celles listées ci-après, mais qui dépassent le sujet que nous traitons ici. Je renvoie pour ces questions-là aux analyses de Paul Théberge [Thé97], Phillip Auslander [Aus08], ou plus récemment de Rebecca Bennett et Angela Cresswell Jones [JB15]

duit avant tout la possibilité du “temps différé”, de l’enregistrement exploitable dans le futur ;

- **la computation** : le traitement algorithmique permet – ou impose – une reconfiguration permanente des modèles et des représentations, qui entraîne une instabilité, un métamorphisme des relations entre les données.

Par ailleurs, les **DMIs** ne sont encore souvent pas considérés par les institutions musicales au même titre que les instruments acoustiques : leur pratique n’est pas enseignée en tant que telle dans les conservatoires¹⁶, et la partie électronique dans les concerts institutionnels est souvent absente de la scène¹⁷ et confiée à un **Réalisateur en Informatique Musicale (RIM)** (et non à un “musicien”) au statut ambigu¹⁸ et qui opère généralement dans l’ombre. Cette situation n’a guère favorisé la considération des interfaces électroniques et des nouveaux gestes qui leur étaient propres en tant qu’instruments de performance musicale à part entière.

Les DMIs ne sont pas des “interfaces utilisateur”

Un biais de l’approche fonctionnelle des **IHM** est lié au fait que l’interaction a longtemps été définie (et l’est parfois encore) par la perspective d’une tâche que l’utilisateur doit accomplir. Ce contexte écologique a contribué au développement de tout un champ d’étude dans le domaine des **IHM** : les *user studies*, transposé dans le domaine de l’ingénierie industrielle sous le nom “d’Expérience Utilisateur”¹⁹. L’efficacité dans l’accomplissement d’une tâche et l’absence d’effort – qui constitue “une vertu cardinale dans la mythologie de l’ordinateur”²⁰ comme le notait Joel Ryan – ont longtemps été les principales motivations ayant guidé l’interaction dans les **IHM**. La notion d’expérience utilisateur est venue étendre leur analyse éco-systémique en intégrant des aspects esthétiques ou émotionnels dans leur design, mais qui privilégie généralement la recherche d’une utilisation facile, efficace et confortable pour l’utilisateur.

Or dans une performance musicale vivante, cette situation n’existe pas. Le musicien ne saurait être défini comme “l’utilisateur de son instrument” (figure 3.1), pas plus que son instrument comme une “interface utilisateur”, et comme le note Ryan, il

16. La pratique musicale des **DMIs** est généralement reléguée à une pratique optionnelle dans les classes de composition électroacoustique ou **Musique Assistée par Ordinateur (MAO)**

17. C’est particulièrement le cas pour les concerts de musique mixte dans la tradition de l’**IRCAM**, beaucoup moins pour les concerts organisés par le **GRM** dont l’histoire n’a pas cet ancrage dans la musique classique acoustique.

18. Voir notamment l’analyse de Laura Zattra sur l’origine du statut de **RIM** à l’**IRCAM** : [Zat13]

19. En abrégé : UX pour User eXperience ; le métier de “UX designer” étant désormais très répandu dans le domaine du développement logiciel mais également appliqué à d’autres domaines tels que la grande consommation.

20. “Most computer instruments in use are those provided by the commercial music industry. Their inadequacy has been obvious from the start ; emphasizing rather than narrowing the separation of the musician from the sound. Too often controllers are selected to minimize the physical, selected because they are effortless. Effortlessness in fact is one of the cardinal virtues in the mythology of the computer.” dans [Rya91]



Figure 3.1. Les instruments ne sont pas des *interfaces utilisateur*. De gauche à droite : John Cage, Jimi Hendrix, Paul Simonon, Charlotte Moorman.

serait tout aussi intéressant de rendre son contrôle aussi difficile que possible²¹. Les musiciens cherchent bien souvent à produire quelque chose à la limite des possibilités de leur instrument²². Que cela soit le contre-fa de la Reine de la Nuit, les pianos préparé de John Cage, le scratch sur les platines vinyle d'un Q-bert ou les mises en larsen de table de mixage “*no-input*” de la scène Onkyokei, les exemples abondent dans l'histoire de la musique qui font preuve d'une démarche allant dans l'outrepassement des possibilités instrumentales lors du jeu musical. Dans une conversation durant la dernière conférence NIME, Paul Stapleton utilisait ironiquement le terme *interface abusers* pour souligner l'erreur du terme *interface users*.

Une conséquence en terme de design instrumental est la possibilité d'envisager la conception d'interfaces bancales ou inadaptées comme une stratégie volontaire, plutôt qu'elle soit un artéfact résultant d'une connaissance approximative des outils. Anthony Dunne souligne l'intérêt d'une telle démarche dans ce qu'il nomme des “objets post-optimaux” présentant une “inconivialité” (*user-unfriendliness*) recherchée : “*Si la convivialité caractérise la relation entre l'utilisateur et l'objet optimal, l'inconivialité dans ce cas, une forme de douce provocation, pourrait caractériser l'objet post-optimal. L'accent n'est plus mis sur l'optimisation de l'adéquation entre les personnes et les objets électroniques par le biais d'une communication transparente, mais sur la délivrance d'expériences esthétiques par le biais des objets électroniques eux-mêmes.*”²³

21. “*In designing a new instrument it might be just as interesting to make control as difficult as possible.*” [Rya91]

22. cf. interview de Nicolas Bernier désignant “l'infini des possibles” comme principale motivation l'ayant amené à utiliser les instruments électro-acoustiques.

23. “*If user-friendliness characterizes the relationship between the user and the optimal object, user-unfriendliness then, a form of gentle provocation, could characterize the post-optimal object. The emphasis shifts from optimizing the fit between people and electronic objects through transparent communication, to providing aesthetic experiences through the electronic objects themselves.*”, [Dun99] p. 35.

Les limites du contrôle

La plupart de la littérature sur les **DMIs** met l'accent sur la notion de contrôle par le geste (et les interfaces y sont souvent nommées “contrôleurs gestuels”). La performance musicale n'est toutefois pas exclusivement gouvernée par une relation de contrôle absolu du son. De nombreux exemples dans des styles musicaux très divers viennent démontrer l'absence de contrôle – voire sa recherche – sur certains aspects musicaux : les *couacs* dans le jeu de John Coltrane, le “laisser-jouer” de la machine dans la musique noise²⁴, les partitions impossibles de Brian Ferneyhough²⁵, etc.

Si l'on considère la pratique des **DMIs** par rapport à celle des instruments acoustiques, on est amené à faire le constat que là où la présence du musicien sur scène remplissait une nécessité acoustique pour l'écoute, la musique sur support, ou produite par des machines, déplace ce besoin au profit d'une autre fonction qu'elle exacerbe. La performance musicale est le théâtre²⁶ d'un corps plongé dans l'instabilité propre au médium sonore et l'instrumentiste peut s'y trouver dans différentes postures face à ce qui jaillit de son instrument (parfois à son insu), pilote à la maîtrise totale, chimiste opérant des mélanges incertains de fluides sonores, chirurgien-ne disséquant le son, funambule en équilibre sur le fil de l'audible, dompteur de cirque face à un instrument sauvage, cascadeur-se se jetant dans le vide, explorateur-riche dans une jungle inconnue, chamane faisant naître la transe... autant de postures différentes qui partagent toute une attention extrême à leur environnement.

[In]fidélité instrumentale

La notion de “fidélité” a également été vantée dans les dispositifs d'enregistrement et de reproduction audio, depuis leurs origines, comme un gage de qualité. Fernando Iazzetta [Iaz00] analyse la manière dont la notion de fidélité dans l'industrie musicale, originalement utilisée pour désigner la capacité d'un enregistrement à reproduire les qualités sonores de la performance originale, a progressivement évolué vers une notion ne faisant plus référence au son original, mais établie en fonction de la technologie d'enregistrement disponible. Les conditions contemporaines de production musicale ont à certains égards renversé le sens de la fidélité : un morceau produit intégralement en studio à l'aide d'outils d'édition numériques, précède souvent sa performance (si performance il y a un jour) et amène ainsi les musiciens à chercher à reproduire dans leurs performances live les qualités sonores de leurs disques, et parfois même, à devoir en inventer les gestes.

24. Voir en particulier les analyses de Paul Hegarty et Sarah Benhaim sur le non-contrôle dans la musique noise [Heg07 ; Ben18]

25. On notera au passage, en poursuivant la critique de l'analogie entre instrument et **IHM**, que la partition **n'est pas** un mode d'emploi.

26. Le “théâtre instrumental” développé par Mauricio Kagel dans les années 1970 prend à bras le corps cette question de la place du musicien la scène théâtrale, actant le fait que sa présence n'y est plus nécessaire pour l'interprétation d'une musique d'accompagnement.

3.3 Le modèle ergotique et l'héritage acoustique

3.3.1 Continuum énergétique : typologie de Cadoz

Claude Cadoz fait partie des pionniers de l'analyse du geste instrumental, en prenant en compte les spécificités propres à cette pratique gestuelle et en les mettant en perspective des technologies informatiques. En particulier, comme son nom l'indique, le geste instrumental n'est pas un "geste nu" mais se retrouve couplé à un instrument qui polarise les termes de leur interaction (sans toutefois les définir totalement). Le geste est instrumentalisé, médiatisé, et sa description passe par l'analyse du rapport qu'il entretient avec l'interface instrumentale.

Dès 1978, Cadoz décrit avec Jean-Loup Florens dans un article séminal²⁷ un grand nombre des enjeux soulevés par le contrôle gestuel de la synthèse audio-numérique. Ils y explicitent notamment les spécificités induites par l'ordinateur présentées précédemment et proposent, dans la continuité des travaux de Pierre Schaeffer, la notion d'*objet gestuel*²⁸. Bien que la rupture du numérique et notamment "*l'artifice [du continuum énergétique]*" y soit exposée avec lucidité, Cadoz et Florens remarquent aussi que : "*La perception des objets musicaux a ses racines, ses références, ses codages dans la pratique traditionnelle*"²⁹. C'est probablement cette volonté d'ancrage dans la pratique traditionnelle acoustique qui amène Cadoz à définir dès 1981 [CLF81] des catégories gestuelles basées sur la notion de continuum énergétique, qui polariseront fortement les développements de l'**Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression (ACROE)**. Claude Cadoz, Annie Luciani, Jean-Loup Florens et Sylvie Gibet définiront progressivement la nomenclature suivante pour décrire les différents types de "*gestes instrumentaux*" :

- **gestes d'excitation** qui fournissent l'énergie qui sera présente dans le son *in fine*. Ils peuvent être de nature "continue", quand le son et le geste co-existent (e.g. frottement de l'archet, souffle dans un instrument à vent), ou de nature "instantanée", si le son commence quand le geste finit (e.g. percussion, pincement de corde) [CW00] ;
- **gestes de modulation** venant modifier les propriétés de l'instrument. Une distinction est apportée par la suite dans [CLF83] entre modifications "paramétriques", telles que le vibrato, et les modifications "structurelles" (e.g. ajout d'une sourdine sur une trompette, sélection d'un jeu d'orgues, etc.) ;
- **gestes de sélection**, ajoutés à cette nomenclature en 1984 dans [LC84], ils consistent à choisir parmi plusieurs éléments similaires d'un instrument (e.g. quelle touche de piano, quel corde de harpe, quel fût de batterie, etc.) ;

27. "Fondement d'une démarche de recherche informatique / musique" [CF78]

28. Le titre de la section : "L'objet gestuel - champ expérimental" laisse entendre que tout reste à y faire, et ce concept sera au final assez peu repris par Cadoz.

29. *ibid.*

- **gestes de polarisation ou de maintien**, ajoutés en en 1999 dans [CW00], ils consistent à assurer des conditions normales de fonctionnement à l'instrument (e.g. le geste du bras qui assure un niveau de pression suffisant pour le jeu de cornemuse).

3.3.2 Intérêts et limites du modèle ergotique

Cette classification du geste instrumental “producteur de son” peut sembler relativement bien adaptée aux instruments acoustiques. Elle est devenue une référence sur le sujet et abondamment citée dans la littérature des **NIME**. Assez paradoxalement, elle a été prise comme modèle pour le design de l'interaction des **DMIs** développés à l'**ACROE** mais également par de nombreux autres luthiers numériques (e.g. [Arf+02], [Sch12]), alors même que ses auteurs précisent dans [Cad94 ; CW00] que :

- il est nécessaire que l'instrument soit stable durant la performance ;
- un continuum énergétique doit exister entre le geste et le phénomène perçu ;
- le geste doit être appliqué à un objet matériel et il doit exister une interaction physique avec lui (le cas du Theremin étant considéré comme une exception rare).

Or, ces trois aspects sont précisément mis en défaut dans le cas des **DMIs** : le continuum énergétique est *a priori* rompu, les instruments sont sujets à des possibles reconfigurations dynamiques³⁰, et le geste est bien souvent capté en dehors de tout contact physique³¹.

Cette relation pluri-millénaire étant cassée, l'ambition de l'**ACROE** a été de tenter de la recréer artificiellement par des systèmes de capteurs, d'actionneurs et des stratégies de mapping servant la définition de cette relation. Ces recherches ont notamment abouti au système **CORDIS-ANIMA**, dispositif pionnier en matière de retour d'effort et de synthèse par modèle physique, qui n'a malheureusement pas connu une grande utilisation hors du laboratoire. On se garderait donc bien de dire que l'inaptitude de cette catégorisation à décrire le geste instrumental dans le cas des **DMIs** ait été un obstacle à l'avancement des travaux de l'**ACROE**. Elle a au contraire été une direction idéologique motrice³² pour le développement de modèles physiques et de systèmes à retour d'effort avancés.

Pour autant, après bientôt quarante ans de pratiques musicales numériques, nous pouvons observer facilement que cette direction n'était pas la seule possible et de

30. qu'elles soient souhaitées ou dûes au contexte d'obsolescence (cf. 2.2.4)

31. Par des capteurs de distance, accéléromètres, caméras, etc. Voir le chapitre 4.

32. Et d'une certaine manière, on peut aussi y voir un choix esthétique, Cadoz étant aussi compositeur.

nombreuses stratégies de jeu se sont développées, de manière “sauvage”³³ en dans des pratiques **DIY**, sans être freinées par l’absence de continuum énergétique, ni l’instabilité de l’instrument, ni l’absence de contact – au contraire, les artistes ont embrassé ces artéfacts. L’idée du continuum énergétique est donc insuffisante pour comprendre les termes du geste instrumental numérique et ses traductions en terme de lutherie³⁴.

3.4 Expressivité et sémiologie du geste nu

3.4.1 Du fonctionnel au symbolique : typologie de Delalande

Dans son analyse des gestes de Glenn Gould au piano [Del88], François Delalande a établi une autre typologie de geste abondamment citée³⁵, sur “*au moins trois niveaux, qui vont du purement fonctionnel au purement symbolique*”. Il distingue ainsi :

- **des gestes effecteurs** responsables de la production du son (le toucher du clavier dans le cas de Gould) et correspondant, d’une certaine manière, à la notion de geste instrumental de Cadoz mentionné plus haut ;
- **des gestes accompagnateurs**, qui engagent le corps entier et semblent reliés à une “*attitude affective*”. S’ils semblent en apparence moins directement responsables de la production du son, Delalande les considère comme des “*schèmes expressifs*” incarnant le lien entre le plan de l’imagination et celui de la production effective du son ;
- **des gestes évocateurs** perçus dans la musique par l’auditeur, tels qu’un appui de phrase ou une envolée, et qui ne semblent pas directement liés aux mouvements du corps. Delalande évoque notamment ces gestes comme traduction possible d’un imaginaire associé à la musique, tel qu’une dimension orchestrale dans le jeu pianistique de Gould.

33. Le terme de “lutherie sauvage” est couramment employé pour désigner des lutheries expérimentales pratiquées hors des méthodes industrielles, académiques ou traditionnelles, notamment avec des objets de récupération et du détournement de dispositifs électroniques.

34. Il ne faudrait cependant pas déduire de cette critique que Cadoz n’est pas conscient des limites de ce modèle ; même s’il leur refuse généralement le statut de “geste instrumental” au sens qu’il a donné à ce terme, il a contribué dans de nombreux articles à analyser de manière nuancée d’autres aspects du geste présentés ci-après.

35. Notons toutefois que si Delalande utilise ces différents termes, il ne les présente pas explicitement comme des catégories gestuelles absolues, comme peut le faire Cadoz, pas même comme une liste, comme ils sont souvent présentés – et ici encore. Il prend soin de préciser que cette division est “*un artifice de description ne correspondant à aucune dissociation effective dans la conduite expressive*” [Del88].

Marcelo Wanderley a mis en évidence que les gestes accompagnateurs, qu'il appelle "gestes ancillaires" ou "gestes non-évidents"³⁶ avaient une influence mesurable sur le résultat sonore, par exemple en terme de projection acoustique. Il a par ailleurs été montré que les doigts ne sont pas un simple système mécanique indépendant des mouvements du reste du corps et que la performance d'une phrase musicale requiert des inflexions *facilitées* par ces mouvements du corps (Cf. [CHA+12]). Par ailleurs, la perception du résultat sonore est influencée par la perception visuelle³⁷. Les gestes accompagnateurs, outre leur influence sur le jeu et le son, ont également une influence sur la manière dont l'auditeur les perçoit.

3.4.2 Imaginaire du geste et du son

Dès 1995, Todd Winkler proposait de repenser le geste instrumental dans les **DMIs** en proposant des contraintes et des idiomes libérés du modèle de l'instrument acoustique [Win95]. Sa formulation de cette problématique est intéressante en ce qu'elle envisage déjà la sonorité des gestes au-delà du modèle acoustique excitation/résonance ("le son du claquement d'une seule main"). Cependant, ses propositions reflètent son attachement au paradigme physique et à la corrélation entre l'énergie du geste et du son : *"Qu'est ce que la musique des doigts ? Qu'est ce que la musique de course ? Quel est le son d'une seule main qui claque ? On peut répondre à ces questions en permettant à la physicalité du mouvement d'avoir un impact sur le matériel et les processus musicaux. Ces relations peuvent être établies en considérant le corps et l'espace comme des instruments de musique, libérés des relations dans les instruments acoustiques, mais avec des contraintes similaires qui peuvent donner du caractère au son par des mouvements idiomatiques."*³⁸

En analysant les gestes induits par du son, Rolf Inge Godøy a souligné la manifestation de deux autres types de gestes d'accompagnement : les "gestes de tracé sonore"³⁹ qui suivent le contour des morphologies sonores (e.g. le contour mélodique) et les "gestes d'imitation des gestes de production du son"⁴⁰ en prenant notamment comme exemple les performances d'*air-guitar*⁴¹. Il est intéressant de s'arrêter ici sur ces deux types de gestes. En effet, ils ne sont pas *a priori* des gestes

36. "Non-obvious gestures". Voir [Wan99].

37. Un exemple connu en est l'effet McGurk, mettant en évidence l'interférence entre l'audition et la vision lors de la perception de la parole. Cf. [MM78]. Exemple audio : <https://www.youtube.com/watch?v=PWGeUztTkRA>

38. "What is finger music? What is running music? What is the sound of one hand clapping? These questions may be answered by allowing the physicality of movement to impact on musical material and processes. These relationships may be established by viewing the body and space as musical instruments, free from the associations of acoustic instruments, but with similar limitations that can lend character to sound through idiomatic movements."

39. "sound-tracing gestures", cf [GHJ06].

40. "mimicry of sound-producing gestures", cf. [GHJ05].

41. Le *air guitar* est une activité qui consiste à mimer le geste d'un guitariste, typiquement de guitare électrique dans un groupe de rock ou de métal, sans avoir l'instrument en main, dans une sorte de playback instrumental.

instrumentaux dans la mesure où ils ne sont pas effectués par quelqu'un en situation de jeu instrumental (mais sans aucun doute par quelqu'un qui *musique*, au sens de Christopher Small). Il s'agit là d'un geste qui relève en partie d'une forme de théâtralité mais aussi, comme l'explique Godøy, d'une forme de "geste d'écoute" : "(...) nous pouvons donner un sens à ce que nous entendons parce que nous devinons comment les sons sont produits (...) des études récentes sur la neuro-imagerie semblent appuyer l'idée que la perception est un process actif de la cognition motrice⁴²." Godøy développe cette idée dans ce qu'il appelle des "objets gestuels-sonores"⁴³, qui étendent la typologie Schaefferienne des "objets sonores" [Sch66], à l'étude des gestes associés aux différents objets sonores.

Cette fonctionnalité gestuelle, à rapprocher des *gestes évocateurs* évoqués par De-lalande, présente ici l'intérêt de décrire des gestes *physiques* exprimant des relations *imaginaires* entre le geste et le son. La morphologie du geste y découle de l'écoute musicale, renversant ainsi la perspective de causalité entre le geste et le son, telle qu'elle existe dans les instruments acoustiques. Dans le cas des **DMIs** où cette relation est *a priori* dépourvue de causalité, ces catégories s'avèrent très intéressantes, en ce qu'elles nous renseignent sur des axes possibles sur lesquels cette relation peut se construire en l'absence de toute contrainte physico-énergétique. C'est sur le principe de telles correspondances qu'ont été développés des systèmes de contrôle musical par suivi de gestes⁴⁴.

Le suivi de geste et sa reconnaissance par apprentissage-machine sur la base d'un vocabulaire de formes gestuelles pré-définies, rend possible le design d'une interaction à mi-chemin entre ce que Cadoz appelle *gestes de sélection* et *gestes de modulation*. Les systèmes d'apprentissage permettent en effet de calculer non pas la catégorie d'un geste, mais la probabilité de présence de différentes catégories dans le geste, et leur écart par rapport aux formes typiques pré-définies. Les capacités d'interpolation de la machine permettent ici de reconstruire un espace continu à partir d'un espace catégoriel, à l'inverse de ce qui est communément réalisé sur les instruments acoustiques, à savoir le striage d'un espace continu en des catégories discrètes (touches de piano, frettes de guitare, etc.)

3.5 Geste programmé, geste re-sonné

42. "(...) we can make sense out of what we hear because we guess how the sounds are produced. (...) recent neuro-imaging studies seem to support the idea of perception as an active process involving motor cognition." [GHJ06].

43. "Gestural-sonorous objects" décrits dans [God06].

44. Voir les travaux menés au sein de l'équipe *Interaction Son Musique Mouvement* (ISMM) de l'IRCAM, en particulier le projet *Modular Musical Objects* [Car+14 ; Fra15], ou ceux de Rebecca Fiebrinks, en particulier le projet *Wekinator*, [FC10] à l'Université Queen Mary de Londres.

3.5.1 L'outil comme externalisation de la mémoire

Dans son essai “Le geste et la parole” paru en 1964 [Ler64], le paléo-anthropologue André Leroi-Gourhan met en lumière la manière dont l’invention et l’utilisation d’outils techniques contribuent à l’évolution de l’humain, par une externalisation progressive des processus opératoires dans les outils :

Au cours de l’évolution humaine, la main enrichit ses modes d’action dans le processus opératoire. L’action manipulatrice des Primates, dans laquelle geste et outil se confondent, est suivie avec les premiers Anthropiens par celle de la main en motricité directe où l’outil manuel est devenu séparable du geste moteur. À l’étape suivante, franchie peut-être avant le Néolithique, les machines manuelles annexent le geste et la main en motricité directe n’apporte que son impulsion motrice. Au cours des temps historiques la force motrice elle-même quitte le bras humain, la main déclenche le processus moteur dans les machines animales ou les machines automotrices comme les moulins. Enfin au dernier stade, la main déclenche un processus programmé dans les machines automatiques qui non seulement extériorisent l’outil, le geste et la motricité, mais empiètent sur la mémoire et le comportement machinal.⁴⁵

Il note ainsi que l’externalisation des facultés de l’humain s’est étendue à tous ses organes, jusqu’aux fonctions cérébrales de la mémoire, et prédit les opérations de computabilité rendue possible par le numérique : “*Les fichiers à perforations sont des machines à rassembler des souvenirs, elles agissent comme une mémoire cérébrale de capacité indéfinie, susceptible, au-delà des moyens de la mémoire cérébrale humaine, de mettre chaque souvenir en corrélation avec tous les autres*⁴⁶.” Cette idée est développée en ce qui concerne les **DMIs** par Thor Magnusson qui les envisage comme des “*outils épistémiques*”⁴⁷ et qui souligne, lors de la création d’un **DMI**, le processus de création d’affordance permettant l’interaction avec le matériau que constitue cette mémoire musicale numérisée⁴⁸.

3.5.2 Le geste programmé

Le mouvement qui anime le son peut être réalisé explicitement par un instrumentiste humain ou bien produit de manière automatisée par la machine ; on pourra alors parler de gestes “programmés”. Leur définition peut être “extensive”, par exemple

45. [Ler64] pp. 41-42.

46. [Ler64] p. 74.

47. Cf. supra, section 2.4.5

48. “*As opposed to the acoustic instrument maker, the designer of the composed digital instrument frames affordances through symbolic design, thereby creating a snapshot of musical theory, freezing musical culture in time.*” [Mag09].

sous la forme d'enregistrements (samples, courbes d'automation, etc. Figure 3.2) ou "intensive", c'est-à-dire définie par une règle générative⁴⁹. Si toutefois la définition du geste implique que le mouvement soit associé à une intention, on ne peut prêter une intention à la machine qu'à travers la "programmation" de ce mouvement machinique par le compositeur/luthier numérique.

Bernard Stiegler développe le concept de "gramme" comme "*corps organisé de*

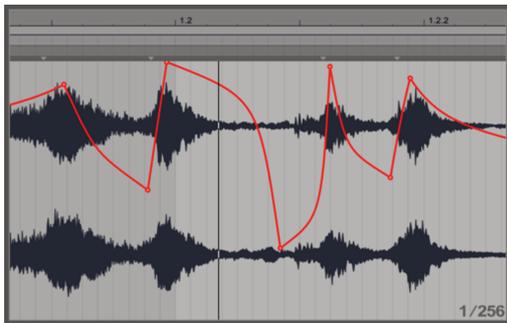


Figure 3.2.: Une courbe d'automation dans le logiciel Ableton Live, synchronisée à un échantillon audio.



Figure 3.3.: Partition tangible d'Enrique Tomás.

signes et de symboles" et emprunte à Sylvain Auroux⁵⁰ le concept de "grammatisation" comme "*le processus par lequel le continuum temporel des comportements humains est transformé en un spatial discret, qui permet de les intégrer dans les outils*" [Aur94]. Ainsi en est-il de l'informatique, qui dissocie en symboles et en catégories discrètes ce qui est continu et intégré dans le geste, comme dans le son. Pour Stiegler, les objets sont des enregistrements⁵¹, dans lesquels la mémoire de ce que nous faisons et de ce que nous connaissons est déposée sous la forme d'une mémoire technique.

Le concept de Stiegler fait également écho à la notion de "diagramme", proposée par Gilles Deleuze dans son étude sur la peinture de Francis Bacon [Del81] : "*Le diagramme, c'est donc l'ensemble opératoire des lignes et des zones, des traits et des taches asignifiants et non représentatifs. Et l'opération du diagramme, sa fonction, dit Bacon, c'est de suggérer. Ou, plus rigoureusement, c'est d'introduire des « possibilités de fait » : langage proche de celui de Wittgenstein. Les traits et les taches doivent d'autant plus rompre avec la figuration qu'elles sont destinées à nous donner la Figure. C'est pourquoi elles ne suffisent pas elle-mêmes, elles doivent être « utilisées » : elles tracent des possibilités de fait, mais ne constituent pas encore un fait (le fait pictural).*"

On peut voir un parallèle frappant entre cette notion de diagramme et les fonc-

49. Sur les notions de notation "intensive" et "extensive", voir Giavitto [Gia14].

50. L'idée de "grammatisation" fait également écho à la *grammatologie* [Der67] de Jacques Derrida (qui fut aussi le mentor de Stiegler) et au concept de *différance* qu'il y développe, lui-même inspiré par la pensée de Leroi-Gourhan.

51. Stiegler utilise les termes de "rétentions tertiaires" pour décrire cette inscription de la mémoire dans les objets, afin de la mettre en perspective des "rétentions primaires" que sont la conscience du flux temporel et les "rétentions secondaires" que sont les souvenirs qui constituent l'expérience d'un individu.

tions assumées à la fois par l'instrument et par la partition musicale.⁵² L'instrument de musique contient ainsi l'enregistrement de la théorie musicale qui lui est propre (ses "traits et ses taches" que représentent son organisation des hauteurs, sa signature timbrale, son ergonomie, etc.) et que le luthier lui imprime. De même, on peut voir la partition comme un "enregistrement" de la pensée et du travail du compositeur, une trace de ses "gestes sédimentés" comme le disent Jean-Paul Olive et Susanne Kogler dans [OK13]. La composition et la lutherie sont deux formes d'écriture diagrammatiques du geste et du son, qui s'inscrivaient jusqu'alors (avant le numérique) sur des médiums distincts : papier pour la composition, matériaux physiques pour la lutherie. Le numérique offre un médium commun qui permet leur recomposition mutuelle : l'instrument est "composé" [SB02], la partition est "instrumentalisée"⁵³ et les gestes de l'expression compositionnelle et de l'expression performative s'interpénètrent [DK06].

Ces gestes programmés ne sont pas de simple enregistrements linéaires à reproduire tels quels, mais des modèles complexes et dynamiques⁵⁴ qui invitent à l'interaction, au jeu⁵⁵, par le musicien qui n'est pas, justement, un *utilisateur* qui démarre, par exemple, la lecture d'un enregistrement audio. La performance musicale consiste justement à faire entendre ce qui n'est pas calculable comme le dit Stiegler [SD04] : *"Un musicien, c'est quelqu'un qui d'abord entend, c'est-à-dire qu'il est primordialement affecté par l'oreille, une oreille qui a cependant des yeux et des mains, et un corps qui les relie. Il ne se contente pas de calculer. Il peut calculer, il doit même calculer, mais s'il le fait, c'est pour donner à entendre ce qu'il a lui-même entendu comme l'incalculable même."*

Ce jeu de la main et de l'oreille, qui vient mettre en mouvement ces *gestes programmés* par un geste expressif incalculable, m'amènent à introduire l'idée de geste de "re-sonnance", qui se départit du modèle acoustique d'excitation/modulation, en ce qu'il nourrit une relation avec le son qui n'est pas simplement causale mais intègre l'idée d'agencement compositionnel et d'aller-retour entre la temporalité du geste re-sonnant et celle, intrinsèque au geste programmé.

52. Il faudrait encore rapprocher cette notion de diagramme du "di-son" dans la tripartition des "modes d'écoute attentive" (im-son, di-son, mé-son) de François Bayle, qui définit le "di-son" comme "le diagramme, sélection de contours simplifiés, indiciels". Cf. [Bay93]

53. Voir à ce sujet le travail explicite de Enrique Tomás sur les "partitions tangibles" [TK14]

54. Cette idée est développée au chapitre 5.2

55. Cf. les propos de Stiegler dans [SD04] *"Quant à la duction de l'instrumentiste, elle vient retemporaliser ce qui ne peut être que spatial : le travail de la composition, ce n'est que spatial, c'est du temps spatialisé, et en cela, essentiellement en défaut d'être. C'est du virtuel pur. C'est du temps discrétisé et détemporalisé dans cette mesure. Discrétisé, il devient manipulable dans sa détemporalisation temporaire telle que la pratique le compositeur, mais il n'est que virtuel. Il ne peut devenir actuel qu'avec l'interprète, qui doit le re-temporaliser."*

3.5.3 Le geste de re-sonnance

Si les gestes programmés s'apparentent au résultat d'un processus de "composition instrumentale"⁵⁶, comment donc nommer ces gestes qui permettent de faire sonner un **DMI**? On ne peut se réduire à les nommer "gestes d'excitation et de modulation" (même si la métaphore qui les sous-tend peut s'appuyer sur cette idée), car de nombreux gestes n'évoquent en rien cette dimension physique (e.g. l'ouverture d'un fader de volume). On pourrait utiliser le terme de "gestes effecteurs" de Delalande, mais il faudrait les coupler d'une part à un processus dynamique, et d'autre part à une métaphore définissant leur logique. Or dans le cas de l'analyse du jeu pianistique de Gould, le piano est déjà sa propre métaphore, car l'instrument acoustique *est* sa propre interface et son propre modèle intermédiaire à la fois⁵⁷. La notion "d'objet sonore-gestuel" de Rolf Inge Godøy s'approche le mieux de l'idée présentée ici, en tant qu'elle intègre cette notion de métaphore intermédiaire entre le geste et le son, mais d'une part sa nature "d'objet" semble plutôt s'appliquer au modèle intermédiaire lui-même qu'au geste, et d'autre part Godøy semble (malheureusement) en limiter le cadre à une relation de congruence spectromorphologique entre le geste et le son (avec le dessein d'offrir, là encore, une lisibilité de la relation énergétique).

On pourra élargir ce cadre métaphorique au-delà de la spectromorphologie en s'inspirant d'un système métaphorique un peu plus ancien et plus ouvert : le "Tayin da quanji"⁵⁸ décrivant la relation gestuelle-sonore pour l'apprentissage du Guqin dans un ensemble de feuillets comprenant une illustration de la position de main, associée à l'image d'un animal et d'un texte poétique condensant l'esprit du mouvement (cf. figure 3.4), par exemple : "*À la manière d'une grue qui danse parce qu'elle est effrayée par une brise.*" Considérons maintenant un hypothétique **DMI** dont le modèle intermédiaire représenterait la danse de la grue durant la dynastie Song ; le geste de re-sonnance d'un tel instrument pourrait consister à jouer la brise qui effraie la grue. Ce geste pourrait alors se concrétiser de différentes manières, que cela soit en simulant les mouvements du vent par le mouvement d'un stylet sur une tablette graphique, par le mouvement des mains munies d'accéléromètres, en soufflant dans un microphone, ou encore en pinçant des cordes sur lesquelles – s'il est possible d'y évoquer la danse de la grue au Guqin – il serait sûrement possible d'évoquer le mouvement du vent.

56. Ce processus qui se décline sur différentes échelles temporelles est toutefois réalisables durant le temps même de la performance, en particulier dans le *live-coding*.

57. Ce qui n'empêche pas d'autres métaphores extra-pianistiques de se superposer à l'instrument et d'en orienter les gestes effecteurs, comme le note Delalande : "(...) *les différents touchers sont pour lui [Gould, NdE] l'équivalent d'une orchestration pour différencier les parties polyphoniques ; ainsi le staccato joue-t-il le rôle des pizzicati de violon et le grand legato de la basse, celui des violoncelles. Il n'est donc pas exclu que certains gestes puissent être dictés par cette imagination orchestrale (...)*"

58. "L'Encyclopédie des sons suprêmes", ouvrage ayant probablement vu le jour durant la dynastie Song, mais n'ayant survécu qu'à travers diverses éditions, une datant du XVI^e siècle. Une reproduction est disponible en ligne : <http://www.silkqin.com/02qnpu/05tydq/ty3.htm>. Voir [Pic91].



Figure 3.4.: Un feuillet du *Tayin da quanji* : les gestes instrumentaux du Guqin y sont décrits par un aphorisme poétique et illustrés par le mouvement d'un animal. Source : cf. note 58.

J'utiliserai donc ici le terme de “gestes de re-sonnance” pour désigner un geste qui consiste à faire sonner un **DMI** basé sur un “geste programmé”, c’est-à-dire un modèle dynamique préalablement enregistré, encodé dans le **DMI** et définissant son comportement. Son apparente similitude avec le terme *résonance* n’est pas fortuite : le geste de re-sonnance a affaire à un processus qui possède sa propre dynamique avec lequel il doit s’accorder (ou non) et se mettre “en résonance”.

Le “geste de re-sonnance” s’appuie donc sur un *modèle intermédiaire* projeté dans l’imaginaire par *une métaphore* : modèle physique appelant des gestes d’excitation, modèle de lecture de vinyle appelant le *scratching*, modèle de robinets-à-son⁵⁹ contrôlés par l’ouverture de *faders* sur une table de mixage, modèle cartographique (e.g. interpolation par boules) définissant un terrain à parcourir sur une tablette, modèle de grue effrayée dansant dans la brise, etc. Le geste de re-sonnance se déploie dans un espace polarisé par cette métaphore.

Ce modèle est rendu tangible via l’interface, mais l’interface ne définit pas l’ensemble de la métaphore : ainsi un clavier peut servir au déclenchement de notes (comme sur un piano), mais si l’intensité des notes est contrôlée par un autre pro-

59. Je reprend ici l’expression utilisée par François Dumeaux pour décrire une partie de son interface de jeu. Cf. annexe B.

cessus (e.g. une pédale d'expression, ou une foule d'agents virtuels autonomes) le clavier ne sera plus envisagé comme une surface "de percussion" mais comme un filtre, un crible ne laissant passer que certaines fréquences. La métaphore du piano avec ses marteaux projetés par l'enfoncement des touches disparaît pour laisser place à un autre rapport sensible à l'instrument.

À la différence de la typologie gestuelle de Claude Cadoz, à prétention universelle, le geste de re-sonnance est un geste *contextuel*, dépendant de l'interface, du modèle intermédiaire, de la musique jouée, du contexte de performance. Cette contextualité n'empêche cependant pas qu'une typologie soit établie pour un contexte donné, en s'appuyant sur l'observation des pratiques qui s'y rattachent. C'est par exemple l'objet de la thèse de Baptiste Bacot⁶⁰ : son analyse, qu'il définit comme une "*organologie située*", s'appuie sur l'observation de situations concrètes de performance musicale chez différents instrumentistes numériques, et prend en compte les spécificités de leur configurations instrumentales.

C'est aussi le cas dans le travail mené par Nathanaëlle Raboisson et Pierre Couprie, sur l'étude du geste performatif dans l'interprétation de musiques acousmatiques sur table de mixage [RC17]. Une analyse partant de l'observation méthodique des gestes et de leur corrélation (ou non) avec le résultat musical leur permet d'esquisser une typologie propre à cette pratique, incluant des "*gestes de placement*" qui participent à la (dé)construction de l'espace sonore, ou encore des "*gestes d'accompagnement*"⁶¹ caractérisés par une synchronie entre le geste et la morphologie sonore.

De même qu'il existe un répertoire gestuel associé aux instruments acoustiques, les modèles intermédiaires définissent, de manière modulaire, un vocabulaire d'interaction qui leur est lié. Le geste de re-sonnance s'appuie donc sur les affordances et la structure musicale associées à certains modèles intermédiaires : un geste venant contrôler une boucle de batterie telle que le "*Amen Break*"⁶² peut s'appuyer sur l'ensemble des techniques de *chopping*⁶³, *cutting*, *filtrage*, *stuttering*, *varispeed*, etc. qui lui sont historiquement associées.

Norbert Schnell développe l'idée de "ré-animation d'enregistrements audio"⁶⁴ [Sch13] et propose une étude très riche sur le plan théorique comme sur le plan pratique des modalités d'engagement dans une relation gestuelle/sonore par le biais d'une action métaphorique. En particulier, plusieurs exemples s'appuient sur une pièce musicale complète (la *Variation Goldberg n°18* de Johann Sebastian Bach, en

60. [Bac17]

61. Le sens est ici tout autre que le *geste d'accompagnement* défini par Delalande, mentionné précédemment, et pourrait être rapproché des *gestes de tracé sonore* de Godøy (cf. 3.4.2).

62. Pour un aperçu de l'importance de cette boucle, voir notamment l'installation sonore "*Can I Get An Amen?*" de Nate Harrison, qui retrace son histoire (version audio accessible sur <https://youtu.be/5SaFTm2bcac>).

63. Dans les musiques basées sur l'utilisation du *break-beat*, le *chopping* consiste à découper la boucle de certaines manières en segments plus petits afin de les reconfigurer dans un ordre différent.

64. Le terme anglais *reenactment* utilisé dans son travail reflète mieux que "ré-animation" le lien avec la théorie de l'enaction sur laquelle s'appuie notamment son travail.

l'occurrence) et présentent diverses stratégies possibles d'avancement dans la pièce, sur la base d'une même structure commune définie par l'œuvre de Bach.

3.5.4 Résonance entre gestes re-sonnants et programmés

Les instruments acoustiques présentent des modes de résonance que l'instrumentiste apprend à connaître, à apprivoiser, pour obtenir les qualités sonores qu'il ou elle recherche. Ces modes de résonance influent sur le timbre qui sera, par exemple sur un instrument à corde, rond et ample si l'on joue la corde au milieu de sa longueur, tandis qu'il sera plus grêle et chuintant si l'on joue *sul ponticello*. La résonance de l'instrument acoustique peut également affecter d'autres paramètres que le timbre, par exemple le rythme : un percussionniste peut mettre à profit le rebond de ses baguettes sur la peau tendue, lors d'un jeu de roulements, et adaptera le poids et/ou la tension qu'il applique sur ses baguettes en fonction de la zone qu'il frappe et de son élasticité.

Cette adaptation dynamique du geste à la résonance de l'instrument prend d'autres dimensions encore dans des **DMIs**, pouvant générer de manière autonome toute une phrase musicale, tout un morceau. La nature dynamique et générative des **DMIs** déplace l'agentivité⁶⁵ de l'interaction instrumentale sur un terrain où elle se distribue entre des processus "qui tournent" et qu'il s'agit "d'attraper"⁶⁶ pour en jouer. Un exemple évident de cette situation est l'alignement rythmique entre deux morceaux mixés par un **DJ**, ou encore l'utilisation d'un *looper* permettant à un musicien de superposer plusieurs couches musicales et devant se jouer en rythme avec ce qu'il a enregistré.

Le **DMI** peut se retrouver en position de mener le jeu et imposer sa cadence à l'instrumentiste. La performance musicale avec un **DMI** est donc une co-performance où la distribution du contrôle de la synthèse et de la gestuelle qui la provoque (ou en découle), peut se définir de manière polymorphe. Une partie de la dynamique de jeu peut être prise en charge par la machine et une autre partie par l'instrumentiste dans une relation qui peut parfois s'apparenter à un duo⁶⁷.

La part d'agentivité respective de la machine et du musicien dans la production du son des **DMIs** définit en fait toute une échelle de nuances, allant de la posture de la personne écoutant la musique "malgré elle" (dans un supermarché, typiquement) à celle du musicien engageant tout son corps (physique et mental) dans l'interaction musicale. Cette recherche de la résonance avec l'instrument, qui vise à en

65. La notion d'agentivité dans la performance musicale dépasse sa simple implémentation opérante dans les **IHM**. Par exemple, les figures dialogiques dans la musique classique ont été également analysées à travers ce prisme, voir notamment [Gra16]

66. Guerino Mazzola rapporte cette phrase du mathématicien Jean Cavallès dans [Maz+18] : "Comprendre, c'est attraper le geste et pouvoir continuer".

67. Cette redistribution dialogique devient explicite dans des dispositifs tels qu'Omax ([Ass+06]) ou le Continuator ([Pac03]). Voir par exemple la session d'improvisation entre György Kurtág père et fils avec le Continuator pour la pièce *Zwiesgespräch* : <https://youtu.be/pqfKG1Rvddg>.

comprendre l'organisation des sons et les rythmes propres, à en attraper les gestes programmés, à y trouver les *sweet-spots* est peut-être, davantage que le médium constitutif de l'instrument, ce qui définit vraiment son instrumentalité. La possibilité des **DMIs** de pouvoir générer du son en continu sans qu'aucun effort physique ne soit nécessaire pose en effet la question de l'engagement du musicien de manière plus critique encore qu'avec les instruments acoustiques car, à l'inverse, ne pas jouer peut requérir un effort physique.

Les gestes du musicien peuvent alors entretenir diverses relations expressives "en phase" avec le mouvement autonome de l'instrument : dialogique, d'accompagnement, d'accentuation, d'infléchissement, d'opposition... mais il peut également s'affranchir d'une relation lisible au profit d'une subversivité expressive.

3.6 Subversion sonore, subversion gestuelle

3.6.1 Geste produit, capté, perçu

Dans le domaine des **IHM**, peu d'importance était accordée au geste en dehors de son interaction directe avec la machine jusqu'à la fin des années 1990, comme le dénote l'analyse de Gordon Kurtenbach dans l'ouvrage *The art of human-computer interface design* : "Un geste est un mouvement du corps qui contient de l'information. Faire un signe d'au-revoir est un geste. Appuyer sur la touche d'un clavier n'est pas un geste car le mouvement d'un doigt dans sa course pour frapper une touche n'est ni observé ni signifiant. Tout ce qui importe est quelle touche est enfoncée."⁶⁸.

Pourtant, comme le rappelait à la même époque Richard Leppert, la nature intangible du son et de la musique est polarisée par l'expérience visuelle : "Précisément parce que le son musical est abstrait, intangible et immatériel (...) que l'expérience visuelle de sa production est cruciale, tant pour les musiciens que pour le public, pour situer et communiquer la place de la musique et du son musical dans la société et la culture. (...) La musique, malgré son immatérialité sonore phénoménologique, est une pratique incarnée, comme la danse et le théâtre."⁶⁹

Nous avons vu dans les sections précédentes différents aspects concernant la fonctionnalité du geste, considérée du point de vue de l'instrumentiste. Ce point de vue privilégie généralement la recherche d'une relation lisible et cohérente entre le geste et le son, se situant à cette intersection où les actions permises par la confi-

68. "A gesture is a motion of the body that contains information. Waving goodbye is a gesture. Pressing a key on a keyboard is not a gesture because the motion of a finger on its way to hitting a key is neither observed nor significant. All that matters is which key was pressed." [KH90]

69. "Precisely because musical sound is abstract, intangible, and ethereal [...] the visual experience of its production is crucial to both musicians and audience alike for locating and communicating the place of music and musical sound within society and culture. [...] Music, despite its phenomenological sonic ethereality, is an embodied practice, like dance and theater." [Lep93]. Une assertion confirmée expérimentalement par de nombreuses études perceptives, par exemple [Tsa13].

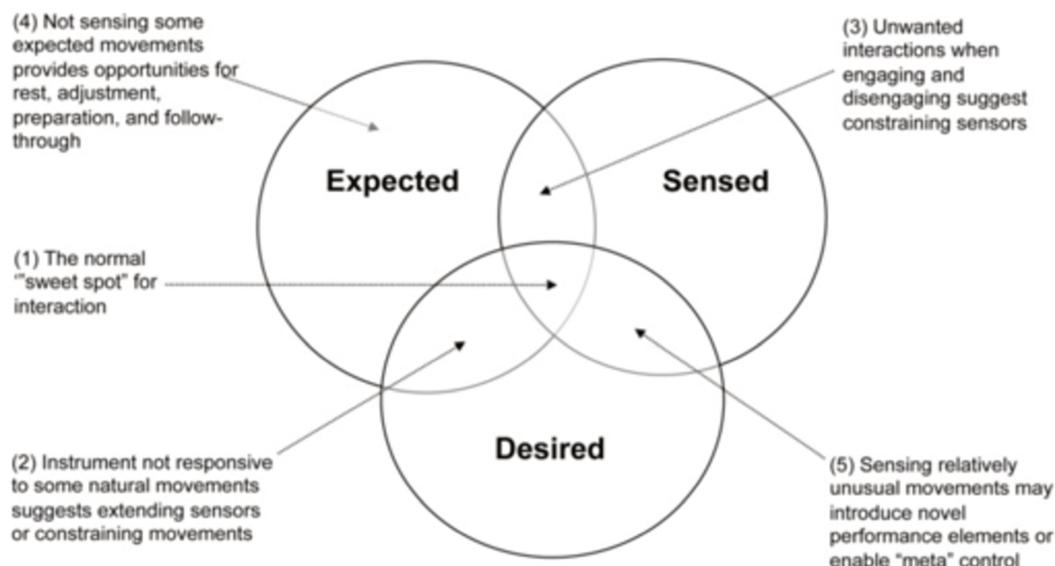


Figure 3.5.: Recouvrement partiel entre les gestes attendus sur une interface, les gestes effectivement captés et les gestes désirés par l’instrumentiste, d’après [Ben10]

guration physique de l’agencement instrumental, celles effectivement captées par l’interface et celles désirées par l’instrumentiste se correspondent, ce que Steve Benford représente par le diagramme de Venn de la figure 3.5. Ce diagramme fournit une représentation intéressante des compromis qui se présentent au luthier numérique pour la définition des gestes d’un DMI. Benford remarque que si les zones où ces cercles ne se recoupent que partiellement peuvent apparaître comme problématiques (interface pas assez sensible, gestes captés mais non-désirés), elles sont aussi des espaces permettant d’inventer de nouvelles relations (en particulier quand des gestes désirés qui peuvent être captés ne sont pas des gestes *a priori* attendus).

En se plaçant dans la perspective de l’instrumentiste, ce diagramme ne met pas en évidence la relation entre les gestes de l’instrumentiste et la traduction sonore de ces gestes par l’instrument, ni la perception de ce résultat par le spectateur-auditeur. Or, la compréhension du mapping entre gestes captés et production de l’instrument joue un rôle essentiel dans l’attribution de l’agentivité. En particulier, la représentation visuelle du fonctionnement de l’instrument peut aider à cette compréhension comme l’ont montré Florent Berthaut et collaborateurs dans [Ber+13 ; Ber+15]. Benford propose un autre diagramme pour prendre en compte ces aspects que nous analyserons plus loin, mais il nous faut d’abord éclaircir un point sujet à différentes orientations et partis-pris.

3.6.2 Une critique de la transparence

Dans son essai “*Theses on Liveness*” [Cro07], John Croft opère une distinction intéressante entre ce qu’il appelle “expressivité procédurale” (*procedural liveness*),

définie par la manipulation concrète du son en temps-réel, et “expressivité esthétique” (*aesthetic liveness*)⁷⁰ définie par la traduction des valeurs d’entrée en des variations esthétiques significatives. Cependant, Croft écarte immédiatement l’idée de considérer cette “expressivité esthétique” dans ce qu’elle peut contribuer à façonner l’interaction instrumentale, considérant que cette expressivité nécessaire à la musique, peut tout aussi bien s’appuyer sur des sons pré-enregistrés. Ce point de vue l’amène à une conclusion similaire à celles de Fels, Dobrian ou Cadoz⁷¹, fondée sur une stabilité de l’instrument et un rapport de causalité, de cohérence et de proportionnalité entre le geste et le son.

La poursuite exclusive d’une telle “transparence instrumentale”, comme condition nécessaire à l’expressivité d’un instrument, pourrait masquer le fait que la relation entre le musicien et son public n’est pas exclusivement, sinon principalement, motivée par la recherche de cette transparence, comme l’ont notamment montré Cavan Fyans, Michael Gurevitch et Paul Stapleton dans une série d’articles⁷². Il mettent notamment en évidence que la confiance apparente de l’instrumentiste joue un rôle prépondérant dans l’évaluation que fait le spectateur de la maîtrise de l’instrumentiste et, de manière plus générale, que les modalités d’engagement des spectateurs dans l’appréciation et la compréhension d’une performance sont multiples et contextuelles.

On arguera même du contraire : la subversion⁷³ est une composante essentielle de la création artistique, qui se manifeste déjà dans le cas des instruments acoustiques. Leur design est en effet orienté par l’obtention d’une homogénéité de timbre tout à fait artificielle, autant que la discrétisation du *continuum* des hauteurs en notes. De même, les gestes du musicien et du compositeur créent des continuités là où il y a discontinuité (e.g. le *legato* sur des notes de piano, la modulation tonale pour passer d’un mode à un autre, la fusion des timbres dans le travail d’orchestration, etc.), et inversement introduit des ruptures pour déjouer les attentes du public (e.g. les jeux de contre-temps rythmiques, le *subito-piano*, le montage *cut*, etc.). La musique est un art du mirage, de l’illusion – comme le rappelle Risset dans la citation en exergue de ce chapitre –, dans lequel la transparence n’est qu’un alibi de la subversion, pour

70. La traduction du terme anglais “*liveness*” par le terme “expressivité” ne rend pas tout à fait compte de la connotation de “vivacité” qu’il contient et dénote la confusion et/ou l’intrication de cette notion avec celles d’*agentivité* et de *présence* directe.

71. Voir par exemple les remarques de Sydney Fels [FGM02] “*We consider transparency as a predictor for expressivity. (...) We identify transparency as a quality of a mapping.*”, Christopher Dobrian [DK06] “*Another basic need is that the software provide correspondences between input data and output sound that are sufficiently intuitive for both performer and audience.*”

72. Cf. [FGS09; FGS10; GC11]

73. Le terme “subversion” (du latin *subvertere* : renverser, bouleverser) désigne “*l’action visant à saper les valeurs et les institutions établies*” (dictionnaire Larousse). Les moyens employés par la subversion consiste à diffuser un message contraire à un l’ordre établi, dans le but d’affaiblir celui-ci. Dans le cas de la musique, si la notion de subversion peut prendre une dimension culturelle ou politique dans certains courants musicaux, c’est ici au sens cognitif de la subversion de la perception que j’emploie ce terme. Par exemple, on pourra dire qu’un groupe de musique pop interprétant un tube en playback sur un plateau de télévision use d’un principe subversif, en laissant croire que ce que l’on écoute est le résultat de leur interprétation en direct (valeur établie), alors qu’il s’agit d’un enregistrement.

dessiner de nouvelles relations du sensible.

L'attribution de qualités expressives aux **DMIs** sur la base de la perception explicite de causalité entre ce que fait le musicien et le son produit, traduit ainsi une référence implicite à un modèle instrumental acoustique qui n'est qu'à moitié justifiée. Loin de prétendre ici que le modèle causal de l'instrument acoustique soit obsolète, il semble nécessaire de s'en détacher si l'on veut saisir l'étendue réelle des possibilités créatives offertes par les **DMIs**. L'expressivité ne saurait être réduite à la simple traduction sonore immédiate des gesticulations d'un musicien. Les films de la nouvelle vague, en particulier le cinéma de Jean-Luc Godard ou Wim Wenders, ont suffisamment prouvé que la collision de plans sonores et visuels n'entretenant *a priori* aucun rapport de causalité ou de synchronicité, sont capables de susciter une émotion intense et de capturer un fragment inouï ayant pu se glisser dans la fêlure des normes⁷⁴, comme le fait le poème qui s'affranchit de la grammaire habituelle pour inventer la sienne propre.

Les **DMIs** offrent de nouvelles possibilités de subversion de la perception – comme autant de fêlures du modèle acoustique – qui peuvent s'appuyer sur les caractéristiques qui leur sont propres. Ainsi, le découplage énergétique permet des correspondances inattendues entre force du geste et intensité du son, les capacités d'enregistrement permettent de faire surgir des matériaux de toutes natures sonores, l'absence potentielle de contact avec l'instrument permet d'associer plus librement gestes effecteurs et gestes d'accompagnement, et la reconfiguration dynamique des algorithmes permet d'envisager une métamorphose continue des relations de jeu.

3.6.3 Stratégies expressives d'interaction gestuelle

Dans une analyse des stratégies de design d'interface en fonction de leur perception par le spectateur [Ree+05], Stuart Reeves, Steve Benford et al. distinguent quatre orientations possibles en fonction du degré de visibilité des gestes effecteurs de l'instrumentiste par rapport au degré de perceptibilité (visible, audible) de l'effet produit par l'instrument (cf. figure 3.7) :

- **expressive** : lorsque les gestes de manipulation et les effets sont perceptibles, l'interface est dite *expressive* ;
- **secrète** : à l'opposé, une interface sur laquelle les gestes effecteurs sont invisibles ainsi que le résultat est jugée "secrète" – Benford évoque le cas d'une performance qui ne serait accessible qu'à une partie du public. Ce pourrait être aussi le cas par exemple lors de gestes discrets visant à rappeler des réglages sur l'instrument et dont l'effet n'est pas directement perceptible ;
- **à suspens** : si des gestes effecteurs sont visibles manifestement destinés à produire un effet mais qu'aucun effet n'est perçu, cela pourrait être perçu

74. Et que rappelle ce refrain de Leonard Cohen dans *Anthem* : "Ring the bells that still can ring / Forget your perfect offering / There is a crack, a crack in everything / That's how the light gets in".

comme un dysfonctionnement, mais également (et c'est l'orientation proposée ici par Benford) comme un moment de *suspens*, si le public a conscience que l'action de ces gestes lui seront perceptibles plus tard. Benford prend l'exemple d'un public faisant la queue devant une installation dont il ne peuvent faire l'expérience que lorsque leur tour arrive. On pourrait aussi observer une telle situation dans des gestes de live-coding, où le code s'écrit de manière visible pour le public⁷⁵, dont l'activation est imminente, mais dont on ne perçoit le résultat qu'une fois le code envoyé dans le DSP ;

- **magique** : enfin, et c'est la direction qui m'intéresse plus particulièrement ici, les gestes effecteurs peuvent être cachés tandis qu'un effet est produit par l'instrument, configuration que les auteurs appellent "magique".

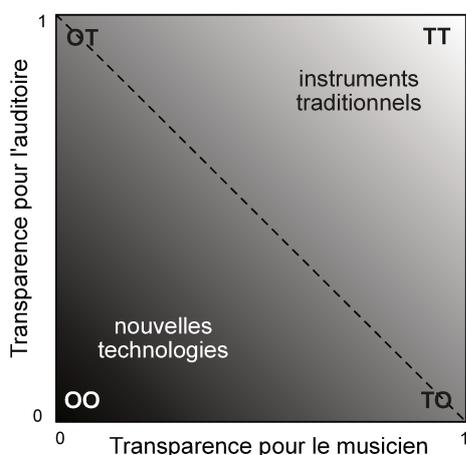


Figure 3.6.: Transparence pour le musicien et l'auditoire, d'après [FGM02]

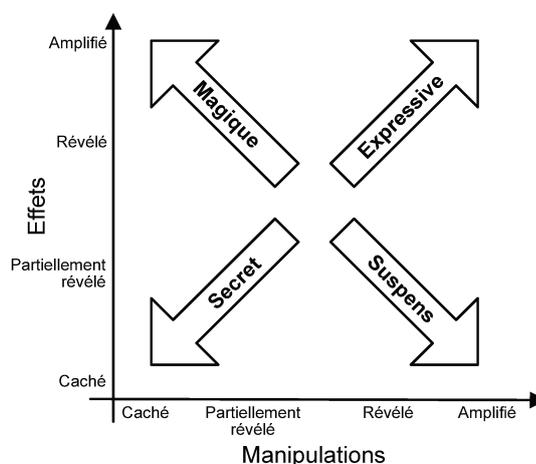


Figure 3.7.: Stratégies de design d'interfaces pour le spectateur, d'après [Ree+05 ; Ben10]

Ce schéma, à rapprocher de celui déjà proposé par Sydney Fels, Ashley Gadd et Axel Mulder trois ans plus tôt (figure 3.6), présente l'intérêt de dépasser une vision uni-dimensionnelle de l'expressivité instrumentale, envisagée comme le seul résultat du degré d'agentivité de l'instrumentiste perceptible par l'auditeur/spectateur, en proposant une caractérisation de la relation geste/son prenant en compte l'absence potentielle (et potentiellement souhaitée) de congruence entre les gestes effecteurs de l'instrumentiste et leur traduction sonore perçue par le public.

On pourrait cependant ajouter une dimension à ce schéma en y insérant le paramètre de cohérence de la relation entre les gestes effecteurs et l'effet produit⁷⁶. Cette cohérence peut être obtenue par la congruence énergétique/spatio/temporelle du geste et du son⁷⁷, mais de manière plus générale, elle se caractérise par la capacité des spectateurs-auditeurs à comprendre cette relation, qu'elle soit congruente ou

75. Une pratique courante dans le live-coding consiste à montrer son écran au public, généralement sous la forme d'une vidéoprojection du code composé en direct (cf. manifeste TOPLAP : <https://toplap.org/wiki/ManifestoDraft>)

76. À cet égard, le schéma de Benford semble se placer dans le cas particulier où cette relation est cohérente.

77. Telle que préconisée par Cadoz (Cf. supra p.52.), ou John Croft dans [Cro07]

non⁷⁸. Pour conserver les mêmes unités d'axe, je propose d'assimiler ce paramètre de *cohérence* au degré de “visibilité des gestes programmés”, qu'il faut ici entendre comme une compréhension de la mécanique interne de l'instrument, de son mapping. On obtient ainsi un espace tri-dimensionnel dans lequel d'autres axes d'interprétation de la relation expressive se dessinent (cf. figure 3.8).

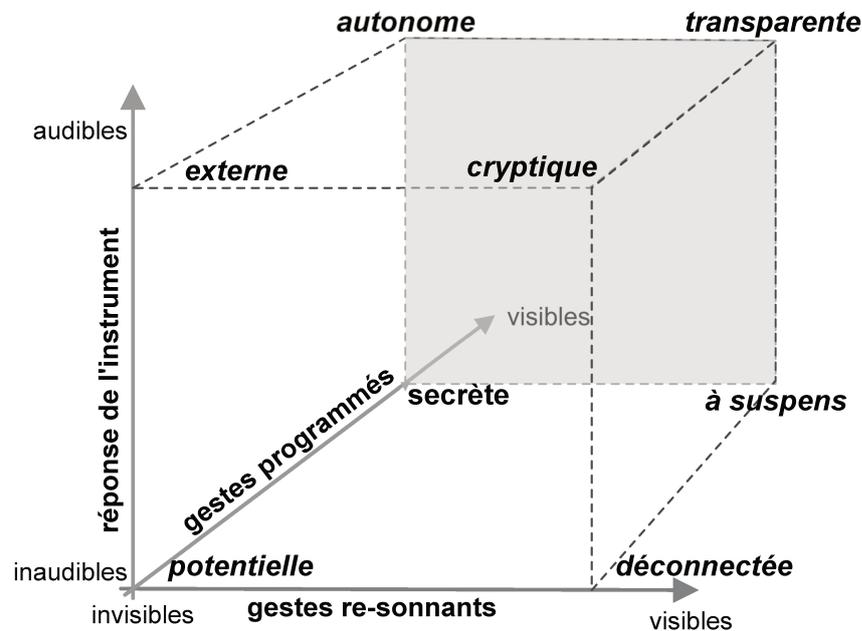


Figure 3.8.: Stratégies de design d'interaction instrumentale pour le spectateur en fonction de la visibilité des *gestes re-sonnants* de l'instrumentiste, des *gestes programmés* dans l'instrument et des effets sur le son.

Ainsi, le schéma que je propose ici se fonde sur celui de Benford, en reformulant certains de ses axes et en l'étendant selon l'axe de la visibilité du *geste programmé* :

- **transparente** : correspondant à la relation que Benford nomme *expressive*, en indiquant ici que la relation est comprise (du moins en apparence) par le spectateur. Il me semble ici préférable de renommer la zone désignée comme “*expressive*” dans le schéma de Benford par le terme “*transparente*”, afin d'éviter cet abus de langage qui empêche de considérer d'autres formes d'expressivité que celle passant par la transparence de la relation instrumentale ;
- **autonome** : de même, la zone désignée comme “*magique*” dans le schéma de Benford me semble davantage correspondre à une situation “*d'autonomie*” de l'instrument. En effet, la notion de geste magique⁷⁹ implique d'autres variables que celles de l'occultation et de la révélation, en particulier l'inscription dans

78. Ce qui semble être démontré par l'étude de Berthaut et al. dans [Ber+13]

79. Les principes du “geste magique” ont été analysés par de nombreux anthropologues, notamment par Marcel Mauss dans [MH02], et également dans le cadre des IHM par [Lok95 ; MBP10]

une temporalité permettant de créer un contexte favorable à la subversion (par la narration, le détournement d'attention, etc.). La notion d'autonomie, elle, se traduit par exemple dans le rôle pris par une platine vinyle jouant un enregistrement en l'absence de geste venant perturber sa lecture ;

- **cryptique** : une relation sera vue comme cryptique si les gestes re-sonnants et le résultat sonore ne présentent aucune relation apparente. C'est un état perceptif très instable car nous sommes naturellement happés par une recherche de sens dont il est difficile de s'affranchir. Cette situation *cryptique* dévie donc rapidement vers les autres pôles ;
- **externe** : dans le cas où des effets sonores sont perceptibles sans qu'aucune action ne semble les produire, ni celles de l'instrumentiste, ni celles provoquées de manière autonome par l'instrument, le son sera perçu comme externe à l'instrument. Cette situation est typiquement renforcée dans le cas des instruments électroniques par la distance fréquente entre l'instrument et les haut-parleurs qui supprime cette congruence de localisation entre l'instrument et le son, naturelle dans les instruments acoustiques. La présence habituelle d'un espace scénique mis en lumière focalise bien évidemment l'attention sur l'instrument[iste], mais ce point de fuite de l'attention peut précisément être déplacé par ces mêmes procédés (e.g. hors de la scène) ;
- **déconnectée** : un musicien procédant à des mouvements sur un instrument muet et dont le public ne peut pas comprendre le fonctionnement renvoie l'image d'un instrument déconnecté. Cette situation se rencontre par exemple lorsqu'un musicien numérique procède à des réglages en amont de sa performance, entre deux morceaux musicaux ou lorsque, effectivement, l'instrument ne répond pas (e.g. bug informatique, câble débranché, ...) ;
- **potentielle** : enfin la seule présence de l'instrument, sans qu'aucun geste ne lui soit adressé, sans qu'il ne produise aucun son, ni que son fonctionnement soit compréhensible pourrait s'apparenter à la *rencontre* d'un instrument inconnu, ou d'un objet dont nous envisageons l'instrumentalité. Que nous portions intentionnellement notre attention sur cet objet, où que notre attention soit guidée sur elle (e.g. par sa mise en lumière dans un espace dédié tel qu'une scène ou une galerie d'art), il subsiste le mouvement de notre imagination qui projette les affordances, le jeu, les sonorités potentielles. La pièce *4'33"* de John Cage ou encore l'installation *Handphone table* de Laurie Anderson (cf. figure 3.9) se situent à la limite de ce cas de figure.

Il faudrait rajouter à ce schéma une variable permettant de définir si le comportement de l'instrument est désiré ou subi, en particulier lorsque la relation n'a pas cette "transparence" généralement considérée comme celle attendue de la part d'un instrument. En présentant ces différents rôles comme des stratégies plutôt que seulement des problèmes, nous prenons ici le parti de les considérer comme des modes de fonctionnement souhaitable, ne serait-ce que temporairement, par le musicien.



Figure 3.9.: *Handphone table* de Laurie Anderson. En posant ses coudes sur de petites zones vibrotactiles et ses mains sur ses oreilles, le public peut écouter la musique composée par Laurie Anderson par conduction osseuse. Coll. MAC de Lyon. Photographie : Blaise Adilon.

Dans la mesure où ils seraient subis, on pourra les assimiler à la notion de fausse note, dont le musicien peut tout à fait s'accommoder, en les réutilisant dans la dynamique du jeu, selon le désormais célèbre adage répété par de nombreux jazzmen dont Miles Davis qu'il n'y a pas de "fausses notes" en tant que telles, que ce sont les notes jouées ensuite qui les rendent justes ou fausses⁸⁰.

L'assertion de Miles Davis (et d'autres) sur le caractère de "justesse" d'une note⁸¹ dépendant de ce qui est joué à sa suite fait apparaître deux autres lacunes importantes de ce schéma : sa dimension temporelle d'une part et la connaissance préalable des idiomes musicaux et instrumentaux sur lesquels se construit à la fois la performance et la construction de sens de la part du spectateur. Ainsi, on ne peut subvertir la perception de l'auditeur qu'à la condition qu'il y ait un système de valeur à déconstruire. Ce système peut exister préalablement à la performance (e.g. "un piano produit un son de piano accordé selon une échelle chromatique tempérée"), mais aussi se construire durant le temps même de la performance, en installant une

80. Herbie Hancock en rend compte dans une interview, en notant le caractère "magique" de la résolution trouvée par Miles Davis : "Au milieu d'une des chansons, pendant le solo de Miles, j'ai joué cet accord qui était tellement faux. Je pensais que j'avais tout détruit et réduit cette formidable soirée en miettes. Miles a repris son souffle et il a joué quelques notes, et il a récupéré mon accord. Je n'ai pas compris comment il a fait ça, mais ça sonnait bien comme par magie." cf. <https://youtu.be/C-GrRIgdmw8>

81. Le terme de justesse est bien évidemment utilisé ici au sens de sa pertinence, son intérêt dans la grille d'accords du morceau, et non pas de la précision de sa hauteur.

relation qui semble cohérente et stable, au point de sembler établie au moment de la mettre en défaut.

Il me faut préciser ici une dimension esthétique sous-jacente à cette entreprise : l'intérêt de subvertir le système des valeurs sur lesquelles la musique s'appuie ne se borne pas à une duperie du spectateur-auditeur, qui se trouverait victime d'une farce, mais bien de permettre l'extrapolation du réel dans un espace imaginaire, en ouvrant une brèche qui permet en retour de le rendre tangible.

3.6.4 Inférences perceptives et soudure subversive

Inférences entre perception du geste, de l'instrument, du son

De la même manière que l'écriture musicale a permis l'émergence de processus compositionnels difficilement concevables sans ce support visuel⁸², les ordinateurs ont permis de créer des formes sonores qu'il aurait été difficile de concevoir sans cet outil computationnel, tels que les sons paradoxaux de Risset et Shepard⁸³. Les nouvelles possibilités d'écriture du geste permettent également d'imaginer des *gestes paradoxaux*, notamment par la redéfinition dynamique de leur traduction sonore⁸⁴.

L'agentivité du musicien, de l'instrument et du son permet d'envisager tous les cas de figures d'influence réciproque entre ces agents : le geste du musicien peut autant produire des sons directement que par l'intermédiaire de l'instrument, et inversement, le son et l'instrument peuvent influencer son geste. De même, l'instrument peut produire des sons (de manière autonome) autant que le son peut influencer son comportement (s'il est par exemple capté par microphone). L'absence de relation fixe et prévisible dans l'interaction gestuelle avec les **DMIs** entraîne donc l'auditeur/spectateur, dont la cognition est tendue vers la compréhension de ce qu'il observe, dans un réseau d'inférences entre ces différents agents que sont le musicien (son expression gestuelle), l'instrument, et le son perçu.

En construisant de manière systématique un tableau de ces relations (figure 3.10) et examinons l'ensemble des inférences possibles et à quelles situations réelles elles correspondent ("si toutefois elles existent", dira-t-on avant d'avoir construit ce tableau) quand elles sont subverties.

- **a) Inférence des gestes à partir du son.**

Le lexique servant à décrire les sons recourt souvent à des expressions dénotant l'inférence gestuelle : "sons percussifs", "craquements", "souffles". En-deçà même de leur verbalisation, nous associons naturellement les sons à une

82. On pense ici à des procédés tels que la rétrogradation ou la fugue.

83. Ce qui ne signifie pas que les sons paradoxaux soient impossibles à produire sans recourir à l'ordinateur ; cf. leur interprétation vocale par Victoria Hart : <https://vimeo.com/147403169>.

84. Voir par exemple l'étude de François-Xavier Féron sur les "rythmes paradoxaux" [Fér10].

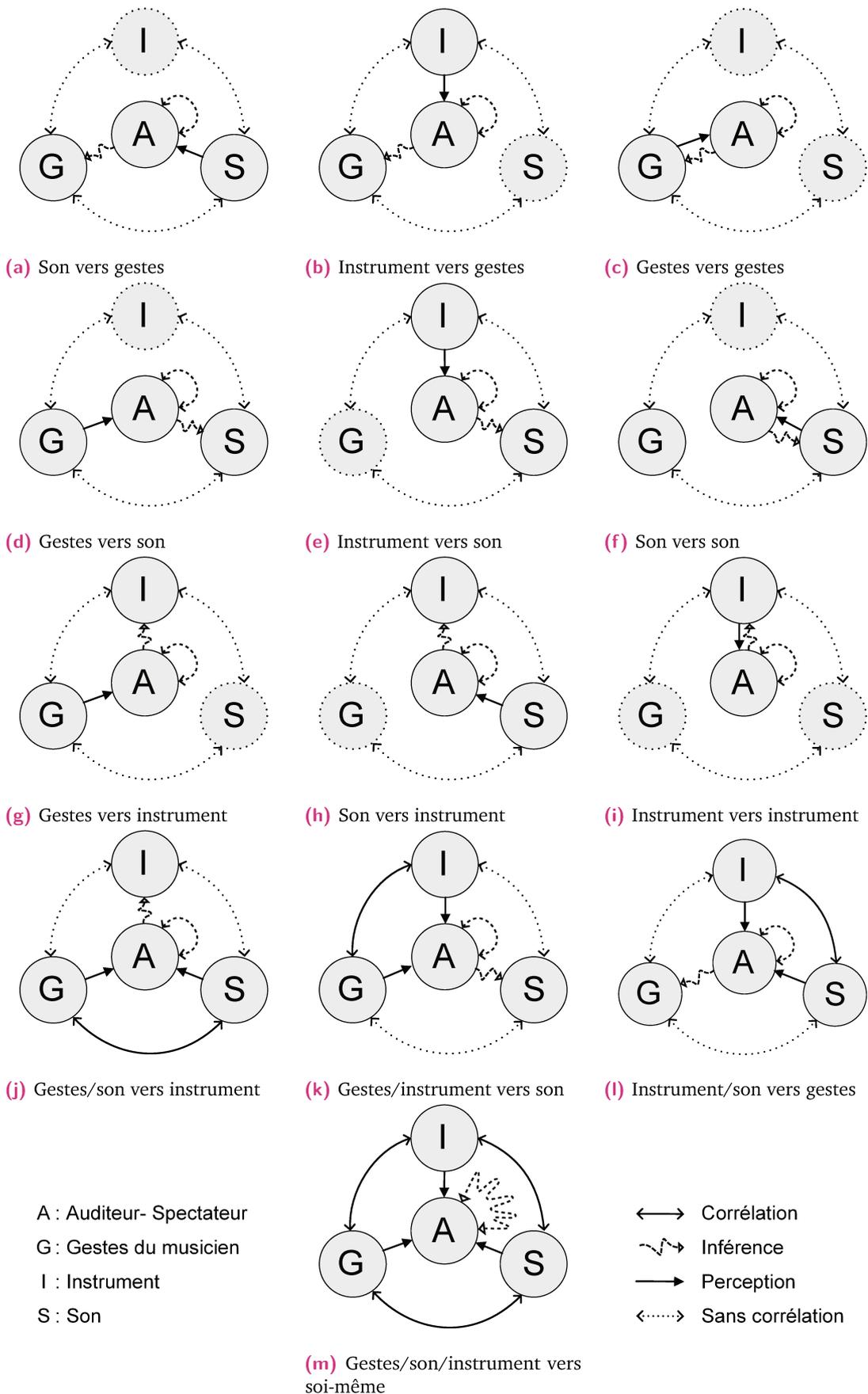


Figure 3.10.: Inférences croisées de la perception des gestes (G), du fonctionnement de l'instrument (I), du son (S), et de la perception de l'auditeur-spectateur (A).

“source” (réelle ou imaginée), dont nous caractérisons le mode d’excitation⁸⁵. Non seulement nous inférons les gestes, mais également des schèmes gestuels de plus haut niveau impliquant l’articulation temporelle des gestes⁸⁶. Ce type d’inférence donne en particulier lieu aux *gestes d’imitation de production du son* et aux *gestes de suivi de son* décrits par Godøy et présentés précédemment⁸⁷.

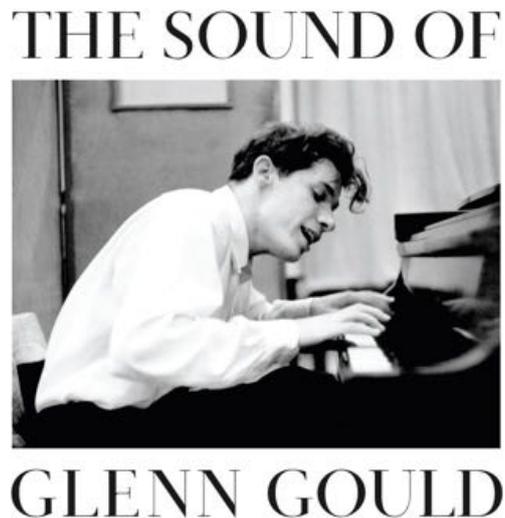


Figure 3.11.: Pochette d’un CD audio de Glenn Gould dont le titre indique l’inférence des gestes à partir du son (© Sony Classical)

- **b) Inférence des gestes à partir de l’instrument.**

Elle correspond aux “gestes attendus” dans le schéma de Benford (figure 3.5). Par exemple, un instrument comme le piano entraîne l’attente d’un jeu sur les touches (et non directement sur les cordes), une interface multitouch à des gestes en contact avec l’écran (et non à ce qu’on frappe dessus, ou que les mains s’agitent en l’air au-dessus de l’interface). Les multiples manières de capter le geste dans les **DMIs**, à partir de capteurs très discrets, permettent aisément de subvertir cette inférence, mais elle suppose que l’interface de l’instrument soit suffisamment référente pour qu’un certain ensemble de gestes soit effectivement attendus.

- **c) Inférence des gestes à partir des gestes.**

Cette inférence qui pourrait paraître étrange au premier abord est évidente

85. Cf. le travail de thèse d’Anne Faure [Fau00], qui recense dans une étude perceptive que 12% des personnes à qui on demande de verbaliser des sons ont recours à des gestes mimant le geste supposé à l’origine du son.

86. Par exemple, l’expression “le son de Gould” sur la figure 3.11 se réfère davantage au style particulier du touché pianistique de Glenn Gould (notamment l’agogique) qu’au timbre du piano. Sur un plus haut niveau encore, les études d’Ani Patel et al. (e.g. [PIR06]) tendent à montrer que des corrélations rythmiques et mélodiques entre la musique et les accents toniques propres à une langue permettraient d’inférer l’origine culturelle du compositeur.

87. Cf. supra 3.4.2

et nous l'avons déjà évoquée : la perception des gestes effecteurs du musicien est influencée par la perception que nous avons de ses postures, ses expressions faciales, les mouvements accompagnateurs, etc. Par exemple, la confiance apparente du musicien donne l'impression qu'il maîtrise mieux son instrument⁸⁸.

- **d) Inférence du son à partir des gestes.**

L'inférence décrite en a) fonctionne également par retournement : la vision d'un geste amène assez naturellement à imaginer un son associé à ce geste. Cette inférence est notamment la base du travail du bruiteur au cinéma, qui (re)créé un design sonore en cohérence avec les gestes visibles à l'écran, mais généralement de manière à la fois exagérée (e.g. le bruit des coups de poing dans les films d'action) et épurée (des bruits considérés comme parasites)⁸⁹. L'exagération, dans ce travail de sonification du geste, est encore plus manifeste dans les créations musicales qui accompagnent les *looney tunes* – ceux de Tex Avery en particulier – au point d'avoir rendu certains sons iconiques pour les gestes auxquels ils sont associés (*glissando* sifflant pour une chute, bruits de ressort pour un arrêt soudain, notes isolées de xylophone pour des pas discrets, coup de triangle pour une idée lumineuse, etc.).

- **e) Inférence du son à partir de l'instrument**

Il est également fréquent d'inférer un résultat sonore en fonction des qualités prêtées à un instrument. Par exemple, on aura tendance à s'imaginer que le son "cuivré" caractéristique de la famille d'instruments éponyme est lié au matériau métallique dont ils sont fabriqués, alors qu'il est essentiellement lié à sa géométrie. De même, on prêtait souvent aux instruments anciens, tels que les cordes, une sonorité meilleure, comme si la patine du bois avait amélioré le son, un *a priori* récemment invalidé par une étude perceptive rigoureuse [Fri+17].

- **f) Inférence du son à partir du son**

Là encore, cette auto-inférence pourrait sembler étrange, mais se manifeste clairement dans tous les effets psychoacoustiques⁹⁰ utilisés tant dans la composition musicale que dans les effets de traitement audio : phénomène de perception de "fondamentale manquante" utilisé pour renforcer les basses sur les systèmes audio à bande passante limitée, d'écrasement du spectre par le réflexe stapédien utilisé dans la technique de *sidechaining* de la compression

88. Cf. l'étude de Fyans et al. mentionnée précédemment supra 3.6.2.

89. Michel Chion propose le terme de *synchrèse* pour désigner ce travail de "synthèse synchronisée" [Chi13].

90. Pour plus de détails sur ces effets, se référer notamment aux travaux de Michèle Castellengo [Cas15] ou Diana Deutsch [Deu13].

dynamique⁹¹, de fission mélodique utilisée par les compositeurs pour créer une illusion de polyphonie dans un jeu monodique⁹², etc.

- **g) Inférence de l'instrument à partir des gestes.**

Les gestes propres à un instrument traditionnel sont souvent caractéristiques au point où nous n'avons aucun mal à deviner duquel il s'agit, si une personne en mimait le jeu devant nous. Pour un **DMI** encore inconnu, la tâche s'avère plus compliquée mais peut s'appuyer sur un ensemble de schèmes gestuels transposés, tels que les gestes instrumentaux traditionnels, mais également de gestes techniques de contrôle tels que la rotation d'un potentiomètre. Certains types de gestes étant plus couramment associés à certains types de contrôle, on peut inférer en partie le fonctionnement à partir des gestes qu'on observe. Par exemple, des gestes percussifs laissent présumer une surface qui se prête à la percussion (e.g. une peau tendue) tandis que des gestes déictiques sembleront davantage associés à des fonctions de sélection. Les technologies de capteurs utilisés dans les **DMIs** permettent cependant de reprogrammer en grande partie la course des gestes.

- **h) Inférence de l'instrument à partir du son.**

La situation d'inférence la plus courante consiste à déterminer la source des sons que l'on perçoit. Ce réflexe animal de survie est si profondément ancré que l'*écoute réduite* Schaefferienne s'apparente à un exercice contre-nature⁹³. Dans le cas des instruments de musique, on a cependant affaire à une source sonore d'un genre très particulier, dont la fonction est précisément de produire des sons (ce qui n'est pas le cas du cheval dont on entend le galop, par exemple). La programmabilité des **DMIs** permet de conférer à une interface de multiples timbres, dont certains pouvant appartenir à des "familles de sons" déjà identifiées. C'est par exemple le cas lorsqu'on a recourt à des banques de sons pré-enregistrés, telles que la Vienna Symphonic Library (VSL), dont le réalisme peut conduire l'auditeur à prendre une partition programmée pour une performance réelle d'instruments acoustiques⁹⁴. Par ailleurs, l'inférence de la source s'étend au-delà de l'instrument lui-même et englobe l'acoustique des lieux, qu'il est possible de modéliser dans des algorithmes de réverbération et de spatialisation.

- **i) Inférence de l'instrument à partir de l'instrument.**

D'une manière similaire aux auto-inférences des gestes et du son précédemment évoquées, la perception partielle d'un instrument peut entraîner l'infé-

91. Cet effet utilisé notamment pour renforcer l'impression de puissance des percussions est aujourd'hui omniprésent dans la productions musicales. Un exemple sonore significatif, dans le morceau *Ascending* du DJ anglais Actress <https://youtu.be/8F-v9RZt1Z8>

92. Par exemple, son utilisation est manifeste dans la Partita pour violon seul n° 3 de Bach : <https://youtu.be/5tj107RmEQg>

93. Les remarques de Pierre Schaeffer sur les efforts nécessaires pour s'affranchir ce qu'il appelle "l'écoute banale" sont explicites : "*quelle application il y faut, quels exercices répétés, quelle patience et quelle nouvelle rigueur !*" [Sch66] p. 271.

94. Cf. infra, note de bas de page 49.

rence de son fonctionnement global. Cette inférence est d'autant plus forte que des instruments iconiques se sont clairement établis au fil des siècles et ont été fabriqués en série. Si je vois donc un instrument ressemblant à un piano, j'en déduirai probablement qu'il se joue et sonne de manière similaire à ceux que j'ai déjà vus. Les instruments augmentés sont ainsi particulièrement aptes à subvertir cette relation, tel qu'un piano **MIDIs** équipé d'un revêtement TouchKeys⁹⁵.

- **j) Inférence de l'instrument à partir de la cohérence geste/son.**

La perception des gestes du musicien et/ou du résultat sonore sur un instrument dont on ne connaît pas *a priori* le fonctionnement entraîne une inférence de son fonctionnement. Par exemple, l'interprétation de la pièce *Hangsimgato N°2* de György Kurtág Jr.⁹⁶ laisse imaginer plusieurs scénarios possibles d'interaction instrumentale. Dans cette pièce, le développement musical se fait par avancement sur une partition pré-programmée par l'intermédiaire d'un capteur Infra-Rouge (D-Beam). Le capteur lui-même n'est pas capable de reconnaître quelle main (gauche ou droite) vient couper le rayon infra-rouge, ni sensible à son orientation, mais György Kurtág Jr. développe un vocabulaire gestuel qui établit des relations de correspondances avec les différents sons de la pièce. Ces relations de correspondances peuvent s'appuyer sur une similarité de morphologie énergétique, mais dans certains cas (e.g. geste de présentation des mains ouvertes vers le ciel, replis des bras en croix) elles sont purement métaphoriques et poétiques.

- **k) Inférence du son à partir de la cohérence geste/instrument.**

Cette inférence se construit sur la base des gestes perçus et du fonctionnement supposé connu de l'instrument. C'est typiquement le cas de l'effet McGurk⁹⁷ : on voit les lèvres bouger, on suppose connaître le résultat produit par la voix lors d'un tel mouvement des lèvres (l'instrument), et on infère le son entendu. Dans le domaine musical, c'est le résultat que peut produire l'interprétation de certaines pièces de György Kurtág comme par exemple *Veszekedés*, dans lesquelles les doigts doivent "*toucher la surface des touches très légèrement, sans les faire bouger*"⁹⁸ (figure 3.12), ce qui pourra amener l'auditeur à une perception *inframince*⁹⁹ d'un son imaginé en deçà du *pianississimo*.

- **l) Inférence des gestes à partir de la cohérence instrument/son.**

Le son perçu et le fonctionnement supposé de l'instrument peuvent enfin laisser supposer des gestes en décalage avec les gestes réellement effectués.

95. Revêtement muni de capteurs s'appliquant de manière quasi-transparente sur les touches d'un clavier pour l'augmenter d'une captation multi-touch. <http://touchkeys.co.uk>

96. Vidéo disponible sur <https://youtu.be/MJ8Z5skovLw>.

97. Cf. supra, note 37

98. György Kurtág évoque la pièce en ces termes : "*Je voudrais vous présenter maintenant deux pièces, deux versions de Veszekedés (Dispute). La seconde a la même idée de caractère que la première, mais en forme de pantomime : le geste est très important, même au-delà du son (un geste pour le crescendo, un pour l'accelerando. . .), parce qu'il facilite la sensation physique.*" [Kur18]

99. Cf. définition en note 44

Némajáték (Veszekedés 2)

Pantomime (Zanken 2) Dumb-show (Quarrelling 2)

*A billentyűk felületét éppen csak érintsük anélkül, hogy egyikük is megmozdulna.
*Man berühre nur leicht die Tasten, ohne daß sie sich bewegen.
*Touch the surface of the keys very lightly, without moving any of them.

Figure 3.12.: Exemple de gestes non-sonores dans les *Játékok* de György Kurtág. L'indication en bas de page mentionne : “Toucher la surface des touches très légèrement, sans les faire bouger”.

Un exemple en serait l'écoute aveugle d'une pièce de Méta-Piano de Jean Haury¹⁰⁰, dans laquelle le son de piano et le fonctionnement supposé d'un tel instrument laisse imaginer des gestes qui ne correspondent pas à ceux réalisés, la pièce étant en partie pré-séquencée dans la machine.

- **m) Inférence de sa propre perception à partir de la cohérence musicien/son/instrument**

Enfin, la cohérence entre plusieurs éléments cohérents qui contrediraient nos pré-supposés peut nous amener à ré-évaluer notre propre perception. Par exemple, si j'entends un exemple audio utilisant l'effet de *sidechain* décrit précédemment¹⁰¹ à faible volume, je peux déduire que l'effet que j'entend n'est pas dû à un réflexe stapédien.

Ces inférences sont évidemment présentées ici *ex vivo* : une performance musicale réelle les superposera, les multipliera, les entrelacera, ainsi que d'autres (avec les autres musiciens, le public, le lieux de la performance, son contexte...) dans un tissu d'inférences bien plus complexe que ces cas pris séparément.

100. Cf. par exemple l'interprétation de la *Grande Fugue Op. 133* de Beethoven : <https://youtu.be/0hD1WxA6S1Y>. On y notera également la manière dont Jean Haury invente de nouveaux gestes d'interprétation pour cette pièce, en traduisant gestuellement le rapport dialogique entre les parties musicales par l'alternance des mains.

101. cf. infra 3.6.4 et note de bas de page 91

3.6.5 La subversion comme soudure de perceptions

Nous avons donc établi d'une part, que les stratégies expressives s'appuient sur la visibilité relative de différentes composantes de la performance musicale, en particulier les gestes "re-sonnants" du musicien, le fonctionnement de l'instrument ("gestes programmés"), et la perception du résultat sonore, et d'autre part que des inférences se manifestent à tous les niveaux entre ces différentes composantes.

La subversion de la relation instrumentale, qui consiste donc à faire entendre des sons inaudibles¹⁰², réaliser des gestes inattendus, sur des instruments improbables, peut s'appuyer sur ces inférences, dont l'erreur fondamentale est de considérer que les mêmes causes produisent les mêmes effets, et le génie, de les créer quand ils viennent à manquer.

La réalisation de cette subversion passe par une *soudure* entre deux espaces perceptifs préalablement disjoints, que l'on vient faire coïncider en un point, pour extrapoler les mouvements de l'un vers l'autre. L'invisibilité de cette soudure, nécessaire à l'impression de continuité, implique qu'elle se glisse dans les synchronismes spatiaux et/ou temporels de la relation instrumentale. En termes implémentationnels, cette soudure nécessite de pouvoir facilement réattribuer les paramètres de contrôle d'un modèle d'interaction à un autre. C'est notamment un des aspects qui a conduit au développement du protocole MP présenté au chapitre 5.

3.7 Conclusion

La relation entre le geste et l'instrument a été considérablement affectée par l'introduction de l'électricité et de l'enregistrement, mais plus encore du numérique, dans le corps de l'instrument. Ces relations se construisent sur un médium présentant des caractéristiques radicalement opposées à celles de l'instrument acoustique : l'absence de causalité et de *continuum* énergétique entre le geste et le son, le métamorphisme du comportement de l'instrument, et l'absence possible de contact physique entre le geste et l'instrument y sont inhérentes et constituent des spécificités avec lesquelles il faut composer.

Dans ce contexte, plusieurs voies sont possibles. La recherche d'une lisibilité de la relation geste/son peut s'appuyer sur le modèle instrumental acoustique dont la cohérence semble offrir un terrain propice à l'expressivité musicale car, comme le soulignait Jean-Claude Risset, "*notre ouïe a évolué dans un environnement d'objets vibrants : aussi la prise en considération des contraintes et des particularités des vibrations mécaniques est-elle importante pour comprendre les idiosyncrasies de la perception auditive et pour en tirer parti*" [Ris92].

102. "C'est ainsi que la musique doit rendre sonores des forces insonores, et la peinture, visibles, des forces invisibles" disait Gilles Deleuze dans son *Étude de la peinture de Francis Bacon* [Del81], p. 57.

Ce modèle recréant artificiellement les modalités perdues de l'instrument acoustique ne saurait toutefois constituer une fin en soi, car comme le note encore Risset, *“la musique est aussi un art du mirage, de l'illusion”* [Ris10], et *“les limites de l'acoustique numérique dépendent des capacités différentielles de perception davantage que des contraintes mécaniques”* [Ris92].

À cette fin, l'étude des inférences perceptives entre le geste, le son et l'instrument, ainsi que la possible subversion de ces relations, nous fournit un ensemble d'éléments sur lesquels nous pouvons créer de nouvelles continuités imaginaires entre l'espace gestuel et l'espace sonore. Leur modélisation informatique, à côté de celle des lois de l'acoustique, de la psychoacoustique et de la théorie musicale contribue à un répertoire de *“modèles intermédiaires”*, à partir desquels se fabrique une sorte de lutherie généralisée. Celle-ci rassemble sur un même médium les différentes formes d'écriture de la relation gestuelle-sonore, préalablement distribuées dans le travail du luthier, du compositeur, de l'interprète et même de l'architecte responsable de l'acoustique d'une salle.

La modélisation numérique de tous ces aspects, jusqu'à ceux-mêmes de la perception auditive, ne se limitent pas à la possibilité – pour souhaitable qu'elle fût – de s'affranchir purement et simplement du réel, mais pose de manière critique la question de l'interaction musicale, des *“modes de résonance”* entre le son et l'humain. C'est peut-être dans cette démarche que l'on peut entrevoir la manière dont les lutheries numériques poursuivent le travail de la lutherie classique et de la composition, qui prirent soin, elles aussi, d'inventer des formes de continuités artificielles entre les hauteurs, les timbres, les rythmes et de les matérialiser sous la forme de théories musicales et dans les instruments. Le chapitre suivant proposera une analyse de cette interface entre humain-machine, où se joue cette interaction.

Interfaces sensibles / hardware

” *Komponieren heißt : über die Mittel nachdenken.
Komponieren heißt : ein Instrument bauen.
Komponieren heißt : nicht sich gehen,
sondern sich kommen lassen.*

— **Helmut Lachenmann**

Musik als existentielle Erfahrung, 1986.

[Lac96]

” *Fingers are not to be despised :
they are great inspirers, and,
in contact with a musical instrument,
often give birth to subconscious ideas
which might otherwise never come to life.*

— **Igor Stravinsky**

An autobiography, 1975.

[Str75]

Dans ce chapitre sont étudiés différents aspects de l'interface des **DMIs**, c'est-à-dire leur part matérielle, tangible et sensible, qui réifie et incarne la part immatérielle et intangible de l'instrument définie par le code informatique, en se situant à la frontière entre ces deux domaines. Seront notamment considérés les éléments concrets qui composent cette interface, le rôle qu'ils y jouent et la manière dont l'instrumentiste peut appréhender une interface nouvelle.

Pour illustrer ces différentes considérations dans un cas pratique, je présenterai également deux interfaces que j'ai développées pour ma pratique musicale : le Filigramophone (figure 4.1) et le Xypre (figure 4.2). Ces deux interfaces sont en quelque sorte des variations sur un même archétype d'instrument "tablette", nées de l'utilisation initiale d'une tablette graphique Wacom. Leur design reflète les différentes contraintes rencontrées lors du passage d'une technologie à une autre et la manière dont un même modèle général d'interaction est adapté en fonction du médium et des technologies qui l'implémentent et l'incarnent.



Figure 4.1.: Filigramophone, vue d'ensemble du dispositif : Filigramophone, ordinateur avec Max, carte son [sous le] Akai MPD24, haut-parleurs, accessoires de jeu.



Figure 4.2.: Xypre, vue d'ensemble du dispositif : Xypre, ordinateur avec Max, carte son, haut-parleurs.

4.1 Différentes faces de l'interface

4.1.1 Interface gestuelle ou interface sensible ?

Il est souvent question “d’interface gestuelle”, voire de “contrôleur gestuel”, lorsqu’on évoque les IHMs utilisées pour l’interaction musicale. Comme nous l’avons vu au chapitre précédant, le geste y occupe une part importante, mais les interfaces de jeu ne se limitent pas nécessairement à la captation du geste¹ : elle peuvent être sensibles au son², à la température, la lumière³, la couleur, la géolocalisation⁴, aux signaux biologiques internes du corps⁵ et réagir de manière générale à différentes conditions environnementales. Par ailleurs, le geste possède un certain nombre de qualités qui ne sont pas forcément captées par l’interface, alors qu’elles sont effectivement perçues par le musicien et par le public et contribuent ainsi à la performance.

Enfin, le “geste” qui vient contrôler les processus sonores dans les DMIs peut être de nature virtuelle, prendre la forme de motifs pré-enregistrés qui peuvent être issus de toutes sortes de sources de données interprétées en tant que flux temporels, comme c’est le cas dans la “sonification de données”⁶ ou l’utilisation de “modèles intermédiaires”⁷. Pour toutes ces raisons, il semblerait ainsi préférable de parler

1. Il serait plus exact de dire qu’elle ne capturent pas les gestes, mais les effets des gestes sur les capteurs.
2. L’utilisation de microphones est courante et sera développée en particulier dans la section 4.3
3. Voir par exemple les œuvres *Light Thing* de Leafcutter John (<https://youtu.be/2jIILHfSEfs>), ou encore *Light Music* de Thierry de Mey.
4. Voir en particulier les travaux d’Atau Tanaka [Tan04], ou les instruments de Yann Seznec <https://www.impracticaldevices.com>
5. Voir notamment les travaux de Marco Donnarumma [Don17]
6. La sonification de données consiste à transformer des données non-sonores, par exemple le cours de la bourse, en signaux audio. Cette technique est notamment utilisée, en dehors du champ musical, pour rendre perceptible des phénomènes ignorés, en s’appuyant en particulier sur nos capacités auditives à identifier des périodicités ou des intervalles de valeurs.
7. La notion de “modèle intermédiaire” sera décrite plus en détail dans le chapitre 5.

d'*interface sensible*, plutôt que d'*interface gestuelle* pour décrire les dispositifs d'interactions numériques pour la musique, leur caractéristique commune étant l'usage de capteurs (*sensors*).

Inversement, les haut-parleurs, les projections graphiques, les moteurs et actionneurs contrôlés algorithmiquement sont également à l'*interface*, en "sortie" cette fois, entre le virtuel et le réel. Si de même, on considère plus souvent la partie "captation" que la partie "diffusion" lorsqu'on évoque les interfaces de jeu des **DMIs**, il faut garder en vue que ces deux aspects s'entremêlent, non seulement dans la boucle d'interaction qui se crée entre le musicien et l'instrument, mais également dans l'agencement concret des éléments matériels qui constituent le dispositif instrumental dans son ensemble, comme nous le verrons dans ce chapitre.

L'interface de jeu, en étant à la fois sensible à son environnement tout en rendant perceptible les artefacts générés par les algorithmes, traduit dans le réel la potentialité virtuelle d'un **DMI**.

4.1.2 Un support pour *musiquer* ?

Les **DMIs** sont des objets techniques dont l'interface est le support de diverses activités musicales : composition, interprétation, improvisation, pédagogie... En tant qu'agencements éphémères en perpétuelle évolution, leur interface est parfois le support de l'activité même de lutherie qui sert à les concevoir⁸.

Par ailleurs, le degré d'interaction du musicien varie du simple déclenchement de processus autonomes jusqu'au contrôle direct et continu de tous les paramètres d'un processus de synthèse sonore. La granularité du contrôle joue un rôle important dans cette perspective. Entre une note **MIDI** qui ne déclenche qu'un événement ponctuel, un contrôleur continu qui envoie des données chaque fois qu'il est modifié et un capteur échantillonné à fréquence audio, qui envoie ses valeurs 44 100 fois par seconde, les possibilités de contrôle seront différentes en terme de réactivité et de finesse de modulation. Il faut donc prévoir les capteurs adéquats pour les processus que l'on souhaite contrôler en aval. Comme le faisait remarquer Max Mathews : "*Il faut penser aux systèmes dans leur globalité pour obtenir quelque chose d'utilisable musicalement - on ne peut pas vraiment développer un capteur sans le mettre en perspective des programmes avec lesquels on va l'utiliser*"⁹.

Ceci n'est pas sans poser problème dans la perspective de modularité d'un **DMI** que l'on aimerait pouvoir faire évoluer et adapter à différents contextes, différents projets. Une direction consiste à disposer d'une palette de capteurs variés, afin de

8. L'exemple le plus manifeste de cette amalgame entre les fonctions d'instrument de performance, de composition et de lutherie est sans doute le *live-coding*, dans lequel le clavier alphanumérique (ainsi que l'écran et les haut-parleurs) joue le rôle d'interface de jeu polyvalente pour ces différents contextes.

9. "One has to think of overall systems to get a musically useful thing — you can't really develop a sensor without relating it to the programs that you're going to use it with.", Max Mathews, cité par Joel Chadabe dans [Cha96], p. 230

les agencer selon une ergonomie adaptée aux gestes qu'ils invitent, et d'adapter le logiciel, plus souple, à cette configuration¹⁰. Une autre direction, sans compromission de l'interface, consiste à accepter le fait qu'un instrument ne puisse pas tout faire et à prendre l'objet tel quel, dans sa complexité, avec ses résistances, avec ses choix esthétiques, avec son usage unique et singulier¹¹.

4.1.3 Instruments acoustico-électronico-numériques

Si on les considère sur le plan matériel, il faut encore noter que les **DMIs**, s'ils se caractérisent par l'usage de la computation numérique, sont aussi nécessairement des instruments électroniques, électriques et acoustiques. Il portent par conséquent l'héritage et les contraintes propres à ces différentes dimensions.

Dans le domaine virtuel du code informatique, ces dimensions sont (trop¹²) bien séparées : la mécanique et l'électricité y sont absentes, et les signaux acoustiques et de contrôle bien rangés dans des variables indépendantes qui n'interagissent que si on le leur demande explicitement. Dans le monde réel, au contraire, l'interférence est la règle – pour le meilleur et pour le pire – et il devient nécessaire d'isoler les différents signaux si l'on ne veut pas avoir à gérer la complexité de leur interaction : mettre les haut-parleurs loin des microphones, isoler les câbles électriques pour ne pas capter la radio, rajouter des mousses pour ne pas entendre les bruits mécaniques d'une frappe sur un capteur, etc. En se situant à la frontière, l'interface de jeu doit communiquer avec le virtuel mais aussi composer avec le réel.

4.1.4 Facteurs de formes : héritages et transpositions

En partie libérée¹³ des contraintes de facteur de forme liées à l'acoustique, l'interface de jeu présente un agencement et une topologie liés à des questions d'ergonomie d'une part mais aussi de divers héritages musicaux et extra-musicaux. Il ne s'agit pas ici de juger des directions les plus adaptées à la performance instrumentale, mais de constater leur usage effectif dans ce domaine par les musiciens numériques, en analysant leur intérêt respectif.

Héritage instrumental

L'héritage le plus évident est celui des techniques de jeu et du répertoire, qui prend une importance considérable dans le design des **DMIs** inspirés d'instruments pré-existants, en particulier les instruments dits augmentés (cf. figure 4.3 et 4.4 et

10. C'est par exemple la direction prise dans le Méta-Instrument de Serge de Laubier, qui peut charger toute une série d'instruments logiciels différents (cf. [Cou18]).

11. C'est par exemple davantage le cas dans *The Sponge* de Martin Marier (figure 4.7).

12. Cf. commentaires en section 5.1.

13. En partie seulement, cf. § 4.3



Figure 4.3.: La Smart Guitar de HyVibe ressemble à s’y méprendre à une guitare. Photographie © HyVibe

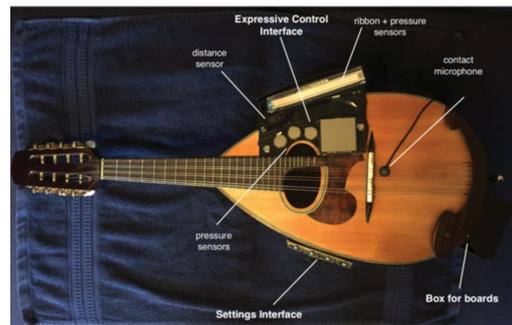


Figure 4.4.: La Smart Mandolin de Luca Turchet, avec capteurs ajouté sur la caisse. Photographie © Luca Turchet

annexes C et F). Cet héritage est le plus manifeste dans les instruments qui se destinent à une diffusion commerciale, en permettant un effet dilligence¹⁴ entre instruments classiques et instruments nouveaux¹⁵.

Outre l’héritage gestuel liés aux modes de jeu sur les instruments acoustiques, les théories de la musique s’inscrivent de manière plus générale dans l’interface de jeu, en imprimant sur elles une topologie polarisée par les valeurs auxquelles elle recourt¹⁶ (rythmes, intensités, hauteurs, timbre, etc.).

Héritage scientifico-industriel



Figure 4.5.: Interface du *Système 360* d’IBM (détail), un ordinateur utilisé dans le domaine scientifique et l’ingénierie, commercialisé en 1965.



Figure 4.6.: Le *Launch-Control XL* de Novation, une interface MIDI dédiée à l’expression musicale, commercialisée en 2014.

14. Notion définie par le médiologue Jacques Perriault, décrivant les protocoles mis en place pour l’adaptation d’une innovation en vue de son acceptation sociale (Les premiers wagons de train avaient la forme des diligences).

15. Cf. sur ce sujet l’analyse de Trevor Pinch dans [Pin01] sur la présence de clavier sur les premiers synthétiseurs et section 6.1.1.

16. Cf. section 6.1.3

L'informatique et l'ingénierie électronique, avec leur ancrage historique dans le domaine scientifique, industriel et militaire contribuent également à façonner les interfaces qui héritent des panneaux de commandes garnis de potentiomètres rotatifs, de faders et de LEDs clignotantes disposés en matrices rectilignes (cf. figure 4.5 et 4.6). Les interfaces graphiques connaissent le même genre d'influence avec l'héritage de la bureautique (dossiers et fichiers, pouibelle, menus déroulants, etc.), omniprésent dans le design des logiciels et parfois imposé¹⁷. L'intérêt de ces interfaces est de présenter le maximum de contrôleurs indépendants, en facilitant le monitoring par une représentation uniforme adapté à une lecture rapide de leurs valeurs.

Héritage du corps

L'ergonomie, pensée en dehors de l'organologie classique, nous amène à considérer directement le corps, et plus particulièrement les mains. Comme l'explique Serge de Laubier (cf. Annexe A) : “(...) *quand on fabrique un instrument il y a une contrainte, c'est le corps et donc forcément, il faut que les instruments, en tout cas ceux qui fonctionnent bien, soient quand même relativement bien adaptés au corps (...) et la première contrainte c'est celle des mains (...) parce que c'est [le membre] le plus agile, je pense, le plus agile, rapide, réactif.*” Un certain nombre d'instruments comme “The Hands” de Michel Waisvisz – dont le nom parle de lui-même – ou le Méta-Instrument de Serge de Laubier sont ainsi directement conçus à partir de l'ergonomie de la main.

Le corps entier peut être utilisé de manière instrumentale, en particulier dans la domaine chorégraphique. Si les interactions entre la danse et les systèmes électroniques interactifs ont plus de 50 ans¹⁸, les interfaces de *motion capture*, devenues plus accessibles depuis le début du XXI^e siècle¹⁹ ont multiplié le nombre de performances chorégraphiques dans lesquelles l'expertise du mouvement corporel est directement utilisée pour le contrôle de processus musicaux²⁰.

Enfin, les mouvements internes du corps tels que la tension musculaire, les battements du cœur, ou l'activité cérébrale sont envisageables pour l'interaction instrumentale en utilisant des capteurs de signaux bio-physiques (ECG, EEG, EMG, etc.). Une analyse détaillée de cette perspective est proposée par Atau Tanaka et Marco Donnarumma dans [TD19], qui sont eux-mêmes les auteurs de plusieurs projets et performances musicales dans cette veine.

17. Par exemple, le non-respect des règles de design édictées par Apple peut entraîner le refus de la publier (même gratuitement) sur l'app store.

18. En 1965, Merce Cunningham, John Cage et David Tudor utilisaient déjà des capteurs photo-électriques pour contrôler les processus musicaux dans la performance *Variation V*.

19. On pense ici aux webcams et aux nouveaux usages permis par les progrès de l'analyse d'image et d'apprentissage, à la Kinect de Microsoft, au Leap-motion, aux capteurs de type AHRS, etc.

20. Voir notamment les créations de Myriam Gourfink et Kasper Toeplitz, et les travaux de Frédéric Bevilacqua, e.g. [BSF11]

Héritage poétique de l'objet

C'est parfois l'absence d'héritage instrumental qui est recherchée. Martin Marier²¹ explique ainsi le design de l'interface "The Sponge" [Mar10] (figure 4.7), dont il souhaite qu'elle ne fasse référence à aucun instrument existant, afin que son apparence ne dicte pas de paradigme musical, ni ne crée d'attente particulière du public en terme de composition.

L'instrument est également un objet mis en scène et son rôle scénographique



Figure 4.7.: "The Sponge", une interface instrumentale de Martin Marier. Photographie © Preston Beebe.



Figure 4.8.: LUNGTA, une installation performative basée sur une matrice de feuilles de papier contrôlée algorithmiquement. Photographie © Patrick Saint-Denis.

vient parfois façonner son instrumentalité. C'est le cas par exemple dans les créations de Patrick Saint-Denis²², qui "*part de l'objet*" et "*poursuit l'idée des objets animés par le son*" (cf. figure 4.8 et annexe G).

L'idée d'utiliser la connotation des objets employés comme instruments de musique était également centrale dans la performance audiovisuelle *Donjon*²³ (Cécile Babiole, Jean-Michel Dumas, Vincent Goudard), dans laquelle des bornes d'arcades des années 1980 reconverties, à l'aide d'une électronique *ad hoc*, en interfaces de jeu pour le contrôle de l'image et du son en temps réel, faisaient écho à l'esthétique musicale et visuelle de la performance (figure 4.9).

L'interface est ainsi forgée par la force d'évocation poétique des objets, qui dépasse le strict cadre fonctionnel de la relation instrumentale. La mythologie qui leur est associée polarise le jeu du musicien et l'écoute du public, "*comme s'il y avait un arrière plan imaginaire de tout ce que ça draine d'histoire, de projections*" (cf. Annexe B). On retrouve cette même fonction poétique dans "l'Olitherpe", instrument joué par Patricia Dallio²⁴, qui se présente comme un agencement de capteurs intégrés dans des objets de récupération. Les associations morphologiques et fantasmagoriques entre mouvements de l'instrumentiste, fonction des capteurs et forme des objets

21. Voir les vidéos sur <http://www.martinmarier.com>

22. Voir les vidéos sur <http://www.patrickssaintdenis.com>

23. Plus de détails sur <http://vincentgoudard.com/donjon>

24. Site web : <http://www.patriciadallio.com>. Voir le documentaire "L'Olitherpe et la teneur de l'air" (<https://vimeo.com/224494409>) à propos des considérations faites ici.

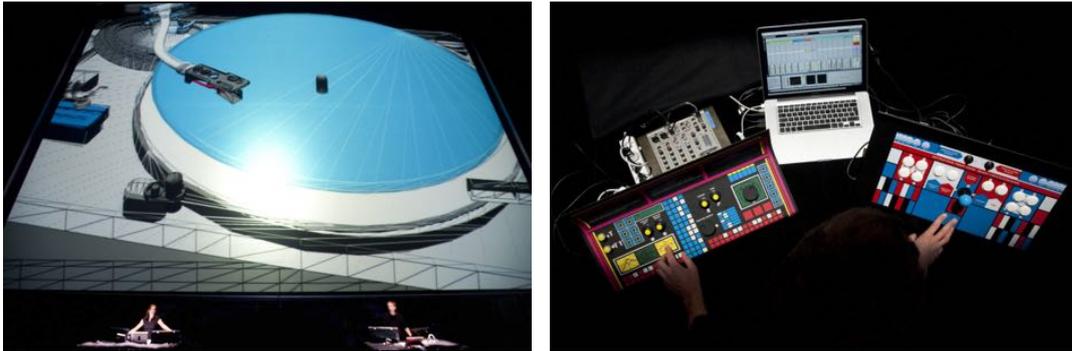


Figure 4.9.: Des bornes d’arcade, à l’esthétique très connotée, utilisées comme interface de jeu dans la performance audiovisuelle *Donjon*. À gauche : Vue d’ensemble de la scène, à droite : détail des interfaces de Vincent Goudard. Photographies : Sébastien Bozon.

tient un rôle essentiel dans la construction de l’interface de jeu : par exemple, le capteur infra-rouge évocant des yeux est intégré dans un vieux phare de vélo.

On peut voir dans la démarche artisanale et **DIY** des lutheries numériques l’importance accordée à la charge affective de l’instrument ; les interfaces numériques vendues dans le commerce (telles que les contrôleurs **MIDI**) sont en effet souvent issues d’une production industrielle et faites de matériaux plastiques qui, à l’inverse du bois d’un violon, ne portent pas la trace des fibres organique du bois ou celle du geste artisanal imprimé par le luthier, et se retrouvent, d’une certaine manière, dépourvues d’histoire.

4.2 Matériaux



Figure 4.10.: Matériaux sur la table d’un luthier numérique.

Une partie de la recherche sur les **IHM** est motivée par la perspective d’une “disparition de l’interface” ([Wei91 ; DLS01 ; HS17]), au profit d’une *informatique ubiquitaire* permettant une interaction directe avec les contenus plutôt qu’au moyen d’un support intermédiaire. Cette disparition de l’interface est liée – parfois à tort, comme nous l’avons objecté dans le chapitre précédent – à l’idée de “transparence” de l’interaction, c’est à dire de correspondance entre l’attente d’un utilisateur et le résultat de

son interaction avec la machine. Cette vision a été également appliquée au contexte de l'interaction musicale et, de façon relativement paradoxale, par des auteurs²⁵ fermement attachés aux notions d'*embodiment* et d'*énaction*²⁶.

Cependant, et paraphrasant la citation de Stravinsky en exergue de ce chapitre, les matériaux ne doivent pas être méprisés. Ils offrent de nombreuses possibilités, en terme de sensation, d'appui et de repos, et on peut s'en saisir aussi facilement que les délaissier – quand il s'avère plus compliqué de délaissier un système immersif, voire ses propres pensées. Cette section regroupe une liste non-exhaustive de matériaux pouvant se retrouver sur la table de travail d'un luthier numérique (cf. figure 4.10). Ils sont regroupés en familles : matériaux bruts, capteurs, processeurs, mais l'agencement instrumental rend parfois leurs frontières poreuses (par exemple, un textile resistif et une plaque de métal peuvent servir à réaliser un capteur de pression). Cette liste propose néanmoins un paysage général de ce répertoire, en en soulignant certains traits.

4.2.1 Matériaux structurels

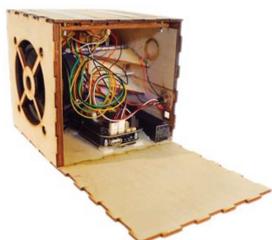
Dans les instruments “à contact” (c'est-à-dire dans lesquels l'interaction passe par un rapport tactile avec l'interface de jeu), les matériaux structurels définissent l'agencement physique du **DMI** : non seulement la distribution spatiale de son affordance mais également la cohésion et les liaisons mécaniques entre les différents capteurs. En effet, on touche rarement les capteurs de manière directe : ils sont recouverts, enveloppés, intégrés dans un objet matériel plus ou moins complexe, possédant son propre état de surface, son propre jeu mécanique, en liaison avec le reste du dispositif. Ils assurent la jonction autant que l'isolement entre les capteurs.

- **le bois** : Le contreplaqué est très souvent utilisé pour le prototypage rapide des **DMIs** (cf. figure 4.11a). Disponible en plaques de différentes épaisseurs, facilement découpable, perçable, collable et usinable par machine **CNC**, il est un matériau très répandu dans la fabrication **DIY** et les **makerspaces**. Par ailleurs, le bois est historiquement le matériau phare de la lutherie acoustique. Il est par

25. On peut notamment citer Marc Leman : “*What is needed is a transparent mediation technology that relates musical involvement directly to sound energy. Transparent technology should thereby give a feeling of non-mediation, a feeling that the mediation technology “disappears” when it is used. Such a technology would then act as a natural mediator for search-and-retrieval purposes as well as for interactive music-making.*” [Lem08] ou encore Sydney Fels : “*The more transparent the mapping is, the more expressive the device can be. The degree of mapping transparency for the player and audience form orthogonal axes of a graph into which devices can be placed. Full transparency for the player means that the device’s output exactly matches the player’s expectation and control.*” [FGM02].

26. L'*embodiment* (ou cognition incarnée) est un concept issu de la psychologie cognitive qui s'attache notamment à la façon dont notre connaissance du monde est façonnée par l'expérience sensorielle de l'ensemble du corps, et non seulement par l'activité cérébrale. Ce concept est souvent associé à la théorie de l'*énaction*, qui envisage la cognition comme le résultat d'une interaction dynamique entre un organisme en action et son environnement. Voir notamment les travaux de Francisco Varela et al. [VTR93].

conséquent présent dans les instruments augmentés issus de lutheries acoustiques, mais son importance historique l'ancre de surcroît dans l'imaginaire collectif de l'instrument de musique. L'image d'Épinal de l'atelier du luthier est remplie de copeaux et de ciseaux à bois et, de même que le clavier, le bois contribue à donner un sentiment d'instrumentalité à un dispositif numérique. Ainsi, bien que n'ayant aucun rôle fonctionnel (excepté celui de sa sensualité), le bois massif est utilisé pour son caractère noble et évocateur sur certains instruments numériques high-tech, tels que le Linnstrument, le SoundPlane (cf. figure 4.11b), ou encore le Touché²⁷ ;



(a) La D-Box (cf. [ZM14])



(b) Le SoundPlane. © Madrona Labs

Figure 4.11.: Contreplaqué ou massif : deux usages du bois dans les DMIs.

- **le métal** est couramment utilisé pour les châssis et les coques de revêtement des machines électriques et électroniques. En dehors de ses propriétés de résistance mécanique, sa conductivité permet d'isoler les composants de faux contacts et de perturbations électromagnétiques et notamment d'éviter le "bruit de masse" qui peut survenir quand un équipement électrique tel qu'un DMI n'est pas relié à la masse. Le métal possède également des propriétés de résonance acoustique qui en font un matériau intéressant pour la captation et la diffusion électro-acoustique, et utilisé par exemple dans le diffuseur "Gong" de l'onde Martenot ;
- **le plastique** offre de grandes facilités de thermoformage, moulage, collage, perçage, gravage, qui permettent d'obtenir toutes sortes de formes et notamment de s'adapter à l'ergonomie du corps (e.g. la main du MI). Les propriétés de transparence du **Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)**²⁸ permettent de l'utiliser au-dessus d'un écran. L'essor des imprimantes 3D depuis le début du XXI^e siècle a également contribué à son utilisation pour le prototypage rapide hors contexte industriel, dans les pratiques **DIY** et les **makerspaces** ;
- **la mousse** est généralement utilisée pour ses propriétés d'isolation phonique et vibratoire, mais également comme matériau tampon, pour augmenter la course des capteurs de pression (**FSR**). Il existe de nombreuses sortes de mousses, offrant des nuances différentes d'enfoncement, de résilience et affectant considérablement la sensation tactile sur ce type de capteurs ;

27. <https://www.expressivee.com>

28. Aussi connu sous le nom commercial Plexiglass(®).

- **le textile** a enfin été utilisé dans un certain nombre de **DMIs** et de manière plus générale dans tout le champ d'interaction entre le domaine de la confection textile et de l'électronique, généralement désignée sous le terme de “*wearable electronics*”²⁹. La possibilité d'intégrer des fibres conductrices entrelacées dans le textile (“*e-textile*”) a ainsi donné lieu à plusieurs développements de surfaces multitouch [Fre08a; DHS17; WP17] ou de vêtements munis de capteurs [HS08; Ser+14; Myl+15];
- **le verre** est utilisé en particulier pour le caractère cristallin de sa résonance acoustique (e.g. Cristal Baschet, glass-harmonica). Une étude des cristallogones et de l'exploitation des qualités timbrales du verre dans les instruments électroniques a été proposée dans [JIF10; FIJ10]. Sa transparence permet d'offrir un support tangible à un écran où une caméra (voir par exemple [SSP12] ou la section 4.5.3). Plus difficile à travailler, son usage est toutefois moins courant dans les lutheries en général.

Systèmes “intermédiaires” physiques

Outre l'aspect structurel “statique”, de nombreux systèmes mécaniques sont utilisés dans les **DMIs**, venant modifier l'agencement spatial de l'instrument, ou transformer la relation avec les capteurs. Certains sont directement issus des lutheries traditionnelles; c'est le cas par exemple pour les touches de clavier, dont l'implémentation varie entre le simple contact direct sur un interrupteur bipolaire, et des systèmes plus complexes imitant la mécanique du clavier de piano (lestage des touches, mesure de la vitesse d'enfoncement, de pression et de relâchement la touche, etc...), d'autres sont d'origine extra-instrumentale, par exemple le système de pantographe développé par Ali Moméni pour contrôler un stylet de tablette graphique, présenté dans [Zby+07] ou le système d'articulation des bras sur le Méta-Instrument de Serge de Laubier. La notion de “modèle intermédiaire”, transposée dans le domaine numérique, sera présentée plus en détail dans la section 5.2.

4.2.2 Feed-in : capteurs

Une grande diversité de capteurs est disponible sur le marché, mesurant différentes grandeurs physiques : position, distance, pression, orientation, flux d'air, son, lumière, humidité, température, champ magnétique, présence, contact, etc. Pour chaque grandeur mesurée, la donnée sera encore variable selon les caractéristiques du capteur : sensibilité, résolution, précision, linéarité, bande passante, temps de réponse, etc. À cette diversité s'ajoute encore le fait que les capteurs intègrent de plus en plus souvent des algorithmes de traitement de signal, parfois programmables. Ces capteurs dits “intelligents” peuvent notamment réaliser des opérations de filtrage, mais également de la fusion de données permettant de renvoyer des informations de

29. Cf. la revue proposée dans [SC14]

plus haut niveau³⁰. Enfin, comme nous l'avons dit précédemment, les capteurs sont rarement utilisés de manière brute mais s'intègrent dans un agencement à la fois matériel, mécanique, électronique et algorithmique qui affecte leur réponse du tout au tout.

L'utilisation spécifique de cette diversité de capteurs dans le domaine des lutheries numériques a été l'objet de nombreuses études qualitatives et quantitatives, menées en particulier depuis ces deux dernières décennies par l'équipe de Marcelo Wanderley à l'**Input Devices and Music Interaction Laboratory (IDMIL)**³¹. En fournissant une analyse détaillée de leurs caractéristiques et en les intégrant dans des réalisations instrumentales fonctionnelles et jouées, ces études fournissent une base de données documentaire inestimable pour aider les luthiers numériques à ne pas se perdre dans cette multitude d'options possibles.

Cependant, la généralisation de leur évaluation à des fins musicales reste délicate, en raison du fait que les instruments de musique constituent, comme nous l'avons déjà décrit dans les chapitres précédents, des **IHM**s d'un genre particulier.

Une analyse critique de la relation entre capteurs et fonctions musicales

Un certain nombre d'études ont par ailleurs proposé une analyse de l'adéquation entre capteurs et fonctions musicales (e.g. [VUK96; Gou02]), en mettant les aspects statique, dynamique, absolu ou relatif des valeurs transmises par les capteurs en regard de ces mêmes aspects appliqués à des valeurs musicales (en particulier la hauteur), dans l'optique d'évaluer qualitativement l'adéquation entre le choix des capteurs et le type de contrôle musical³². Bien qu'instructives et utiles dans la perspective d'une relation de mimétisme³³ univoque entre le mouvement gestuel et le mouvement d'un paramètre sonore, ces études mettent cependant de côté un aspect essentiel des **DMIs**, à savoir la possibilité sans pareil des ordinateurs à traiter le signal et changer son échelle, transformer le continu en discret, l'absolu en relatif, l'instantané en différé, le statique en dynamique, et inversement, et plus encore.

Ainsi d'après l'étude de Vertegaal (cf. figure 4.12), un potentiomètre linéaire serait très adapté à la sélection d'une valeur absolue de hauteur, tandis qu'un capteur de pression isotonique tel qu'un **FSR** serait plus adapté à sa modulation. La validité de ce modèle "subjectif" (selon les termes des auteurs³⁴) a été confirmée

30. C'est le cas par exemple sur les capteurs dits **AHRS**, sur les interfaces multitouch qui analysent une matrice de capteurs pour en extraire la position des points de contact

31. Voir notamment : [Wan+00; HW06; Mar+09; VW12; MW14] ainsi que le site <https://sensorwiki.org> qui rassemble un grand nombre d'informations techniques utiles sur les capteurs et les interfaces.

32. Cette perspective reflète de manière plus générale une tendance de l'époque à vouloir répliquer le modèle instrumental classique ou la relation entre le geste et le résultat sonore est très directe. La remarque en conclusion de l'article d'Ungvary et Vertegaal "(...) a good causal mapping can ensure that tension is properly translated to the audible result." en est révélatrice. Voir également la position de Claude Cadoz en ce sens au chapitre 3.

33. Et les relations de mimétisme jouent un rôle essentiel dans les lutheries numériques, comme l'analyse Thor Magnusson dans [Mag18]

34. Cf. [UV99]

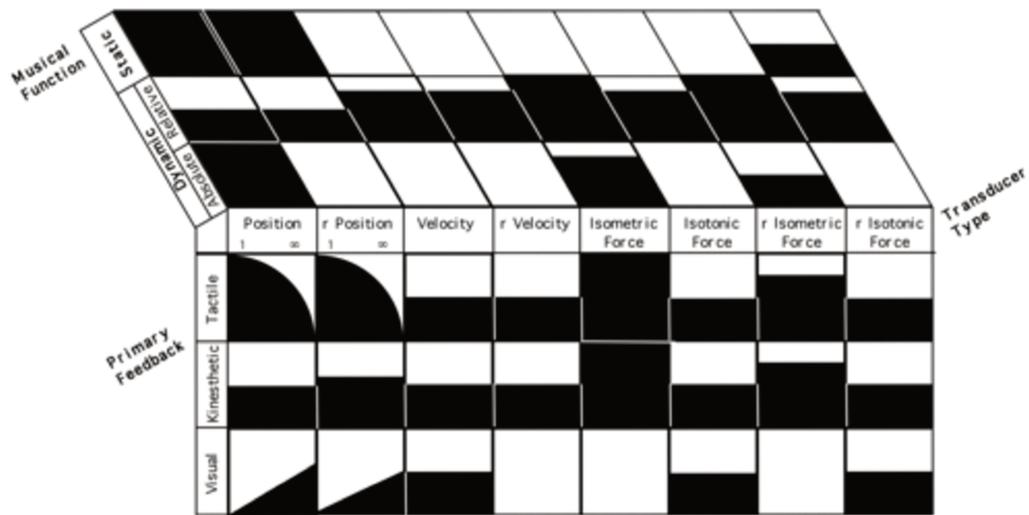


Figure 4.12.: Adéquation entre fonction musicale, transducteur et retour primaire, selon [VUK96].

expérimentalement par une étude récente³⁵, mais dans un contexte de laboratoire et non un contexte musical réel. Il est ici intéressant de remarquer qu’un clavier de synthétiseur implémente quasiment l’exact opposé de la recommandation susmentionnée (cf. figure 4.13), en permettant de sélectionner des hauteurs absolues par un ensemble de capteurs de pression et de vélocité sous les touches, tandis qu’un potentiomètre rotatif – mais présenté latéralement, ce qui rend sa course longitudinale plutôt que radiale –, le “*pitch-bend wheel*” permet leur modulation relative. La différence par rapport au modèle théorique d’Ungvary et Vertegaal tient au fait que le mapping n’y est pas *one-to-one* en ce qui concerne la hauteur, que le potentiomètre du *pitch-bend-wheel* est muni d’un ressort de rappel et que ces deux capteurs contrôlent la hauteur de manière conjointe.

On voit donc que l’usage, la taille, l’agencement des capteurs et le traitement de ses données contribuent pour autant, sinon davantage, à définir les relations entre capteurs et paramètres musicaux, que la nature de la variation du capteur lui-même. Le fait qu’un paramètre musical ne soit pas “facilement” modulable avec un certain type de capteur ne présage donc pas de l’inadéquation de ce capteur pour le contrôle du paramètre en question. Tout au contraire, cela peut faire partie de la *raison d’être* de l’instrument, dont la pratique s’apparente parfois davantage à celle du domptage d’un animal sauvage que celle de l’utilisation d’une machine docile³⁶.

35. Cf. [Mal+19]

36. On pense par exemple au Theremin, sur lequel le contrôle précis de la hauteur par la distance de la main à l’antenne est très difficile et dont la virtuosité que nécessite sa maîtrise constitue un intérêt évident de la performance d’un thereministe.



Figure 4.13. Un exemple de l'influence de l'agencement des capteurs sur leur usage musical : à gauche l'Onde Martenot : slider linéaire pour le contrôle de hauteur (avec la bague) et capteur de pression pour la modulation (d'intensité). À droite, un clavier MIDI : multiples capteurs de pression pour la sélection de la hauteur absolue et potentiomètre pseudo-linéaire pour la modulation (pitch-bend). Photographie de l'Onde Martenot : Wikipedia User :30rKs56MaE

4.2.3 Ordinateurs et DSP

Si les algorithmes d'un DMI sont virtuels, les ordinateurs qui les font tourner sont bien réels et physiques. La principale remarque que l'on puisse faire à leur sujet, concernant leur aspect matériel, est la prodigieuse chute de leur coût et de leurs dimensions, depuis leur invention. Une conséquence directe de leur prix abordable a été leur démocratisation, et la conséquence de leur miniaturisation, leur intégration progressive dans des objets mobiles³⁷. On peut distinguer dans cette évolution, cinq périodes d'une quinzaine d'années chacune, résumées dans le tableau 4.1, la dernière en date étant couramment désignée comme celle de "l'Internet des Objets" (IoT, *Internet of Things*).

Si l'audio numérique temps-réel a depuis son origine été incarné par des dispositifs dans lesquels l'ordinateur, trop volumineux et lourd, était séparé de l'interface, cette dernière évolution est tout particulièrement intéressante en ce qui concerne les DMIs. Elle augure la possibilité pour un public élargi de créer ses propres DMIs intégrant interface de jeu et partie computationnelle dans un seul et même objet portable et (re)programmable. Des cartes électroniques comme *Bela* ou *The Owl*³⁸ et des langages comme **FAUST** développé par le **GRAME** [OFL08] ou **SOUL** annoncé par Roli³⁹ reflètent cette tendance.

37. Le smartphone en est un exemple significatif, qui a notamment permis le développement d'instruments autonomes tournant sur smartphone ; voir par exemple le projet SmartFaust et la pièce "Virtual rhizome" pour smartphones de Vincent Carinola : <https://youtu.be/cGZB44KI9Y0>

38. *Bela* : <https://bela.io> ; *The Owl* : <https://www.rebeltech.org>

39. Announced at the Audio Developer Conference 2018. <https://youtu.be/-Gh1eKNaPdk>

Période	Nom	Taille	Public	Audio
1950 – 1965	macro-	salle	laboratoires	non temps-réel
1965 – 1980	mini-	meuble	entreprises	contrôle temps-réel
1980 – 1995	micro-	caisse	foyers	temps-réel sur DSP
1995 – 2010	laptop	livre	individus	temps-réel sur PC
2010 –	nano-	< main	plusieurs/individu	temps-réel sur mobile

Table 4.1.: Évolution de l'ordinateur : taille, accessibilité et capacités de calcul audio.

4.2.4 Feed-back : actionneurs

En “sortie” de la machine, à l’autre extrémité de la boucle instrumentale – si l’on peut dire – se trouvent les systèmes qui font le travail inverse des capteurs en venant agir sur l’espace sensible. Là encore, de nombreux types d’actionneurs existent pour agir sur diverses dimensions, quoique celles qui nous intéressent plus directement dans le contexte musical soient celles du son, du mouvement et de la lumière (dans la mesure où l’expérience musicale est aussi une expérience *gestuelle*⁴⁰ et visuelle du mouvement).

D’un point de vue matériel, l’actionneur se présente comme un composant électronique connectable à l’ordinateur, généralement au moyen d’un **Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)** et d’un amplificateur (parfois intégrés), qui adaptent le signal numérique au courant et voltage adaptés au transducteur. Le transducteur convertit ce signal électrique en oscillations acoustiques, en mouvements mécaniques, en intensités lumineuses, en champs électro-magnétique, etc.

L’actionneur n’est toutefois jamais utilisé “nu” (sinon dans un modèle théorique erroné) mais toujours couplé à un support matériel qui filtre, amplifie, oriente la diffusion des mouvements de l’actionneur pour les rendre perceptibles. Par exemple, un haut-parleur est inséré dans une enceinte qui oriente la diffusion du son vers l’avant de l’enceinte ; ou encore, un écran de vidéoprojection reçoit la trace lumineuse émise par un vidéoprojecteur.

Les caractéristiques du matériau auquel l’actionneur est couplé peuvent ainsi considérablement influencer sur le résultat sensible de l’action du capteur. Ainsi, un casque audio traduit le signal numérique en une vibration acoustique de manière relativement “plate”⁴¹ et directe à l’oreille, alors que ce même signal audio-numérique envoyé dans la corde d’une guitare via un transducteur tactile laissera entendre la résonance de la corde, de la caisse de guitare et du lieu (si par exemple on se trouve dans une salle de concert, plutôt que dans une chambre anéchoïque). De même, les rayons lumineux émis par un vidéoprojecteur pourront être envoyés sur des objets complexes (e.g. un bâtiment, ou de la fumée) qui transformeront la qualité du signal

40. Cf. la notion de “perception gestuelle” qui recouvre le toucher et les différents aspects proprioceptifs dans [CLF81]

41. C’est à dire sans distordre le signal, ni en fréquence, ni en amplitude, ni dans le temps.

émis.

La disposition spatiale des actionneurs joue également un rôle qu'il faut prendre en compte, car leurs actions peuvent selon les cas se compléter (e.g. une image vidéo composée de plusieurs écrans juxtaposés, un front d'onde recréé par de multiples haut-parleurs dans la **Wave Field Synthesis (WFS)**, etc.), interférer (e.g. l'opposition de phase qui crée des "trous" dans le spectre sonore quand des signaux harmoniques en phase synchrones sont envoyés sur plusieurs haut-parleurs) ou entrer en résonance (e.g. l'effet Larsen résultant d'une boucle entre capteurs et actionneurs se contrôlant et s'influençant mutuellement). La possibilité de pouvoir facilement assigner, sur ordinateur, des relations de correspondances entre n'importe quel type de capteur et n'importe quel type d'actionneur entraîne la possibilité de Larsens multi-modaux : par exemple un système dans lequel le son est capté par un microphone, utilisé pour générer une image, l'image utilisée pour générer du son, capté par le microphone.)

En dernier lieu, si l'on peut envisager une action directe des actionneurs sur nos organes sensibles, sans médiation intermédiaire⁴², il faut encore considérer les effets de notre système cognitif, qui en plus de filtrer, d'amplifier, de focaliser lui aussi (comme un matériau) discrimine, ordonne, interprète, construit, aime ou rejette les signaux que nous recevons, en s'ajoutant à la médiation complexe qui opère déjà entre la représentation numérique du signal sur l'ordinateur et la production du phénomène sensible provoqué par les actionneurs.

Outre les caractéristiques techniques de l'actionneur (puissance, bande passante, course, etc.), il faut donc ainsi prendre en compte les propriétés des matériaux auquel les actionneurs sont couplés, en y incluant les processus cognitifs à l'œuvre dans la perception de leur action sur le sensible⁴³. À défaut, s'intéresser à ces caractéristiques prises isolément risque de conduire à oublier leur articulation dans l'instrument lui-même, comme le note François Dumeaux : *"Quand tu composes par exemple une pièce, combien de fois je me suis retrouvé à aligner des belles courbes ... c'était pas avec les oreilles que je faisais ma courbe de volume, c'était avec mes yeux. Voilà, (...) tu te retrouves à faire des trucs absurdes, à être tatillon... [à dire, en parlant des valeurs MIDI de la courbe] "ah non c'était à 127!", alors qu'en fait on n'entend pas la différence..."* (entretien personnel, cf. annexe B).

42. Ce qui est le cas dans des dispositifs tels que la projection rétinienne, les implants cochléaires ou neuronaux.

43. L'étude des propriétés acoustiques des matériaux ainsi que des mécanismes de la psychologie cognitive mène par ailleurs à l'élaboration de modèles utilisables dans les lutheries numériques. Cf. section 5.2.

4.3 La part acoustique de l'interface des DMIs

Il faut ici rappeler que les DMIs, s'ils se caractérisent par l'usage de la computation numérique, sont aussi nécessairement des instruments électroniques, électriques et acoustiques. Ils portent l'héritage et les contraintes propres à ces différents médias. Mais le phénomène acoustique, omnidirectionnel et tri-dimensionnel dans le monde physique, est réduit dans l'électronique numérique à un signal mono-dimensionnel⁴⁴ et mono-directionnel⁴⁵, introduisant une distinction entre les "entrées" d'une part et les "sorties" d'autre part. La dimension acoustique des DMIs s'intègre donc dans un circuit ouvert ou fermé avec le système de computation via des transducteurs acoustiques – microphones en entrée, ou haut-parleurs en sortie.

4.3.1 Captation : microphones et transducteurs piezo

La captation en direct de son acoustique dans un instrument électronique est une pratique très courante chez les musiciens électroacoustiques, et permet des séquences de jeu en prise directe avec des sons concrets, amplifiés, enregistrés, transformés par l'instrument (ou non). En particulier, l'usage de microphones, notamment de transducteurs piezo dits "microphones de contact", vient redonner une composante acoustique au corps physique de l'agencement instrumental (et du musicien s'il utilise directement sa voix et son corps), cette composante acoustique "naturelle" étant sinon généralement couverte par la puissance du son amplifié. L'intérêt principal réside dans la richesse du signal capté, comme le note Miller Puckette⁴⁶ : *"(...) il y a peu chance que le frottement de balais sur un pad de batterie produise quoi que ce soit d'intéressant, alors que faire la même chose sur un instrument qui fonctionne directement avec le signal audio du microphone de contact (...) offre la possibilité de créer une large gamme de sons musicaux utiles."* L'usage d'algorithmes d'analyse en temps-réel permet, au-delà d'effets déjà existants dans le domaine électroacoustique, d'utiliser les caractéristiques du son comme paramètre de contrôle⁴⁷. Plusieurs stratégies sont possibles, consistant à utiliser le signal comme source d'excitation

44. Nicolas Collins, dressant une liste de traits distinctifs entre hardware et software dans [Col13] notait : "Traditional acoustic instruments are three-dimensional objects, radiating sound in every direction, filling the volume of architectural space like syrup spreading over a waffle. Electronic circuits are much flatter, essentially two-dimensional. Software is inherently linear, every program is a one-dimensional string of code."

45. Au niveau logiciel, des blocs bi-directionnels de plus haut niveau peuvent cependant être créés, comme par exemple dans la librairie de modèles physiques pour FAUST, cf. [BS12] et [Mic+18].

46. "(...) sliding a brush over a drum trigger isn't likely to produce anything useful, whereas doing the same thing on an instrument that operates directly on the audio signal from the contact microphone (as we do here) has the possibility to create a wide range of useful musical sounds." [Puc11].

47. L'interface Mogeest est par exemple principalement basée sur ce principe (<https://www.mogeest.co.uk>), voir également l'Annexe D.

de modèles physiques ([Mom05 ; SS09 ; MWS17 ; WO17 ; RD18]), de filtrages convolutifs ([STH14]), ou encore d'utiliser des paramètres de plus haut niveau extraits du signal. En particulier, le suivi temps-réel de pitch, s'il reste un problème ouvert dans le domaine des **Music Information Retrieval (MIR)**, bénéficie d'une histoire de plus de 40 ans ([Nol67]) et de nombreux algorithmes relativement efficaces sont disponibles ([Boe93 ; DK02 ; PHM15 ; Sch+18]). Le suivi de hauteur (ainsi que d'autres caractéristiques du son) a été particulièrement développé à l'**IRCAM** et est utilisé en concert, depuis le développement d'Antescofo⁴⁸, dans de nombreuses pièces mixtes pour instruments acoustiques captées en temps-réel⁴⁹.

4.3.2 Diffusion : haut-parleurs et transducteurs tactiles

Dans le cas le plus trivial, l'acoustique des **DMIs** se limite à la membrane du haut-parleur qui transforme *in fine* le signal audio-numérique en son acoustique⁵⁰. À la différence des instruments acoustiques, la diffusion et la projection du son est souvent séparée de l'interface gestuelle et, bien souvent, distante du musicien quand elle est "spatialisée". La spatialisation du son a en effet joué un rôle essentiel dans la motivation des concerts électroacoustiques "live", à une époque où l'arrivée du **Compact Disc (CD)** est vendue comme la possibilité d'une écoute de salon "haute-définition" équivalente à l'expérience du concert⁵¹, comme le raconte Serge de Laubier en parlant des origines du PSO⁵² et du Méta-Instrument dans les années 1980 : "*Si on entend mieux chez soi, c'est pas la peine de faire des concerts, donc il faut qu'au concert, il y ait une expérience unique qui vaille le coup de se déplacer, d'où réfléchir à un système de spatialisation.*" (communication personnelle, cf. annexe A).

Mais le retour acoustique peut également être perçu dans sa dimension tactile. Ronald Verillo montre que la sensibilité du doigt est capable de percevoir des vibrations jusqu'au kHz [Ver91] et dans les années 1990 plusieurs **DMIs** explorent les possibilités offertes par un retour vibrotactile dans l'interface de jeu [Cha93 ; Bon98]. Au début des années 2000, plusieurs études proposent une analyse de tels dispositifs à la fois sous l'angle technique et dans la perspective de leurs usages dans les **DMIs** (e.g. [RH00 ; MW06a ; Bir+05]). L'essor progressif des transducteurs tactiles à large

48. Antescofo est la dernière version des systèmes de suivi de partition développés à l'**IRCAM**. Au-delà du suivi, Antescofo intègre par ailleurs un système de programmation synchrone qui permet de synchroniser des événements (e.g. musicaux) avec des motifs repérés dans ce qui est capté par le système.

49. Un exemple en est la pièce *En Echo* de Philippe Manoury, une des premières pièces utilisant un suivi audio temps réel (sur la voix), ainsi que l'extraction des hauteurs des différents formants de la voix pour contrôler la synthèse.

50. Le choix des haut-parleurs peut jouer un rôle primordial, comme c'est le cas dans la musique acousmatique diffusée sur orchestre de haut-parleur ou "acousmonium". Voir en particulier [Moo06]

51. Comme en témoignent les publicités de l'époque, par exemple celle de Phillips mettant en scène un public les yeux bandés incapables de faire la différence entre le concert et l'écoute d'un **CD** : <https://youtu.be/jtNyWmD3EQ4>

52. "Processeur Spatial Octophonique", système de spatialisation inventé par De Laubier en 1986.

bande audio depuis la dernière décennie a renouvelé l'intérêt pour le vibrotactile en permettant de l'associer directement au retour audible via le rayonnement acoustique d'un matériau support, comme c'est le cas dans les instruments augmentés à contrôle actif tels que la *Smart Guitar* de HyVibe⁵³. Ce retour vibro-acoustique présente plusieurs intérêts :

- **offrir au musicien un retour vibratoire** (et/ou auditif), qui lui permet de mieux ressentir le résultat sonore et pouvoir plus facilement identifier sa contribution personnelle dans le cas de musique d'ensemble⁵⁴ ;
- **faciliter l'identification et la localisation** auditive des instruments et accroître la lisibilité des relations geste/son pour le public ;
- **bénéficier des propriétés acoustiques des matériaux** structurels de l'instrument, notamment leur rayonnement, beaucoup plus singulier que celui des haut-parleurs (dont la conception est généralement orientée vers un rayonnement homogène et une bande-passante plate) ;
- **introduire du feedback** dans le corps de l'instrument en recaptant cette vibration. Traité avec une latence suffisamment faible, le *feedback* laisse la possibilité de transformer dynamiquement les propriétés acoustiques des matériaux, comme le fait par exemple le système HyVibe⁵³ ;
- **communiquer des informations** à l'instrumentiste via un retour vibratoire, tel que le fretage virtuel⁵⁵, ou des informations sémiotiques de plus haut-niveau⁵⁶.

4.3.3 Boucler la boucle

Paradoxalement, si le résultat acoustique d'un instrument est *in fine* ce qui nous intéresse le plus, la part acoustique de l'instrument numérique est aussi la plus problématique. Sur un instrument acoustique, le contrôle du son se fait directement, de manière haptique. Il est ainsi possible d'exciter un élément résonant (e.g. une corde ou une peau) et d'étouffer sa résonance en appliquant simplement la main sur les éléments résonants. La surface du résonateur, qui présente un grand nombre de modes de résonance, permet de plus d'interagir directement avec tous ces modes. Par exemple, on peut sélectionner des harmoniques sur une guitare en positionnant son doigt sur un nœud de vibration du mode en question, ou encore obtenir un timbre "étouffé", filtré de ses modes d'ordre élevé par une technique de *palm-muting* sur l'extrémité des cordes d'une guitare. C'est une manière très intuitive d'agir avec le timbre d'un instrument de manière tangible.

53. <https://www.hyvibe.audio>

54. Voir par exemple les systèmes *SubPac* (<https://subpac.com>), ou *Basslet* (<https://lofelt.com>) commercialisés pour augmenter la perception du son par la vibration tactile.

55. cf. infra, section 4.4.3

56. Voir en particulier le travail de Gabriela Patiño-Lakatos et al. [PNG19] sur la communication intersubjective d'information par voie vibrotactile.

Dans le cas où le système microphone/DSP/haut-parleur est non-bouclé (typiquement, quand les haut-parleurs sont éloignés des microphones), on contrôle facilement le filtrage de la source, sans que se posent de vrais problèmes de stabilité, ce qui permet d'appliquer toute sorte de transformations actives ou passives, linéaires ou non.

Dans le cas où les haut-parleurs et microphones ne sont plus distants, mais intégrés à l'interface, les effets de feedback rendent les traitements beaucoup plus instables. La stabilité globale nécessite que le système électronique soit l'équivalent d'un système physique analogique [BSN12], ce qui contraint fortement l'espace des transformations possibles et constitue un problème de traitement du signal ouvert⁵⁷. La recherche dans le domaine du "contrôle actif" qui s'intéresse précisément aux possibilités de modification dynamique des propriétés acoustiques d'un matériau physique, a développé ces dernières décennies un ensemble de modèles [Bou11 ; Ben+15 ; Meu+15 ; Par+19] et de techniques pour faire face à ce problème, sans l'avoir totalement résolu. Essentiellement, il s'agit de soustraire la contribution de l'actionneur au signal capté par le microphone d'une part en échantillonnant à haute fréquence, de traiter le signal avec une latence la plus faible possible, et de n'utiliser que des filtres linéaires passifs pour éviter un repliement spectral qui pourrait faire diverger le signal.

À défaut d'une solution idéale, l'utilisation de microphones et de transducteurs acoustiques dans le corps physique de l'instrument reste une option intéressante tant au niveau sonore qu'au niveau tactile, sans nécessairement nécessiter une stabilité absolue du système. On peut ici tirer partie du fait que les gains en entrée comme en sortie peuvent être ajustés dynamiquement (et donc, être "joués" comme d'autres paramètres), soit pour utiliser alternativement le microphone et le haut-parleur, soit pour jouer de leur instabilité conjointe. Dans ce dernier cas, l'usage de filtres et de compresseur (notamment) permet de garder l'amplitude et la fréquence du signal dans une zone non-douloureuse de l'audition, et même, une zone riche en qualité de timbre. C'est cette solution pratique qui a été utilisée dans le développement du Filigramophone et du Xypre.

4.4 Ergonomie, ergodynamisme

4.4.1 Portabilité de l'interface

Avant d'évoquer l'ergonomie de l'instrument en situation de jeu, notons ici que l'instrument (et l'instrumentiste) a une vie en dehors de son usage musical sur scène. Le musicien est amené à [faire] transporter son instrument, à pied, en métro, en voiture, en camion, en avion... Le hardware, comme son nom l'indique, est

57. Voir notamment les travaux de l'équipe S3AM de l'IRCAM sur ce sujet : [MH18 ; FH14 ; MH19]

“dur”, concret, matériel. Son poids et ses dimensions affectent sa transportabilité et constituent un facteur contraignant pour le musicien. Sa dématérialisation dans des alternative logicielles —*soft*, plus douces et légères— permet d’intégrer dans les limites acceptables pour leur transport, certaines fonctionnalités offertes par les équipements *hard*. En particulier, la virtualisation des outils d’ingénierie du son (table de mixage, égaliseurs, compresseurs et autres effets) permet leur intégration dans l’instrument lui-même⁵⁸. Cela étant, la part scénographique des instruments fait que leurs dimensions peuvent également être impraticables à dessein⁵⁹ pour confronter le musicien et le public à un objet hors-norme⁶⁰.

Les instruments peuvent prendre différentes formes, plus ou moins grandes, qui définissent à la fois leur portabilité ainsi que la posture du musicien envers son instrument. On peut distinguer quatre types d’interface de jeu impliquant différents rapports de proximité avec l’instrument :

- **interfaces portables**, qui *adhèrent* au corps. L’interface est *portée* (comme un habit) et les mouvements du corps sont captés directement et en permanence, par exemple : le *Méta-Instrument 3* de Serge de Laubier, *The Hands* de Michel Waisvisz, le *Myo* d’Atau Tanaka, la guitare électrique, etc. ;
- **interfaces portatives**, qu’on peut *prendre* et *tenir* dans ses mains pour en jouer, mais également *poser* (comme un ustensile), par exemple *The Sponge* de Martin Marier, un tambourin, un gamepad, un harmonica ;
- **interfaces statue**⁶¹ : objets trop grands pour être déplacés (où qui n’a pas vocation à) mais autour duquel on peut tourner. L’instrument est *touché* (comme une sculpture), par exemple les claviers, et pad **MIDI**, les “intonarumori” de Nicolas Bernier et Martin Messier⁶², les synthétiseurs modulaires en rack, le Théremin, etc.) ;
- **interfaces immersives** : captant une variation particulière dans l’intégralité de l’environnement. L’instrument est *enveloppant* (comme un lieu), et joué en étant *parcouru*. Il m’entoure mais je n’ai pas directement accès à lui, par exemple les instruments basés sur caméra ou Kinect, les installations sonores utilisant la réalité virtuelle (CAVEs, etc.).

58. Ainsi, Serge de Laubier qui utilisait jusqu’en 2005 une table de mixage Yamaha O2R (31kg) motorisée et contrôlée directement depuis son Méta-Instrument, ainsi qu’un échantillonneur EMU (4,5kg) a progressivement conçu des émulations logicielles tournant sur un MacBookPro (1.8kg) de ces équipements pour alléger le transport. Pour une analyse approfondie de cette importance critique du poids des **DMIs**, voir l’analyse de John Richards dans [Ric06]. Par ailleurs, les émulations logicielles permettent de réaliser d’autres fonctions qui n’étaient pas présentes dans les modèles originaux. De même, voir les propos d’Adrien Mamou-Mani (annexe F) sur l’intérêt que trouvent les ingénieurs du son à ce qu’une partie du traitement audio soit pris en charge par l’instrument lui-même

59. Le but d’un instrument n’est pas de nous simplifier la vie, alors que l’absence d’effort constitue “une vertu cardinale dans la mythologie de l’ordinateur” comme le notait Joel Ryan dans [Rya91].

60. Cf. par exemple le projet “Machine _ Variation” de Nicolas Bernier et Martin Messier, et les observations de Bernier en annexe H.

61. Claude Cadoz nomme ce type de configuration “dispositif à vis-à-vis” dans [Cad94]

62. Voir <http://www.lachambrede machines.com>

Ces catégories ne sont pas étanches ; par exemple, un synthétiseur à clavier se jouera aussi bien assis, que debout, que porté en bandoulière dans le cas des *Keytars*⁶³. On représenterait mieux ces catégories par un espace continu, polarisé par la taille de l'interface en abscisse et la permanence du contact requis par l'instrument en ordonnée (figure 4.14). L'origine des abscisses serait alors un rapport de taille à la limite de ce qu'il est possible de porter, et qui constitue un point de clivage en terme d'usage. L'ordonnée s'étend entre deux extrêmes représentant un contact permanent (tel que dans une installation immersive) et un contact inexistant, ou du moins limité à son activation (instrument autonome).

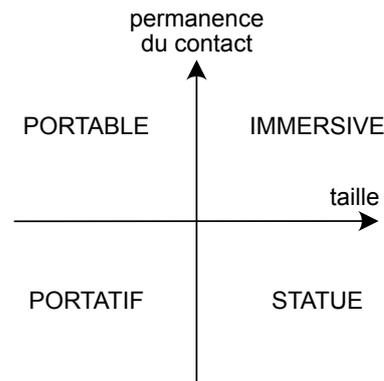


Figure 4.14.: Portabilité et permanence du contact avec l'interface.

4.4.2 Disponibilité de l'interface

L'agencement modulaire des **DMIs** entraîne par ailleurs un temps de démontage-remontage de l'instrument avant qu'il soit possible d'en jouer. Leur fonctionnement nécessite généralement la disponibilité de prises de courant à proximité, voire de réseau WiFi. Il faut ensuite câbler les haut-parleurs distants (pour la spatialisation du son), les capteurs et/ou actionneurs parfois distants eux-aussi (e.g. lors de l'usage de caméra), les machines qui fonctionnent en réseau, et les divers modules (carte son, interface d'acquisition, microphones, boîtes de direct, etc.) Se rajoute ensuite le "temps de lancement", c'est-à-dire le temps de démarrer l'ordinateur, de lancer le(s) logiciel(s) nécessaire(s), d'ouvrir le patch ou le script adéquat, et éventuellement de l'initialiser avec la bonne configuration. S'ajoute enfin le temps préalablement passé (même si les surprises au moment du concert peuvent arriver) à maintenir la partie algorithmique opérationnelle avec les changements d'**OS** et les mises à jour logicielles, comme il a été souligné dans le chapitre 2 et dans l'étude de Morreale et McPherson [MM17].

Le terme "plug'n play" est couramment utilisé pour qualifier une disponibilité immédiate de l'instrument, mais sur de tels dispositifs, le temps de branchement peut dans les faits s'avérer assez long. Il est important de prendre en compte cette durée dans le design d'un **DMI**, car tout le temps passé sur la partie de montage technique est pris au détriment du temps de jeu⁶⁴. Notons toutefois qu'à la différence des instruments acoustiques, les **DMIs** ne nécessitent généralement pas de temps

63. contraction des termes *keyboard* et *guitar* désignant les synthétiseurs à clavier qui se portent comme les guitares électriques.

64. Cf. les propos de Nicolas Bernier (annexe H), François Dumeaux (annexe B) et Bruno Zamborlin (annexe D) dans les entretiens.

d'accordage et ne sont généralement pas sujets aux conditions de température et d'hygrométrie requérant un ré-accordage et un "temps de chauffe", particulièrement pour les cuivres.

4.4.3 Se repérer dans l'interface

L'apprentissage et la maîtrise d'un instrument passe par une exploration multimodale qui implique l'ensemble de la perception. Les **DMIs** présentent cette particularité par rapport aux instruments acoustiques que la relation entre une action sur l'interface et la réaction de l'instrument n'est pas *a priori* basée sur un rapport causal obéissant aux lois de la physique, mais sur une relation programmée, qui constitue comme le dit Thor Magnusson "*une théorie de la musique en soi*" [Mag19b], avec ses règles propres et d'éventuels scénarios évolutifs. Cette exploration peut s'appuyer sur un certain nombre de repères, présentés dans cette section.

Repères visuels

Le premier rapport avec un nouvel instrument inconnu est visuel : avant même de sonner, l'instrument exhibe sa structure spatiale, d'éventuels éléments reconnaissables : marqueurs, touches, poignées, symboles, etc. On pourrait parfois presque imaginer la manière dont il va sonner en le regardant : une interface pleine de *pads* présage d'un jeu rythmique tandis que la surface lisse d'une tablette graphique laisse imaginer des sons plus continus et un jeu sur le timbre. Il est fort possible que l'on se trompe en spéculant de la sorte, mais il est difficile d'échapper à ces associations intuitives suscitées par nos expériences passées. Ces différents aspects visuels seront présentés plus en détail dans le chapitre 6.

Repères sonores

Les termes de l'exploration sonore ont déjà été en partie présentés dans la section 2.4. La pratique de l'écoute et de la mémorisation des correspondances entre actions sur l'interface et résultat sonore contribue à enrichir son "solfège de l'audible" [Sav10] et découvrir comment ces différents points de résonance (ou *sweet spots*) s'articulent topologiquement, voire chronologiquement, sur l'interface de jeu.

Notons la possibilité d'utiliser des *earcons*⁶⁵ et autres effets sonores venant notifier de l'usage adéquat (ou non) des fonctions offertes par une interface, par exemple les "pops" associés à la pression d'un bouton, ou le bruit d'un cadenas qui s'ouvre ou se ferme pour un interrupteur. Les *earcons* sont rarement utilisées dans les **DMIs** en raison de l'interférence évidente avec le son musical. Ils ne sont toutefois pas à exclure, car il reste possible de séparer ces signaux informatifs du signal audio

65. Le terme *earcon*, construit comme un jeu de mot à partir du terme "icon" (prononcé eye-con en anglais), est un son bref et distinctif utilisé pour représenter un événement spécifique ou pour transmettre une information.

musical (par un retour au casque sur un canal différent par exemple).

Il faut noter ici le cas particulier de l'utilisation du sonore pour le guidage de personnes malvoyantes. Les **DMIs** rendent en effet possible l'implémentation d'un système d'assistance vocale⁶⁶ pour délivrer des informations *ad-hoc* concernant l'usage de l'instrument. Nous avons implémenté un tel système dans la *Table Sonotactile Interactive* (cf. figure 4.15), un dispositif imaginé pour la *Maison des Aveugles*⁶⁷ de Lyon par la compositrice Pascale Criton en collaboration avec Hugues Genevois de l'équipe **LAM** et Gérard Uzan, chercheur en ergonomie du handicap.



Figure 4.15.: La Table Sonotactile Interactive : un dispositif interactif d'écoute installé à la Maison des Aveugles. Photographie © Anne Maregiano.



Figure 4.16.: La Table Sonotactile Interactive : détail du pad. Photographie © Anne Maregiano.

Repères tactiles

L'état de surface des matériaux, la présence de reliefs (glissières, concavités, etc.) et de jeux mécaniques (e.g. l'enfoncement élastique d'une mousse recouvrant les pads **MIDI**), contribuent à l'orientation tactile sur l'interface et à augmenter la cohérence entre le sens du toucher et la perception auditive des sons produits par le **DMI**⁶⁸.

Un grand défaut des interfaces graphiques dites "tactiles" est, ironiquement, que leur surface est généralement dépourvue de tels repères : aucune aspérité ne vient guider la main pour qu'elle trouve son chemin sur la matrice des capteurs, sans l'aide de la vue (ou de signaux sonores, comme vu ci-avant).

Différentes stratégies présentées ci-après peuvent venir partiellement compenser cette lacune. Leur application dépend à la fois de la technologie de captation du *multitouch*, ainsi que du type de repère, statique ou dynamique, que l'on souhaite.

Repères statiques

Les surfaces multitouch permettent d'agencer de multiples zones virtuelles d'in-

66. Les assistants vocaux se sont largement développés depuis la dernière décennie avec l'émergence des smartphones. *VoiceOver* sur iOS et *TalkBack* sur Android permettent ainsi de parcourir quasiment toutes les informations et fonctions disponibles sur l'écran, via des gestes indépendants de la position à l'écran des zones d'information/interaction et une énonciation vocale des fonctions à disposition et de leur valeurs.

67. La *Table Sonotactile Interactive* fait partie d'un plus large projet : "La Carte Sonore" proposé par Anne Maregiano à la Villa Saint-Raphaël <https://www.mda-lacartesonore.com>

68. Voir par exemple les glissières sur le pad d'interaction de la table sonotactile interactive, qui guident les doigts sur les potentiomètres linéaires, figure 4.16

teraction : l'écran d'un smartphone présentent ainsi des boutons, des sliders, des menus, etc. activant des fonctions dissociées, sans qu'il soit tactilement possible de sentir leur contour. Les interfaces "Joue"⁶⁹ ou "Sensel Morph"⁷⁰ commercialisent différents revêtements (*overlays*) interchangeable pour leur surface *multitouch*. Ces surfaces sont toutefois dépourvues d'écran graphique, ce qui évacue le problème de la transparence de ces repères. Une solution bon marché consiste à utiliser de la bande adhésive (cf. figure 4.17). Un intermédiaire plus fin entre l'éphémère bande adhésive et une solution fixe consiste à utiliser une plaque de PMMA (cf. figure 4.18) intermédiaire entre le doigt et la surface tactile, qui permet de graver des motifs potentiellement plus complexes. Cette dernière option n'est toutefois pas toujours réalisable sur les écrans à technologie capacitive, qui nécessite généralement que le doigt soit directement en contact avec l'écran.

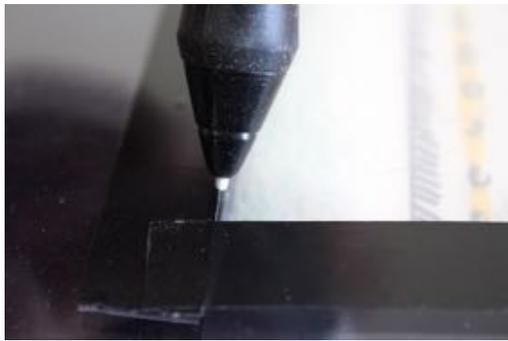


Figure 4.17.: Bande adhésive comme repère tactile du contour de la zone d'interaction de la tablette graphique dans le Filigramophone.

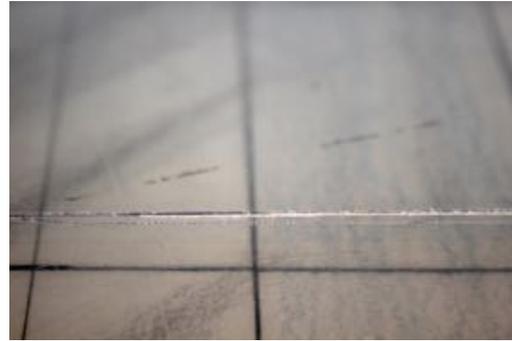


Figure 4.18.: Gravure d'une ligne de repère tactile sur la plaque de PMMA du Filigramophone.

Repères dynamiques : retours haptique et audiotactile

Les systèmes à retour haptique rendent tangible le contour, la résistance physique ou la vibration d'objets virtuels dynamiques. L'ACROE a été pionnière dans cette direction appliquée à la lutherie numérique et développé à la fois des interfaces robotisées ainsi que les logiciels permettant une écriture musicale avec de telles interfaces. Plusieurs projets ont donné lieu à des prototypes d'écrans visuels intégrant un retour haptique, de manière globale [SPB13], ou distribué sur toute la surface par une matrice de mini-actionneurs [Fol+13]. Des études ont démontré le bénéfice des interfaces haptiques sur l'évaluation qualitative de la relation instrumentale [OMo01 ; YMW17], mais la plupart d'entre elles restent encore à l'état de prototype et leur coût ainsi que la complexité de leur conception mécanique constituent souvent un facteur prohibitif.

L'accessibilité des transducteurs tactiles, ainsi que la qualité de leur bande passante a considérablement augmenté depuis la dernière décennie et offre une alterna-

69. <https://www.play-joue.com>

70. <https://sensel.com>

tive plus souple et économique pour la transmission d'information tactile. La solution la plus simple et directe pour établir un lien entre la perception auditive et tactile consiste à envoyer le résultat sonore (qui serait envoyé sur des haut-parleurs) dans le corps de l'instrument. Cette solution n'ajoute pas *a priori* de repères autres que ceux perçus par les oreilles, mais la sensation vibratoire qui vient se coupler à la perception kinesthésique des gestes génère une sensation complexe perçue comme un tout cohérent, qui fusionne davantage encore que le simple couplage entre l'ouïe et la sensation kinesthésique, et qui semble aider la perception et la mémorisation spatiale de l'instrument. En particulier, utiliser le stylet d'une tablette graphique comme une tête de lecture, en associant sa position sur la tablette à la position temporelle de la lecture d'un échantillon sonore résulte en un troublant renversement des sens : la vibration recrée un état de surface fictif sur l'étendue de la tablette, qui donne l'impression d'être la cause du son entendu. D'autres essais ont été effectués dans la perspective d'améliorer la cohérence entre la sensation tactile et auditive. En particulier, l'accentuation des phénomènes transitoires, par un calcul différentiel du spectre pondéré par une courbe isosonique, semblait donner de meilleurs résultats. C'est assurément un champ riche et fertile, pour lequel différentes solutions sont envisageables et qu'il conviendrait d'étudier plus en profondeur.

Un autre type de repère audiotactile qui s'inspire de cette expérience d'un état de surface virtuel, sans toutefois être aussi directement en relation avec le son audible, consiste à réaliser un "fretage virtuel" de la surface de jeu. L'envoi d'impulsions synchronisées à la position du stylet dans un transducteur tactile plaqué sur une tablette graphique, permet de simuler des petites "bosses" sur sa surface (un peu comme les frettes sur le manche d'une guitare). Ce fretage peut aider, par exemple, à sentir les paliers dans la progression d'un geste continu (e.g. les différentes "notes" d'une échelle de hauteur) (cf. figure 4.19) ou les contours d'une zone d'interaction⁷¹.

Anamorphose dynamique

Enfin, il est possible de procéder algorithmiquement à des anamorphoses de l'espace de jeu. Cette solution ne permet pas de "créer" des repères tactiles à proprement parler, mais d'adapter dynamiquement l'espace de l'interaction pour que le geste puisse s'affranchir en partie du besoin de ces repères.

Un exemple classique est le verrouillage des composants d'une **interface graphique (GUI)** pendant l'interaction : si l'on clique sur un bouton ou un *slider*, l'interaction est maintenue avec le composant tant que le doigt est en contact avec la surface tactile, ce qui permet des gestes plus amples utilisant l'intégralité de la surface de l'écran tactile, plutôt que de les restreindre à une petite zone⁷². Cette

71. Cette technique permettant de simuler un relief par une simple vibration est notamment utilisée depuis 2015 dans les dernières versions de boutons d'iPhone et de trackpad sur les ordinateurs portables Apple, une fonctionnalité connue sous le nom "Force touch".

72. Cette solution a notamment été implémentée dans la librairie mp.TUI présentée au chapitre 6.



Figure 4.19.: Frettage virtuel par retour vibro-tactile : le transducteur tactile (en bas à gauche) émet une impulsion à chaque fois que le stylet franchit une frontière virtuelle (matérialisées par les lignes noires sur le calque).

stratégie d'interaction s'appuie sur la loi de Fitts [Fit54], caractérisant l'*indice de difficulté* d'une tâche de sélection par pointage, couramment exprimée en terme de temps mis à réussir ce pointage, par la relation (formulation de MacKenzie) :

$$T = a + b \log_2 \left(1 + \frac{D}{L} \right)$$

- où: T = temps moyen pris pour effectuer le mouvement ;
 D = distance séparant le point de départ du centre de la cible ;
 L = largeur de la cible mesurée selon l'axe de mouvement ;
 a, b = variables pouvant être déterminés empiriquement.

Un autre exemple d'anamorphose, plus directement lié au domaine musical, est l'algorithme de correction dynamique de la hauteur⁷³ à l'attaque, présenté dans [GGF14] et sur la figure 5.8.

Repères somesthésiques

Enfin, le développement des réflexes moteurs qui permettent la virtuosité de jeu sur une interface passe par une cognition incarnée, qui s'appuie sur notre perception *somesthésique*, c'est-à-dire l'ensemble des sensations internes du corps. En particulier, parmi les différentes sensations que recouvre la somesthésie, la *proprioception* désigne la perception de la position des différentes parties de notre corps dans l'espace, recouvrant le sens du mouvement (*kinesthésie*) et le sens de la posture (*statesthésie*). La somesthésie est particulièrement mise à contribution dans les **DMIs** qui ne présentent pas d'interface physique tangible, tels que ceux basés sur des gestes libres (e.g. captés par une Kinect), et peut s'avérer être la seule sensation directe

73. L'algorithme s'applique à la hauteur, comme à n'importe quel autre paramètre qu'il pourrait être intéressant de contrôler à la fois de manière continue et discrète.

(i.e. non médiatisée par la machine) disponible dans les **DMIs** basés sur les signaux biologiques (e.g. tension des muscles du Myo).

Durant la phase de conception d'un **DMI**, cette exploration est double : il s'agit à la fois d'intégrer la topologie physique de l'instrument (disposition des capteurs, espace du mouvement autour de ceux-ci, course sensible et courbes de réponse...) mais également la topologie virtuelle des algorithmes manipulés, c'est à dire la redistribution dynamique de cette spatialité pendant le jeu musical. Par exemple, dans le cas de la manipulation d'un modèle intermédiaire dynamique⁷⁴ (e.g. un bâton de pluie virtuel), le résultat d'un même geste pourra différer en fonction de l'état du modèle intermédiaire (selon que les grains de sable du bâton de pluie sont d'un côté ou de l'autre).

Ainsi, le positionnement des capteurs dans l'interface *Xypre* a été revu en fonction de gestes qui venaient naturellement lors du jeu avec le *Filigramophone*. Par exemple, le geste de percussion sur le côté du châssis venait naturellement dans la course du bras pivotant autour de l'articulation de l'épaule, alors qu'aucun capteur n'avait été positionné là. C'est par ailleurs un geste de percussion qu'on retrouve dans des instruments de percussion comme le Mridang indien, et que l'auteur ayant pratiqué le tabla trouvait relativement aisé.

4.4.4 Ergodynamie

Les différents aspects qui contribuent à l'ergonomie de l'interface de jeu d'un **DMI** sont ainsi à la fois ancrés dans le corps matériel de l'instrument, mais également dans les artéfacts sonores, visuels ou vibratoires produits par l'ordinateur. À ces aspects cognitifs s'ajoute l'expérience personnelle et la reconnaissance de tous les éléments appartenant au répertoire culturel dans lequel un nouveau **DMI**, encore inconnu, s'inscrit.

Thor Magnusson propose la notion d'*ergodynamie* "comme un terme qui s'approche d'une certaine manière de l'usage du mot 'gameplay' dans le domaine des jeux vidéo, mais qui traduit également une conscience et une expérience de l'instrument dans des pratiques incarnées, historiques et esthétiques. L'*ergodynamie* concerne l'objet étudié, mais elle se rapporte aussi bien au contexte culturel qu'à des expériences personnelles subjectives de cet objet."⁷⁵

74. Cf. section 5.2

75. "(...) the word *ergodynamics* is proposed as a term that somewhat relates to the use of 'gameplay' in computer games, but further signifies an awareness and experience of the instrument in embodied, historical, and aesthetic practices. *Ergodynamics* are of the object studied, but it relates equally to cultural context and subjective personal experiences of it." [Mag19a].

4.5 Un exemple pratique : phylogénèse d’interfaces de type tablette

Cette partie retrace le développement d’une série d’interfaces de **DMIs**, basée sur un archétype d’instrument de type “tablette”. On peut voir dans la tablette graphique des liens évidents avec les gestes du dessin et de l’écriture, tandis que l’usage généralisé des écrans *multitouch* sur les smartphones a fait émergé un grand nombre d’habitudes d’interaction (ainsi que les attentes que ces habitudes génèrent) telles que les mouvements de balayage, de *pinch-to-zoom*, de défilement à deux doigts, etc.

La conception d’une nouvelle interface pour la performance musicale est une tâche complexe, nécessitant de nombreux aller-retours entre conception, fabrication et pratique musicale. Le filigramophone est une interface qui a connu plusieurs versions, suffisamment différentes pour les considérer comme des instruments distincts et suffisamment similaires pour y voir la continuité d’une seule et même famille d’instruments.

4.5.1 Origine : la tablette graphique (2005)

La tablette graphique (précisément un modèle Sapphire de Wacom) a été l’interface originelle qui a servi de base au filigramophone. J’ai commencé à l’utiliser dans le cadre du développement de la Méta-Mallette⁷⁶. Le choix de cette interface était motivé par la diversité de gestes expressifs possibles sur une tablette graphique, ainsi que par son coût relativement abordable⁷⁷ comparativement à la plupart des interfaces **MIDI**, permettant de la déployer en nombre, dans le cadre d’activités pédagogiques pratiquées en groupe, dans des écoles et autres collectivités.

À l’origine destinées aux graphistes, les tablettes à stylet ont également été utilisées pour la composition. Le système *UPIC* inventé par Iannis Xénakis (figure 4.21) ou le *Fairlight CMI* (figure 4.20) utilisaient tous les deux, dans des directions relativement différentes, une interface basée sur la tablette et le stylet. En dehors de son usage pour la composition, un certain nombre de musiciens, compositeurs et concepteurs de **NIME** l’ont par ailleurs adoptée pour la performance⁷⁸. Nicolas d’Alessandro a consacré une partie de son travail de thèse [dAl09] à ce sujet, en proposant une étude détaillée des différentes échelles de mouvements dans le geste

76. Logiciel pour la pratique collective de musique par ordinateur développé par l’association Puce Muse, au développement duquel j’ai activement participé entre 2005 et 2008.

77. un peu moins de 100€ en 2005, autour de 50€ pour un modèle équivalent en 2019.

78. Notamment à l’**IRCAM** (voir [Wan+00]), au **Center for New Music and Audio Technologies (CNMAT)** (voir [Zby+07]), au **Laboratoire de Mécanique et d’Acoustique de Marseille (LMA)** [Cou04], au **Laboratoire d’Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l’Ingénieur (LIMSI)** [FLD11] puis dans l’équipe **LAM** [Xia+19] avec le Chorus Digitalis, mais on peut également citer Pierre Jodlowski (voir *Music, Violence and other stories* : <https://youtu.be/pLARXmGwIO4>) ou Jesper Nordin (voir le projet *gestrument* <https://gestrument.com>).



Figure 4.20.: Le Fairlight CMI créé en 1976, un synthétiseur et séquenceur utilisant un écran à stylet. Photographie : Peter Wielk.



Figure 4.21.: La station UPIC inventée par Xénakis permet de dessiner des formes graphiques libres, pouvant être lues de différentes manières pour être traduites en son. (Image extraite du documentaire “Avenir UPIC Xenakis”, centre Xénakis)

du dessin et de l’écriture, liées à l’articulation entre doigts, poignet et épaule. J’avais pour ma part utilisé la tablette graphique dans différents projets⁷⁹, comme un composant parmi d’autres interfaces MIDI ou de type joystick, avant de développer plus particulièrement des programmes pour cette interface.

Un des inconvénients de la tablette Wacom est que les contours de la surface utile, plus petite que la surface de la tablette⁸⁰, sont à peine perceptibles, tant visuellement qu’au niveau tactile. Cela s’avère problématique quand on manipule certains processus sonores (et non un pinceau dans PhotoShop, tel que l’usage de la tablette le prévoit), car le regard de l’instrumentiste est souvent déjà occupé par l’attention qu’il/elle accorde aux autres instrumentistes, à une partition, ou un chef d’orchestre. Une première adaptation a donc consisté à rajouter des bandes adhésives permettant de matérialiser cette frontière, visuellement et tactilement (cf. figure 4.22).

En 2007, dans l’équipe LAM, Hugues Genevois avait acquis de nouveaux transducteurs tactiles large bande⁸¹. Nous avons fait l’expérience d’en placer un sous une tablette graphique, sur laquelle nous contrôlions la lecture d’un échantillon en se servant du stylet comme d’une tête de lecture virtuelle. La sensation haptique résultant était tout à fait saisissante et donnait l’impression que la surface de la tablette avait un relief physique similaire aux reliefs perçus dans le son : littéralement, l’impression de “toucher le son”. Ce “relief” artificiel est bien entendu éphémère car ces transducteurs ne transmettent pas le continu et leur course est faible⁸², mais la sensation est tout à fait confondante. J’ai donc utilisé ce système directement sur

79. *filigram*, *Media Music room*, cf. <http://vincentgoudard.com>.

80. Cela permet de ne pas “tomber” hors de la tablette.

81. Cette nouvelle génération offrirait une bande passante de l’ordre du Hz jusqu’à plusieurs kHz, bien supérieure aux actionneurs linéaires, ainsi qu’une dynamique supérieure à celle des transducteurs piezo. Cette technologie a depuis équipé de nombreux cinémas pour donner au spectateur une expérience plus tactile du son.

82. Ceci les différencie nettement des systèmes de retours haptiques tels que développés, en particulier, à l’ACROE.



Figure 4.22.: Tablette Wacom utilisée à l'origine. Des adhésifs rajoutés en bordure guident la perception haptique, un point central sert de repère visuel.

la tablette graphique, qui était une sorte de prototype du Filigramophone présenté ci-après.

4.5.2 Le Filigramophone : une tablette augmentée (2013)

L'expérience décrite précédemment a suscité le développement d'une interface plus intégrée, augmentant la tablette graphique d'une dimension acoustique bi-directionnelle, en captant d'une part le son de la tablette à l'aide de microphones piezo et en diffusant des signaux audio dans la tablette à l'aide de transducteurs tactiles.

Intégration des microphones piezo

En effet, si la tablette graphique est une interface relativement expressive, par la possibilité qu'elle offre de contrôler trois, voire cinq variables continues en même temps⁸³, sa fréquence d'échantillonnage reste relativement faible⁸⁴ et la latence importante⁸⁵. Le désir de l'augmenter de microphones est ainsi largement lié à

83. La position horizontale et verticale, la pression, et sur certains modèles, l'inclinaison du stylet selon les deux axes.

84. Généralement de 100Hz, d'après Wacom, mais l'objet wacom recevant les données de manière asynchrone dans Max ne permet pas la pleine exploitation de cette fréquence.

85. La latence entre le mouvement du stylet et l'arrivée des données est de l'ordre de 50ms, alors qu'elle est de l'ordre de 5ms pour le MIDI.

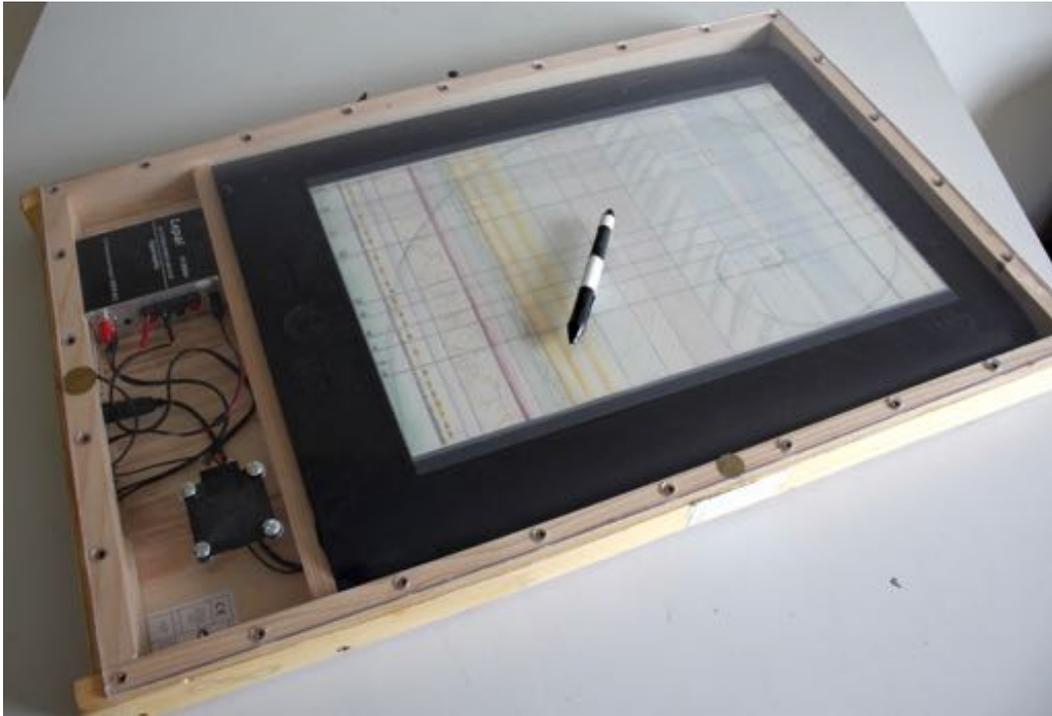


Figure 4.23.: Filigramophone - vue d'ensemble, débranchée.

cette sensation de distance, qu'on retrouve de manière générale dans la plupart des interfaces de contrôle de type **MIDI** (bien que moindre dans le **MIDI**, cette distance est également sensible).

Ali Momeni avait réalisé ce type d'augmentation acoustique, en plaçant un microphone piezo directement sur la tablette⁸⁶. Cette technique lui permet de “*Taper, gratter, frapper avec un anneau métallique ou frotter la tablette*” pour obtenir une variété de signaux audio captés par le microphone piezo.

Plus récemment, Romain Michon a étudié différentes possibilités d'effectuer des gestes percussifs et de pression sur une tablette *multitouch*⁸⁷, et proposé une solution hybride par l'ajout de capteurs **FSR** placés sous un iPad, modulés en amplitude et récupérés via l'entrée audio d'un iPad. L'intérêt de cette solution est de permettre le calcul de la vitesse des gestes percussifs, en plus de l'aftertouch, mais la fusion des informations de pression et de coordonnées X/Y, bien que judicieusement contournée par une triangulation des différents **FSR**, reste problématique comme le remarque son auteur. Par ailleurs, cette solution utilisant des capteurs de pression, sous la surface rigide de l'iPad ne permet pas d'exploiter la variation de hauteur spectrale en fonction du lieu de frappe, la surface de l'iPad étant trop rigide et les **FSR** inadaptés à cette gamme de fréquences.

J'ai pour ma part choisi d'insérer les microphones piezo entre une vitre en **PMMA** et le châssis contenant la tablette graphique (cf. figure 4.24). Cela permet des gestes percussifs, de frottements ou l'utilisation d'objet mis en mouvement (toupies, dés,

86. Développements présentés dans sa thèse [Mom05].

87. Voir [Mic+16].



Figure 4.24.: Transducteur piezo entre la vitre et le châssis sur le Filigramophone



Figure 4.25.: HP tactile sur le Filigramophone

disques, etc.) directement sur la surface, tout en conservant – à travers le **PMMA** – l’usage de la tablette qui renvoie les coordonnées horizontale et verticale ainsi que la pression et l’inclinaison du stylet. Ces transducteurs piezo permettent de capter les différents timbres de la surface **PMMA**, qui présente une certaine élasticité (par rapport à la surface rigide de la tablette) en étant fixée uniquement sur ses bords, et dont la hauteur spectrale est plus grave au centre et plus aigüe sur les bords, à la manière d’une peau de tambour. Il est également possible de frapper sur le châssis, ce qui permet d’obtenir encore d’autres nuances de timbre (figure 4.26). Cette solution évite par ailleurs les bruits “parasites” de la structure de la tablette graphique quand on frappe directement dessus. Enfin, l’ajout de la plaque de **PMMA** laisse la possibilité de dessiner, ajouter de l’adhésif, ou graver directement sur le **PMMA**, sans détériorer la tablette. Eventuellement, disposer de différentes plaques de **PMMA** permettrait d’adapter l’interface à différentes configurations, à la manière des ce que permettent les *overlays* sur les interfaces commerciales *Joué* et *SenselMorph*⁸⁸, ou à des compositions différentes, telles que les “*tangible scores*” d’Enrique Tomás [TK14].

Intégration du transducteur tactile

Parallèlement, un transducteur a été fixé sur la vitre de **PMMA** (cf. figure 4.25), et positionné empiriquement⁸⁹ pour favoriser l’excitation des premiers modes de résonance de la plaque de **PMMA** sans être toutefois dans la zone d’interaction de la tablette graphique. Les premiers modes de résonance correspondent en effets aux fréquences les plus basses, et le but était ici d’avoir une vibration aussi forte que possible dans un domaine vibrotactile qui n’empiète pas trop sur le domaine audible.

Le transducteur tactile est utilisé à la fois pour le retour vibratoire et la communication d’information, en particulier par frettage virtuel de la surface (cf. infra, section 4.4.3). Le retour vibratoire de l’instrument se distingue toutefois de l’envoi pur et simple du signal audio, la perception tactile ne lui étant pas directement liée. Au lieu

88. <https://www.play-joue.com>, <https://sensel.com>.

89. c’est-à-dire, par un balayage des fréquences, envoyé sur le transducteur, en écoutant et en touchant la surface pour y trouver les zones de résonance.



Figure 4.26.: Le microphone piezo laisse la possibilité de capter le son des mains ou d'objets sur la surface du Filigramophone

de cela, un signal sinusoïdal à 70Hz, correspondant à une fréquence de résonance de la vitre de **PMMA**, est modulé par l'enveloppe du son final, ainsi que par sa dérivée spectrale, afin de mieux sentir dans les doigts les transitions et les ruptures du son.

Le Filigramophone a été joué plusieurs fois en concert, à la fois dans l'ensemble ONE, ainsi que dans la première version de la performance audio-visuelle "FIB_R" avec la plasticienne Gladys Brégeon (cf. figure 4.27). Le dispositif complet était composé du Filigramophone, d'un ordinateur faisant tourner un patch Max pour la synthèse, d'une carte son et haut-parleurs, ainsi que d'une interface **MIDI** Akai MPD24, donnant un accès direct à davantage de paramètres tels que le volume général, le mixage entre différentes synthèses, le rappel de configurations, la sélection d'échelles musicales pour l'accordage, ainsi que divers autres paramètres spécifiques aux algorithmes de synthèse.

4.5.3 Xypre : écran multitouch augmenté (2015, 2018)

L'utilisation du Filigramophone lors de performances musicales a permis de constater plusieurs points d'améliorations possibles, qui ont donné lieu au développement d'une nouvelle interface, nommée Xypre⁹⁰ :

- La taille de l'interface le rendait intransportable en avion en tant que bagage cabine, et de manière plus courante, peu pratique dans le métro parisien ;

90. Une vidéo montre en accéléré le processus de fabrication de la version 2 du Xypre : <https://vimeo.com/358401223>

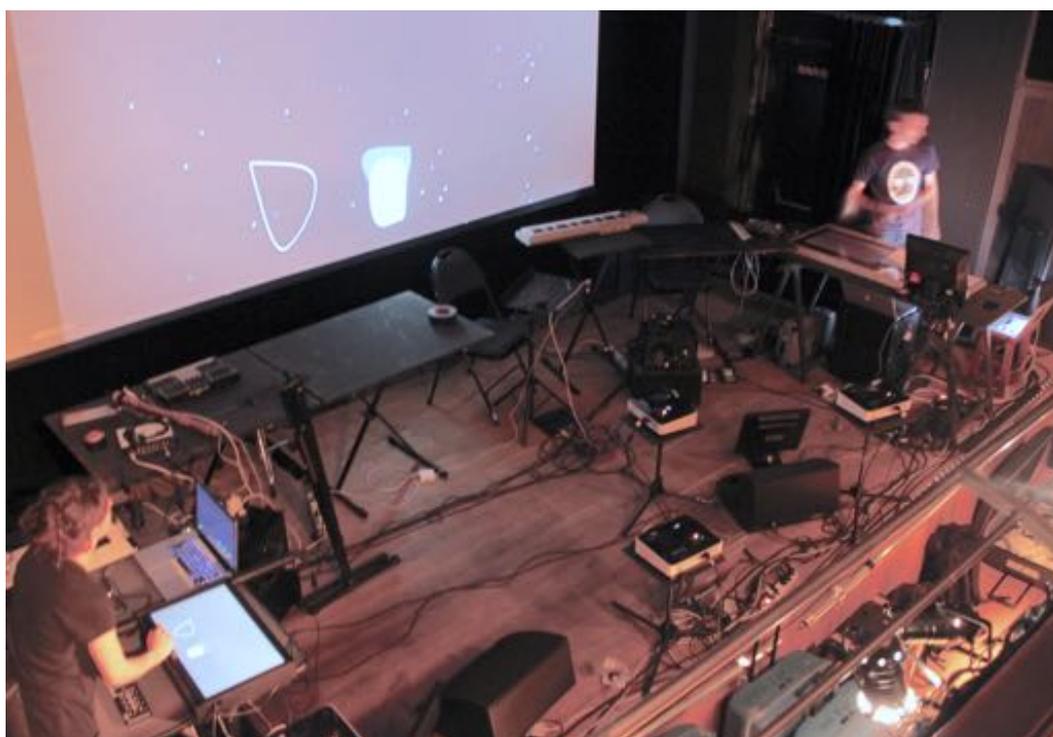


Figure 4.27.: Filigramophone (à droite) et une version prototypique du Xypre v1 (à gauche) sur scène, durant la répétition de FIB_R en juin 2015, Le Triton, Les Lilas (93).

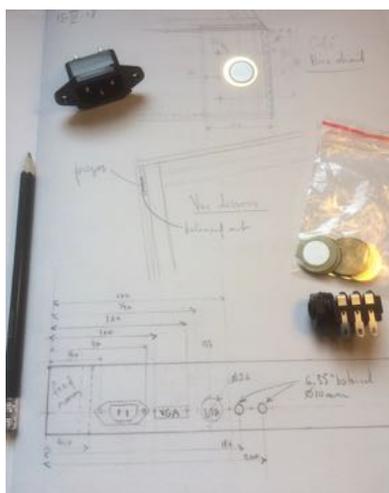


Figure 4.28.: Xypre v2 - plans de conception



Figure 4.29.: Xypre - vue d'ensemble, débranchée

- Son poids rendait également son transport pénible, malgré une pochette à dessin adaptée⁹¹. Notamment le châssis, trop massif, pouvait être allégé ;
- La nécessité d’une interface complémentaire (le MPD24) augmentait d’autant le temps de montage, de démontage, ainsi que le poids global ;
- La relative fixité des repères visuels sur le calque de la tablette, qui exigeaient un démontage fastidieux pour être changées, et qui du coup, ne l’étaient pas ;
- Le jeu polyphonique y était limité, tant par l’unicité du stylet que par l’absence de retour visuel permettant de gérer différentes couches de manière indépendante avec un seul stylet.

Le poids et la taille ont été diminués en utilisant du contreplaqué plus fins pour le châssis et en adoptant un format de valise cabine, offrant une surface équivalente à la surface utile de la tablette graphique utilisée dans le filigramophone, suffisamment large – quoique juste assez – pour permettre des gestes amples impliquant tout le bras.

La solution adoptée pour les autres problèmes évoqués a consisté à remplacer la tablette graphique par un écran *multitouch*, toujours augmenté de piezo et transducteurs tactiles, le retour visuel offert par les écrans permettant de virtualiser les contrôleurs physiques utilisés sur l’interface MIDI MPD24⁹².

Deux versions du Xypre ont été développées sur ce même principe, mais utilisant deux technologies différentes en ce qui concerne la captation *multitouch* : l’une basée sur la détection par infra-rouge⁹³ et l’autre sur une détection capacitive⁹⁴. Les deux interfaces communiquant avec Max via le protocole TUIO⁹⁵, peu d’adaptations ont été nécessaires sur le patch Max gérant l’interaction et la synthèse audio. Toutefois, cette différence de technologie a des conséquences sur l’assemblage et sur les modes de jeu possibles.

Technologie multitouch et incidence sur le jeu

La technologie infra-rouge de l’*overlay G4S* laisse la possibilité de poser des objets sur la surface, qui soient détectés par les capteurs infra-rouge. Cela permet notamment de pouvoir maintenir des processus actifs, par la présence physique d’objets (comme on maintiendrait une note enfoncée sur un orgue à l’aide d’un poids). Un inconvénient de cette technologie est la détection possible des doigts (ou d’objets) entrant dans le plan de détection, situé légèrement au-dessus de la surface de la

91. Un avantage d’un tel format “tablette” est qu’il est relativement facile de trouver des sacs d’artiste, habituellement destinés au transport de dessins, dans un grand nombre de formats.

92. Voir la librairie graphique “mp.TUI” développée à cette fin et présentée au chapitre 6.

93. Le modèle *G4S-overlay* de la marque PQ-Labs (<https://www.pqlabs.com>) permettant théoriquement jusqu’à 32 points de contact simultanément.

94. Un écran tactile *Iiyama ProLite T2252MSC*, intégrant une technologie “capacitive projetée” permettant la détection de dix points de contact simultanément.

95. À la différence, toutefois, que le G4S envoie directement des données TUIO exploitables dans Max, alors que l’écran capacitif davantage destiné à un usage grand public ne les renvoie pas. Un driver payant, développé par la société *Touch-Base Ltd.* est nécessaire pour convertir les données au format TUIO.

vitre. Cela requiert par exemple de lever les doigts qui ne jouent pas relativement haut afin qu'il ne soit pas détectés par erreur, et provoque une tension musculaire pénible de la main. Également, cette technologie est plus sensible à la poussière qui peut provoquer de fausses détections.

À l'inverse de la technologie infra-rouge, le capacitif ne détecte que la présence des doigts et pas celle d'objets quelconques. Il est possible de détecter la présence d'objets dédiés, intégrant un système électrique actif ou passif, stimulant le champ électrostatique de l'écran, ainsi que de reconnaître ces objets à l'aide d'identifiant spatiaux et/ou temporels⁹⁶. Ce type de solution a notamment été utilisé dans l'application *Rotor* de *ReacTable*. Cette solution présente néanmoins l'inconvénient de nécessiter un circuit électronique dédié d'une part, et d'autre part la reconnaissance de l'objet consomme rapidement le nombre de point de contact détectable par l'interface⁹⁷, en même temps qu'elle rajoute une latence due à l'analyse du motif déterminé par les points.



Figure 4.30.: Cadre multitouch à technologie infra-rouge (PQ-Labs). La surface de contact en verre est détachable et la captation d'objets quelconques est possible.

Implantation des microphones piezo et transducteur tactile



Figure 4.31.: Transducteur piezo pseudo-symétrique dans le côté du châssis sur le Xypre v2 (plaque extérieure démontée).



Figure 4.32.: HP tactile sur le Xypre.

96. Voir notamment [RUO01 ; Yu+11].

97. Par exemple, la détection de la position et de l'orientation nécessite généralement trois points de contact, ce qui signifie qu'un écran multitouch permettant dix points de contact ne pourra pas détecter plus de trois objets (et un doigt).

Sur le Xypre v1, la technologie infra-rouge du cadre de détection du *multitouch* permet d'insérer une vitre en PMMA (cf. figure 4.30), pour un fonctionnement similaire à celui développé sur le Filigramophone. L'inconvénient qui résulte des gestes de percussion sur cette vitre est la transmission des vibrations au cadre de détection *multitouch* et les bruits de plastique parasites qu'elles provoquent. Il serait envisageable de supprimer ces bruits en serrant le cadre multitouch entre des mousses, mais cet assemblage plus complexe n'a pas encore été testé.

Sur le Xypre v2, l'écran *multitouch* capacitif ne permettant pas l'ajout d'une vitre PMMA, les microphones piezo ont été placés sur le côté du châssis, pré-contraints entre le châssis et une plaque de bois plus fine servant de surface de percussion. Cette plaque fixée sur deux côtés au châssis permet là-encore de récupérer différentes nuances de hauteur spectrale, utilisée pour la synthèse en aval (cf. figure 4.31). La pré-contrainte du piezo est en partie due à l'orientation verticale du piezo (qui chuterait, autrement) mais permet également d'utiliser une technique de pseudo-symétrisation du signal du piezo (cf. schéma fonctionnel figure 4.33 et aperçu figure 4.31), qui s'avère très utile quand les transducteurs piezo sont utilisés à proximité d'un écran, source de perturbations électromagnétiques.

La séparation entre la surface percussive et l'interface *multitouch* de l'écran a

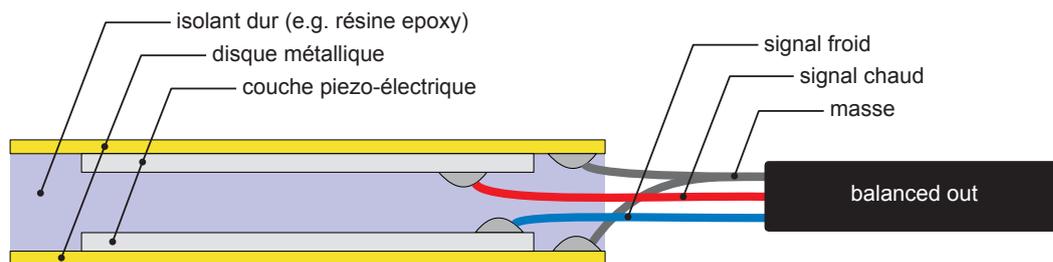


Figure 4.33.: Montage pseudo-symétrique de transducteurs piezo-électriques.

conduit à placer le haut-parleur tactile sur une plaque de contreplaqué à l'avant du châssis (cf. figure 4.32). Il se trouve ainsi relié acoustiquement au transducteur piezo #2 (cf. figure 4.34), tandis que l'autre transducteur (figure 4.31) est (relativement) isolé acoustiquement en étant positionné orthogonalement.



Figure 4.34.: Liaison acoustique entre piezo et haut-parleur tactile sur le Xypre.



Figure 4.35.: Xypre v1 inauguré durant une performance avec ONE

4.5.4 Bilan et perspectives

Si les interfaces multitouch conservent une parenté avec les tablettes graphiques, elles offrent de nouvelles possibilités en même temps qu'elles imposent d'autres contraintes. En particulier, la perte de la pression du stylet comme paramètre expressif est difficile à compenser et à distribuer dans d'autres gestes sans revoir considérablement le design d'interaction en aval. Il est tout de même prévu de rajouter des capteurs de type FSR et capteurs de distance, d'une granularité temporelle et d'une expressivité intermédiaire entre celle permise par les microphones et celle permise par l'écran tactile.

Une autre direction de développement (en cours), est l'autonomisation progressive de l'interface, en transférant le calcul de la synthèse audio et graphique depuis l'ordinateur sur lequel il tourne maintenant, vers des nano-ordinateurs tels que Raspberry Pi et Bela⁹⁸, tout en conservant une extension possible par l'ordinateur.

Enfin, au niveau acoustique, l'usage de plaque de bois massive et/ou de métal est envisagé afin d'améliorer la liaison acoustique entre le microphone piezo et le transducteur tactile en façade. Si les premiers tests révèlent des interactions intéressantes sur le contrôle du feedback (qu'on espère améliorer en utilisant une carte Bela à très faible latence), le contreplaqué semble un matériau trop épais et absorbant pour que des pressions directes sur la plaque interagissent efficacement avec la boucle de *feedback*.

4.6 Conclusion

L'importance croissante du découplage énergétique entre les gestes de l'instrumentiste et la production du son, depuis l'orgue, qui en donne les premiers signes manifestes, jusqu'aux DMIs, qui finissent d'achever cette scission, a entraîné une séparation physique de l'interface de jeu. En effet, comme l'énonce Thor Magnusson, *“on peut dire que l'instrument électronique ou numérique a une interface, tandis que l'instrument acoustique est l'interface”*⁹⁹.

Les DMIs ne sont plus nécessairement des “objets que l'on touche”¹⁰⁰, dans la mesure où les capteurs permettent à la fois d'étendre l'interaction à un espace externe à l'objet qui capte le mouvement, ou interne au corps même de l'instrumentiste. L'agencement des capteurs sur l'interface de jeu définit la topologie spatiale de l'interaction gestuelle possible. Il est cependant difficile, comme nous l'avons ici objecté, d'établir un lien univoque entre les types de capteurs utilisés et les fonctions musi-

98. <https://raspberrypi.org>, <https://bela.io>.

99. “We can state that the electronic or digital instrument *has* an interface, whereas the acoustic instrument *is* the interface.” [Mag19b] (italiques de l'auteur)

100. Pour les instruments acoustiques, ce rapport au toucher se lit clairement dans le terme italien *toccata*, “œuvres à toucher”, ou l'espagnol *tocar musica*, littéralement “toucher la musique”.

cales que l'on cherche à moduler, tant il est possible d'interpréter et de re-segmenter les données issues des capteurs de différentes manières, à l'aide d'algorithmes de *mapping*.

Cette séparation permet de repenser de manière beaucoup plus ouverte la distribution spatiale de l'instrument, son ergonomie gestuelle, ainsi que la temporalité des relations gestuelle-sonore, dans un champ de possibles qui pourrait s'apparenter à une vertigineuse page blanche. Le design de cette interface est toutefois polarisé par un certain nombre de facteurs matériels (poids, encombrement, matériaux physique, temps de montage, portabilité, etc.) qui conditionnent l'usage effectif des **DMIs** pour la performance musicale.

Les interviews menées auprès de musiciens et l'étude des pratiques musicales impliquant des **DMIs** indiquent ici un éventail très large de configurations d'interface, de l'objet physique massif à sa disparition la plus complète, de sa référence à l'instrument traditionnel (dans les instruments augmentés) à sa prise de distance la plus manifeste (The Sponge), de sa fonctionnalité la plus technique (e.g. les interfaces de contrôle à potentiomètres) à sa présence essentiellement scénographique et poétique (e.g. Lungta).

Leur diversité les rend ainsi difficiles à classer en raison des héritages et desseins multiples qui les façonnent, mais le design de l'agencement instrumental semble inséparable d'une considération globale de l'interaction musicale et du projet artistique qu'il sert. Avant même que le musicien ne soit présent pour interagir avec son instrument, la présence physique de l'instrument (ou son absence) se manifeste dans l'interface de jeu. Sa configuration évoque à la fois les postures corporelles et les gestes qu'appelle cette interface, mais possède également une force propre d'évocation poétique, potentiellement liée à des références extra-instrumentales.

Les **DMIs**, à la différence des instruments acoustiques, ne sont jamais intégralement construits par une seule et même personne, car les capteurs et processeurs qui les composent sont issus d'une fabrication industrielle qui les rendent dépendants d'une logique de production externe au luthier. Leur fabrication se caractérise ainsi par le fait d'être toujours, fondamentalement, un détournement de matériaux déjà complexes, et rarement conçus à des fins musicales. La description de la conception du filigramophone et du Xypre ont mis en évidence ces aspects, à travers les adaptations apportées en fonctions des caractéristiques techniques de leurs différents composants. Le *mapping*, au moyens d'algorithmes de transformation et de synthèse, vient encore ajouter à ce détournement, en redéfinissant toutes les relations possibles ou attendues. C'est cette interaction algorithmique que nous allons étudier au prochain chapitre.

” *One general effect of the digital revolution is that avant-garde aesthetic strategies became embedded in the commands and interface metaphors of computer software. In short, the avant-garde became materialized in a computer.*

— **Lev Manovitch**

The language of the new media, 2001.

[Man01]

La citation de Lev Manovitch en exergue de ce chapitre en reflète la question centrale : le code est l'élément définissant le fonctionnement d'un **DMI** et si sa nature virtuelle rend son usage très malléable, la nature des objets virtuels que l'on manipule est en grande partie conditionnée par les représentations que l'on se fait de l'interaction musicale. Cependant, les machines ont aussi leurs contraintes, leurs limitations et leur hérédité, qui influencent la conception des protocoles et les choix d'implémentation. Après avoir présenté le contexte informatique dans lequel s'inscrivent les développements logiciels d'informatique musicale temps-réel, je détaillerai trois développements en lien avec ces questions :

- **le concept de “modèle intermédiaire dynamique”** qui, au-delà des questions de mise en relation de variables, propose un modèle abstrait pour l'interaction geste/son ;
- **le protocole MP**, qui propose une solution alternative au **MIDI** pour répondre aux questions d'agencement et de connexions de modules de traitement, en prenant en compte l'aspect polyphonique en particulier ;
- **la librairie *Sagrada***, qui propose un système original de synthèse granulaire modulaire dans Max contrôlée de manière synchrone ou asynchrone.

5.1 Matériaux numériques

5.1.1 Le son synthétique

“Ces instruments numériques que vous fabriquez, ils utilisent des sons enregistrés ou des sons de synthèse ?” Cette question fréquemment posée par des interlocuteurs néophytes curieux des nouvelles lutheries est révélatrice des catégorisations opérées sur les matériaux et processus à l’œuvre dans les instruments numériques. Elle se traduit, en termes esthétiques, par des genres musicaux différents dans les musiques actuelles (“field recording”, “folk acoustique”, par opposition à “techno” ou “musique électronique”) qui reflètent cette distinction que l’on fait intuitivement entre une image *analogique* des sons du monde “réel” et les artéfacts *synthétiques* de la machine, quand bien même les deux seraient produits à l’aide d’un ordinateur. L’électronique et le numérique sont en effet présents dans la quasi-totalité des productions musicales actuelles, pour les besoins de l’enregistrement multi-pistes, de l’égalisation, du mixage, de l’ajout d’effets, du mastering ou encore, *in fine*, de la distribution, qu’elle soit sur support CD ou dématérialisée en *streaming*. Rappelons donc tout d’abord ce préalable : les sons produits par un ordinateur sont tous des sons de synthèse.

On viendra opposer à ce postulat la nature plus artificielle d’un son purement créé à partir d’une équation mathématique, tel un son de synthèse additive¹, par rapport à la relecture d’un enregistrement audio réalisé à partir d’une source acoustique. Pourtant, la relecture de cet enregistrement n’est, du point de vue de son fonctionnement technique, guère différente de la lecture d’une table d’onde dans une synthèse additive. À la différence perceptive du résultat vient donc s’opposer une évidente parenté de moyens. De plus, les lutheries numériques, en pratique, reposent moins sur des modèles théoriques purs que sur des formes hybrides. Si l’on utilise un enregistrement audio-numérique, cela ne sera généralement pas pour le reproduire tel quel, inchangé, mais pour en jouer, en utilisant le processus de lecture comme un algorithme interactif, avec ses variables paramétriques de vitesse de lecture, de position, de gain, etc. Un son, dès lors qu’il est enregistré n’est plus un son, mais une représentation du son, qui s’apparente à un “*geste programmé*”², c’est à dire un modèle complexe qu’il ne faudrait pas confondre avec le son lui-même, en se laissant “trahir par son image”. Les données numériques sont à la fois extrêmement diverses en terme de contenu (son, image, texte, vidéo, structure, processus, etc.) et extrêmement uniformes en terme de représentation (une séquence de 0 et de 1). Cette uniformité de la représentation numérique permet de stocker ces diverses informations sur des supports identiques, de les transmettre sur les mêmes câbles,

1. La synthèse additive est un type de synthèse sonore consistant à produire un son par addition de ses différentes composantes harmoniques.

2. Cf. section 3.5.2.

mais également de leur appliquer les mêmes processus de traitement³.

Au regard de cette uniformité de représentation, il nous faut donc compléter la remarque précédente : tous les sons produits par un ordinateur sont des sons de synthèse et tout matériau numérique est potentiellement un matériau sonore et musical.

5.1.2 Contrôle de la synthèse, synthèse du contrôle

En paraphrasant Edgar Varèse et John Cage qui décrivaient la musique comme un *art des sons organisés*, on pourrait donc dire que le son numérique est “l’art des bits organisés”. Sans toutefois descendre aussi profondément dans le fonctionnement technique de la machine et son alphabet binaire, on peut considérer, d’un point de vue fonctionnel, que la partie numérique d’un **DMI** est composée de deux grands types de données :

- **le code**, ou comme le dirait Bernard Stiegler les “réentions tertiaires”, qui prennent la forme d’algorithmes ou de structures de données ;
- **les flux**, provenant des capteurs de l’interface, du réseau, ou du code lui même, dans sa capacité à les générer, et qui se modifient en “traversant” le code pour produire *in fine* des signaux audio.

Dans les environnements de programmation audio, on opère généralement une distinction entre deux types de flux de données :

- **des signaux synchrones**, représentant par exemple des signaux audio, échantillonnés à une fréquence précise et traités généralement par bloc dans un **DSP** ;
- **des événements asynchrones**, arrivant de manière sporadique, tels que les messages **MIDI**, **Open Sound Control (OSC)** ou d’autres types de messages propres au programme et traités dans un graphe de contrôle réactif.

Si cette distinction reflète une différence ontologique entre le domaine du continu et celui du catégoriel, ces deux types de flux traduisent également deux granularités temporelles différentes et sont généralement associés aux notions d’*audio-rate* et de *control-rate*⁴. Il est intéressant de noter que le contrôle est ainsi implicitement défini comme un signal sporadique et de fréquence moindre que le signal audio-numérique, ce qui relève en soi d’une représentation musicale qui pourrait être discutée.

Également, les signaux numériques synchrones représentent le plus souvent

3. Par exemple, lire un fichier PDF comme s’il s’agissait d’un signal audio, comme dans la composition audiovisuelle 107724404x8 : <https://vimeo.com/242484484>.

4. On retrouve cette distinction dans tous les logiciels basés sur l’utilisation du **MIDI**, mais également dans Max, dans SuperCollider, dans Csound et même dans Chuck qui permet pourtant que le contrôle soit cadencé à une fréquence arbitraire aussi élevée, voire plus, que celle de l’échantillonnage audio.

un signal (audio) analogique échantillonné, avec l'idée de continuité qui lui est associée, tandis que les messages asynchrones représentent généralement un ordre d'exécution (e.g. une note-on **MIDI**). D'un côté, nous avons un signal continu et mono-dimensionnel (un seul échantillon est traité à la fois), de l'autre un signal sporadique et potentiellement polyphonique (plusieurs messages peuvent être envoyés au même instant logique, sans qu'ils soient associés à des flux différents).

Cependant, du point de vue de leur usage, les frontières entre ces deux types de données numériques d'une part, et ces deux natures d'objets conceptuels (le signal continu et l'ordre événementiel) d'autre part, ne se recouvrent pas exactement. Il est ainsi courant d'utiliser des messages asynchrones pour convoyer des variables continues (telles que les données d'un contrôle MIDI-CC ou d'un capteur envoyé par **OSC**). À l'inverse, il est également possible d'utiliser un signal synchrone pour déclencher des événements (musicaux) discrets. C'est par exemple le cas lorsqu'une impulsion déclenche une enveloppe temporelle ou la lecture d'un échantillon audio⁵.

Par ailleurs, la programmation des **DMIs** adopte souvent un paradigme de *data-flow*, telle que la programmation réactive⁶, pour répondre aux besoins du temps-réel, tout en s'intégrant dans des environnements multi-paradigmes⁷. Une distinction qui en découle en partie, est celle qui consiste à séparer les algorithmes de synthèse audio d'une part, et le *mapping*⁸ d'autre part, en deux objets conceptuels distincts, comme en témoignent les représentations de modèles de mappings proposés sur les figures 5.1, 5.2, 5.3.

Si ces différentes distinctions résultent de contraintes techniques, d'évolutions historiques, de choix conceptuels voire de représentations musicales sous-jacentes, j'ai choisi de regrouper dans ce chapitre des aspects concernant à la fois le mapping et la synthèse. Ce choix est motivé par la porosité évidente entre ces différentes catégories et par les développements que je présenterai, qui visent à rapprocher l'ergonomie de leur interaction.

5.2 Modèles intermédiaires dynamiques

-
5. C'est le cas par exemple dans les systèmes de synthèse granulaire **GMEM Microsound Universe (GMU)** et *Sagrada*, présentés en section 5.4, mais c'est aussi le cas dans les systèmes modulaires analogiques de type Eurorack.
 6. En informatique, la programmation réactive suit un paradigme qui consiste en la propagation des modifications d'une source réactive (modification d'une variable, entrée utilisateur, etc.) aux éléments dépendants de cette source.
 7. Ces différents paradigmes peuvent être implémentés dans des logiciels différents, mis en relation par des protocoles de communication, ou intégrés dans un même environnement. Un logiciel tel que *Max* qui s'articule essentiellement autour d'une programmation visuelle de *dataflow*, intègre ainsi des possibilités de scripting, de programmation synchrone, fonctionnelle ou impérative.
 8. C'est-à-dire les relations entre les "entrées" de l'instrument (telles que les données issues d'une interface de jeu) et la synthèse. Nous reviendrons sur cette notion plus loin.

5.2.1 Du mapping aux modèles intermédiaires dynamiques

Origines du terme mapping

Dans le domaine des lutheries numériques, le terme de “mapping” est très couramment utilisé pour décrire la relation entre les données issues des capteurs de l’interface sensible et les paramètres de la synthèse sonore. Le terme lui-même est issu des mathématiques dans lequel il se traduit en français par “application”, c’est-à-dire une relation entre deux ensembles pour lesquels chaque élément du premier (appelé ensemble de départ) est relié à un unique élément du second. Andy Hunt le définit ainsi comme *“la liaison ou la correspondance entre les paramètres de contrôle (dérivés des actions de l’interprète) et les paramètres de synthèse sonore”*⁹.

Ce terme a glissé dans le vocabulaire de la lutherie numérique en raison de la relative simplicité des relations de correspondance dans les premiers DMIs et est resté, alors que ces relations se sont progressivement complexifiées, comme le notait déjà Joel Chadabe en 2002 : *“Le mapping décrit la façon dont un contrôle est connecté à une variable. Mais à mesure que les instruments deviennent de plus en plus complexes pour inclure de grandes quantités de données, une sensibilité au contexte, ainsi que des capacités de génération sonore et musicale, le concept de mapping devient plus abstrait et ne décrit pas les réalités plus complexes des instruments électroniques.”*¹⁰

Un grand répertoire

Le *mapping* est un domaine en effervescence depuis le début des années 2000 et de nombreux modèles ont été proposés (figures 5.1, 5.2, 5.3), passant par la proposition de modèles multi-couches [WSR98 ; HW02], auto-adaptatifs [VWD06], de cartographie de paramètres sur des espaces perceptifs [Wes79 ; WD10 ; Sch12 ; TD14], de métaphores d’interaction avec des objets virtuels [WWS02], de modèles physiques ou visuels [MH06], de modèles géométriques [VWD04], stochastiques [Dab96], ou d’apprentissage automatique [Fie11 ; Car+14 ; Fra15].

À cette longue liste s’ajoute celle, probablement plus longue encore, de mappings empiriques qui ont émergé lors de la conception expérimentale de nouveaux DMIs et qui n’ont pas été identifiés, nommés ou présentés de manière formelle dans une conférence académique.

La qualité d’un mapping est contextuelle

Ces différentes approches relèvent (sans que cela soit nécessairement explicité par leurs auteurs) de perspectives différentes concernant l’interaction musicale et ses

9. “The liaison or correspondence between control parameters (derived from performer actions) and sound synthesis parameters” [HWK00]

10. “Mapping describes the way a control is connected to a variable. But as instruments become more complex to include large amounts of data, context sensitivity, and music as well as sound-generating capabilities, the concept of mapping becomes more abstract and does not describe the more complex realities of electronic instruments.” [Cha02]

finalités. Ainsi, plusieurs études ont été publiées, tentant de cerner les contours de la notion de mapping, de les catégoriser et de les comparer qualitativement. Cependant, si certains de ces articles ont tenté de montrer que certains types de mappings fonctionnaient mieux que d'autres, il semble difficile de les évaluer en dehors du cadre spécifique dans lequel ils ont été conçus¹¹, et encore moins dans la perspective d'une "universalité" – qui semblerait aujourd'hui davantage être une "multiversalité". Leur qualité est en effet extrêmement complexe à évaluer et fait intervenir, au-delà du modèle théorique qui les régit, la qualité des capteurs, la fréquence d'échantillonnage, le type de synthèse contrôlée en aval, les conditions environnementales (qui peuvent altérer la manière dont le geste est capté), les motivations musicales sous-jacentes, et par suite, des considérations esthétiques éminemment subjectives¹².

Mappings hybrides

Nous sommes ainsi aujourd'hui dans une situation où de nombreuses stratégies de mapping sont disponibles, qui loin de s'exclure mutuellement, constituent un répertoire très riche pour composer le design de l'interaction instrumentale. En effet, au-delà de l'utilisation de stratégies isolées à des fins démonstratives¹³, le design de l'interaction instrumentale est souvent un hybride de différentes stratégies qui se complètent. Par ailleurs, si la plupart des stratégies de mapping présentées dans la littérature cherchent à obtenir une cohérence entre le geste et le son, nous avons vu au chapitre 3, que cette cohérence n'est pas nécessairement une finalité dans la création musicale. La possibilité de mélanger les mappings présentés dans la littérature, d'en "abuser" et de les corrompre, fait donc partie intégrante du processus d'élaboration de l'interaction instrumentale.

Ainsi, malgré sa popularité¹⁴, le terme de mapping semble assez peu représenter la complexité de ce qui n'est pas une simple mise en relation de paramètres et nous préférons parler d'un "design interactif", c'est-à-dire d'une programmation interactive des relations entre gestes et sons faisant intervenir modèles physiques, d'apprentissage, de mise à l'échelle, de filtrage, des scénarios évolutifs ou encore des fragments de partitions, qui s'agencent dans la pratique selon des scénarios complexes (cf. schéma figure 5.4 et exemple figure 5.5).

Ce sont ces différents traitements, lorsqu'ils se cristallisent en des agencements

11. Nous avons vu dans le chapitre 3 la diversité des situations d'interaction musicale, allant de la composition à la performance, en passant par des situations d'écoute, de pédagogie, etc.

12. Par exemple, les assertions prétendant qu'un mapping complexe donnerait de meilleurs résultats qu'un mapping simple ([Rov+97; HK00]) sont difficiles à prouver hors du cadre de laboratoire. Sergi Jorda prenait l'exemple du Theremin dans [Jor05] pour mettre en évidence le succès d'un mapping *one-to-one*.

13. Comme c'est souvent le cas dans les présentations scientifiques et dans les démonstrations qui les accompagnent.

14. Entre 2001 et 2015, le terme "mapping" a été employé dans plus de 750 articles de la conférence NIME alors que "design d'interaction" (interaction design) n'était employé que dans 160 articles.

identifiables, que l'on peut extraire sous forme de modèles abstraits ré-utilisables, que l'on nommera ici "modèles intermédiaires dynamiques".

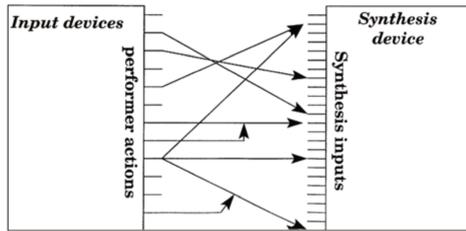


Figure 5.1.: Mapping entre contrôleur et synthèse d'après [HWK00]

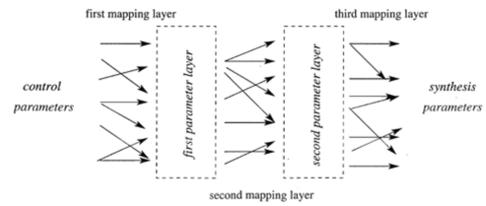


Figure 7. Three-layer general mapping model.

Figure 5.2.: Mapping multi-couches d'après [HW02]

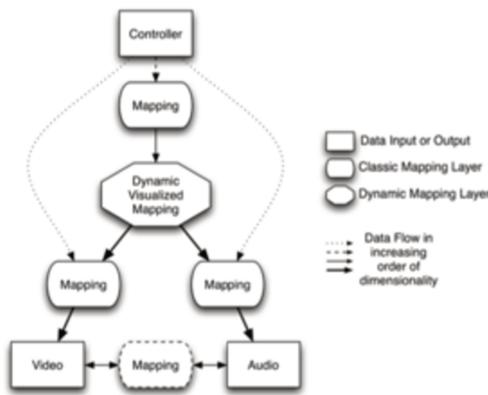


Figure 5.3.: Mapping intermédiaire dynamique, d'après [MH06]

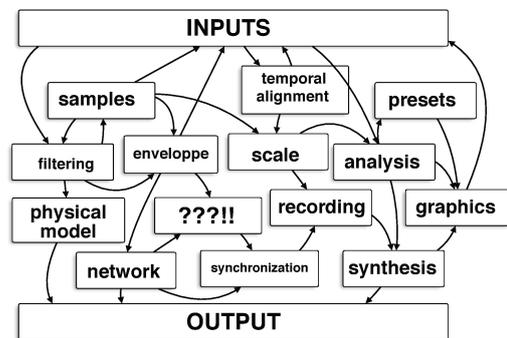


Figure 5.4.: Mapping, "dans la vraie vie" (schéma outrageusement simplifié)

5.2.2 Rôle des modèles intermédiaires

Un "modèle intermédiaire dynamique", selon notre définition, est un processus de traitement d'un signal apparenté à du geste et qui produit un signal transformé, apparenté, lui aussi, à du geste¹⁵.

Parmi les qualités recherchées lors de l'utilisation de modèles intermédiaires, se trouvent en bonne place les qualités que l'on trouve sur les instruments acoustiques, perdues dans leur transposition numérique : finesse et richesse de l'interaction avec des matériaux (frottement, grincement, raclement... et tous les phénomènes subtils et non-linéaires qui se produisent en fonction de l'état de surface, de la viscosité et des propriétés élastico-mécaniques des matériaux). Certains de ces modèles s'inspirent ainsi de systèmes intermédiaires rencontrés dans le domaine des instruments acoustiques (si l'on considère, par exemple, l'archet comme un système intermédiaire entre le geste du violoniste et la corde). D'autres sont plus spécifiques au numérique, tels que les modèles agissant sur l'aspect temporel du geste ou sur sa

15. J'utilise l'expression "apparenté à du geste" car d'une part, ce signal n'est que son image captée et numérisée, et d'autre part car la frontière entre ce qui est "geste", "image", "son", ... une fois le signal numérisé, est éminemment poreuse.

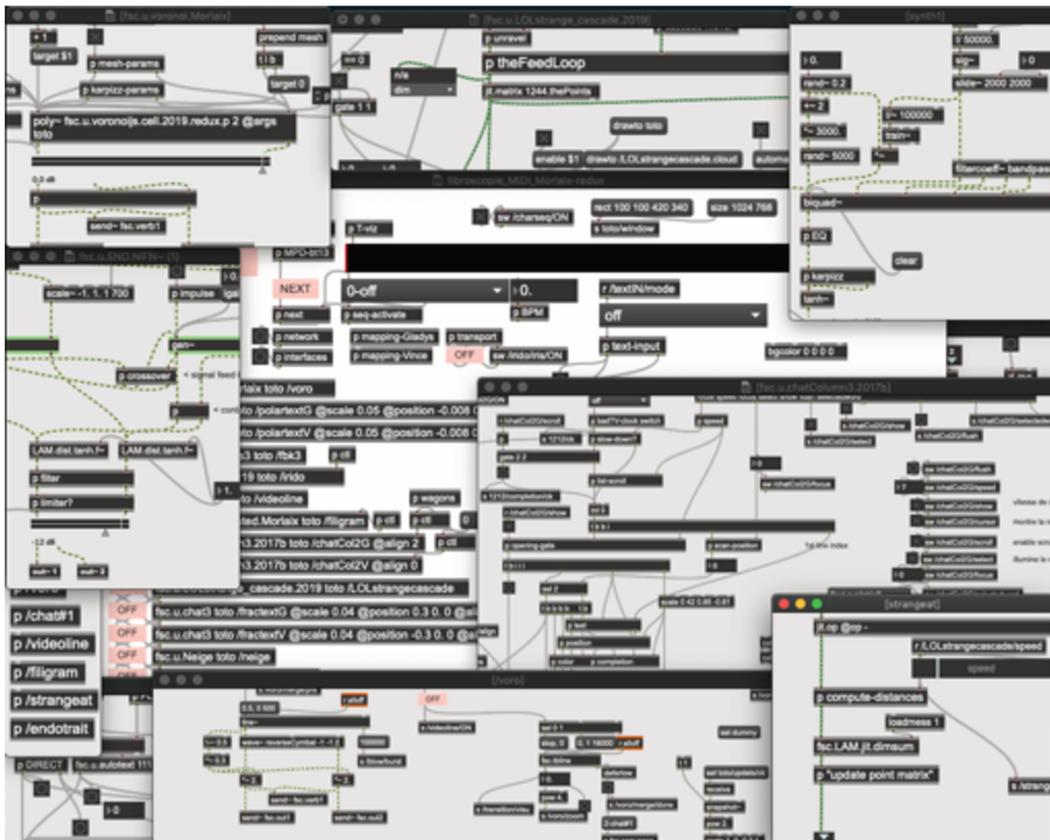


Figure 5.5.: Aperçu très partiel du patch Max utilisé dans la performance “FIB_R”.

reconnaissance.

La liste suivante présente plusieurs axes selon lesquels ces modèles affectent le mouvement :

- **en qualité** : les modèles intermédiaires peuvent venir enrichir le mouvement, que cela soit de manière statique, en modifiant sa plage de valeur, ou dynamique, en le modulant pour lui ajouter un contenu fréquentiel absent dans le geste capté, excédant potentiellement les capacités motrices humaines¹⁶, par exemple, un vibrato, un tremolo, une distorsion, etc. Le champ des possibilités est très vaste, tant la richesse du signal fourni par les capteurs gestuels sur les **DMIs** est généralement bien en-deçà de la richesse des interactions se produisant dans les instruments acoustiques.

Il est ainsi plus rare, quoique possible, qu’un modèle intermédiaire *réduise* la richesse du mouvement. Cela peut cependant se présenter, dans le cas de modèles qui visent à borner son amplitude, ou réduire ses variations. Un exemple notoire dans les musiques pop actuelles est l’*auto-tune* qui vient réduire les variations de hauteur dans la voix naturelle, pour la contraindre sur une hauteur fixe. Dans le cas du geste, le système de quantification dynamique de la

16. Nick Collins présente ainsi son algorithme BBcut : “The sort of audio cutting assumed here is usually at haptic or human rhythmic rates, with the obvious capability to reach inhuman speeds.” dans [Col02]

hauteur présenté dans [GGF14] en est un exemple (cf. figure 5.8).

La nature de l'altération vient conférer une identité musicale au modèle intermédiaire, un "son" spécifique. Par exemple, l'algorithme BBcut [Col02] et ses variations¹⁷ est une signature qui, associée à une famille de boucles rythmiques¹⁸, est audible dans toute la musique breakbeat et "incorpore" – pour reprendre l'expression de Manovitch en exergue de ce chapitre – les techniques de scratch des DJs et de segmentation de boucles rythmiques re-séquencées dans les boîtes à rythmes.

- **en quantité** : le geste peut également être augmenté quantitativement, en le démultipliant et en créant une polyphonie à partir d'un mouvement unique. C'est le cas, par exemple, des algorithmes de foule (e.g. algorithme de Boids), ou des modèles physiques qui permettent de générer une multitude de mouvements constituant la réponse d'un matériau virtuel sur lequel on exerce une simple force. Le mouvement peut également être réduit en quantité, notamment par des systèmes de cribles qui ne laissent passer que certaines valeurs.
- **dans sa continuité** : les algorithmes permettant de quantifier le mouvement en sont des exemples, de même que les algorithmes d'analyse qui permettent la reconnaissance de formes labellisées.
- **dans sa temporalité** : les machines permettant l'enregistrement et le temps différé offrent de multiples possibilités d'étirer, de contracter, de différer le mouvement, que cela soit sous la forme d'échos, de boucles enregistrées, d'alignements temporels sur une partition (e.g. le système Antescofo) ou sur un motif rythmique (e.g. les "grooves" dans Ableton Live).
- **dans son contenu** : un geste peut également être le simple déclenchement de processus possédant leurs propres mouvements autonomes, comme cela peut être le cas dans les algorithmes stochastiques ou génératifs (cf. modèle basé sur le "jeu de la vie", présenté dans les exemples en section 5.2.3). Un autre exemple intéressant est celui du sélecteur de bande radio, qui transforme un simple geste de rotation de potentiomètre en des changements disruptifs de contenus musicaux, tel qu'utilisé par John Cage dans sa pièce "Imaginary Landscape No. 4", et qui a été adapté dans un module Eurorack (cf. interview dans l'Annexe B).

Indépendamment de leur fonctionnement interne, les modèles intermédiaires présentent également certaines potentialités, qui facilitent leur usage au sein d'un agencement instrumental. La liste ci-après résume quelques aspects souhaitables de cette affordance :

17. Notamment : *modsquad* (2000) de Atau Tanaka dans Max, *LiveCut* de Rémy Muller, ou encore *BeatRepeat* (2005) dans Ableton Live 5.

18. Notamment les samples "Amen Break" des Winstons, "Funky Drummer" de James Brown, ou encore "Think" de Lyn Collins.

- **disponibilité** : pouvoir les convoquer et les délaissés à tout instant (i.e. en cours de geste) ;
- **interconnectibilité** : pouvoir facilement brancher un modèle sur un autre, sans que la nature ou la valeur de leurs signaux ne restreigne *a priori* cette connexion ;
- **ajustabilité** : pouvoir ajuster les réglages d'un processus durant le temps de jeu, afin d'expérimenter et d'éprouver son fonctionnement de manière perceptive ;
- **éditabilité** : pouvoir les éditer, les modifier, les déconstruire, le ré-agencer en variations exportables ;
- **réutilisabilité** : pouvoir créer de multiples instances, dans des agencements différents ;
- **bidirectionnalité** : le modèle intermédiaire doit pouvoir communiquer dans les deux sens avec l'interface et les autres modèles afin de pouvoir s'ajuster mutuellement (et en particulier, pouvoir se coupler en assurant une continuité des processus internes) ;
- **abusabilité** : ne pas contraindre arbitrairement les plages de valeurs selon des critères de raisonnabilité *a priori*, afin de laisser l'espace nécessaire à une expérimentation "hors-normes" et une relation subversive (sur l'idée de "geste subversif", voir la section 3.6). Par exemple, il est intéressant de pouvoir utiliser un modèle physique dans un régime incohérent avec la physique réelle.

5.2.3 Exemples

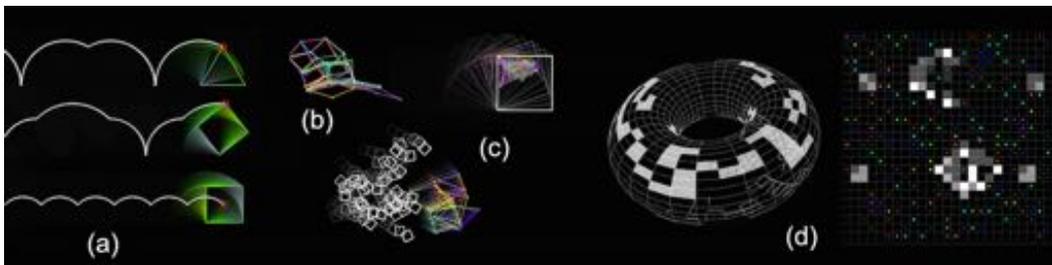


Figure 5.6.: Modèles intermédiaires dynamiques pour la synthèse audio-graphique. De gauche à droite : a) un modèle géométrique basé sur les courbes cycloïdes, b) un modèle pseudo-physique basé sur l'algorithme de Verlet, c) les modèles de Cycloïdes et de Verlet interconnectés, d) un algorithme génératif basé sur le "jeu de la vie".

Ces dix dernières années, plusieurs modèles intermédiaires dynamiques ont été développés dans l'équipe **LAM**, dans le cadre de plusieurs projets de recherche¹⁹ et donnant lieu à des publications, dans la continuité des développements pionniers d'Ali Momeni et Cyrille Henry [MH06], sur le contrôle de modèles audio-graphiques. En particulier, des recherches ont été menées sur les possibilités d'interconnexion

19. *OrJo* (Orchestre de Joysticks), 2009-2012, projet FEDER, financé par la Région Ile-de-France et *Panam* (Pédagogie Artistique Numérique Accessible et Multimodale), 2012-2015, projet Agence Nationale de la Recherche (ANR).

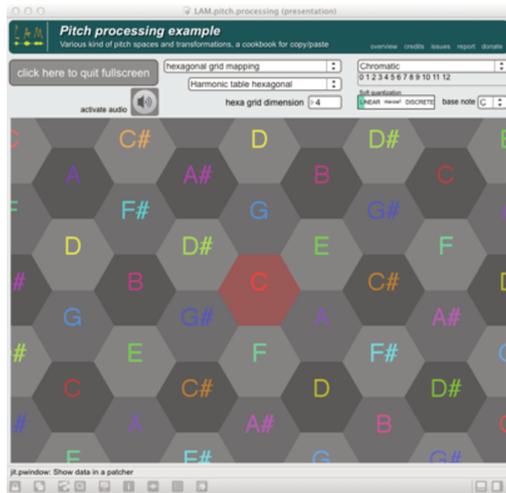


Figure 5.7.: Mapping de clavier isomorphe dans la librairie LAM-lib/mp.TUI.

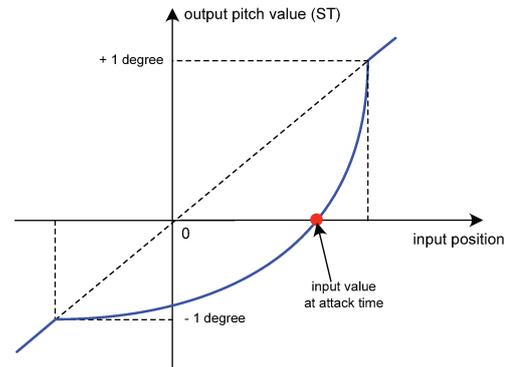


Figure 5.8.: Correction dynamique de la hauteur à l’attaque de note par anamorphose de la surface de jeu, d’après [Pd13].

de ces modèles²⁰ (figure 5.6 et voir [Gou+ 11]). D’autres développements se sont focalisés sur des algorithmes génératifs comme l’automate cellulaire du “jeu de la vie”²¹ (voir [GDG12]). Enfin, des développements se sont concentrés sur l’étude verticale de la gestion du contrôle de la hauteur monophonique [GGF14], en s’intéressant à ses possibles représentations sur une interface bi-dimensionnelle (de type tablette)(figure 5.7) et sur ses altérations (figure 5.8).

Ces différents modèles ont été intégrés dans la LAM-lib, un package pour Max librement téléchargeable²². Ils ont notamment été utilisés dans le cadre d’une pratique d’ensemble avec le logiciel Méta-Mallette²³, ainsi que dans des créations personnelles comme “FIB_R” (cf. figure 5.9).

5.3 MP : polyphonie modulaire et expressive

5.3.1 Une note sur les polyphonies

La polyphonie dans les **DMIs** peut être envisagée à plusieurs niveaux : polyphonie de gestes (e.g. plusieurs doigts en contact sur une tablette multitouch), de sons (e.g. plusieurs “notes” qui résonnent en même temps) ou de modèles intermédiaires (e.g. plusieurs processus qui tournent en parallèle). Concevoir le design d’un **DMI** poly-poly-polyphonique nécessite par conséquent d’établir les connexions entre ces différentes multiplicités.

20. Une vidéo réalisée durant le projet OrJo donne un aperçu de la manière dont ils peuvent être interconnectés dans un scénario évolutif : <https://vimeo.com/25740547>

21. Une vidéo montre son utilisation dans le logiciel Méta-Mallette : <https://vimeo.com/158323394>

22. <https://github.com/LAM-IJLRA/lam-lib>

23. Logiciel développé par l’association Puce Muse (<https://pucemuse.com>).

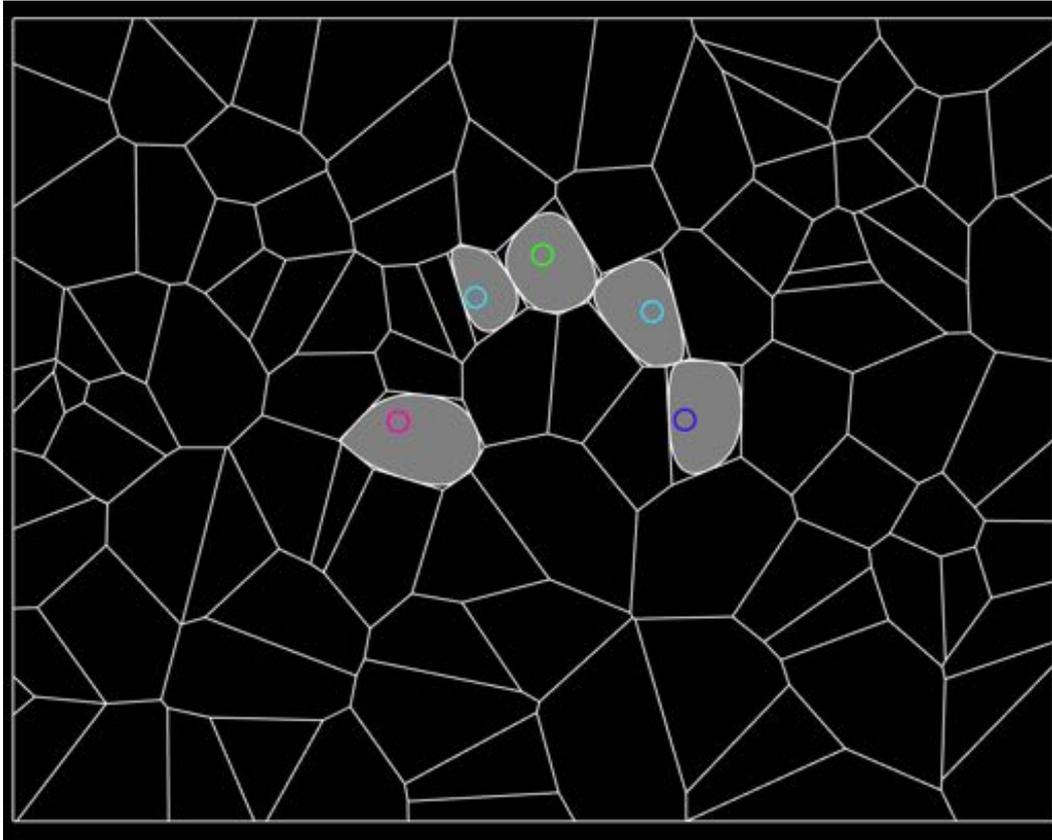


Figure 5.9.: Un modèle intermédiaire développé pour la performance audiovisuelle FIB_R, à partir d'un algorithme de calcul d'un diagramme de Voronoï (simulant la coadaptation organique d'un réseau de cellules). L'algorithme a été adapté pour permettre la modulation polyphonique du son en fonction de la forme que prennent les cellules quand elles sont déformées par l'interaction directe sur écran tactile (les cercles de couleur représentent ici la position des doigts).

Les notions de mapping *one-to-one*, *many-to-one*, *one-to-many* et *many-to-many*, telles que définie par [HW02], peuvent ainsi s'agencer sur plusieurs niveaux, selon la polyphonie de chaque modèle en jeu, ou être organisées en sous-groupes. Prenons l'exemple de doigts contrôlant chacun une multiplicité d'agents autonomes, venant chacun contrôler une polyphonie de notes sur une synthèse FM. Un scénario souhaitable (c'est un exemple) est que les agents et les notes contrôlés par un même doigt partagent des caractéristiques communes, ce qui nécessite une traçabilité de la source gestuelle jusqu'à la synthèse et/ou un moyen de fusionner les informations nécessaires de part et d'autre des différentes sources concourant au résultat sonore final.

Inversement, nous pouvons considérer un mapping *many-to-one*, en prenant l'exemple de plusieurs doigts venant agir sur un même objet virtuel. Dans ce cas, le résultat monophonique produit par l'objet virtuel peut être fonction de l'information polyphonique des différents doigts qui agissent sur lui. Cette différence d'appréciation peut être comparée à la manière dont sont envisagées les différentes notes d'un clavier. On peut soit considérer les différentes hauteurs produites par les touches comme une multiplicité d'événements indépendants (comme c'est le cas sur le clavier polyphonique d'un piano, sur lequel s'appuie le concept de note MIDI), soit envisager la hauteur comme un paramètre monophonique (comme c'est le cas sur le clavier monophonique d'une onde Martenot)²⁴.

Il est important de préciser ici que ces différentes manières de gérer la polyphonie se traduisent par des modes de jeu différents, qui peuvent modifier l'instrument jusque dans son identité, et ne doivent pas être considérées comme de simples facteurs d'échelle quantitatifs.

5.3.2 Motivations et revue des protocoles existants

Nous avons vu dans la section précédente comment le concept de modèle intermédiaire dynamique pouvait enrichir le geste capté et améliorer l'ergonomie des DMIs. Cependant, un des facteurs critiques rencontré lors de ces développements se situait dans la manière de faire communiquer différents modules polyphoniques²⁵ entre eux.

Un certain nombre de protocoles asynchrones²⁶ dédiés au contrôle temps-réel de

24. On notera l'existence possible de cas hybrides comme celui du clavier de la vielle à roue, une "duo-phonie", dont les 23 touches (en général) se répartissent sur les deux (voire trois ou quatre) cordes chanterelles.

25. Par « module polyphonique », on entend ici des processeurs traitant simultanément plusieurs flux de données de contrôle de même nature en parallèle, e.g. le filtrage des points de contact sur une interface multi-touch ou encore la modulation des différentes notes d'un accord.

26. Les protocoles de contrôle que nous envisageons ici sont asynchrones, fondés sur l'idée que les lutheries numériques sont des systèmes complexes composés d'éléments hétérogènes et intégrant notamment des interfaces *hardware* elles-mêmes asynchrones. Bien que la synthèse audio soit un processus synchrone, le design global d'un DMI est le plus souvent un système **Globalement Asynchrone, Localement Synchrone (GALS)**, tel que défini par Daniel M. Chapiro [Cha84].

la synthèse numérique ont vu le jour depuis les années 1980. Au-delà de proposer des solutions techniques concrètes, ces protocoles sont porteurs d'un modèle implicite représentant les objets en présence dans un contexte d'interaction musicale. Une brève revue montrera comment ceux-ci se sont progressivement ouverts, à mesure que les capacités de calcul se sont accrues et que la notion même d'instrument s'élargissait à de nouveaux champs tels que les installations sonores ou les applications musicales interactives.

MIDI

La norme **MIDI**, proposée en 1983, reste encore aujourd'hui le protocole le plus répandu pour le contrôle de la synthèse audio. La profusion de nouvelles interfaces et applications l'auront tout juste fait évoluer pour permettre la prise en charge de nouvelles technologies de réseau (rtMIDI²⁷) ou de nouvelles interfaces (**MPE**, voir plus bas). Les limitations du **MIDI** ont pourtant été identifiées peu de temps après son apparition²⁸, notamment :

- sa précision et son espace de nommage sont limités ;
- l'identifiant d'une note est assimilé à son (éventuelle) hauteur ;
- l'état actif d'une note est assimilé à sa vélocité ;
- la modulation individuelle des notes est fastidieuse ;
- sa nomenclature fait en partie référence aux instruments acoustiques (e.g. les notions de *Velocity*, de *Key-Pressure*, ou de *Bend*).

Le **MIDI** élude une partie de la question du mapping en reliant intrinsèquement le geste à la production sonore à travers le concept de note **MIDI**²⁹ qui assimile les deux côtés de l'interaction : la notion de vélocité se rapportant au geste et celle de pitch au son.

La dernière évolution du **MIDI** a été motivée par la commercialisation récente d'interfaces dites expressives³⁰, c'est-à-dire permettant la modulation indépendante de chaque note jouée. Bien qu'elles ne soient pas les premières interfaces permettant un tel contrôle, un effort conjoint a été entrepris par plusieurs fabricants pour définir un standard nommé **MPE**. Cette évolution n'est cependant qu'une normalisation de l'usage des canaux **MIDI** actuels permettant un tel contrôle dans le cadre existant, et non un nouveau protocole qui dépasserait les limitations intrinsèques au **MIDI**.

27. Encapsulation du **MIDI** dans des messages **Real-Time Transport Protocol (RTP)** permettant une communication sur des réseaux ethernet et WiFi.

28. Voir par exemple [Moo88], [MWW94] ou [Sel97]

29. Une note **MIDI** est composée d'une valeur de hauteur et d'une valeur de vélocité associées à un canal **MIDI**.

30. Citons le *LinnStrument*, le *Seabord* de Roli, le *Continuum* de Haken Audio, le *Eigenharp Alpha*, le *Soundplane* de Madrona Labs, le *K-Board Pro4* de KMI ou prochainement le *Joué*.

ZIPI

En 1994, Zeta Instruments et le CNMAT proposèrent le **Zeta Instrument Processor Interface (ZIPI)** [MWW94] pour dépasser les limitations du MIDI. ZIPI fait ainsi la distinction entre note, hauteur, canal et vélocité, augmente la précision des données, introduit des messages de modulation par note, la possibilité d'un réseau en étoile (plutôt que le chaînage linéaire du MIDI), ainsi qu'une méthode d'interrogation des instruments connectés.

ZIPI propose également une organisation hiérarchique à trois niveaux, héritée d'une classification traditionnelle où les "orchestres" sont des ensembles de "familles d'instruments", composées "d'instruments" et définis par un ensemble de "notes". ZIPI introduit enfin deux espaces de nommage distincts pour la description du geste d'une part et de la synthèse audio d'autre part.

Malheureusement, le public ciblé – les fabricants et utilisateurs de synthétiseurs hardware – n'était pas prêt pour un tel changement alors que l'avènement du protocole **firewire** cette même année palliait le faible débit de données du MIDI³¹.

Max et les "nombres asignifiants"

Dès 1985, un logiciel introduisait une nouvelle manière de connecter des dispositifs entre eux. Héritant à la fois de la logique des *opcodes* de la série de logiciels **MUSIC-N** et d'une ergonomie calquée sur le câblage hardware, Max³² offre la possibilité de connecter des opérateurs de bas niveau sur des flux de données libérés de toute référence à ce qu'ils pouvaient représenter (geste, son ou autre), d'où l'expression "meaningless numbers"³³ formulée à leur propos par Zicarelli dans [Zic91].

Un facteur ayant contribué au succès d'un logiciel comme Max est la possibilité qu'il laisse de pouvoir brancher plus ou moins n'importe quelle variable sur une autre, permettant ainsi une grande souplesse dans l'élaboration de scénarios d'interaction, ainsi qu'une approche expérimentale dans l'élaboration des **mappings**.

Cependant, la gestion de processus polyphoniques y reste délicate. Si un objet comme `poly~` permet effectivement de créer des instances multiples d'un même processus, son adressage reste fastidieux³⁴. En particulier, la distribution d'un processus polyphonique dans plusieurs modules élémentaires indépendants, permettant leur ré-agencement, n'est pas intégrée de manière aussi souple que la connexion de modules non-polyphoniques. L'utilisation de matrices pour le contrôle de variables

31. Le débit d'un bus MIDI était jusqu'alors de 31,25 kbit/s en connexion DIN uni-directionnelle ; le **firewire** proposait jusqu'à 400Mbit/s tout en étant bi-directionnel.

32. Initialement développé par Miller Puckette sous le nom "The Patcher".

33. Cette notion de nombres "asignifiants" fait éminemment écho aux propos de Gilles Deleuze dans "Mille Plateaux" [Del80] : "Un agencement machinique est tourné vers les strates qui en font sans doute une sorte d'organisme, ou bien une totalité signifiante, ou bien une détermination attribuable à un sujet, mais non moins vers un *corps sans organes* qui ne cesse de défaire l'organisme, de faire passer et circuler des particules asignifiantes, intensités pures, et de s'attribuer les sujets auxquels il ne laisse plus qu'un nom comme trace d'une intensité." p. 10

34. La gestion de la polyphonie a été améliorée par la prise en charge de messages au format **MPE**, ainsi que par l'ajout de signaux audio polyphoniques dans la dernière version. Cependant, le format **MPE** reste contraint par les limites pré-citées

en nombre est une option possible, mais elle n'est adaptée, en matière de performances, que lorsque l'on a affaire à un ensemble homogène de variables de taille pré-déterminée³⁵ plutôt qu'à des événements sporadiques arrivant à la volée. Elles se prêtent donc mal à l'hétérogénéité des variables rencontrées dans le design interactif de **DMIs**.

OSC : Open Sound Control

En 1997 au **CNMAT**, un groupe incluant d'anciens concepteurs de **ZIPI** ré-utilisa cette recherche pour développer le protocole **OSC** [WF+97], motivé par les possibilités offertes par la communication en réseau et le désir de prendre en compte l'extension des types de données, alimentée par l'utilisation grandissante de logiciels comme Max. En proposant une syntaxe intelligible et facile à utiliser, **OSC** a connu un certain succès : il a été adopté par un certain nombre de logiciels et interfaces hardware³⁶ et utilisé pour définir d'autres protocoles tels que **Gesture Description Interchange Format (GDIF)**, **TUIO**, ou encore la librairie "o."³⁷.

Pendant, sa relative lourdeur en terme de débit comparé au **MIDI** [Fra08] et une absence de nomenclature rendant plus fastidieuse les branchements l'ont pour l'instant privé d'une adoption par l'industrie et le grand public.

TUIO : Tangible User Interface I/O

Dans cette brève revue, il faut mentionner **TUIO** [Kal+05], basé sur **OSC**, et développé pour le projet *ReacTable*. **TUIO** ne se focalise que sur l'information gestuelle particulière propre aux interfaces multitouch, en transmettant des informations sur le contact des doigts et d'éventuels objets sur la surface tactile. Il introduit un indice incrémentiel pour identifier de manière unique des événements dynamiques et éphémères tels que les touches de doigt sur une **interface utilisateur tangible (TUI)**. Il se distingue également de la logique des événements **MIDI**, dont l'utilisation de messages distincts pour les note-on et -off peut produire des notes qui restent "bloquées" si un message note-off est perdu. Il propose une solution simple et pratique pour résoudre l'incertitude d'arrivée des messages envoyés sur **User Datagram Protocol (UDP)**, consistant à envoyer systématiquement la liste des événements actifs.

Minuit/Jamoma

Une autre direction de développement basée sur **OSC** est le protocole *Minuit* [DRG11], qui implémente en particulier un système d'auto-déclaration / découverte sur un réseau de modules connectés. *Minuit* a été utilisé comme protocole dans

35. Le changement dynamique de taille de matrice étant une opération coûteuse, mal-adaptée aux exigences du temps-réel de la performance.

36. Comme le *Lemur* de JazzMutant, le *Monome* ou encore l'*Ethersense* de l'**IRCAM**.

37. "Oh dot" : package pour Max, développée au **CNMAT**, cf. [FMS11].

le projet Jamoma³⁸ et dans le séquenceur interactif i-score/OSSIA développé par le LaBRI [Cel+15].

Le signal

S'il n'est généralement pas envisagé tant comme un signal de contrôle que comme un support pour l'audio numérique³⁹, le signal peut être utilisé à cette fin et même permettre la transmission d'événements asynchrones. Le développement de la librairie "Sagrada", présentée dans la section 5.4, en donne un exemple concret.

5.3.3 Description générale

Le système MP (*Modular Polyphony*)⁴⁰ est un protocole et un ensemble d'outils facilitant la connexion modulaire de processus polyphoniques. Il se compose de blocs de traitements polyphoniques nommés *MP-blocks*, communiquant par des messages asynchrones nommés *MP-messages* et représentant des objets temporels abstraits nommés *MP-events*. Le but de cette librairie est d'améliorer la modularité en conservant l'indépendance des blocs individuels de traitement par rapport au design général de l'interaction.

MP s'inspire de certaines des idées présentes dans les protocoles pré-cités. En particulier, il reprend un concept général du **MIDI** qui conçoit le contrôle musical temps-réel comme une séquence d'événements temporels ayant un début (Note-On) et une fin (Note-Off). Il emprunte aussi à **ZIPI** l'idée d'un découplage entre identifiant, hauteur, vélocité, canal, ainsi que la nuance entre l'activation d'une note et sa modulation. Le protocole MP est ainsi fondé sur un paradigme à trois états permettant la modulation expressive de tout paramètre.

Par ailleurs, ce système étant destiné à une lutherie expérimentale et exploratoire, MP laisse le typage et l'espace de nommage des paramètres ouverts, sans le restreindre à une nomenclature arbitraire. Néanmoins, il propose une syntaxe plus orientée qu'**OSC** et que les "nombres assignifiants" de Max, pour faciliter une gestion cohérente de l'interconnexion de modules.

Enfin, MP propose une stratégie originale permettant l'association dynamique d'événements entre eux, de telle sorte qu'il soit possible de contrôler les paramètres par groupes (et sous-groupes).

38. <http://jamoma.org>

39. David Zicarelli parle encore d'*audio channels* dans une conférence présentant la nouvelle version de Max sensée changer la manière de les considérer : <https://www.youtube.com/watch?v=Y4YLy7kqcr8>

40. Disponible sur : <https://github.com/LAM-IJLRA/ModularPolyphony>

5.3.4 MP-events

Un *MP-event* est un objet temporel abstrait qui peut être traité par des *MP-blocks*. Il est défini par un ensemble de *MP-messages* (figure 5.10). Ces messages sont composés de paramètres de contrôle précédés par un identifiant unique propre au *MP-event*. Le format de message est minimaliste et tous les messages utilisent la même syntaxe : un identifiant unique, un nom de paramètre suivi d'une liste de valeurs. Par exemple :

- [42 pitch 112] : le *MP-event* #42 règle le paramètre de pitch à la valeur 112 ;
- [123 scale 0 2 4 5 7 9 11] : le *MP-event* #123 définit une gamme diatonique.

Deux noms de paramètre sont réservés pour un usage particulier : `state` et `guess`. Ils seront détaillés dans les prochaines sections. Nous verrons également qu'un *MP-event* peut suivre plusieurs chemins de traitement en parallèle et être fusionné avec d'autres *MP-events*.

Identifiant

L'identifiant unique (ID) sert à identifier un *MP-event* tout au long de ses traitements. Le *MP-event* peut provenir d'un capteur physique (e.g. une touche de clavier) ou d'une source virtuelle (e.g. représentant le contact d'un doigt sur une TUI ou le produit d'un algorithme génératif). L'ID est présent dans chaque *MP-message* pour éviter toute erreur de routage dans le cas où un *MP-block* recevrait parallèlement des *MP-events* de plusieurs sources indépendantes. Les ID peuvent être définis explicitement – auquel cas la gestion de conflit d'adressage est laissée à la charge du développeur – ou générés de manière unique par un objet dédié : `mp.uID-maker`.

Etat

Le message “state” est réservé et deux missions lui sont attribuées :

- il sert d'horloge asynchrone en déclenchant l'envoi des paramètres au processus ;
- il spécifie la manière dont le processus doit interpréter ces paramètres.

Les paramètres peuvent ainsi être interprétés de trois façons :

- **state 1** : début de modulation de paramètre ;
- **state 2** : mise à jour de paramètre ;
- **state 0** : fin de modulation de paramètre.

Le modèle musical sous-jacent envisage ainsi un *MP-event* comme la modulation d'un ensemble de paramètres et prend en compte les phénomènes transitoires qui peuvent

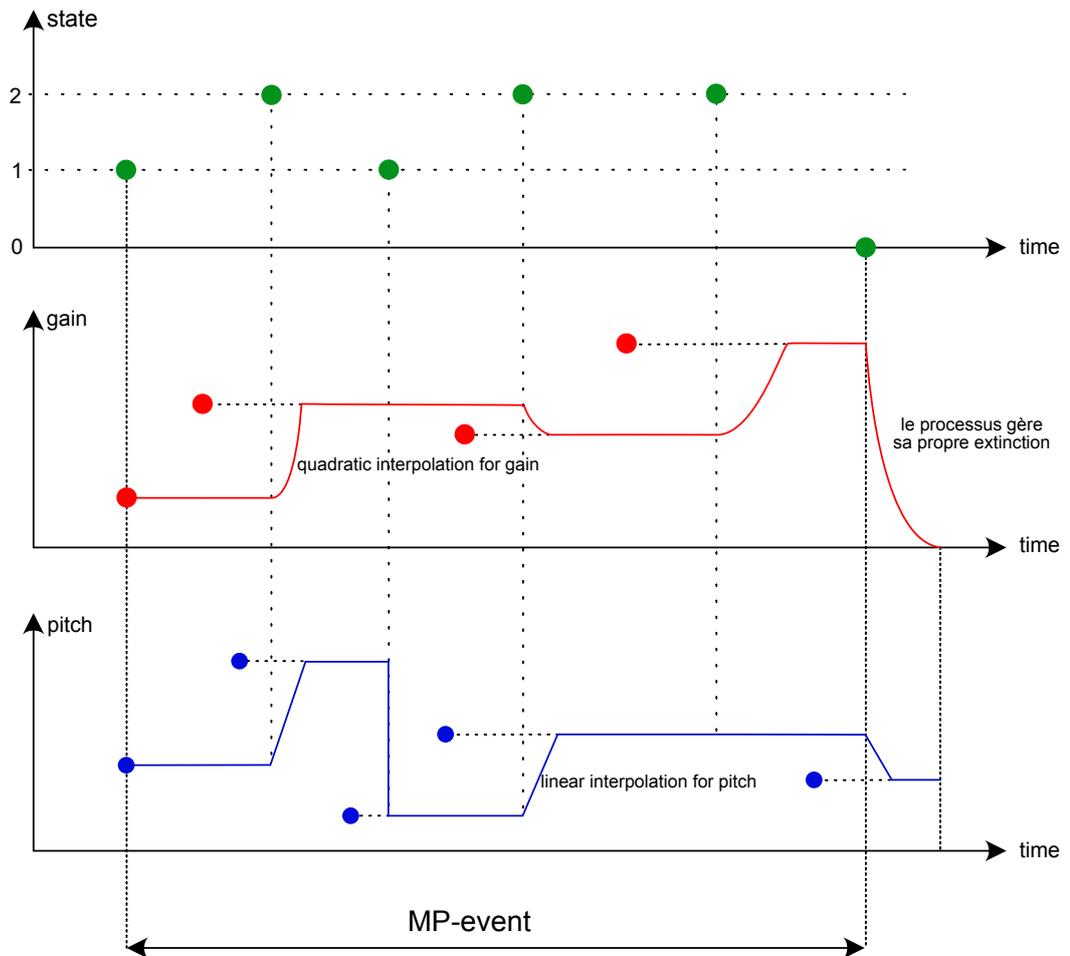


Figure 5.10.: Représentation schématique d'un *MP-event*. Les cercles représentent des *MP-messages*, les courbes représentent l'évolution du paramètre dans le processus. Notons que les paramètres ne sont pris en compte que lorsqu'un message *state* est reçu.

apparaître au début et/ou à la fin d'une modulation⁴¹. Ces discontinuités peuvent causer des réponses non-linéaires, trop rapides pour être contrôlées manuellement et parfois mieux traitées séparément.

Dans l'algorithme de traitement, ces états peuvent correspondre à l'initialisation de variables internes, l'activation d'un lissage (*portamento*) entre deux valeurs consécutives, le déclenchement d'un processus transitoire spécifique (e.g. l'attaque d'un son), etc. Tout paramètre peut donc être envoyé à un *MP-block* en spécifiant s'il doit être considéré comme le début, la continuation ou la fin d'une phrase de modulation⁴². Ce modèle à trois états semble correspondre par ailleurs aux intentions de la **MMA** qui a annoncé un message de *note-update* dans le futur protocole MIDI-HD⁴³.

Notons toutefois que dans notre cas, le message d'état peut être rattaché à n'importe quel paramètre, ce qui diffère encore de l'implémentation **MIDI**, notamment en ce qui concerne l'allocation de voix. Alors que le premier message *state 1* reçu pour un ID causera l'allocation d'une voix dans le *MP-block*, le message *state 0* ne libérera pas nécessairement cette voix, cette décision revenant au processus en cours, comme nous le verrons plus loin.

Guest-list

La spécification MP ne suit pas d'organisation hiérarchique telle que les canaux **MIDI** ou les familles d'instruments de **ZIPI**. À la place, elle laisse la possibilité à tout *MP-event* de déclarer une liste de *MP-events* "invités" (*guestlist*) à la volée. Ces invités pourront avoir accès à la voix allouée au *MP-event* hôte et contrôler ses paramètres. Cette fonctionnalité nous offre une solution flexible pour le groupement d'événements, permettant un nombre arbitraire de niveaux hiérarchiques, sans pour autant être limité par une relation de subsumption.

La *guestlist* peut être utilisée dans le cas de *MP-blocks* génératifs, où l'ID du *MP-event* "parent" peut être ajouté à la *guestlist* des *MP-events* "enfants". Ceci permet de réaliser une traçabilité des événements⁴⁴ et d'assurer une modulation cohérente de plusieurs voix associées à des *MP-events* générés par une même source. Des exemples concrets de cette situation sont les pistes **MIDI** ou la hiérarchie orchestre/famille/instrument/note proposée par **ZIPI**. Ils correspondent à un "*mapping* divergent" dans le schéma proposé par Rován, Wanderley, Dubnov et al. [Rov+97].

Un "*mapping* convergent" est également possible : plusieurs *MP-events* peuvent être déclarés comme invités d'un *MP-event* tiers. Par exemple, un *MP-event* "enfant" peut être créé à partir du résultat de l'interaction de plusieurs *MP-events* "parents"

41. Un exemple évident est l'attaque d'un son, mais en ce qui concerne un processus non-sonore comme le filtrage de données, cela peut concerner l'initialisation du filtre.

42. La confusion entre le *pitch* et l'identifiant de note dans le protocole **MIDI** rend le résultat de la même opération incertain : alors que certains synthétiseurs re-déclencheront la même voix, d'autres alloueront une nouvelle voix et attendront le même nombre de *note-off* qu'il y a eu de *note-on*.

43. Rapporté par le site web Synthtopia : <http://www.synthtopia.com/content/2013/01/20/midi-manufacturers-testing-new-high-definition-midi-protocol>

44. Traçabilité dont la nécessité a été présentée en début de section 5.3

(cf. exemple section 5.3.6).

Notons qu'une solution alternative aurait pu consister à transmettre systématiquement la liste de tous les paramètres d'un *MP-event* parent à ses enfants. Dans le cas de chaînes de mapping assez longues, ou de polyphonies élevées, cet héritage systématique s'avérait cependant trop lourd pour être une solution efficace.

Master-ID

Le paramètre *guests* ne nous laisse toutefois pas un accès aisé à l'ensemble des voix de polyphonies d'un *MP-block*. À cette fin, un identifiant spécifique indexé à 0 permet ce contrôle global. Il revient implicitement à considérer que le *MP-event* #0 (nommé *master-ID*) fait systématiquement partie de la *guestlist* de tout *MP-event*. Dans le cas où les *MP-events*, ses *guests* et le *master-ID* tentent de modifier les mêmes paramètres, l'ordre de priorité est donné du plus spécifique au plus général, c'est-à-dire au *MP-event*, puis aux *guests*, puis au *Master-ID*⁴⁵.

Ordonnancement des MP-messages

Le cycle de vie de la voix d'un *MP-event* suit la séquence suivante de *MP-messages* :

1. envoi des paramètres de début de modulation ;
2. envoi du message state 1 ;
3. envoi des paramètres de modulation ;
4. envoi du message state 2 ;
5. envoi des paramètres de fin de modulation ;
6. envoi du message state 0.

Cependant, comme la libération d'une voix ne suit pas nécessairement un message state 0 (dans le cas où le processus a sa propre stratégie d'extinction), il est possible d'envoyer différents messages d'état plusieurs fois durant la durée de vie d'une voix, jusqu'à ce que la voix soit effectivement libérée.

5.3.5 MP-blocks

Un *MP-block* se compose de deux parties (cf. schéma 5.11 et implémentation dans Max, figure 5.12) : le routeur et le traitement polyphonique que nous décrivons ici.

Le routeur

Le routeur accomplit les fonctions suivantes :

- le stockage des paramètres reçus pour un *MP-event* ;

45. On retrouve également cette idée, quoique limitée par les contraintes du MIDI, dans la notion de *master channel* du protocole MPE.

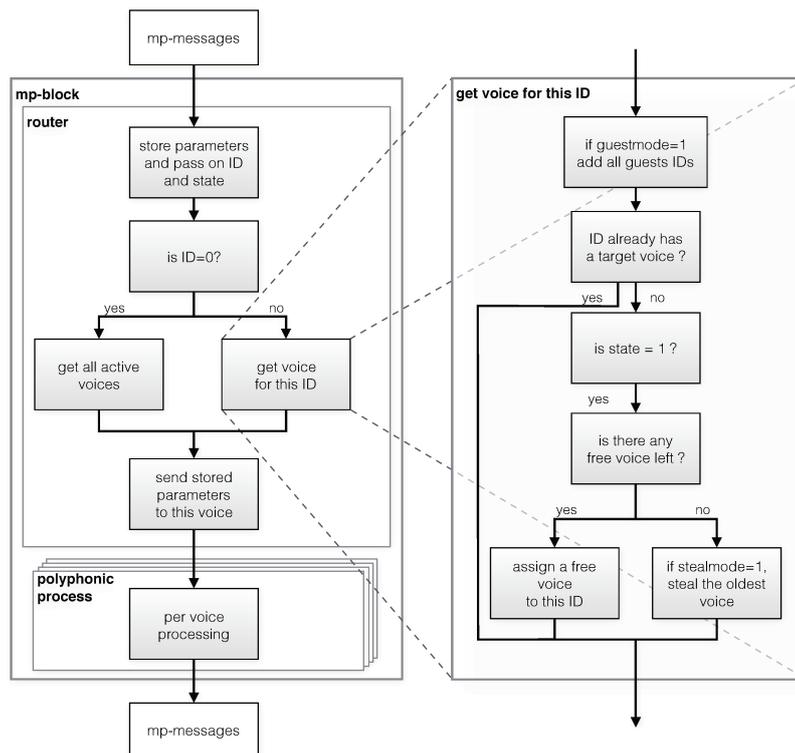


Figure 5.11.: Représentation schématique d'un *MP-block* avec le fonctionnement du routeur.

- l'allocation de voix pour un nouvel *MP-event* ;
- l'envoi des paramètres à cette voix ;
- l'envoi éventuel des paramètres des *guests* ;
- l'enregistrement de la libération de la voix.

L'ordonnancement des messages envoyés à la voix de traitement assure une synchronisation du calcul afin qu'il ne soit fait qu'une seule fois. Ainsi, la séquence suivante est envoyée par le routeur à la voix cible :

1. start X state Y : ce message permet à la voix de se préparer à traiter les paramètres à venir selon l'état Y ;
2. tous les paramètres du master-ID ;
3. tous les paramètres des *guests* ;
4. tous les paramètres du *MP-event* déclencheur ;
5. end X state Y : ce dernier message clôt la séquence et sert de signal d'horloge déclenchant le calcul.

L'allocation de voix est réalisée à l'arrivée du premier message state 1 pour un *MP-event* donné. La libération de la voix intervient quand le processus de traitement indique au routeur qu'il a terminé sa tâche. Trois scénarios sont alors possibles :

- Le processus se termine dès qu'un message `state 0` est reçu. Ce sera le cas, par exemple, pour un processus tel qu'une addition ou un filtre médian. Ce scénario est pris en compte de manière automatique en spécifiant un attribut `@automute 1` au routeur ;
- Le processus déclenche son extinction à la réception d'un message `state 0`, typiquement le *release* d'une enveloppe **Attack Decay Sustain Release (ADSR)** ;
- Le processus a sa propre durée et peut avoir terminé sa tâche avant ou après avoir reçu un message `state 0`. C'est le cas, par exemple, lors de la génération d'un signal audio de durée fixe comme un échantillon de percussion.

Traitement par voix

Le traitement par voix est effectué par un patch chargé dans les multiples voix d'un objet `Max poly~`. En dehors des fonctions permettant le traitement à proprement parler, un objet nommé `mp-muter` permet de ventiler les messages envoyés par le routeur en fonction du message d'état et de renvoyer au routeur l'information de fin de tâche que le processus doit fournir dans le cas où il possède une extinction propre (mode `@automute 0`). Ce principe est exposé sur la figure 5.13, dans laquelle l'objet `Max adsr~` vient notifier la fin de l'enveloppe à l'objet `mp.muter`.

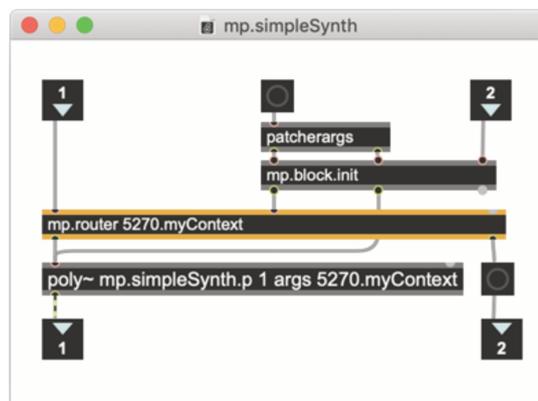


Figure 5.12.: `mp.simpleSynth` : routeur et encapsulation de la synthèse.

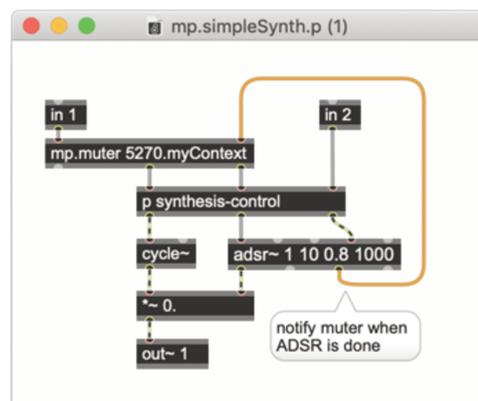


Figure 5.13.: `mp.simpleSynth` : patcher de synthèse. Le routeur est notifié de la fin d'activité de l'envoi d'un message "mute" par l'objet ADSR.

Paramètres d'un MP-block

Les *MP-blocks* répondent à une liste de paramètres contrôlant le processus de traitement par voix. Ces paramètres sont stockés par ID dans le routeur jusqu'à ce qu'un message d'état soit reçu. Ce message entraînera l'allocation d'une voix (si disponible), à qui seront envoyés tous les paramètres rattachés à cet ID.

Il est possible d'envoyer d'autres paramètres que ceux contrôlant le processus. Dans ce cas, ils traverseront le *MP-block* inchangés, tout en restant synchrones avec d'éventuels autres paramètres générés par le processus qu'ils traversent. Dans le cas où ce processus génère de nouveaux *MP-events*, ces paramètres peuvent automatique-

ment être ajoutés à chaque *MP-event* généré, en une sorte d'héritage similaire à celui opéré par la librairie “o.” [FMS11], mais non-automatique et laissé à l'appréciation du développeur du *MP-block*.

5.3.6 Exemples

Les exemples proposés dans cette section présentent des cas concrets d'utilisation du système MP. Ils sont implémentés dans le logiciel Max et inclus dans les exemples du package *ModularPolyphony*. Ces exemples s'appuient sur l'utilisation d'une tablette *multitouch*, dont les données reçues dans l'objet `mp.TUIO.input` sous la forme de *MP-events* correspondent au contact de chaque doigt, avec les coordonnées en X et Y de leur position sur la tablette. Le synthétiseur `mp.simpleSynth` est celui présenté sur les figures 5.12 et 5.13.

Mapping simple avec une fonction pure

Cet exemple (figure 5.14) montre l'utilisation la plus simple du système MP. On contrôle ici la valeur de vitesse sur l'axe vertical tandis que l'axe horizontal contrôle la hauteur.

Comme l'objet `scale`, qui opère une mise à l'échelle entre les données de position (entre 0 et 1) et les données de hauteur et de vitesse (en valeur MIDI 0-127), est une fonction pure⁴⁶, il peut être utilisé pour traiter directement l'ensemble des *MP-messages* lui parvenant. Ici, l'avantage d'utiliser MP est de bénéficier d'un système d'adressage similaire au *MPE* sans être limité par le typage, la précision et l'espace de nommage des données.

Mapping avec une fonction impure

Une fonction sera impure dans le cas où son fonctionnement interne implique la mémorisation de valeurs. Ce cas de figure se produit avec les fonctions récursives, mais également avec les fonctions non-récursives, quand leurs différents opérandes arrivent de manière non-synchrone.

Cet exemple (figure 5.15) montre le cas d'un mapping avec une fonction récursive. L'objet `slide` de Max opère un filtrage logarithmique défini par l'équation :

$$y[n] = y[n - 1] + \frac{(x[n] - y[n - 1])}{slide}$$

Dans ce cas là, il n'est plus possible d'utiliser une seule instance de l'objet `slide` pour traiter l'ensemble des *MP-messages*, en raison de la mémoire interne d'un état précédant propre à un *MP-event* particulier. L'objet `mp.slide` permet alors d'instancier plusieurs voix traitant les valeurs individuelles de *pitch* en parallèle.

46. En informatique, une fonction pure, appelée également algorithme déterministe, est une fonction dont la sortie ne dépend que de la valeur d'entrée.

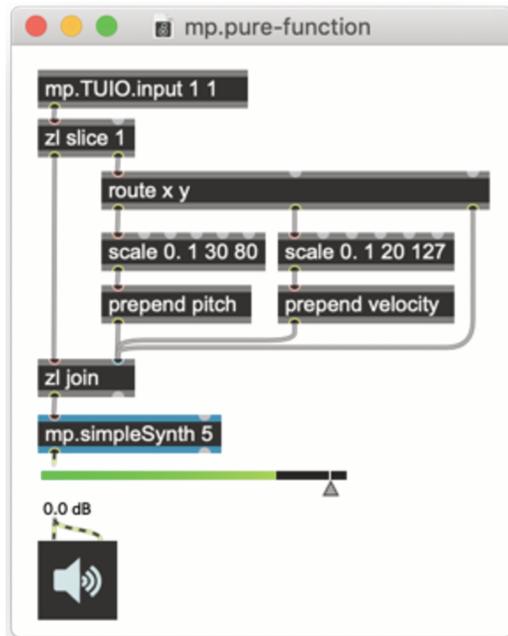


Figure 5.14.: Exemple de patch MP : mapping avec une fonction pure.

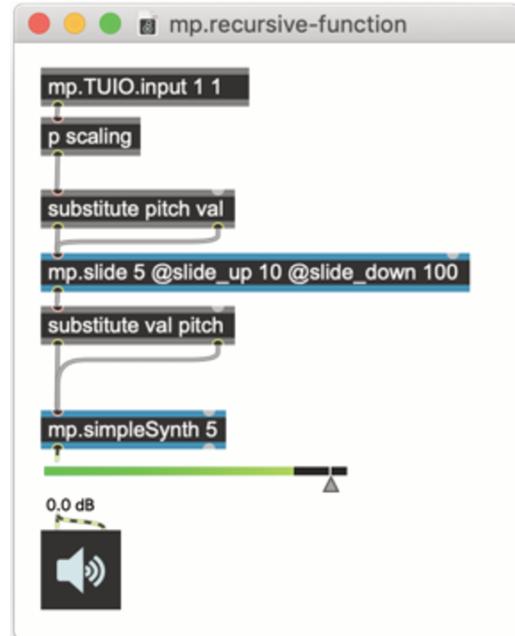


Figure 5.15.: Exemple de patch MP : mapping avec une fonction récursive.

Création dynamique de MP-events et guests

Dans cet exemple (figure 5.16), nous créons à la volée des *MP-events* “enfants” que nous contrôlons en parallèle avec le *MP-event* “parent”. Dans un premier temps, nous associons les coordonnées *x* et *y* d’un *MP-event* aux paramètres de hauteur (pitch) et de vélocité, respectivement. Le module `mp.note2chord` génère un accord à partir de la hauteur (ici en ajoutant une quinte à la hauteur d’entrée). Cet accord prend la forme de deux nouveaux *MP-events* enfants qui vont venir activer chacun une voix de polyphonie de notre synthétiseur. Le module `mp.note2chord` ajoute également aux paramètres des *MP-events* enfants, l’ID du *MP-event* parent, en tant qu’invité. Ceci va nous permettre de contrôler le paramètre de vélocité des deux notes simultanément à partir du *MP-event* parent.

- à gauche, le module génère un ensemble de *MP-events* “enfants”. Le premier niveau en génère deux et le deuxième niveau en génère 3. Le résultat final est la génération d’un accord de six notes à partir d’un seul *MP-event* ;
- à droite, le *MP-event* venant de `mp.TUIO.input` est envoyé sur deux chemins où ses valeurs sont mises à l’échelle par le module `mp-scale` pour définir respectivement la fréquence et l’offset d’un **Low Frequency Oscillator (LFO)**. Le **LFO** contrôlera ensuite la fréquence de coupure d’un filtre passe-bas du module de synthèse ;
- nous avons deux occurrences d’un contrôle global avec le Master-ID : une pour le paramètre *depth* du **LFO** et une pour la transposition du deuxième étage `note2chord` ;

- en dernier lieu, nous dirigeons les messages résultant de ces deux chemins vers un système de représentation graphique. La position d'objets graphiques est assignée aux valeurs de pitch des *MP-events* générés, tandis que leur couleur est associée au *MP-event* parent. Ceci résulte en une représentation graphique de toutes les hauteurs en tant qu'objets dont la couleur nous dit à quelle source commune (ici le contact d'un doigt sur un écran) ils sont rattachés.

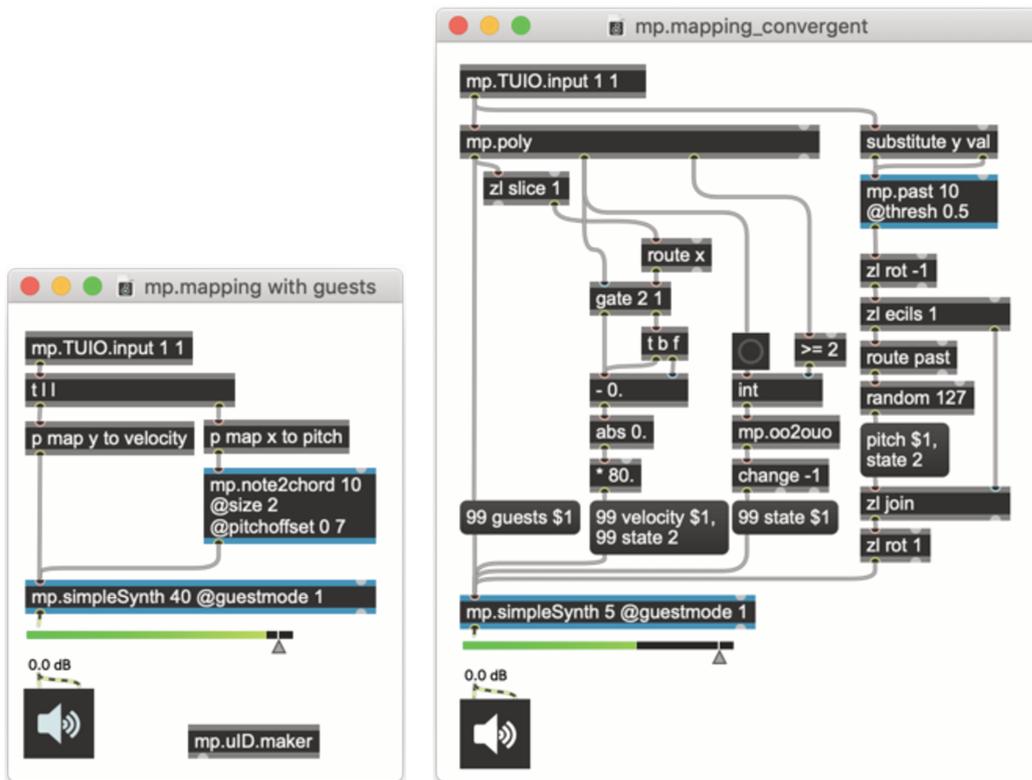


Figure 5.16.: Utilisation de la **Figure 5.17.:** Utilisation de la guestlist pour un mapping divergent. guestlist pour un mapping convergent.

Mapping polyphonique convergent : many[guests]-to-one

Alors que l'exemple précédent montre une utilisation de la *guestlist* dans un mapping "divergent", le suivant (figure 5.17) réalise un mapping "convergent".

Imaginons que l'on souhaite contrôler avec deux doigts un son dont l'intensité est proportionnelle à l'espacement de nos doigts. Il faut alors que deux *MP-events* indépendants (correspondant à la captation de mes deux doigts) soient combinés pour que leur présence conjointe donne naissance à un nouveau *MP-event* "enfant". C'est ce qui est réalisé dans les deux chaînes de traitement centrales sur la figure 5.17, la chaîne la plus à gauche déclarant les ID des *MP-events* "parents" dans la *guestlist* du *MP-event* ainsi créé.

Imaginons maintenant que l'on souhaite que la hauteur du son produit change aléatoirement à chaque fois que l'un de nos doigts franchit une frontière virtuelle sur l'interface (définie dans l'exemple de la figure 5.17 comme une ligne horizontale

de coordonnée $y = 0, 5$). Cela nécessite que les *MP-events* correspondant à chacun de mes doigts puissent agir sur le son créé par le *MP-event* “enfant”. C’est l’opération réalisée par la chaîne de traitement la plus à droite sur la figure 5.17, avec l’objet `mp.past` qui détecte le franchissement de seuil pour chaque événement en parallèle (cette détection n’étant pas une fonction pure).

Contrôle d’interfaces graphiques

Le système MP est également amplement utilisé dans la librairie MP.TUI, qui sera présentée au chapitre suivant.

5.3.7 Limitations et optimisations

Séparer les différents processus de traitement d’un design d’interaction polyphonique a l’avantage de permettre une meilleure modularité et, par suite, une meilleure stabilité des processus mis en œuvre, qui n’auront pas à être modifiés en interne pour être adaptés à une autre situation. Le choix a également été fait de ne pas s’appuyer sur une mémoire globale ou des pointeurs externes aux modules (e.g. pour sauver la *guestlist*), de sorte que les *MP-blocks* soient réellement indépendants et autonomes et que le design d’interaction général puisse être réparti sur plusieurs applications et/ou machines en réseau.

Cependant, cette modularité a un coût et est moins optimisée, en matière de coût **Processeur Central (CPU)** et d’utilisation de la mémoire, qu’un design qui consisterait à inclure toutes les fonctions nécessaires dans les traitements *ad-hoc*. Certaines optimisations peuvent être réalisées pour des processus ne nécessitant pas de mémoire interne (e.g. une mise à l’échelle statique), pour lesquels il n’est pas nécessaire d’allouer des voix. Cela se fait cependant au prix de certaines fonctionnalités (pas d’utilisation du *master-ID* possible dans ce cas). Par ailleurs, le framework MP a entièrement été réalisé à l’aide d’objets natifs Max et pourrait sûrement être optimisé en le portant sous la forme d’objets compilés.

Le modèle de messages asynchrones distinguant début et fin d’événement ne résoud pas directement le problème de note “bloquées”⁴⁷ tel qu’on le connaît avec l’utilisation du **MIDI**. Cependant, l’ouverture de l’espace de nommage permet l’implémentation *ad-hoc* d’un système d’acquittement⁴⁸, ou de *heartbeat*⁴⁹. Par ailleurs, un

47. Ce problème surgit dans les systèmes **MIDI**, quand un message *note-off* n’arrive pas au synthétiseur et que le son reste ainsi “bloqué”. Une fonction “MIDI-panic” est généralement implémentée, qui règle brutalement ce problème en envoyant des messages *note-off* sur toutes les voix (MIDI-CC 120 : “All Notes Off”) ou en coupant directement le son (MIDI-CC 120 : “All Sounds Off”).

48. Tel qu’il existe dans le protocole **Transmission Control Protocol (TCP)**

49. Nom donné au signal périodique généré par un programme pour indiquer son fonctionnement normal ou pour sa synchronisation avec d’autres parties d’un système informatique.

message *flush*⁵⁰ est présent sur chaque module MP, afin de gérer au besoin l'urgence lors d'une performance.

5.4 Sagrada : extension de MP au DSP

5.4.1 Motivations et contexte

Si le développement de la librairie MP a permis d'apporter du contrôle continu à l'intérieur d'une logique basée sur des événements discrets, la démarche inverse permet d'explorer, dans l'autre sens, les passerelles expressives possibles entre le synchrone et l'asynchrone, le continu et le discret, le lisse et le strié⁵¹. En particulier, la synthèse granulaire est basée sur le découpage du continuum sonore en grains de son et les premières œuvres utilisant ce type de synthèse⁵² sont très nettement marquées par cette recherche de passage entre le continu et le discret.

Ma pratique personnelle m'avait amené à utiliser l'environnement **GMU**⁵³ en raison des possibilités inégalées qu'il offrait dans Max, en ce qui concerne le contrôle du déclenchement des grains, réalisé par un signal **DSP**, ce qui permet des fréquences de grains très élevées (potentiellement, jusqu'à la moitié de la fréquence d'échantillonnage) tout en conservant une précision temporelle à l'échantillon près.

La question était donc : comment relier ces deux domaines polyphoniques s'appuyant sur des supports hétérogènes ? La possibilité de pouvoir contrôler les grains individuellement dans **GMU**, bien que très fine, ne permettait pas d'accéder à leur modulation en dehors de l'interface fournie par l'objet Max. Les grains y sortent mixés sur deux canaux⁵⁴ et l'ajout d'un filtre en aval est nécessairement appliqué à l'ensemble des grains.

Suivant la même logique de modularisation suivie dans le développement de MP, Sagrada propose un ensemble de modules indépendants, traitant les grains de manière indépendante. Le passage de paramètre est réalisé à partir d'une horloge qui envoie des impulsions sur un signal synchrone de Max.

50. Équivalent de la fonction "MIDI-panic" généralement présente sur les système **MIDI** et permettant d'éteindre toutes les notes actives (quand elles sont bloquées).

51. Pierre Boulez utilise ces termes pour évoquer la dialectique entre le continu et le discontinu et définir la nature des "espaces" (en particulier, le temps) en musique dans [Bou87].

52. Par exemple, "Concret PH" de Iannis Xénaïkis en 1958, ou "Kontakte" de Karlheinz Stockhausen en 1960, dont un passage durant lequel la fréquence des grains, d'abord perçue comme une hauteur tonale, décroît jusqu'à être perçue comme un rythme, est un exemple concret de notre propos.

53. Environnement pour la synthèse granulaire dans Max/MSP, développé par Laurent Pottier et Charles Bascou au **Groupe de Musique Expérimentale de Marseille (GMEM)**, voir [BP05]

54. Une version 8-canaux existe aussi, mais destinée plutôt pour l'octophonie de haut-parleurs, plutôt que pour le traitement individuel des grains.

5.4.2 Implémentation

Types de modules

Sagrada est basé sur trois types de modules, dont le fonctionnement est détaillé par la suite :

- **une horloge**, gérant le déclenchement des grains ;
- **des modules de traitement**, contrôlés par l’horloge ;
- **des modules de gestion de flux**, permettant de grouper les ticks d’horloges en flux indépendants.

Interconnexion des modules

Un patch Sagrada (figure 5.18) fait intervenir une série de modules reliés par une variable définissant un *contexte*. Ce contexte permet :

- **de redéfinir la polyphonie** de l’ensemble des modules, en la déclarant seulement auprès de l’horloge ;
- **de synchroniser** l’ensemble des modules à une horloge commune ;
- **d’éviter les conflits d’adressage** entre plusieurs contextes Sagrada.

Les modules de Sagrada sont interconnectés par la spécification du nom de leurs entrées et sorties sous forme d’arguments du module (à l’instanciation), ou de messages Max pour changer cette interconnexion à la volée.

Horloge et assignation de voix

L’horloge de Sagrada est implémentée dans l’abstraction Max `sagrada.trigger~`. Son principe de fonctionnement consiste à envoyer un *tick* de déclenchement de grain à une nouvelle voix de polyphonie à chaque fois qu’elle reçoit une impulsion en entrée. Ces impulsions peuvent donc être déclenchées soit de manière asynchrone (e.g. en transformant un message **MIDI** en une impulsion grâce à l’objet Max `click~`), soit de manière synchrone (e.g. en utilisant un train d’impulsion contrôlé en fréquence). L’incrément fonctionne selon l’équation suivante, dans laquelle x représente le signal de déclenchement, y la voix de polyphonie cible et N la polyphonie maximale autorisée :

$$y[n] = (x[n] + y[n - 1]) \pmod N$$

Dans cette version simple, l’assignation des voix se fait donc de manière cyclique, en “usurpant” au besoin la voix à un grain encore actif. Un mécanisme de non-usurpation est également proposé sur le mode du *round-robin*⁵⁵. Il s’appuie sur l’utilisation d’un

55. Le *round-robin* est un algorithme d’ordonnancement consistant à attribuer une opération à un processus faisant partie d’une file d’attente, en choisissant le premier disponible dans l’ordre de la file d’attente.

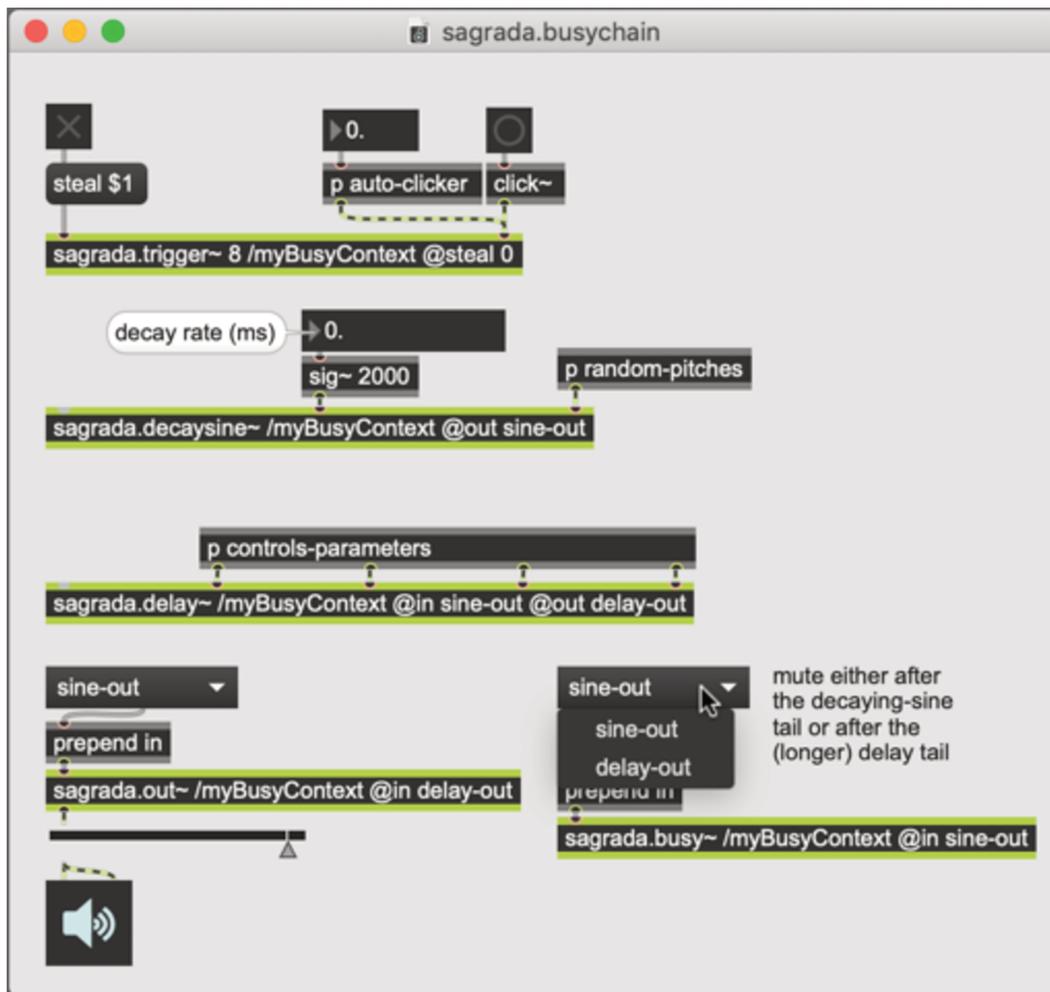


Figure 5.18.: Exemple de patch Sagrada montrant différents modules interconnectés dans un même contexte.

tableau, nommé “*jump-buffer*”, contenant l’incrément nécessaire pour passer de la voix prévue par l’algorithme simple à la prochaine voix disponible. Si la voix prévue est libre, cet incrément est nul ; si l’incrément est égal à la valeur de polyphonie, on n’envoie pas le grain, sinon on saute de l’offset du *jump-buffer* pour trouver une voix libre.

$$z[n] = (y[n] + \textit{jump}[y[n]]) \bmod N$$

L’implémentation de ce mécanisme d’horloge synchrone a été réalisée dans l’environnement `gen~` de Max, afin de pouvoir travailler à l’échantillon (cf. figure 5.19). Le calcul des valeurs du *jump-buffer* est réalisé en permanence de manière synchrone (cf. schéma fonctionnel figure 5.20) à partir de l’information d’état actif des voix, typiquement calculée à partir d’un seuillage sur l’enveloppe temporelle du son.

Le module permettant ce mode de fonctionnement sans usurpation de voix est implémenté dans un module indépendant, pouvant être placé à n’importe quel endroit dans la chaîne de traitement des grains (cf. objet `sagrada.busy~` sur la figure 5.18). Par exemple, si un grain subit une opération de filtrage résonnant, sa durée finale sera plus longue que le grain original. On pourra donc, au besoin, contrôler l’état occupé d’une voix par les grains issus de ce filtre résonnant.

Gestion des flux de grains

Si l’on considère l’ensemble des grains générés comme un flux, deux questions concernant leur gestion se posent alors :

- **la gestion d’un flux dans sa durée** : concrètement, si je considère un flux de grain comme un macro-objet temporel ayant un début et une fin, une gestion particulière des coupures de début et de fin est souhaitable pour adapter la nature du son à un niveau micro-temporel à la forme macro-temporelle (par exemple en choisissant un grain particulier pour l’attaque) ;
- **la gestion de la multiplicité des flux** : concrètement, et pour faire le lien avec les développements présentés dans MP, si un doigt peut contrôler un flux de grains, un autre doigt doit pouvoir contrôler un autre flux de grains (et ainsi de suite) sans qu’il y ait de confusion dans le contrôle de chacun de ces flux.

La gestion de flux de grains est prise en charge par l’objet `sagrada.multilayer~` (figure 5.21), qui permet de multiplexer plusieurs horloges en leur attribuant un index. Cet index de flux permet le décompte des grains par flux et en particulier, d’utiliser cet index pour gérer des grains individuels tels que le premier et le dernier grain d’un flux, qui peuvent ainsi être sélectionnés pour l’attaque et l’extinction du son.

Un mécanisme de feedback interne permet d’éviter le conflit potentiel entre plusieurs *ticks* d’horloge, qui seraient déclenchés exactement au même instant (i.e. sur le même échantillon d’un signal). Dans ce cas précis, la priorité est donnée au flux

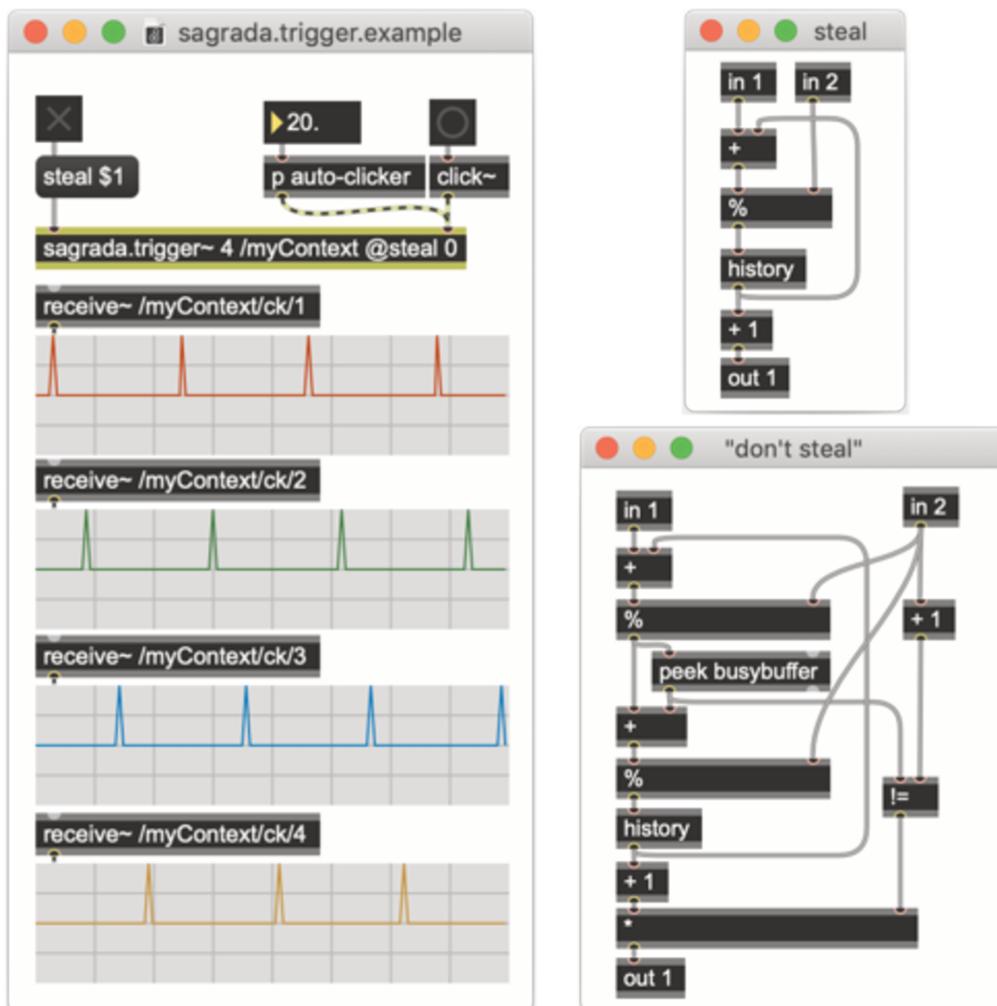


Figure 5.19.: L'objet `sagrada.trigger` (à gauche) et l'implémentation des horloges dans `gen`, avec usurpation de voix (en haut à droite), et sans usurpation de voix (en bas à droite).

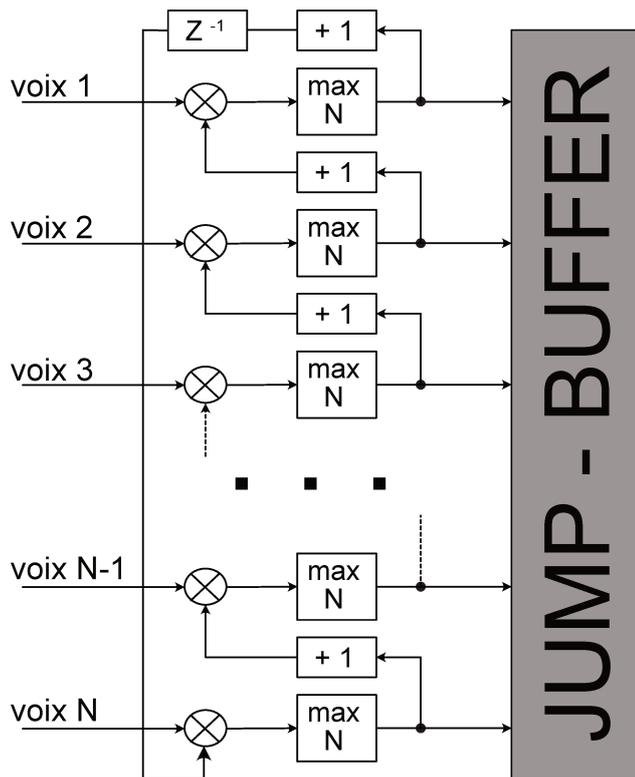


Figure 5.20.: Schéma fonctionnel de la computation synchrone du *jump-buffer*

de plus haut niveau⁵⁶. Toutefois, ce cas de figure étant peu probable statistiquement, le multiplexage permet de n'utiliser qu'un seul et unique signal **MSP** pour la gestion de l'ensemble des flux et d'économiser ainsi en ressources **CPU**.

Cette gestion de la polyphonie des flux de grains permet de les contrôler facilement avec des messages **MP**, comme le montre l'exemple sur la figure 5.22, qui implémente un contrôle des flux de grains via une tablette *multitouch*. Chaque doigt peut ici déclencher un flux et en contrôler la hauteur des grains ainsi que leur fréquence sur les axes X et Y de la tablette.

5.4.3 Performances comparées

L'intérêt principal de *Sagrada* est de pouvoir composer une synthèse granulaire *ad hoc* en traitant chaque grain de la manière souhaitée. En adoptant un système de déclenchement des grains via un signal **MSP**, *Sagrada* bénéficie des mêmes avantages que le système **GMU**, en particulier la possibilité de ré-utiliser les systèmes de déclenchement stochastiques de grains fournis dans **GMU**⁵⁷. Un avantage d'utiliser des impulsions plutôt que le *zero-crossing* utilisé dans **GMU** est de diminuer de moitié

56. C'est-à-dire concrètement à celle gérée dans la voix de polyphonie la plus élevée de l'objet poly-gérant les différents flux.

57. Une réimplémentation partielle en a été faite dans la *LAM-lib*, notamment sa fonction de probabilité à densité `[rand_dist_list~]` dans l'objet `[LAM.pdf~]`.

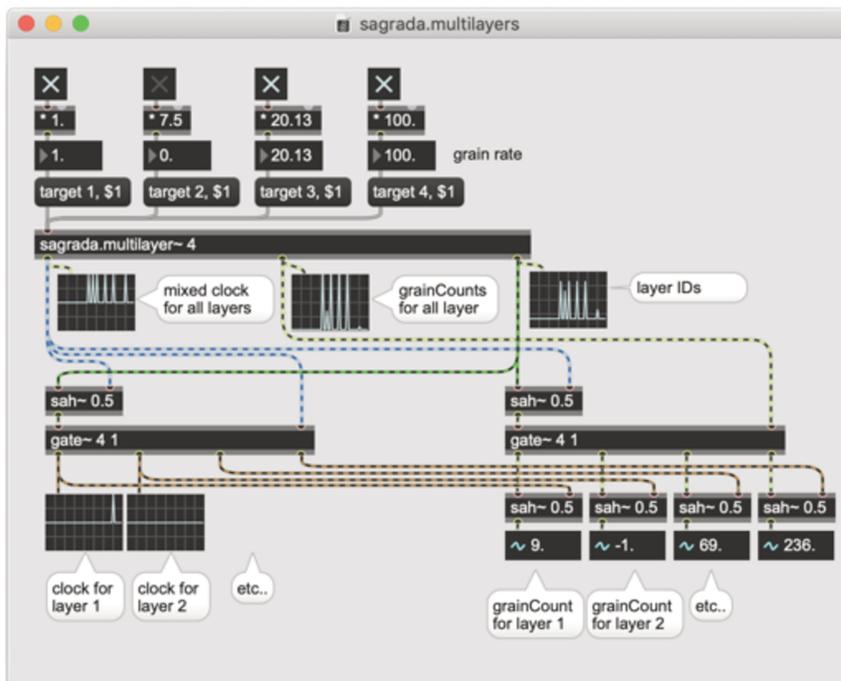


Figure 5.21.: Gestion de flux de grains par multiplexage d'horloges.

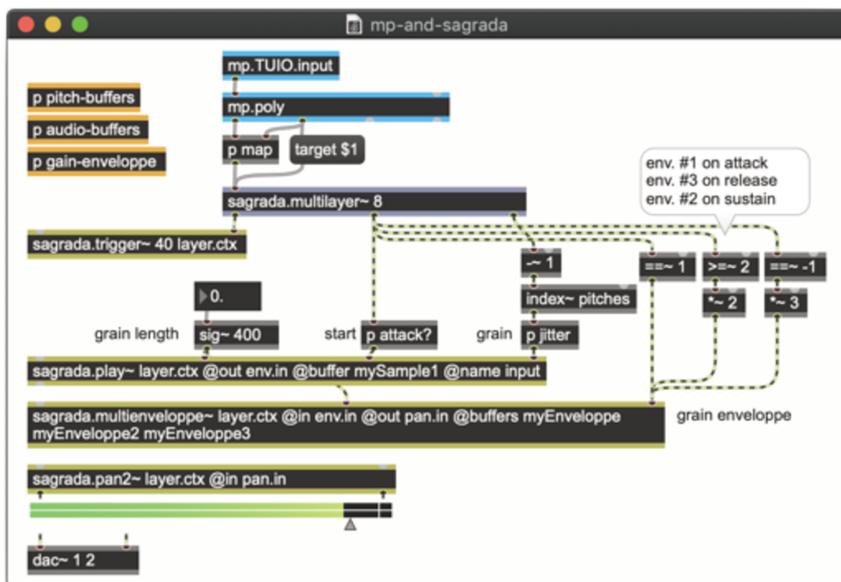


Figure 5.22.: Contrôle de flux Sagrada en multitouch, via MP.

(un échantillon au lieu de deux) l'intervalle entre deux grains successifs d'une part, et d'autre part, de faciliter un déclenchement des grains par des signaux d'horloges concurrentes⁵⁸.

Cette modularité implémentée sous forme de patchs Max a toutefois un coût. À nombre de voix actives égales et traitements égaux, le système **GMU** consomme trois fois moins de ressources **CPU** que **Sagrada**. Cependant, un avantage non-négligeable d'une implémentation avec les objets natifs de Max est une meilleure garantie de sa durée de vie – de nombreuses bibliothèques basées sur des objets compilés deviennent inutilisables quand elles ne sont plus mises à jour. C'est le cas, par exemple, de la bibliothèque **Gabor/FTM** de l'**IRCAM**⁵⁹, aujourd'hui incompatible à cause de l'absence de portage de la bibliothèque sur les nouveaux systèmes *64-bits*. La bibliothèque **Mubu**⁶⁰ qui la remplace ne permet pas, pour sa part, d'appliquer des traitements arbitraires sur des grains séparés, ni de définir le déclenchement des grains par un signal externe.

La récente intégration de signaux multicanaux dans la dernière version de Max⁶¹ permettent de simplifier certains aspects de patch proposés dans **Sagrada**, ainsi que de bénéficier de l'évolution des différentes interfaces de Max (notamment graphiques) pour la prise en charge de cette nouvelle fonctionnalité. Le système multicanal de Max8 étant une simple encapsulation des canaux audio pré-existant, aucun gain de performance n'est cependant obtenu lors de son utilisation.

Une piste à explorer pour l'optimisation des performances serait la traduction du paradigme proposé par **Sagrada** dans *gen~*⁶² ou dans le langage **FAUST**, mais il n'a pas encore été trouvé comment retrouver la même ergonomie et modularité que celle proposée dans **Sagrada**.

5.5 Conclusion

Après une exposition rapide des “matériaux numériques” avec lesquels le programmeur de **DMIs** doit composer, et prenant soin de questionner la pertinence des catégorisations établies, plusieurs stratégies ont été proposées dans ce chapitre pour répondre aux constats présentés dans les chapitres précédents.

Tout d'abord, la notion de “modèle intermédiaire dynamique” vient proposer une perspective d'implémentation des “gestes programmés” évoqués au chapitre 3 et propose un graphe d'agencement de ces modèles intermédiaires comme alternative à

58. La raison en est que plusieurs trains d'impulsions peuvent s'additionner simplement (en limitant le signal crête à 1), alors que la concurrence de signaux alternatifs est moins évidente.

59. Cette bibliothèque permettait également le traitement de grains séparés mais via une implémentation hors du **DSP** de Max. Je n'ai pas pu faire de comparaison de performance avec la bibliothèque **Gabor** en raison de son obsolescence.

60. La bibliothèque **Mubu** est également environ 4 fois moins coûteuse en **CPU** à traitement égal.

61. Les objets `mc.*` dans Max8.

62. *gen~* est un environnement intégré à Max permettant la programmation de processus audio de bas-niveau et compilés à la volée, avec le même paradigme de programmation visuelle que Max. Cf. https://docs.cycling74.com/max7/vignettes/gen_overview.

la notion de *mapping*, qui ne semble pas rendre compte de la complexité du design de l'interaction. Les modèles intermédiaires peuvent agir sur l'interaction instrumentale de différentes manières, soit en enrichissant le signal (en quantité, par sa démultiplication, ou en qualité en lui attribuant les qualités d'un geste programmé), soit en restreignant sa richesse pour le conformer à une grille particulière (quantification de hauteur, de rythme, etc.) ou encore en subvertissant le résultat attendu.

Ensuite, poursuivant une modularité motivée par le métamorphisme de l'interaction également évoqué au chapitre précédent, il nous a fallu définir la manière d'assurer l'interconnexion de différents modèles intermédiaires. Cette interconnexion implique l'usage d'un protocole de communication qui permette d'exprimer la complexité des signaux à l'œuvre, en particulier leur polyphonie. Nous avons donc procédé à une revue des protocoles existants, en soulignant les qualités et limitations de chacun d'entre eux. Le protocole MP a été défini sur la base de cette revue critique et son fonctionnement a été décrit, permettant la communication asynchrone entre des processus polyphoniques, tout en conservant des possibilités de modulation individuelles des voix.

Enfin, la librairie Sagrada propose une implémentation modulaire d'un système de synthèse granulaire. La communication entre les modules Sagrada est ici synchrone, à la différence de MP, mais le déclenchement des grains peut également se faire de manière asynchrone, en utilisant le delta de Kronecker comme signal événementiel asynchrone sur un canal audio. D'une certaine manière, la librairie Sagrada représente la transposition des idées poursuivies dans MP dans le domaine synchrone du signal audio. L'exemple d'une polyphonie de flux de grains, impliquant l'usage de ces deux aspects – contrôle synchrone et asynchrone –, est présenté comme illustration de la manière dont ces deux protocoles peuvent s'articuler. Nous verrons dans le prochain chapitre une autre utilisation du protocole MP, appliquée au design d'interfaces graphiques.

Représentations visuelles

” *Ces petits morceaux d'espace visuel,
dont la connexion n'est pas donnée d'avance,
par quoi voulez-vous qu'ils soient connectés,
sinon par la main ?*

— Gilles Deleuze

Qu'est ce que l'acte de création ?, 1987.

[Del03]

Divers facteurs contribuent à l'aspect visuel des instruments de musique, et y jouent un rôle esthétique mais également fonctionnel, notamment en tant qu'ils contribuent à y définir la topologie de l'interaction. Nous avons vu dans les chapitres précédents que les **DMIs** intègrent des fonctions liées à l'interprétation du geste, à la production du son, à la composition musicale ainsi qu'à l'utilisation de toute sorte de modèles intermédiaires pour le design de l'interaction. Chacun de ces aspects hérite de représentations qui leur sont attachées : représentations du son (temporelles, fréquentielles, intensités de paramètres audio, etc.), représentations musicales (le vaste héritage de la notation musicale traditionnelle), auquel s'ajoute potentiellement tout le langage du design graphique.

Dans les **DMIs**, la possibilité d'afficher des éléments graphiques de manière dynamique sur un moniteur, mais également d'interagir directement avec ces éléments quand le moniteur est tactile, laisse envisager un vaste terrain où peuvent s'entrecroiser diverses représentations liées aux aspects susmentionnés dans des composites hybrides. L'interaction sur ces objets graphiques est elle-même un champ d'exploration ouvert dans lequel les interactions traditionnelles héritées de la bureautique s'avèrent très vite insuffisantes.

Après une étude de ces différents aspects, je présenterai la librairie logicielle “MP.TUI”, dont le développement illustre l'effort entrepris dans cette perspective, ainsi qu'une application pratique de l'utilisation du protocole MP décrit au chapitre précédent.

6.1 Aspects visuels du design d'instrument

La conception d'un instrument englobe plusieurs aspects qui affectent son allure visuelle. Je passerai ici en revue quelques-uns de ces aspects, en m'appuyant notamment sur des exemples d'instruments acoustiques, pour souligner certaines continuités avec les développements entrepris ici dans le domaine numérique.

6.1.1 Adaptation à la production du son

L'apparence des instruments est en partie définie par la recherche d'une certaine qualité de son. Bien que cela soit particulièrement évident pour les instruments acoustiques dont les formes ont des conséquences directes sur le rendement sonore (cf. exemple figure 6.1), les profils particuliers issues de la lutherie traditionnelle ont également donné naissance à un certain nombre d'éléments iconiques (par exemple, les ouïes du violons ou les touches noires et blanches du piano) et de facteurs de forme (par exemple, une taille plus grande produit un son plus grave) associés à l'idée d'un instrument, comme le rappelle Trevor Pinch dans son interview de Robert Moog [Pin01] : *“Les claviers étaient toujours là, et chaque fois que quelqu'un voulait prendre une photo, pour une raison ou une autre, c'était mieux si on jouait du clavier. Les gens comprennent alors vous faites de la musique. (...) Cette pose [prenant la pose, bras gauche tendu tandis que la main droite joue du clavier] associe graphiquement la musique et la technologie.”*¹.

De plus, les DMIs peuvent intégrer des transducteurs acoustiques, tels que des microphones piézoélectriques ou des haut-parleurs tactiles (comme nous l'avons vu à la section 4.3), qui influencent la conception acoustique de leurs composants matériels et donc les facteurs de forme évoqués précédemment.

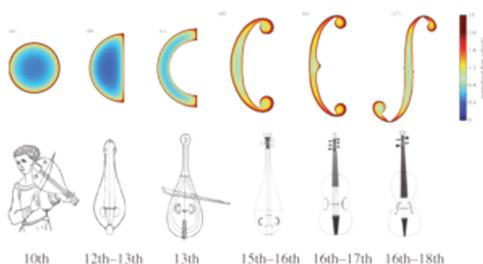


Figure 6.1.: Évolution de la forme des ouïes du violon et influence sur la projection acoustique, d'après [Nia+15]

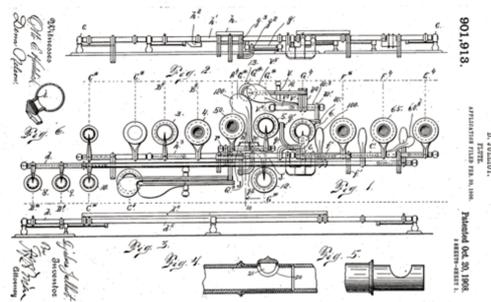


Figure 6.2.: Extrait du brevet de J. Djalma sur *“l'amélioration du clétage des flûtes de Boehm”*, 1908.

1. “The keyboards were always there, and whenever someone wanted to take a picture, for some reason or other it looks good if you're playing a keyboard. People understand that then you're making music. (...) This pose here [acts out the pose of the left arm extended while the right hand plays a keyboard] graphically ties in the music and the technology.”

6.1.2 Adaptations ergonomiques

L'instrument s'adapte également au corps. Un exemple intéressant est l'évolution du traverso vers la flûte de concert occidentale, à l'aide du système Boehm dans les années 1840 (cf. figure 6.2). Ce système de clétage découple la topologie gestuelle de la topologie du flux d'air et de la topologie de résonance. En utilisant des manches et des platines, il permet d'accroître la puissance sonore par l'élargissement des trous et leur déplacement à des endroits adéquats pour la résonance, tandis que les touches peuvent être placées à des endroits adaptés à la position des doigts du flûtiste.

Le système Boehm peut être qualifié de “modèle intermédiaire” entre le geste et la production sonore, fait d'un système mécanique dans ce cas. La plupart des instruments combinent divers “modèles intermédiaires” pour amplifier, enrichir, déplacer, focaliser, multiplier les gestes des interprètes et générer des mouvements hors du champ des possibilités du corps humain : pédales de grosse caisse, marteaux et amortisseurs pour piano, archets et plectres, etc.

6.1.3 Représentations liées à la théorie musicale

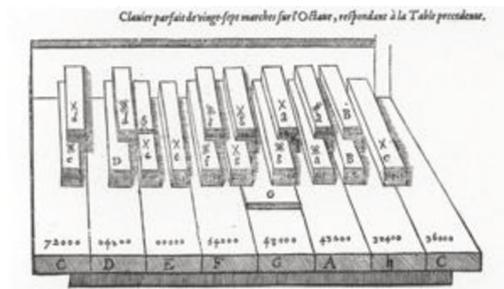


Figure 6.3.: Le “clavier parfait de vingt-sept marches sur l'Octave” de Mersenne (1636)

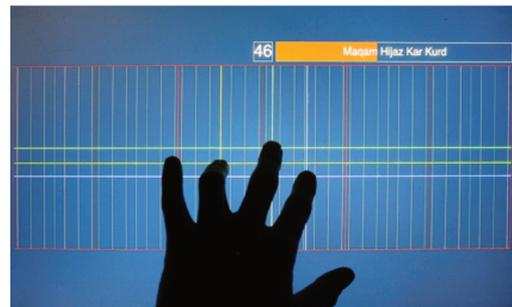


Figure 6.4.: Une grille de hauteur avec une représentation micro-tonale réalisée avec mp.TUI. La luminosité des lignes verticales varie en fonction de la quantité de quantification.

Les instruments de musique intègrent également des éléments de théorie musicale. Par exemple, la partie supérieure d'un clavier (touches noires et blanches) représente la gamme chromatique, tandis que la partie inférieure (touches blanches seulement) représente la gamme diatonique de Do majeur. Le dimensionnement et le positionnement de ces touches est un compromis intéressant entre les contraintes mécaniques du système de marteaux et une représentation uniforme des échelles diatonique et chromatique. De plus, la largeur de l'octave est telle qu'elle tient sous une main tendue et vient réifier dans l'instrument la notion d'équivalence des octaves, en permettant de jouer n'importe quel intervalle à l'intérieur d'une octave avec une seule main. Les claviers ont par ailleurs fait l'objet de nombreux développements

expérimentaux² avec des dispositions de notes utilisant des grilles hexagonales ou plusieurs couches de touches (figure 6.3) pour permettre le jeu dans des systèmes d'intervalles micro-tonaux.

En tant que système symbolique, la théorie musicale peut être facilement encodée dans les ordinateurs. Les logiciels de production musicale contiennent tellement de fonctions et de règles basées sur la théorie musicale qu'il serait difficile de toutes les représenter sur l'interface. Thor Magnusson parle ainsi "d'outils épistémiques" pour décrire les **DMIs**, affirmant qu'il sont conçus avec "un tel degré de pertinence symbolique qu'ils deviennent un système de connaissance et de pensée dans leurs propres termes" [Mag09]. Pour le *musicien numérique*, ce "système de connaissances" est un paysage imaginaire à explorer, un territoire sonore pour lequel l'interface de l'instrument peut métaphoriquement prendre le rôle d'une carte géographique, ou d'un cockpit de pilote [VUK96].

6.1.4 Représentations liées au contexte de performance

Si l'on considère les instruments de musique comme des "instruments pour musiquer" en reprenant la définition de Christopher Small (cf. p. 8), alors les partitions, les salles de concert, le public et plus généralement, le contexte de la performance influencent aussi la conception et la représentation des instruments. Les partitions orientées (figure 6.5) sont un exemple d'adaptation de la partition au contexte de la "musique de table", permettant dans ce cas aux musiciens de lire une même partition lorsqu'ils sont assis autour d'une table. De même, les **DMIs** collectifs (cf. 2.1.2) peuvent adapter leur représentation au nombre d'interprètes en présentant à chacun d'eux un groupe d'éléments d'interface utilisateur orientés vers eux (figure 6.6).

Comme exemples de l'influence du lieu de concert sur le design visuel de l'instrument, on peut notamment évoquer les modélisations de l'espace acoustique du lieu pour venir contrôler la spatialisation du son (cf. figure 6.7) ou – à l'inverse – la projection sur le lieu d'un *mapping vidéo* en correspondance avec la musique³ (cf. figure 6.8).

6.1.5 Représentations liées à l'expérimentation

Le processus de conception des instruments de musique contient une grande part de travail empirique. Dans les **DMIs**, l'ajustement des paramètres requiert une réaction sonore et visuelle directe pour affiner les réglages à la main, jusqu'à ce que l'instrument sonne et se prête au jeu. La représentation visuelle des réglages, sous la

2. Voir notamment [Hau99] pour un historique du clavier.

3. ou une "musique visuelle" comme l'appelle Serge de Laubier



Figure 6.5.: Partition “de table” à plusieurs voix (John Dowland - First Booke of Songs or Ayres. Édition Peter Short, London, 1597)

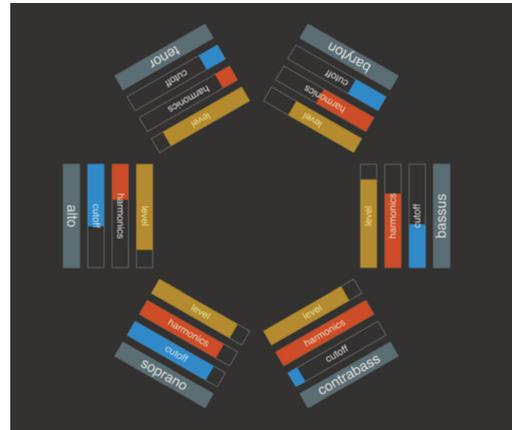


Figure 6.6.: Interface visuelle adaptée pour 6 joueurs situés autour d’une interface de jeu commune, réalisée avec la librairie MP.TUI.



Figure 6.7.: L’interface du logiciel “Spat Revolution” de l’IRCAM modélise l’espace de projection acoustique du lieu de concert.

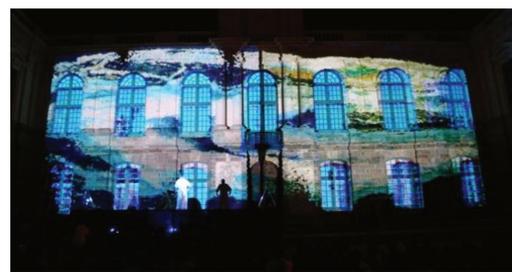


Figure 6.8.: Projections monumentales de “musique visuelle”, contrôlée de manière synchrone à la “musique sonore”. Photographie © Puce Muse.

forme de potentiomètres, de sliders, ou d'autres éléments graphiques joue un rôle crucial et renseigne de manière beaucoup plus rapide qu'un affichage numérique, en offrant une appréciation relative et globale différents réglages (figure 6.9).

C'est notamment pour cette raison que la "programmation visuelle" est un paradigme courant dans les environnements de lutherie numérique, tels que Max, PureData, Reaktor, etc. Non seulement elle est adaptée au paradigme de *dataflow* que la programmation audio temps-réel adopte souvent, mais elle s'apparente également à une pratique de l'ingénierie audio basée sur le *patching*⁴, en même temps qu'elle offre une visualisation qui se prête à la manipulation directe.

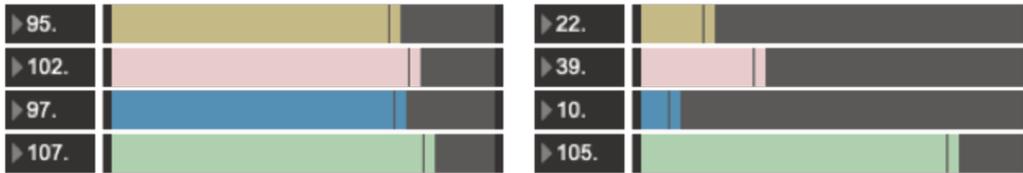


Figure 6.9.: La représentation visuelle des paramètres offre un aperçu plus rapide de leur valeur relative que leur représentation numérique.

6.1.6 Aspects esthétiques : l'instrument œuvre d'art

Le design de l'interface visuelle de l'instrument se résume rarement à ses aspects fonctionnels. Les instruments de musique sont souvent l'œuvre d'un artisanat très pointu, voire des objets d'art. La finesse des détails et le souci de leur aspect esthétique jouent ainsi une part éminente dans le design final. Dans les interfaces visuelles des logiciels audio, on retrouve souvent ce soin esthétique, que cela soit sous forme d'un *skeuomorphisme*⁵ (figure 6.10) cherchant à imiter le bois des instruments acoustiques, le métal et l'aspect physique des boutons sur les équipements hardware, ou d'un design plus épuré⁶ (figure 6.11).

En tant qu'élément scénographique, la représentation visuelle joue un rôle essentiel dans l'esthétique et la poésie de l'instrument. Par exemple, dans la performance *FIB_R* : toute la performance visuelle video-projetée sur l'écran visible du public correspond à ce que les instrumentistes ont face à eux sur leur tablette. Le design de l'interface graphique est donc autant motivé par des aspects fonctionnels d'interaction, que des aspects esthétiques et poétiques.

4. C'est à dire l'interconnexion de modules électroniques par des câbles audio, en particulier dans les synthétiseurs modulaires analogiques.

5. Le terme de *skeuomorphisme* est utilisé pour définir un élément de design dont la forme n'est pas directement liée à la fonction, mais qui reproduit de manière ornementale un élément qui était nécessaire dans l'objet d'origine.

6. Sur les connexions entre le design d'interfaces et les arts graphiques, voir également les étonnants résultats obtenus en appliquant des modèles AI pour créer une interface à partir d'images photographiques dans [TK19].



Figure 6.10.: Le skeuomorphisme dans les logiciels audio témoigne de l'importance accordée à l'esthétique, au-delà des fonctionnalités de l'interface. Photographie Klaus Götting.



Figure 6.11.: Le design minimal et soigné de l'instrument Apparatum. © PanGenerator

6.2 L'écran comme interface de jeu

6.2.1 L'écran, cockpit du musicien ?

En tant qu'*outils épistémiques*, les **DMIs** mettent en jeu un nombre extrêmement élevé de flux de données et de processus qui interagissent entre eux et avec l'interface. La représentation visuelle peut faciliter le *monitoring* du bon fonctionnement de ces processus⁷, de leurs dynamiques, et la sélection de réglages dans des banques de données (presets, samples, etc.).

Espace infini et savoir cartographique

L'écran donne en effet accès à un espace virtuellement infini, grâce à des systèmes d'onglets, de fenêtres multiples, de menus condensant différentes options, de zoom et déplacement sur des zones d'intérêt. L'exploration y est autant possible "horizontalement", c'est-à-dire parmi les différents éléments d'un même niveau de complexité, que "verticalement", c'est-à-dire dans la profondeur des différentes couches d'un même élément.

Ce vaste territoire possède ainsi sa géographie et ses "moyens de transport". Si l'exploration peut se faire horizontalement (de manière "touristique", en parcourant les divers processus à disposition) ou en profondeur (de manière "spéléologique", en plongeant dans les entrailles d'un processus), elle peut aussi se faire par "télé-transportation" : un preset peut rappeler une configuration complète correspondant à un terrain de jeu totalement différent.

À mesure que les données emmagasinables sur les ordinateurs augmentent – et plus encore, sur le net en tant qu'il constitue une excroissance de l'instrument nu-

7. Ce monitoring s'avère nécessaire lors de l'élaboration d'un instrument, mais aussi durant sa pratique, quand la mémoire fait défaut, ou que l'instrument instable est sujet à des dysfonctionnements.

mérique – la fonction de cartographie et de recherche de l’information utile prend de plus en plus d’importance. On peut en observer les signes dans la généralisation de l’intégration de moteurs de recherche dans les logiciels, notamment audio. Le numérique fait évoluer notre rapport aux outils d’une posture consistant à “savoir le contenu” à une posture consistant à “savoir que ce contenu existe et comment le trouver”⁸.

Cependant, l’action de rechercher un contenu n’est pas *a priori* un geste expressif. La conception d’un DMI pour la performance passe ainsi par la circonscription d’un territoire dans lequel l’interaction soit suffisamment directe et intuitive pour que le musicien n’ait pas à réfléchir à la manière de se rendre à l’endroit désiré⁹.

Temporalité de l’interface

À la différence d’une interface physique, l’information sur écran n’est pas seulement représentée de manière *spatiale* mais également *temporelle*, ce qui offre des possibilités tout à fait adaptées pour la représentation des phénomènes sonores et des processus musicaux. Ainsi, l’écran peut assurer une représentation du tempo, des patterns rythmiques ou encore de la progression d’un processus (e.g. l’état d’avancement d’un séquenceur) dans leur évolution dynamique, ce qui facilite leur anticipation (cf. exemple de type “Time Timer”[®] sur la figure 6.12).

Également, l’image peut faciliter la compréhension de processus musicaux sur

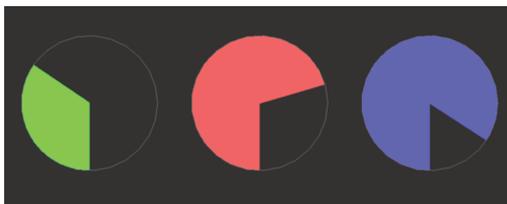


Figure 6.12.: Visualisation temporelle à l’aide de chronomètres visuels de la librairie MP.TUI

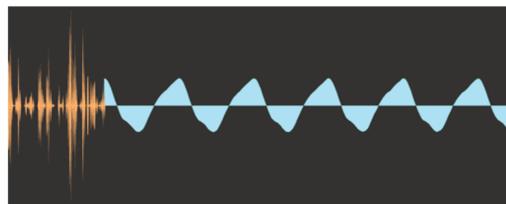


Figure 6.13.: Visualisation du son “en cours” et de sa trace accumulée à plus long terme, en utilisant deux échelles temporelles.

le long terme, en particulier le déploiement de grandes formes temporelles, qui nécessite une mémoire auditive faisant parfois défaut. Si le son est évanescent, l’image peut en effet laisser une trace sensible, “s’écrire” au fur et à mesure de sa performance¹⁰ (cf. figure 6.13). De manière générale, la “partition”, qu’elle soit trace

8. Voir à ce sujet les propos de Nicolas Collins : “(...) *my students tell me, the biggest problem they have in music production is finding their samples on their hard drive. They say “I have so many kick drums on my drive, that I’ve downloaded from so many places, that I can never find the one I want”. (...) now maybe it means that you don’t need Stradivarius, you need a database programmer, that the most important thing in your life would be like, a really brilliant database that would allow you to intuitively retrieve whatever sample you wanted... In other words, that’s in such a different domain but it may be, as I say, the single most important thing for a composer working today.*” Nicolas Collins, cf. annexe E.

9. “(...) *it’s a difficult thing to articulate but I think that if you give somebody too many choices of things to do, it will not be an expressive musical instrument because there’s gonna be too much thinking (...) you have to sort of find a spot in between*” Nicolas Collins, cf. annexe E.

10. Un tel procédé a été utilisé lors d’un concert de ONE, durant lequel les formes d’ondes des sons joués par chaque musicien étaient vidéo-projetées et s’aggloméraient telle des stalagmites, rendant

du passé ou pré-figuration de “l’à-venir”, peut se retrouver intégrée dans l’interface instrumentale (cf. chapitre 7). Cette “partition” n’est pas nécessairement une représentation du temps musical *in extenso*, mais peut être présente sous des formes fragmentées de temps enregistré à la volée ou de séquences pré-programmées.

Une autre conséquence du dynamisme de l’interface graphique est la possibilité d’afficher des informations de manière contextuelle, sur le plan spatial (e.g. en affichant des informations uniquement quand on interagit avec une certaine zone de l’interface) comme sur le plan temporel (e.g. en affichant des informations en fonction d’événements en cours).

Cette idée de l’interface comme “cockpit du musicien” [VUK96] hérite du contexte technico-scientifique dans lequel les **DMIs** ont vu le jour : les interfaces des premiers ordinateurs ainsi que le matériel de l’ingénierie du son ressemblant bien souvent à celles des cockpits d’avion. Pourtant, si l’image d’un cockpit évoque des gestes de réglage et d’ajustement lents, sur un grand nombre de paramètres mesurés sur des échelles absolues (que cela soit sur un avion ou une table de mixage), la notion d’instrument et de jeu musical appelle de son côté des gestes expressifs, vifs, et souvent sur des échelles relatives¹¹.

6.2.2 L’écran comme interface tangible

Dans la chronologie rassemblée par Bill Buxton¹² [Bux+07], il est intéressant de noter que les premières interfaces *multitouch*, développées dans les années 1950, ont été des instruments de musique électroniques¹³ (figure 6.14), utilisant des capteurs capacitifs montés en parallèle, pour le contrôle polyphonique de la synthèse. De même, si le premier *écran multitouch* semble avoir été inventé au Bell Labs en 1984, le premier à avoir été commercialisé pour le grand public a été le Lemur (figure 6.15) développé par Jazz Mutant en 2003, également destiné au contrôle musical.

Les interfaces tangibles se sont multipliées dans les appareils grands public au tournant du siècle, notamment sous l’impulsion de projets de recherche tels que ceux du *Tangible médias Group* dirigé par Hiroshi Ishii au médias Lab du MIT. Si un certain nombre de gestes (la notion de geste étant ici souvent réduite au gestes des doigts, voire du pouce, de l’index et du majeur seulement) sont devenus des standards pour l’interaction sur ce type d’interfaces (tel le *pinch-zoom*, le *swipe*, etc.), la recherche sur les interactions possibles reste un domaine récent et encore largement inexploré.

visible les intensités de jeu de chacun au cours du concert (L’objet LAM.jit.gl.DSW~ développé à cette fin est disponible dans la LAM-lib).

11. ...comme en témoigne l’importance de valeurs relatives telles que les intervalles ou les nuances (*crescendo*/*decrescendo*, *ralentendo*/*accelerando*, etc.) dans l’écriture musicale. Cf. également les propos de Serge de Laubier à ce sujet dans l’annexe A.
12. Bien qu’ils ne se soient pas limités à des applications musicales, les développements de Bill Buxton ont été fréquemment appliqués au contrôle de la synthèse et à la lutherie numérique.
13. L’*electronic sackbut* de Hugh Le Caine, et les claviers de Don Buchla.



Figure 6.14.: Le clavier multitouch du synthétiseur Buchla music easel (1972).



Figure 6.15.: Le Lemur de Jazz Mutant et son écran multitouch (2003).

Les écrans multitouch offrent de nombreux avantages qui ont déjà été soulignés par Bill Buxton [Bux+07] et Sergi Jordà [Jor05], notamment :

- l'utilisation possible de plusieurs doigts, plusieurs mains, plusieurs personnes en même temps, en comparaison de la souris, qui permet une interaction polyphonique, parallèle plutôt que séquentielle ;
- la cohésion entre le contrôle d'un objet et sa représentation et la relation sensorielle d'intimité qui se crée en l'absence de distance entre l'objet virtuel et celui/celle qui le manipule.

La cohésion entre la représentation et le contrôle d'un objet virtuel¹⁴ facilite l'intuitivité de l'interface en abolissant la distance entre ces deux aspects de l'interaction. Au-delà de cet intérêt ergonomique, cela permet d'imaginer de nouveaux scénarios d'interactions dynamiques. Même de simples interactions usuelles, comme celle de la bureautique (sliders, boutons, etc), peuvent être ré-inventées avec des comportements alternatifs, dans une perspective d'utilisation musicale, comme nous le verrons plus loin.

Cette idée est notamment poursuivie dans le domaine des IHM, avec le dessein d'intégration du numérique dans les objets du monde physique, telle que présenté notamment dans l'article "Tangible Bits" d'Ishii et Ullmer [IU97] et reprise par Sergi Jordà dans les 25 principes qu'il adopte pour le développement de la ReacTable¹⁵.

Ce faisant, la cohésion entre le geste et la représentation "acquise" dans les écrans tactile laisse la place à des scénarios d'interaction subversifs¹⁶, qui se jouent de cette

14. ... qui, rappelons-le, n'est qu'une "synchronisme", c'est-à-dire un artéfact liant les deux phénomènes par leur concomitance spatio-temporelle.

15. "For including realtime interactive visualizations and, at the same time, overcoming mouse limitations without adding indirections, interfaces should be able to reflect their own states and behaviors. They should integrate, like the abacus, both representation and control." [Jor05]

16. Sur le geste subversif, cf. section 3.6.

synchrèse artificielle¹⁷.

6.2.3 Topologie dynamique

Repères statiques, amovibles, dynamiques



(a) **statiques** repères sur un manche de guitare (b) **amovibles**, calque sur une tablette graphique (c) **dynamiques**, segmentation d'un échantillon sur un écran multitouch

Figure 6.16.: Repères visuels sur différentes interfaces instrumentales.

Le positionnement des différents capteurs de l'interface d'un **DMI** définit une topologie de l'interaction qui peut être soulignée par des repères visuels (cf. figure 6.16). On peut ainsi distinguer trois cas de figure, concernant le positionnement de ces repères visuels :

- **statique** : les repères sont fixes et l'algorithme sous-jacent pourra être “ré-accordé” dans les limites imposées par cette configuration (e.g. il est possible de changer la tension des cordes d'une guitare, sans que la position des frettes soient invalidée) ;
- **amovible** : les repères peuvent être changés “physiquement”, soit que leurs positions soient réglables (e.g. comme c'est le cas pour les frettes du sitar), soit qu'ils soient interchangeables (e.g. les différents revêtements de l'interface *Joué* ou du *Sensel Morph*, ou le calque glissable dans une tablette graphique) ;
- **dynamique** : cette solution est rendue possible sur les écrans tactiles, mais n'offre pour l'instant pas les qualités haptiques de repères en relief permises par les repères statiques ou amovibles¹⁸.

Nouvelles formes et nouvelles fonctions

De nombreuses règles ont été formulées dans le domaine du design, de l'architecture, des **IHM**, et de la visualisation de données, telles que le célèbre adage “la forme suit la fonction”, pris comme paradigme dans le design et l'architecture moderne, autant que dans le design des interfaces graphiques. Ces règles de design prônent généralement le minimalisme, la lisibilité et l'efficacité du design. L'ouvrage d'Edward W. Tufte “The

17. Voir en particulier la série de performances “Screen to screen” de l'artiste Vincent Brocquaire, basées sur cette duplicité de l'écran/interface. <http://www.vincentbrocquaire.com/screen-to-screen.html>

18. Un certain nombre de prototypes d'écrans à formes dynamiques ont été développés cette dernière décennie (voir [Fol+13 ; Siu+18]), mais restent encore très rustiques et ne semblent pas encore prêts pour une diffusion commerciale.

visual display of quantitative information” [Tuf01], une des principales références dans le domaine de la visualisation de données, rappelle ainsi ces “Principes de l’Excellence Graphique” :

- l’excellence graphique est une présentation bien conçue de données intéressantes — une affaire de *substance*, de *statistiques* et de *design* ;
- l’excellence graphique consiste en la communication claire, précise et efficace d’idées complexes ;
- l’excellence graphique est ce qui donne le plus grand nombre d’idées dans le temps le plus court, avec le moins d’encre possible et dans le plus petit espace ;
- l’excellence graphique est presque toujours multivariée ;
- elle requiert de dire la vérité sur les données.

On retrouve des règles similaires dans les (nombreuses) préconisations concernant le design d’interfaces graphiques, guidées par une recherche de fonctionnalité, lisibilité et transparence maximales. Bien que toutes ces règles puissent être utiles pour le design de la partie graphique d’un **DMI**, il faut cependant garder en tête que les instruments de musique ne sont pas des interfaces dont la raison d’être est définie par leur fonctionnalité (on n’achète pas un instrument pour se rendre la vie plus facile), et que les notions d’*efficacité*, de *lisibilité* et de *vérité* y sont particulièrement sujettes à caution.

Mettre les doigts dans la prise

Si dans un instrument acoustique, l’énergie se transmet des gestes du musicien à l’instrument qui produit le son, cette chaîne d’interaction peut se retrouver perceptivement renversée dans les **DMIs**. Le processus, ou “modèle intermédiaire” (cf. 5.2) qui *tourne* sur la machine possède son propre mouvement autonome, que les doigts viennent perturber, infléchir, canaliser, étouffer, aiguïser, filtrer... La représentation visuelle de modèles intermédiaires dynamiques vient rendre manifestes ces *forces invisibles*¹⁹ et appelle ainsi des gestes *en réponse* aux mouvements internes du modèle, qui redéfinit en permanence son espace d’interaction, dont la topologie n’est pas toujours donnée d’avance et qu’il s’agit apprivoiser (cf. figure 6.17).

6.3 La librairie MP.TUI pour Max

La bibliothèque MP.TUI²⁰ pour Max propose des composants graphiques permettant le contrôle et la représentation d’une interaction polyphonique et modulaire. Elle

19. “En art, et en peinture comme en musique, il ne s’agit pas de reproduire ou d’inventer des formes, mais de capturer des forces. (...) La tâche de la peinture est définie comme la tentative de rendre visibles des forces qui ne le sont pas. De même la musique s’efforce de rendre sonores des forces qui ne le sont pas.” Gilles Deleuze [Del81] p 57.

20. Sources disponible sur <https://github.com/LAM-IJLRA/ModularPolyphony-TUI>.

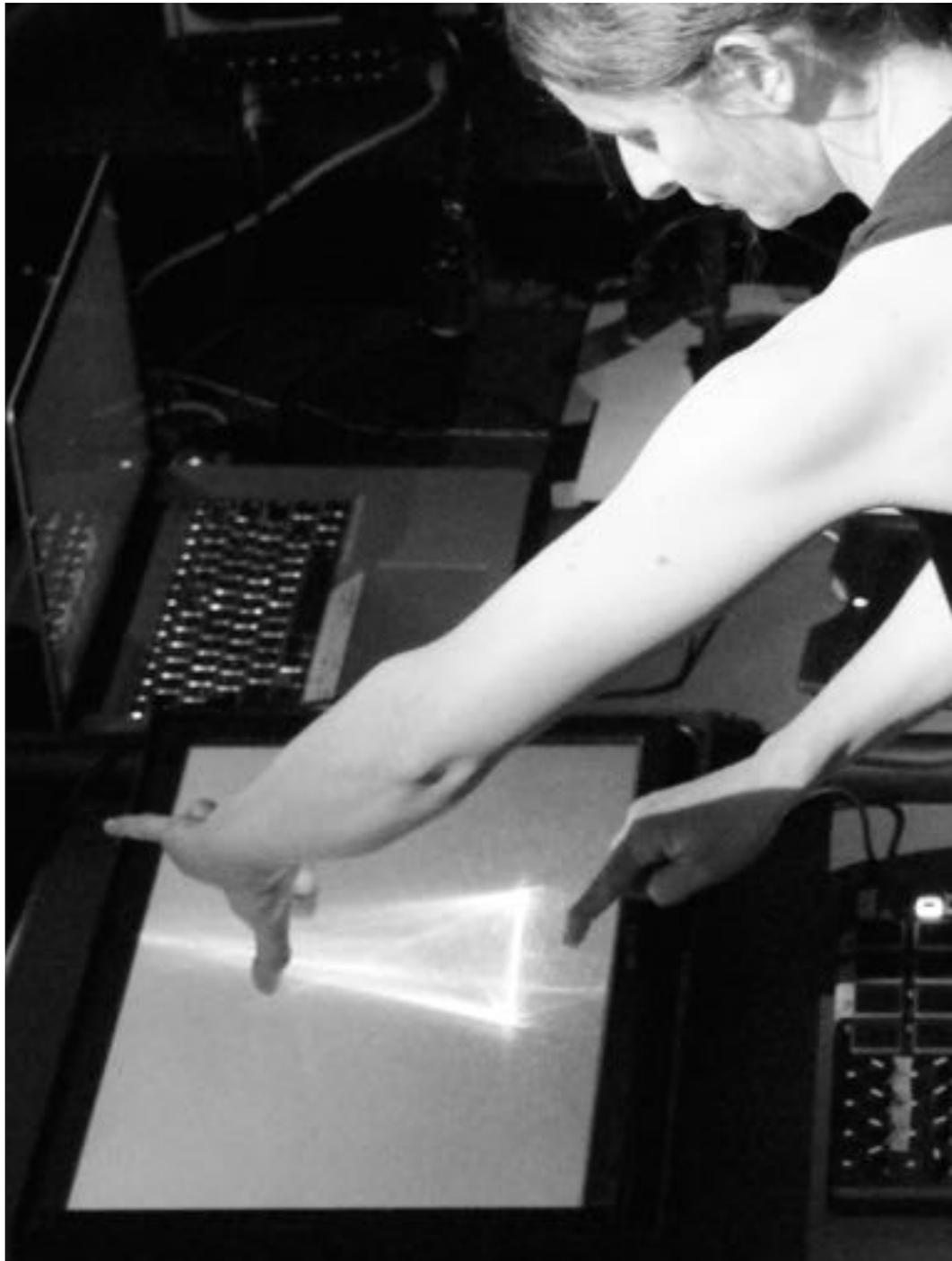


Figure 6.17.: Modèle intermédiaire stochastique manipulé directement sur écran (interface Xypre présentée au chapitre 4), durant la performance *FIB_R*.

offre également (et surtout) un environnement ouvert pour la programmation de nouveaux objets graphiques et de nouvelles interactions en mettant à disposition des briques de base prenant en charge les fonctions élémentaires usuelles. Cette section présente une brève revue des outils existants et des motivations avant de détailler le fonctionnement de la librairie.

6.3.1 Motivations

Antécédants

Plusieurs développements ont été réalisés depuis 2003 permettant de contrôler, de différentes manières, des patchs Max via une interface *multitouch*. Parmi les réalisations, on peut noter notamment :

- **le Lemur** : une interface *multitouch* personnalisable développé par la société JazzMutant entre 2003 et 2011, d’abord sur une interface hardware dédiée avant d’être portée sous la forme d’une application pour tablettes et smartphones²¹. Cette interface était pionnière, à la fois à une époque où le *multitouch* grand public était naissant, et par la possibilité de personnaliser l’interface à l’aide d’un éditeur tournant sur un ordinateur standard. La personnalisation était cependant limitée au fait de choisir les composants graphiques parmi un ensemble de composants alignables sur une grille ;
- **la librairie MMF** : “Max Multitouch Framework”²² développé par Mathieu Chamagne dans le cadre du projet ANR Virage (2008-2010), qui permettait de contrôler certains éléments de **GUI** de Max. La contrainte principale réside dans le fait que le contrôle des éléments de **GUI** de Max est assez gourmand en **CPU** et rend difficile l’usage de plusieurs doigts ;
- **TouchOSC** : développé en 2008, touchOSC²³ est basé sur les principes du Lemur mais développé comme une application pour tablette et smartphones, permettant de renvoyer des données **MIDI** ou **OSC** ;
- **Mira** : En 2013, Sam Tarakajian présente Mira²⁴, qui sera distribué ensuite par Cycling’74²⁵, la société développant Max. Mira simplifie grandement la connexion entre un iPad et un patch Max dans la mesure où les éléments de **GUI** d’un patch Max sont directement transposés sur l’interface *multitouch*, sans qu’il y ait besoin de recréer des connexions manuellement entre deux interfaces différentes, comme cela pouvait être le cas avec le Lemur ou TouchOSC ;
- **Max multitouch** Enfin, Cycling’74 a considérablement amélioré la mécanique de patching depuis la version 8, et a commencé fin 2018 l’implémentation

21. distribuée par la société Liine <https://liine.net/en/products/lemur>

22. Vidéo présentant MMF : https://www.youtube.com/watch?v=EEkj85GU_is

23. <https://hexler.net/products/touchosc>

24. dont la vidéo de présentation est intéressante à plus d’un titre <https://vimeo.com/63846055>

25. <https://cycling74.com/products/mira>

native du *multitouch* dans l'éditeur de patch, pour l'instant limitée à un certain nombre d'objets et à la version Microsoft Windows.

De la nécessité de réinventer la roue

À la vue de ces développements, on peut légitimement se demander quel est l'intérêt de développer une librairie graphique pour le *multitouch* dans Max. La réponse est essentiellement liée à la conviction que les interfaces graphiques, tout comme le domaine du mapping, ne consistent pas en un simple agencement de composants standards, mais en un champ ouvert à la créativité, pour développer de nouvelles représentations interactives.

Si l'on prend l'exemple d'un objet aussi basique et courant qu'un *slider* ; l'objet paraît *a priori* simple et univoque. Pourtant, si l'on détaille le mécanisme de corrélation entre le geste et le comportement de l'objet, on s'aperçoit rapidement que de nombreux scénarios sont non-seulement possibles, mais pertinents selon le contexte²⁶, de sorte que les implémentations d'interactions basiques – telle que celle d'un slider – dans la plupart des logiciels de bureautique ne sont pas nécessairement les plus adaptées au contrôle musical. Ainsi, un musicien utilisera une telle interface linéaire avec tous ses doigts, par exemple pour jouer des intervalles mélodiques, usage pour lequel la mémoire des intervalles s'avère très ergonomique. Il suffit de tester le fonctionnement des sliders sur les tablettes dans la plupart des applications pour constater, sans surprise, que ce genre d'interaction n'y est pas prévu. De même, la plupart des logiciels contraignent l'orientation des composants graphiques selon les axes vertical et horizontal (c'est pour l'instant le cas de toutes les librairies susmentionnées), en se basant sur l'usage habituel de l'écran bureautique, qui se lit de haut en bas et de gauche à droite²⁷.

Ainsi, la prise en charge native du *multitouch* dans l'interface de Max ne saurait être satisfaisante en terme créatif si elle ne laisse pas les relations entre les objets graphiques et le geste ouvertes à la reprogrammation.

26. Un exemple notoire sur l'usage du *slider* est l'introduction, en 2011, de ce qu'Apple nomma "scrolling naturel", en inversant le sens de défilement des documents pour répondre aux nouvelles interfaces tactiles et en balayant plus de 25 ans de convention d'usage. Les réactions furent largement hostiles au début, mais le nouvel usage finit par être non-seulement accepté mais également considéré comme plus naturel. Dans ce cas précis, la question se pose sur la partie du slider sur laquelle on agit : le contenu ou bien le cadre. Si l'on prend un équivalent dans le domaine de l'audio, le déplacement d'une tête de lecture dans un échantillon, tel que couramment représenté dans les interfaces de synthèse granulaire, est aussi approprié que l'idée de déplacer l'échantillon "sous" la tête de lecture, et qui constitue la manière dont fonctionnait les lecteurs à bande.

27. On peut ici noter le choix original d'un design basé sur le cercle dans la ReacTable, inspiré de celui de l'AudioPad développé en 2002 au MIT, pour faciliter un usage collectif.

6.3.2 Utilisation de MP pour le contrôle *multitouch* de GUI

Comme son nom l'indique, la librairie MP.TUI est construite sur le protocole MP (cf. section 5.3). Elle fournit un cadre, basé sur les logiques de patching de Max, pour créer de nouveaux composants GUI *multitouch* dans un contexte graphique OpenGL et surmonter certaines limitations de l'interface graphique native de l'environnement de patching de Max. Par exemple, les interfaces graphiques sont généralement orientées sur une disposition horizontale/verticale avec une orientation de lecture du haut vers le bas alors qu'on peut souhaiter avoir plusieurs orientations, comme dans la situation présentée sur la figure 6.6. La superposition de divers composants peut nécessiter des couleurs et des transparents personnalisés, et l'on peut souhaiter inclure des interfaces visuelles plus complexes que les curseurs et les boutons, par exemple des particules, des vidéos, des modèles 3d, des shaders (cf. figure 6.18), etc. Les composants de la bibliothèque sont un ensemble d'abstractions de trois types :

- **des composants système**, qui implémentent les fonctions de base permettant la communication entre les objets de la GUI. En particulier, l'objet `mp.TUI.hub` récupère les données de la souris ainsi que les messages **TUIO** reçus par **UDP** et les envoie aux composants graphiques sélectionnés ;
- **des éléments de GUI**, (cf. figure 6.20) qui sont des instances prêtes à l'emploi de composants courants ou moins courants tels que curseurs, claviers, graphes, etc. ;
- **des outils**, un ensemble d'abstractions qui permettent de créer facilement de nouveaux composants en proposant des fonctions utiles pour la conception d'interaction (transformation de la visualisation, gestion de la polyphonie sur un élément, interaction tels que pinch-zoom, calcul de dérivées, etc.).

6.3.3 Les composants de la librairie MP.TUI

Les composants MP.TUI se présentent comme des abstractions Max, quiinstancient des éléments graphiques interactifs (cf. figure 6.19). Ils utilisent des transformations géométriques hiérarchiques²⁸, qui permettent d'obtenir des coordonnées relatives à l'écran ou au composant, indépendamment de la position, de l'échelle et de l'orientation du composant. Cela permet également de créer des groupes de composants, comme on le ferait dans n'importe quel logiciel d'édition graphique vectoriel. Suivant la nature empirique de la lutherie numérique revendiquée ci-dessus, un "mode édition" est également disponible pour manipuler rapidement à la main la position, l'échelle et l'orientation des composants de l'interface utilisateur (figure 6.21 et 6.22).

28. à l'aide de l'objet `jit.anim.node` de Max

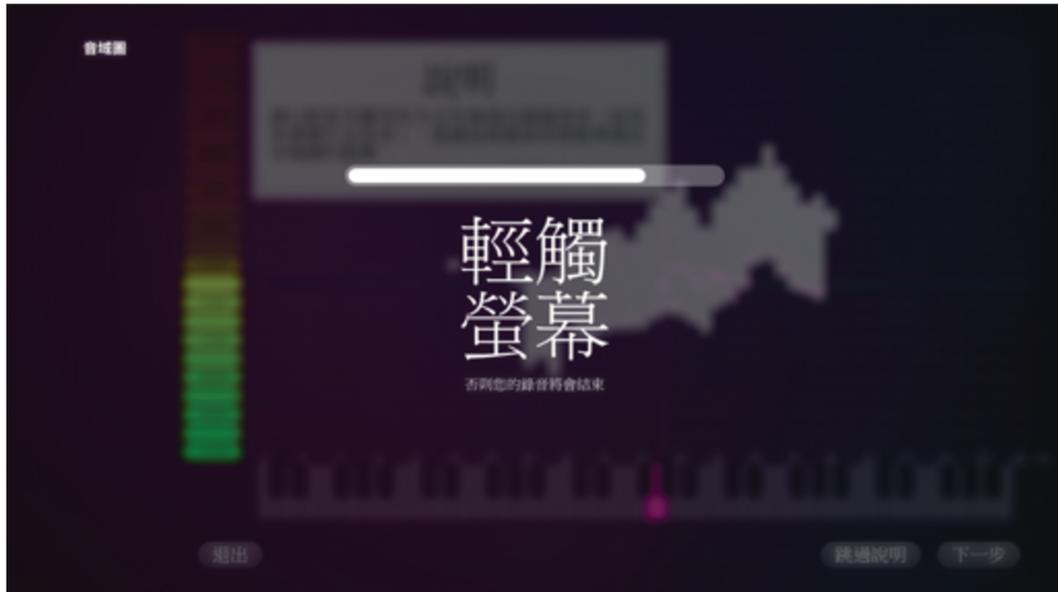


Figure 6.18.: “Le phonétogramme”, une application muséographique conçue pour la Cité des Sciences, dont la GUI est réalisée avec la librairie MP.TUI. L’exemple ci-dessus montre l’usage de *shaders* pour flouter le fond et proposer plusieurs couches de représentation et d’interaction.

La possibilité de concevoir des objets audiovisuels en Max en étroite relation avec la programmation de l’interaction entre le geste, l’audio et le visuel permet de les intégrer dans des scénarios dynamiques personnalisés : histoires narratives pour des ateliers éducatifs avec des enfants, scénarios réactifs, visualisations personnalisées pour les malvoyants, expositions muséographiques avec chartes graphiques spécifiques, adaptation réactive aux formats d’écrans, graphismes expérimentaux pour l’esthétique des performances artistiques live, etc.



(a) L’objet Max créant un slider

(b) Rendu du slider dans une fenêtre OpenGL

Figure 6.19.: Un simple slider dans la librairie MP.TUI

6.3.4 Outils pour l’interaction multitouch

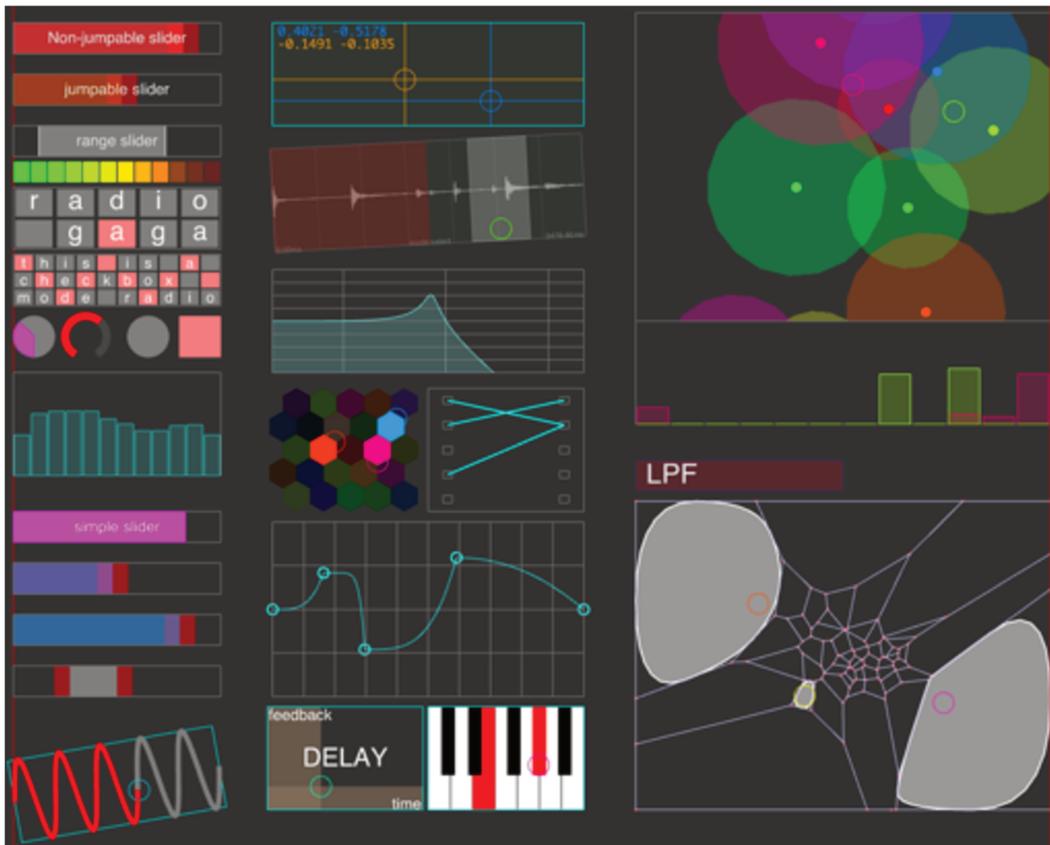


Figure 6.20.: Aperçu de quelques composants graphiques de la librairie MP.TUI

6.3.5 Groupement d'objets graphiques

L'objet `mp.TUI.groups` permet de rattacher différents éléments de GUI à un groupe, comme on le fait dans la plupart des logiciels d'édition vectorielle, afin de gérer leur position, échelle et orientation de manière globale. Cela permet de définir un ensemble de composants dans des coordonnées relatives, puis de venir ajuster l'emplacement d'un seul et unique bloc. Il est possible de procéder à l'ajustement de ces coordonnées par des valeurs passées explicitement au composant, ou bien par une manipulation directe du groupe, selon le même mode opératoire que pour les objets usuels.

Un exemple est présenté sur la figure 6.21 et son rendu graphique figure 6.22.

6.3.6 GUI composites

Il peut s'avérer nécessaire de coordonner plusieurs éléments d'interaction graphique dans un seul et même ensemble, afin qu'un élément puisse réagir à une interaction sur un autre élément. L'objet `mp.TUI.canvas` est destiné à cette fin. C'est un objet graphique vide, qui définit simplement une zone ajustable en position, échelle et orientation. Comme tous les autres objets de la librairie MP.TUI, il émet en sortie

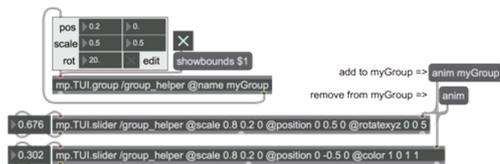


Figure 6.21.: Patch Max implémentant un groupement de composants MP.TUI. Patch Max implémentant un groupement de composants MP.TUI.

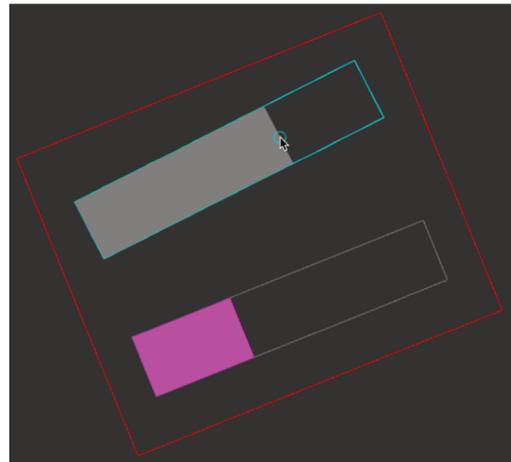


Figure 6.22.: Composants groupés et édition “à la main”. Le cadre du groupe est représenté en rouge.

les *MP-events* qui lui arrivent, ce qui permet de les renvoyer sur les entrées d’autres composants, même si ceux-ci ne sont pas directement touchés par les curseurs de position.

Un exemple simple de **GUI** composite est présenté sur la figure 6.23, associant des curseurs et un texte affichant leurs coordonnées dans une zone précise définie par le *canvas*.

6.3.7 Instanciations dynamiques

La gestion de processus musicaux en parallèle créés à la volée nécessite l’instanciation dynamique d’objets, matérialisant de manière tangible ces processus afin de pouvoir les contrôler durant leur existence et les supprimer lorsqu’on le souhaite. Il est parfois possible de poser des objets physiques sur la surface multitouch pour créer et maintenir en vie de tels processus, sans avoir à maintenir le contact des doigts²⁹ (cf. fig 6.24), mais cette solution n’est pas toujours réalisable³⁰ ni souhaitable (pour des raisons d’encombrement de l’espace de la tablette par exemple).

Les objets graphiques de la librairie MP.TUI peuvent facilement être créés à la volée pour répondre à ce besoin, en les insérant dans des objets MP, tel que présenté dans le chapitre précédant. Ceci permet de concevoir relativement simplement un scénario d’interaction graphique tel que la possibilité de définir des zones “réservoir d’objets” où il est possible de venir piocher des éléments créés dynamiquement, et

29. C’est le cas par exemple sur la *ReacTable* qui utilise des objets physique cylindriques pour instancier des modules.

30. Les surfaces multitouch basées sur une technologie capacitive ne sont pas sensibles à tous types d’objets physiques, contrairement par exemple, aux écrans basés sur une technologie infra-rouge.

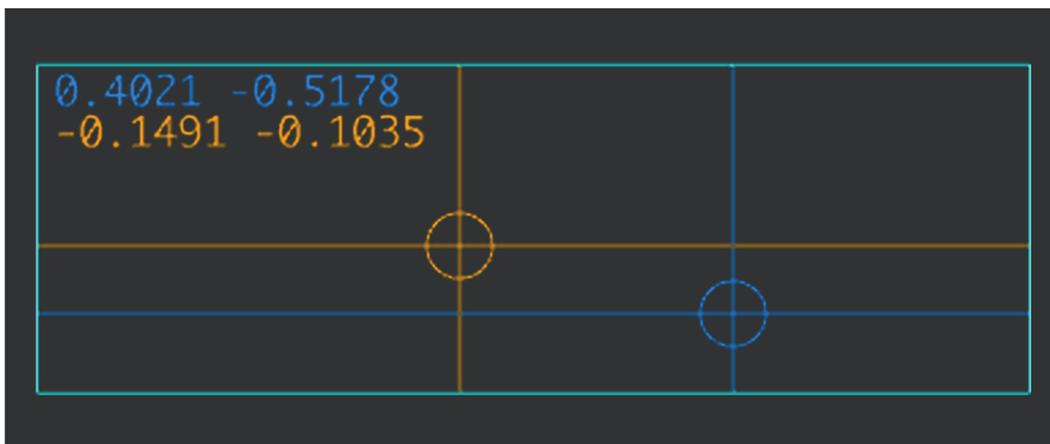
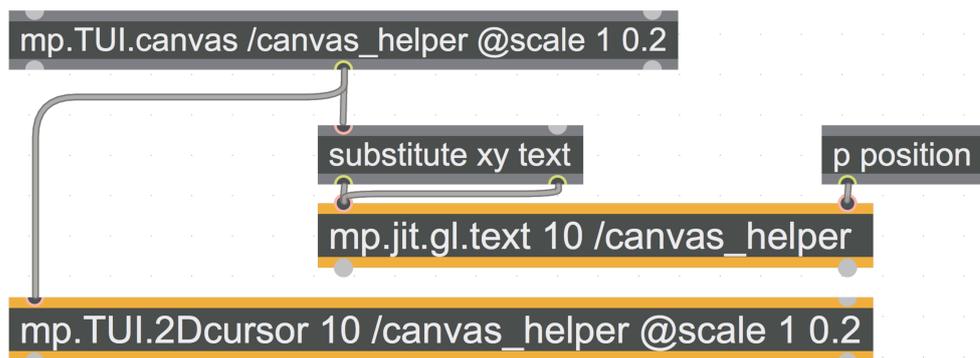


Figure 6.23. Exemple de GUI composite avec `mp.TUI.canvas` : les curseurs ne sont pris en compte que dans la zone définie par le `canvas`. Patch Max en haut, rendu en bas.

représentant des processus complexes incluant leur propre mode de destruction (exemple figure 6.25).



Figure 6.24.: Maintien d'un contrôle par un objet physique. Tout type d'objet solide est captable par une surface multitouch IR; les surfaces capacitives nécessitent, elles, des objets conducteurs, voire un circuit électronique dédié et un traitement logiciel *ad-hoc*.

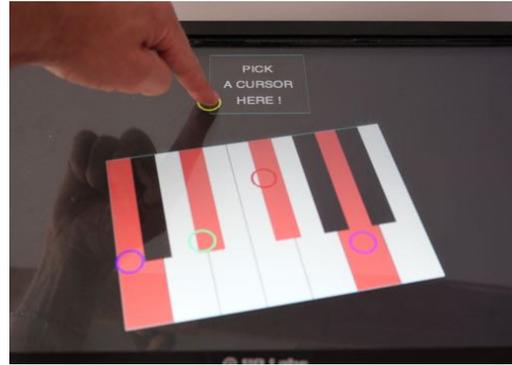


Figure 6.25.: Création dynamique de curseurs permettant le maintien d'un contrôle par un objet virtuel. Les curseurs virtuels sont disponibles dans une zone réservoir (drag'n drop) et supprimables, par exemple, par un double-clic.

6.3.8 Performances

La bibliothèque MP.TUI est entièrement développée avec des objets natifs de la distribution Max. Cette approche, bien que plus coûteuse en charge CPU que des objets compilés, a l'avantage de permettre à tout utilisateur de Max de modifier facilement les composants et de les adapter à ses besoins. De plus, les composants MP.TUI s'appuient essentiellement sur OpenGL, de sorte que la majeure partie de la charge de calcul est laissée au **processeur graphique (GPU)**, ce qui en fait une solution plus réactive que la solution envisagée dans la librairie MMF. L'interaction tangible avec les objets de la GUI se fait à l'aide du moteur physique Bullet-Physics³¹ intégré dans Max. Bien que cela puisse être plus coûteux pour certaines formes simples, cela nous permet de concevoir des composants GUI de n'importe quelle forme et orientation, comme des *sliders* courbes ou des formes évidées, et de les animer avec toutes les possibilités offertes par un modèle physique : champ de forces animant des ensembles d'objets, collisions entre composants, articulations selon des liaisons mécaniques, déplacements inertiels, etc.

6.3.9 Travaux futurs

Des optimisations sont très probablement possibles pour améliorer les performances de MP.TUI, notamment au niveau du calcul de l'intersection entre position des

31. <http://bulletphysics.org>

pointeurs et objets graphiques, en traitant les cas simples séparément plutôt que de les traiter systématiquement dans le modèle générique du moteur *Bullet-Physics*. Cependant, si l'optimisation est toujours utile à la fluidité du rendu graphique, la principale raison d'être de la librairie MP.TUI est le prototypage rapide pour des créateurs non-experts en programmation, et non la finalisation d'une application industrielle pour laquelle des langages plus optimisés (mais plus techniques) offre d'autres solutions.

La librairie MP.TUI permet d'introduire la notion de programmation gestuelle de type *multitouch* dans l'environnement Max, et de bénéficier des possibilités de programmation audio, graphiques et de mapping disponibles, pour les intégrer au fonctionnement des composants de GUI. De nombreuses stratégies de contrôle basées sur ce paradigme restent à implémenter, explorer et inventer, notamment sur la gestion d'événements conjoints définissant des primitives gestuelles, tel que présenté dans [One+19], ou la détection d'objets tagués, tels que présentés dans [Yu+11]. Enfin, le logiciel Max a donné lieu à d'innombrables projets impliquant l'interaction entre le son et l'image, dont les modèles pourraient donner lieu à de nouveaux éléments graphiques d'interaction.

6.4 Conclusion

Nous avons déjà évoqué dans les chapitres précédents la manière dont les DMIs intégraient des aspects traditionnellement liés à des domaines différenciés : lutherie traditionnelle, composition, acoustique de l'espace de jeu, psychoacoustique, mais également informatique, et notamment, comme nous l'avons évoqué ici, design graphique.

L'infographie se prête à l'hybridation des représentations visuelles liées à ces différents domaines et appelle à leur interaction. Lors de l'usage d'un DMI, on peut être amené, par exemple, à "accorder" l'acoustique virtuelle d'une salle, selon les fréquences d'une échelle musicale et donc devoir exprimer sous forme de hauteur tonale des paramètres habituellement exprimés en termes de taille de salle, de temps de décroissance, ou de coefficients de filtres paramétriques. Des représentations visuelles hybrides proposant différentes "vues" d'un même modèle peuvent amener à reconsidérer leur usage pour la performance expressive en direct.

Un grand nombre de règles de conception graphique ont été édictées depuis le début du xx^e siècle, visant en particulier à l'efficacité et la clarté des informations qu'elles soutiennent et fréquemment affirmées de manière impérieuse comme des principes à ne pas enfreindre. Pourtant, l'histoire démontre que les innovations dans le domaine de la représentation graphique sont systématiquement survenues lors de la transgression des règles en vigueur, par des artistes imposant un style nouveau

(parfois teinté des mêmes préceptes à ne pas enfreindre que leur prédécesseurs)³². La représentation visuelle sur les DMIs a cela de particulier qu'elle s'inscrit dans un projet artistique où l'importance de la fonctionnalité se partage l'espace visuel avec l'importance de la sensation et de l'évocation poétique. La conjonction de ces deux aspects contribue à ce que la créativité du domaine artistique nourrisse l'innovation dans les aspects fonctionnels de l'instrument.

Les représentations visuelles ont précédé de plus de 30.000 ans l'apparition de l'écriture³³ et ont la capacité, plus encore que les symboles alphabétiques, de se superposer, de s'interpénétrer, de recourir à des facteurs d'échelle, des nuances de couleur, de texture, pour communiquer des informations de manière concise et efficace, mais également sensuelle. L'infographie permet d'y ajouter encore une dimension temporelle qui permet toute sorte de métamorphoses et d'hybridation des représentations.

Dans ces conditions, le fait de les envisager comme des supports d'interaction laisse présager l'ampleur des possibilités d'invention dans ce domaine. Une spécificité de l'instrument de musique, qui polarise le design graphique dans ce vaste champ des possibles, tient notamment à la disponibilité nécessaire au musicien pour l'écoute, et lorsque qu'il/elle joue en groupe, l'attention aux autres musicien.nes. C'est en particulier cette écologie de l'attention qui a guidé le développement d'un système de notation musicale sur écran présenté dans le prochain chapitre.

32. Minimalisme fonctionnel du Bauhaus, psychédélisme des années 1970, skeuomorphisme des années 2000, *flat design* de la décade passée, pour ne citer que quelques uns de ces contre-pieds.

33. On estime actuellement que l'écriture serait apparue il y a environ 5000 ans, en Mésopotamie, tandis que les plus anciennes représentations visuelles datent d'au moins 40.000 ans (peintures rupestres de Borneo et de Blombos), et probablement bien plus (L'âge de la *Venus of Tan-Tan* étant estimée autour de 300.000 ans).

” *You know how I adjusted to that problem of the radio in the environment : very much as the primitive people adjusted to the animals which frightened them, and which probably, as you say, were intrusions. They drew pictures of them on their caves and so I simply made a piece using radios. Now, whenever I hear radios – even a single radio, not just twelve at a time – as you must have heard on the beach, at least – I think : “Well, they’re just playing my piece”.*

— **John Cage**

John Cage / Morton Feldman.

Radio Happenings, 1966.

[Cag15]

Dans ce dernier chapitre, j’aborde la question de la notation musicale, dont j’ai déjà évoqué les problèmes qu’elle pose dans le cas des musiques électroacoustiques au chapitre 2. En particulier, j’y présente “John, le semi-conducteur”, un logiciel de partition sur écran développé pour la pratique collective de l’improvisation libre électroacoustique avec l’ensemble *ONE*, et les motivations qui ont conduit à ce développement.

Au préalable, je présenterai un état de l’art des partitions sur écran, ainsi qu’un rapide parcours dans l’histoire de la notation musicale à travers ses différents enjeux, en soulignant l’entrelacs qui se tisse entre les pratiques d’analyse, de lutherie, de composition, d’interprétation et d’improvisation, et comment ces différents aspects s’articulent dans les lutheries et les musiques numériques.

7.1 Notes sur la partition

7.1.1 La notation comme instrument mnémorique

Écrire le passé

La notation musicale consiste à transcrire une œuvre musicale sur un support, généralement visuel. Elle est donc, en premier lieu, un moyen de noter *a posteriori* une musique “passée” en procédant, par analyse, à l’extraction de caractéristiques saillantes/structurelles [du continuum] de la performance musicale, et en les représentant de manière symbolique.

La notation sert ainsi de moyen mnémorique permettant de garder une trace de la performance musicale et de conserver de manière durable l’image d’un phénomène sonore sinon éphémère.

Cette analyse peut s’intéresser aux propriétés du son (telle que sa hauteur, son intensité, etc.) mais également aux gestes et aux matériaux qui le produisent. Ces deux aspects, ont notamment donné lieu à deux systèmes de notation dans la tradition musicale occidentale¹, ayant perduré jusqu’à nos jours :

- la portée musicale, élaborée au XI^e siècle par Guido d’Arezzo qui modernise la notation neumatique en formalisant la dénomination des notes et la notation solfégique. Ce système constitue une écriture “phonographique” du son², selon une approche qu’on pourrait qualifier d’“esthétique”³, définie par des caractéristiques du son telle que sa hauteur, son intensité et sa durée, relativement indépendamment des gestes qui concourent à sa production ;
- la tablature, apparue au début du XIV^e siècle, qui s’attache davantage à la notation “ergographique” ou “poïétique” du son, en privilégiant la notation des gestes sur un instrument spécifique (en particulier la position des différents doigts sur les instruments à cordes).⁴

Les techniques d’enregistrement audio inventées à la fin du XIX^e siècle ont permis de conserver les œuvres musicales sans recourir à leur réduction symbolique, mais l’intégration progressive du timbre comme paramètre d’écriture musicale, en

1. Notons cependant que ce biais des sociétés occidentales qui valorisent la culture de l’écrit, associée aux classes sociales plus élevées, davantage que l’oralité, associée aux musiques folkloriques et populaires, n’est pas universel. La culture hindoue, par exemple, attache une valeur plus importante à l’enseignement oral en ce qui concerne la musique, et vouloir noter sur papier ce qu’un maître de tabla enseigne de manière orale serait considéré comme un dilletantisme de la mémoire tout à fait méprisable. Cf. également annexe B.

2. Je reprends ici les termes de notation “phonographique” et “ergographique” proposés par Eric Maestri dans [Mae16].

3. Jean-Jacques Nattiez, dans son analyse sémiologique de la musique [Nat87], distingue un processus “poïétique”, de création, d’un processus “esthétique” de réception de l’œuvre musicale.

4. Bien entendu, ces deux approches ne sont pas orthogonales et partagent de nombreux points communs. Leur avantages et inconvénients respectifs les rendent toutefois suffisamment complémentaires, pour que de nombreuses partitions de guitare présentent les deux en parallèle.

particulier dans les musiques électroacoustiques – qui ne possèdent généralement pas de partition préalable – a renouvelé dans le même temps les besoins d’analyse du champ musical ainsi élargi. Des logiciels tels que l’Acousmographe [FGL10] ou EAnalysis [Cou16] sont entièrement dédiés à cette question et de manière plus générale, le domaine interdisciplinaire des **MIR** qui a émergé au tournant du siècle, ainsi que la plus récente conférence **Conference International sur les Technologies de la Notation et de la Représentation Musicale (TENOR)** continuent d’apporter de nouvelles perspectives sur la notation musicale.

Écrire pour le futur

Si la notation permet de consigner une musique pré-existante, ce processus analytique offre en retour un système symbolique qui possède sa propre logique, et une certaine autonomie. En transposant la *temporalité musicale* en une *spatialité visuelle*⁵, la partition permet d’agencer des symboles musicaux “hors du temps” de la performance, et d’écrire ainsi une musique “pour le futur” à partir de cette grammaire utilisée de manière générative. La notation musicale a ainsi permis de créer des œuvres qui auraient difficilement pu être conçues sans ce support visuel⁶.

Ainsi, la partition est généralement considérée comme un document permettant de composer une œuvre musicale et de la transmettre à un instrumentiste en vue de son interprétation. Elle en constitue la forme abstraite par excellence au point d’être souvent assimilée à l’œuvre elle-même dans la tradition musicale occidentale.

Cette objetisation de la performance musicale, préalablement immatérielle, éphémère et directe, en une forme tangible, durable et médiatisée a opéré une scission entre les actes de composition et de performance, aux multiples conséquences. Comme le souligne Magnusson dans [Mag11], “*le désir de capturer la musique, la représenter dans le silence des signes écrits et l’invoquer à nouveau par l’interprétation de ces signes*” a posé les bases d’une “*industrie de la composition et de l’interprétation de la musique, et surtout, de la technologie et de l’infrastructure nécessaire à l’enregistrement, la distribution et la vente de musique destinée à sa lecture automatique sur machines.*”

7.1.2 Des partitions symboliques aux partitions graphiques

Le développement des techniques d’écriture dans le système de notation d’Arezzo conduit à une complexité croissante des œuvres en terme d’orchestration, qui donne naissance aux formes symphoniques de la musique romantique. Avec la prise en compte croissante du timbre qui l’accompagne, les partitions ont progressivement

5. Voir à ce sujet la notion de “grammatisation” présentée au chapitre 3.

6. Un exemple notoire est le rondeau “Ma fin est mon commencement” (XIV^e siècle) de Guillaume de Machaut, dans lequel les deux voix sont rétrogrades l’une à l’autre.

intégré des techniques de jeu étendues (*con legno, sul ponticello, etc.*) par le biais d'annotations *ad hoc* et de nouveaux symboles pictographiques.

Les diverses révolutions technologiques du XIX^e siècle ont bouleversé à la fois les moyens de production et le champ de l'expression musicale. À l'enthousiasme des Futuristes italiens du début du XX^e siècle – qui voient dans ces révolutions un moyen de se révolter contre le conservatisme de l'opéra italien, en adoptant l'ensemble des bruits dans le domaine du son musical –, et ses influences fertiles sur les compositeurs modernes (Stravinsky, Varèse ...), s'ajoutent des questions plus existentielles de présentation et de représentation musicale.

Le “bruit des machines”, c'est-à-dire la production automatisée et industrialisée des phénomènes audibles (musicaux ou non) a envahi l'espace perceptif, remettant en question la place du son⁷ et de l'œuvre musicale dans la société. Noter le son devient, dans certains cas, impossible dans la mesure où les outils/instruments de production sonore possèdent leur propre logique, possiblement externe à la volonté de l'utilisateur/instrumentiste. Dans les années 1960, le mouvement Fluxus, en particulier, répond à ce problème en accordant une importance primordiale au geste et au processus dans l'écriture de performance⁸ en inventant de nouvelles représentations pour ces partitions nouvelles (figure 7.1).

Les “partitions graphiques”, c'est-à-dire recourant à l'utilisation de signes gra-

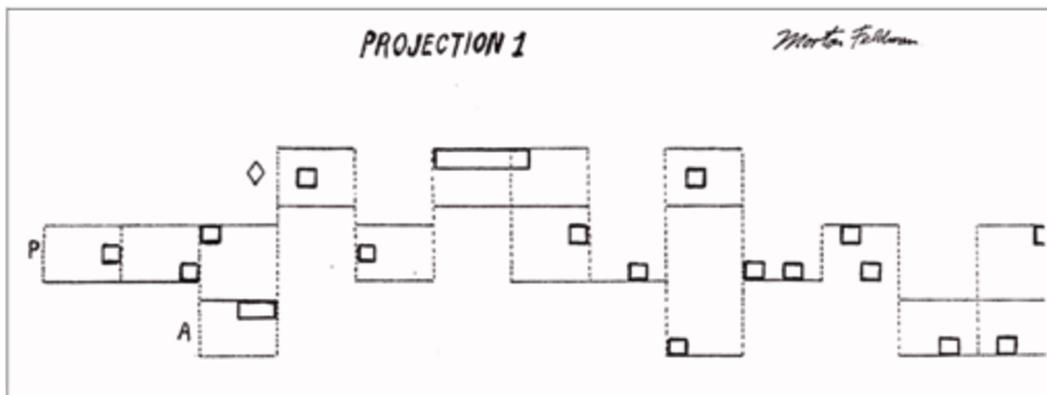


Figure 7.1.: La partition de *Projection 1* (1950) de Morton Feldman est une des premières partitions graphiques, caractéristique du mouvement Fluxus naissant. ©1962 C.F. Peters Corporation, avec leur aimable autorisation.

phiques autres que les symboles habituels de la notation conventionnelle des notes sur une portée, se multiplient ainsi au milieu du XX^e siècle, et reflètent cette évolution musicale pour laquelle la notation traditionnelle s'avère insuffisante. Pour des raisons qui peuvent sembler opposées, la partition graphique a contribué à repousser

7. On pense notamment à la notion d'écologie sonore qui émerge au milieu du siècle et exemplifiée dans le travail de Raymond Murray Schafer [SG79].

8. Un exemple notoire est la pièce “Imaginary landscape No 4” de John Cage, où l'utilisation de radio rend impossible la description du résultat musical *a priori*, tandis que les gestes de changement de gain et de fréquence sont précisément notés. Pour une étude plus approfondie sur la relation entre partition et action, voire notamment [Koj11].

à la fois les limites de ce qu'il était possible de "fixer" dans une composition, en la spécifiant intégralement sur un système de synthèse, et les limites de ce qu'il était concevable de laisser sujet à variations, c'est-à-dire la part confiée à l'interprétation du musicien. Les partitions de *Mycènes Alpha* de Iannis Xenakis et de *December 1952* de Earle Brown soulignent ces deux directions (cf. Figure 7.2).

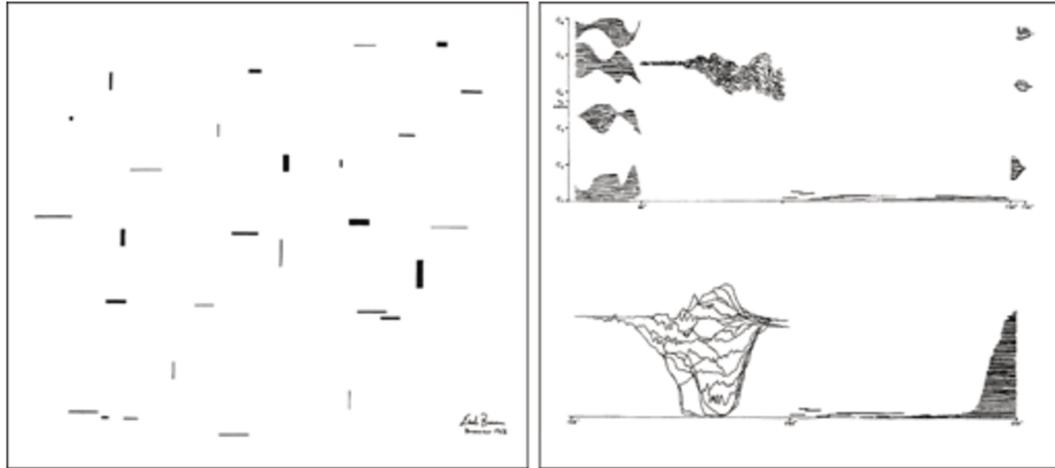


Figure 7.2.: Extraits des partitions de *December 1952* de Earle Brown (à gauche) et *Mycènes Alpha* de Iannis Xénakis (à droite).

Cette opposition apparente entre une œuvre totalement figée et une œuvre totalement sujette à la sensibilité des interprètes semble plutôt le résultat d'approches complémentaires visant à explorer les nouveaux domaines sonores et musicaux, tant dans leurs manifestations que dans leurs potentialités, réifiées ou fantasmées.

7.1.3 Œuvres ouvertes, intension, comprovisation

Parallèlement à cette part laissée à la sensibilité de l'interprète, le *déroulement* de l'œuvre est devenu également sujet à variations. Si les partitions classiques se présentent généralement de manière linéaire et chronologique, les œuvres dites "ouvertes" fournissent aux musiciens des "règles du jeu" plutôt qu'une image résultant du jeu de ces règles⁹.

L'œuvre ouverte peut intégrer des processus génératifs dont les résultats varient à chaque performance et la partition devient un moyen de "noter l'imprévisible" [Reb10]. Jean-Louis Giavitto, dans [Gia14], nomme ces deux types de partitions "intensionnelles" et "extensionnelles" en référence à la formulation d'ensembles en mathématique : soit "extensive", c'est-à-dire définie par la liste explicite des valeurs de cet ensemble, soit "intensive", c'est-à-dire en les définissant par une propriété générative.

Dans ce continuum de possibilités entre œuvre fixe et improvisation libre, que

9. ... d'après la définition qu'Umberto Eco en donne dans son essai "L'œuvre ouverte" [Eco15]

Richard Dudas nomme “*comprovisation*” dans [Dud10], différentes “perspectives notationnelles”¹⁰ peuvent être envisagées. Les différentes finalités de la représentation musicale jusqu’alors intégrées dans la partition traditionnelle gagnent en indépendance et prennent une importance variable, s’adaptant aux contextes de l’œuvre musicale et de l’interprétation. Elle peut ainsi se retrouver fragmentée en éléments qui deviennent le support d’improvisations dirigées, comme dans le *Soundpainting*¹¹ ou dans la composition *Cobra*¹² de John Zorn.

La partition définit le terrain de jeu, qui n’est pas nécessairement linéaire et qui, notamment grâce à la possibilité de produire des images animées en temps réel, peut se reconfigurer dynamiquement durant le temps de la performance.

7.1.4 Partitions animées sur écran

La disponibilité croissante des appareils numériques a conduit au développement d’un certain nombre d’applications destinées à la création de partitions à l’écran. Comme le note Lindsay Vickery dans [Vic14] : “*Ces développements suggèrent une tendance, en particulier chez les jeunes compositeurs dont la pratique s’est développée exclusivement sur ordinateur, de passer logiquement à l’étape de présenter des matériaux notationnels à l’écran.*”

Cat Hope résume les principales caractéristiques offertes par ce nouveau média dans les termes suivants [HV11] : *les capacités de défilement, de permutation, de transformation, de génération et de mise en réseau du support numérique.*

L’utilisation de l’infographie pour la représentation musicale semble être un médium de choix pour enrichir les possibilités d’écriture de partitions graphiques. En particulier, la fluidité d’adaptation du support virtuel permet d’envisager de multiples “vues” d’une même partition selon les contextes auxquels elle est destinée. Ainsi, la composition, la performance ou l’analyse d’une même œuvre musicale ne nécessitent pas nécessairement les mêmes représentations¹³. En termes d’interprétation musicale, on peut ajouter une distinction entre l’interprétation d’une partition par un humain et une machine, ces deux types d’*interprètes*¹⁴ ayant des capacités relativement différentes.

De la même manière que les technologies numériques ont atomisé l’instrument de musique en découplant ses différentes composantes (contrôleur gestuel, cartogra-

10. J’emprunte ici cette expression à Sandeep Bhagwati [Bha13].

11. Le *soundpainting* est un langage gestuel de direction d’improvisation multidisciplinaire, élaboré par Walter Thompson dans les années 1970.

12. *Cobra* (1984) est une œuvre dont la composition repose sur un ensemble de signes notés sur des cartes et de règles associées, prescrivant des actions aux musiciens. Le nombre de musiciens, l’instrumentation et la longueur de la pièce sont indéterminés.

13. Le projet “GesTCom” [ABF14] est un exemple éloquent de l’intérêt de multiples représentations pour la composition, l’analyse et la performance. Voir par exemple : <https://youtu.be/KV9nQUhhyuI>

14. En informatique, on appelle “interprète” un outil ayant pour tâche d’analyser, de traduire et d’exécuter les programmes écrits dans un langage informatique.

phie, synthèse, etc. devenant modulaire), elles ont également atomisé la partition en ses différentes fonctions, de support pour la composition, la performance ou l'analyse. Il est alors nécessaire de préciser quel cas d'utilisation est en jeu et Cat Hope définit à cet effet le terme "partition sur écran" (*screen-score*) [HV11] comme le médium présenté aux musiciens pour une performance : *"Les partitions sur écran sont des compositions musicales écrites, conçues pour être interprétées; elles ne doivent pas être confondues avec des représentations visuelles de la musique ou l'interprétation musicale des arts visuels."*

Le concept de "partition sur écran" a été étudié par plusieurs chercheurs, compositeurs et musicologues (voir Winkler [Win04], Clay [Cla08] ou Lee [LFC12]), qui ont discuté des avantages et des inconvénients de l'utilisation des technologies numériques pour la représentation musicale, tant dans ses aspects techniques que dans ses conséquences musicologiques. Lindsay Vickery propose par exemple une revue très détaillée dans [Vic14], des latences critiques permettant à un instrumentiste de lire en temps réel le matériel musical affiché et donne des conseils sur ce à quoi le compositeur doit faire attention lorsqu'il compose avec ce support.

Ces études offrent des descriptions pertinentes et précieuses pour le compositeur qui souhaite réaliser des partitions sur écran. Cependant, il semble qu'elles puissent être complétées par une approche de la partition différente de celles envisagées dans la plupart de la littérature sur le sujet, où le point de vue est souvent celui du compositeur. La conception d'un système de partition à écran est donc polarisée par l'importance centrale de la partition, elle-même considérée comme une condition préalable à l'exécution musicale, situation qui reflète également une forte tradition de la musique classique occidentale¹⁵. Je présenterai plus loin une "perspective notationnelle" différente, née de la pratique instrumentale dans un contexte d'improvisation libre électroacoustique.

7.1.5 La notation comme instrument performatif

Les différents aspects précédemment cités, combinés à la nature générative des algorithmes exécutés sur ordinateurs, mettent à disposition de nouveaux outils pour l'écriture musicale, qui bouleversent la chaîne traditionnelle faisant se succéder composition, gravure, déchiffrage et interprétation d'une œuvre écrite, en abolissant une partie des délais techniques intermédiaires à ces différentes étapes. Outre

15. Une exception notable est la contribution de Georg Hajdu [Haj16] qui propose le concept de "musique jetable" pour qualifier les formes musicales *"qui reposent dans une moindre mesure sur des partitions entièrement notées, telles que la "comprovisation" ou la performance sur laptop"*¹⁶. Cependant, même lorsqu'elle est "jetable", la partition occupe ici encore une position préalable à la performance et sur laquelle l'attention reste focalisée, à la différence de l'approche proposée dans le logiciel "John".

l'évacuation de cette inertie dans la traduction sonore de l'écriture musicale¹⁷, la puissance de l'écriture algorithmique réside notamment dans sa capacité à générer des motifs arbitrairement grands (potentiellement infinis) à partir d'une écriture très compacte¹⁸.

Ces deux aspects combinés, immédiateté de résultat et générativité, ont favorisé l'émergence de diverses pratiques s'apparentant à une forme de composition performative, c'est-à-dire, pour faire écho au début de cette section, d'une composition dans le présent de la performance. Cette composition "performative" peut prendre la forme d'une notation musicale en temps-réel, telle que la définissaient Arthur Clay et Jason Freeman en préface d'une édition spéciale de la *Contemporary Music Review* dédiée à cette thématique [CF10] : "Nous considérons la notation musicale en temps-réel comme étant toute notation, qu'elle soit traditionnelle ou graphique, créée ou transformée durant le cours d'une performance musicale."¹⁹

Une autre forme de composition en temps-réel est à l'œuvre dans la pratique du *live-coding*, qui consiste à écrire en direct, sur scène, du code interprété directement par la machine²⁰. L'interprète est dans ce cas, le plus souvent, l'ordinateur qui génère le son à partir de ces instructions.

Par ailleurs, l'agencement de structures musicales "hors temps" de la performance, dans ce que l'on nomme couramment un "séquenceur", et qui s'apparentait à ses origines à une simple notation symbolique d'événements musicaux selon une grille temporelle relativement fixe a considérablement évolué. L'étude du temps musical et sa modélisation mathématique a depuis permis d'assouplir ces paradigmes et de manipuler le temps de manière beaucoup plus plastique et élastique, en modélisant les relations entre événements sous formes relatives²¹, son avancement par des modèles statistiques²², ou re-programmation, comme c'est le cas dans le *live-coding* ou dans un logiciel comme Antescofo²³.

D'autres formes apparentées ou hybrides existent, telle que la "notation musicale animée"²⁴ ou les partitions interactives dans lesquelles le contenu évolue en fonction

17. D'autres inerties inhérentes à l'usage des DMIs existent cependant ; le temps moyen mis par un instrumentiste "acoustique" comparativement à un instrumentiste "numérique" pour s'installer sur scène en est un exemple significatif.

18. Toute la scène "demo" (*demoscene*), parfois nommée *bytebeat* en ce qui concerne la musique est orientée par cette recherche de "générativité maximale" de codes compacts. Le projet *sc140tweets* qui consiste à créer une pièce musicale à partir d'un code de 140 caractères maximum – soit la taille d'un message sur Tweeter – en est une démonstration éloquente dans le domaine musical : <https://twitter.com/sc140tweets>. Voir également [Hei11]

19. We consider real-time music notation to be any notation, either traditional or graphic, which is created or transformed during an actual musical performance.

20. L'ouvrage collectif [MD18] en donne une vision riche et récente, voir sinon les contributions de Blackwell et Collins [BC05] ou Magnusson [Mag11].

21. En particulier, les relations d'Allen et le principe de tuilage [BJD13] dont le modèle est à la base d'une série de séquenceurs avancés, développés au LaBRI ces 20 dernières années, de Boxes à *i-Berlioz* [Mir+19], en passant par *I-Score* [DA05] et *OSSIA* [Cel+15]

22. Notamment les chaînes de Markov, utilisées depuis de nombreux systèmes de suivi de partition, comme ceux développés à l'IRCAM depuis les années 1990.

23. Cf. supra note de bas de page 48

24. Voir en particulier les travaux de Ryan Ross Smith [Smi15] dans ce domaine et son blog <http://animatednotation.com> sur lequel il recense les œuvres adoptant cette approche.

d'interactions avec les interprètes ou le public. Un environnement de programmation comme INScore [FOL12], développé par Dominique Fober au GRAME, est précisément conçu dans la perspective de pouvoir articuler une écriture graphique destinée à la musique de manière dynamique, non-linéaire et pluri-directionnelle, en considérant tous les objets graphiques à la fois comme des supports de représentation, des éléments de contrôles et des agents susceptibles d'être animés.

7.2 John, un instrument pour la comprovisation

7.2.1 Genèse d'une notation

Dans le cas des performances de ONE (Figure 7.3), qui sont basées sur une pratique d'improvisation libre sans composition préalable, la focale est déplacée du côté de l'instrumentiste. L'élément central n'est pas la partition mais l'écoute et la compréhension du son et des autres musiciens. La partition (s'il est encore possible de l'appeler ainsi) émerge souvent après les séances d'improvisation et sa présence ne doit pas se faire au détriment de l'attention mutuelle. Dans cette perspective, il est possible d'envisager que le musicien adapte lui-même la représentation musicale à ses propres besoins, en fonction des parties qu'il doit jouer, de ses préférences personnelles, des différents mouvements de la partition, etc.

Dans le cas particulier où les instruments sont numériques et programmables, l'utilisation d'un système de partition en réseau offre également la possibilité de déléguer certains paramètres de l'instrument à un contrôle externe pris en charge par la partition. Dans une situation d'improvisation, la négociation entre ce contrôle automatisé et le choix du musicien implique une médiation que j'évoquerai dans la section 7.2.3.

Présentation de ONE

Les sept musiciens de l'ensemble ONE (cf. figure 7.3) sont tous profondément impliqués dans le domaine de l'informatique musicale avec des spécialités diverses dans les domaines de la pratique instrumentale, de la composition, de la facture instrumentale, de la recherche en sciences musicales et de l'éducation. Nous pratiquons tous des DMIs dont nous avons conçu le logiciel²⁵ et parfois aussi l'interface hardware, dans une certaine mesure. A l'origine de notre collaboration, il n'y avait pas d'autre projet que celui de tenter l'expérience de jouer une "musique de sons" avec cet *instrumentarium* numérique hétéroclite, sans grille, sans théorie musicale, sans accord préalable sur la forme et le contenu²⁶.

25. La plupart de ces DMIs utilisent le logiciel Max pour le design de l'interaction, voire la synthèse.

26. Des extraits video de ONE en concert sont disponibles ici : <https://youtu.be/1BVNwGeTxFA>



Figure 7.3.: Les membre de ONE sur scène avec leurs DMIs. De gauche à droite : Serge de Laubier au Méta-Instrument 3, Pierre Couprie à la flûte augmentée et interfaces MIDI, Hugues Genevois au Calliphone, Laurence Bouckaert au Karlax, György Kurtág Jr. au Handsonic, Jean Haury au Méta-Piano, Vincent Goudard au Filigramophone.

Improvisation libre et expérimentation

Plusieurs séances d'improvisation ont été l'opportunité de découvrir nos sons, nos styles de jeu, notre vocabulaire musical. Ces moments de répétition ont été avant tout l'occasion de performances anarchiques, guidées uniquement par le fil de notre écoute, de confrontation, de mélange, de collision, de superposition d'objets et d'espaces sonores, ainsi que de moments de discussion et de réglages de nos dispositifs de jeu.

Ces sessions ont également fait l'objet d'exercices d'improvisation classiques : recherche de fusion timbrale et de contrepunts, passages fugués entre musiciens, accompagnement d'un soliste, travail sur les nuances pianissimo, ou improvisation "dans le style" d'une pièce connue. Finalement, les enregistrements audio nous ont permis de ré-écouter les improvisations parfois longues et ininterrompues pour en extraire des idées musicales intéressantes.

Structurer le temps

La question de la structure globale d'un concert en mouvements musicaux est apparue durant la préparation de la première performance en public de ONE. L'absence d'une partition structurant la durée du concert nous a conduits à suivre un scénario narratif inspiré d'un roman de Jules Verne. Ainsi, le concert consistait en une série de chapitres, simplement identifiés par des intertitres tenant lieu de paysages sonores exotiques et imaginaires à explorer.

Peu à peu, ces expériences ont donné lieu à l'émergence d'un vocabulaire musical plus atomique, représentant des atmosphères et des mouvements définis collectivement, que nous avons appelés "karmas"²⁷. Les différents moments de jeu et de discussion nous ont amenés au développement d'autres objets conceptuels qui ont été

27. La relation avec ce concept indien est lointaine, mais elle comporte un sens séduisant qui fait écho à la façon dont nous les voyons dans la performance : l'ensemble des actions représentées par le karma influence l'avenir de l'individu. De même que l'interprétation musicale d'un *karma* (tel que nous le définissons) est soumise aux actions des musiciens et tout accident, la bifurcation par rapport à la partition prévaudra sur l'évolution musicale plus que la partition elle-même.

en partie réalisés sous la forme d'un logiciel surnommé "John, le semi-conducteur"²⁸.

L'origine du développement de John est ainsi liée au désir de trouver un moyen de structurer le temps musical en différents mouvements dans la perspective de concerts librement improvisés d'une durée assez longue.

Stimuler la pratique en l'absence de chef

Une autre motivation résidait dans la possibilité de générer des improvisations variées, afin de ne pas toujours répéter les mêmes textures et structures formelles telles que des séquences de cycles ascendants-descendants.

De plus, nous cherchions des moyens de stimuler l'exploration de combinaisons et d'idées musicales inhabituelles qui nous poussent hors de notre zone de confort. La proposition de diviser mathématiquement le temps en séquences pour permettre à tous les ensembles possibles (solo, duo, trio, ... jusqu'au tutti), a été la première impulsion pour le développement d'un générateur de partition capable de produire automatiquement de telles distributions.

Comme les opinions divergeaient au sein du groupe sur l'équilibre entre règles et absence de règles, un principe clé a permis de trouver un terrain d'entente : John est un "semi-conducteur", un "sous-chef d'orchestre". Cela signifie que les partitions créées avec John ne sont qu'une proposition, que chaque membre du groupe est libre de suivre ou non, selon le contexte musical qui ne prend véritablement forme qu'au moment même de la performance. L'écoute reste donc la règle essentielle du jeu, l'emportant sur un suivi aveugle de la partition. En particulier, sont laissées à l'appréciation de chaque musicien l'articulation entre les différentes parties de la partition, qu'elles soient tuilées ou disjointes, ou encore la décision de jouer quand il n'est pas censé le faire (ou inversement), etc.

Ce principe a pour conséquence directe une épuration dans le design visuel de la partition, dont le but est de permettre à chaque musicien de se situer en un coup d'œil dans la partition, sans monopoliser son attention au détriment des autres musiciens et du son. Le but est donc très différent de celui poursuivi dans d'autres systèmes de notation musicale sur écran, comme ceux explorés dans des travaux impliquant du déchiffrement en direct de partition dynamique [Fre08b].

Ainsi, John permet la gestion collective du temps, que ce soit lors des répétitions, de la composition ou des performances, en fournissant un support de représentation partagé. Une brève description du logiciel pour en saisir les grandes lignes précédera une discussion sur les différents aspects liés à cette gestion de groupe.

28. En anglais "John, the semi-conductor", "conductor" signifiant chef d'orchestre, ce subtil jeu de mot se perdant malheureusement dans sa traduction française...

7.2.2 Description technique

John s'appuie sur une architecture client / serveur, dans laquelle chaque musicien visualise une interface client dans un navigateur web, sur laquelle il peut agir. Cette interface se compose de deux parties, un générateur de partition d'une part et une visualisation interactive de la partition d'autre part.

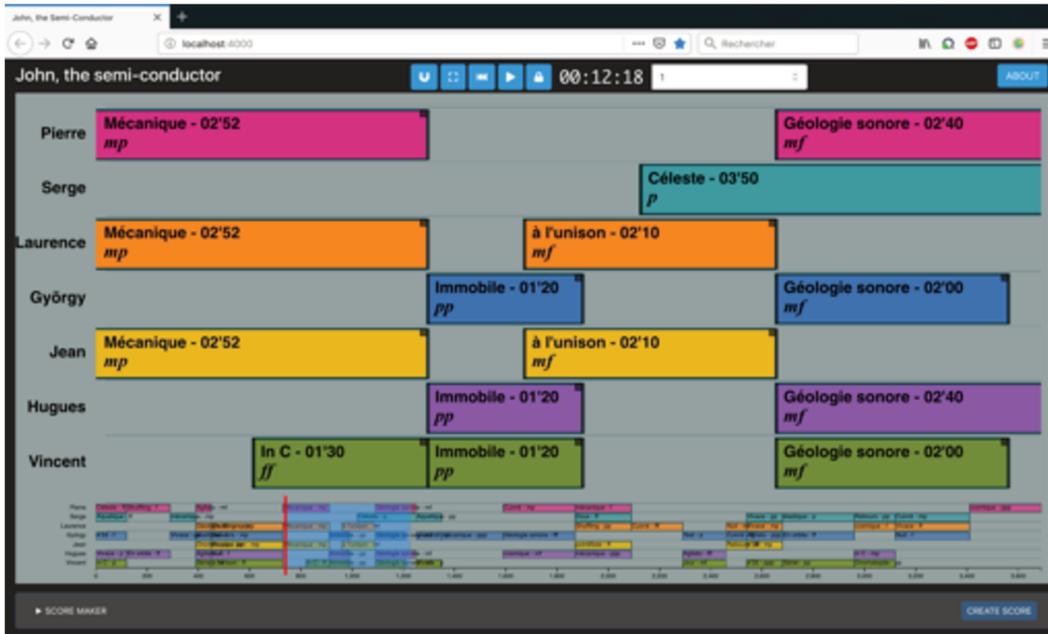


Figure 7.4.: Aperçu de l'interface de John tournant dans un navigateur web.

Générateur de partitions

Le générateur de partitions permet de créer très rapidement des propositions musicales en ne spécifiant que des contraintes globales :

- la durée globale de la partition ;
- le nombre minimal et maximal de joueurs ;
- la durée minimale et maximale des blocs ;
- une liste de *karmas* identifiant une ambiance musicale particulière, selon un vocabulaire défini en commun durant les séances d'improvisation ;
- une liste de nuances de *pianississimo* à *fortississimo*.

Une fois ces contraintes spécifiées, le générateur de partition produit une proposition aléatoire respectant ces conditions, composée d'une séquence de blocs temporels associant un karma et une nuance. Cette proposition peut ensuite être ajustée dans l'interface d'édition / visualisation.

Visualisation interactive

Cette interface représente des blocs disposés sur une abscisse chronologique. Elle se compose d'une *vue globale* réduite d'une part, offrant une vue d'ensemble partagée de la partition dans son intégralité, et d'une *vue locale* zoomable, située au-dessus de la *vue globale*. Sur la *vue globale* se trouve une tête de lecture commune et synchrone à tous les clients, ainsi qu'un empan temporel (en rouge et bleu, respectivement, sur la figure 7.4) définissant la durée affichée sur la *vue locale*. Cet empan est défini individuellement par chaque musicien sur son client web et varie généralement d'une dizaine de secondes à quelques minutes selon la granularité temporelle de la partition et la préférence de chacun.

Tous les paramètres de contrôles sont accessibles dans l'ensemble des clients, permettant à chacun d'éditer la partition : générer une nouvelle instance, déplacer et modifier la durée des blocs et leur contenu (*karma* et *nuance*), démarrer la lecture, modifier la vitesse de lecture, déplacer la tête de lecture pour démarrer à un moment donné de la partition. Ces changements sont immédiatement appliqués à l'ensemble des autres clients de John.

L'utilisateur peut également définir des paramètres locaux qui n'affecteront que son interface client : la visibilité des différentes pistes, la durée de sa *vue locale* et la synchronisation (ou non) de sa vue locale au curseur de lecture, à l'aide du bouton "link" (en forme de cadenas sur la figure 7.4).

Implémentation

Après une première version développée en Max²⁹, l'application a été portée en **HTML5** réactif à l'aide de l'environnement Meteor³⁰. Ceci permet l'édition collective sur la plupart des plateformes (y compris les plateformes mobiles) connectées à un réseau local, via un simple navigateur web. La visualisation a été réalisée à l'aide de la bibliothèque D3.js³¹.

Les partitions sont sauvegardées au format **JavaScript Object Notation (JSON)** sous la forme d'une liste d'événements avec un identifiant unique, un index de piste, un temps de début, une durée et un certain nombre de propriétés telles que le karma et les nuances. Pendant la lecture, le temps et les événements de la partition sont envoyés par **OSC** sur le réseau et récupérables dans Max en tant que messages MP (cf. section 5.3).

7.2.3 John en pratique

Cette section présente divers constats sur les conséquences résultant de l'usage de John dans la pratique musicale de ONE.

29. <https://cycling74.com>

30. <http://meteor.com>

31. <https://d3js.org>

Composition générative

Le générateur de partitions a fait gagner beaucoup de temps pendant les répétitions, en offrant immédiatement une structure musicale possible. Aussi arbitraire que soit cette structure, sa fonction principale est de stimuler la performance musicale via sa prescription la plus minimale : *quand jouer* (ou ne pas jouer). Ainsi, les propositions sont souvent testées telles quelles avant d'être ajustées collectivement en fonction de ce que les membres du groupe trouvent intéressant ou non. Il est alors possible de faire évoluer cette structure musicale, avec apparemment plus d'efficacité que si l'on ne partait de rien.

Distribution de la participation

Le fait que John propose explicitement une distribution du temps de jeu entre chaque musicien a conduit à des configurations d'ensemble que nous n'aurions pas nécessairement tentées, en particulier les ensembles réduits (solo et duo), la tentation de jouer étant parfois trop grande pour laisser s'installer ces configurations minimales, plus fragiles et d'une certaine manière, plus risquées.

De plus, avoir des moments de pause explicites permet de mieux anticiper ses entrées. En effet, les **DMIs** ont souvent une dimension "méta-instrumentale"³² et exposent généralement un grand nombre de paramètres, dont tous ne sont pas nécessairement accessibles directement. Ces moments de pause planifiés peuvent permettre de prévoir le temps dont dispose chaque instrumentiste pour gérer de telles reconfigurations de paramètres.

Synchronisation

Dans une situation d'improvisation libre, la synchronisation entre les musiciens est entravée par l'inexistence de règles idiomatiques. En particulier, l'absence de pulsation et de mesure rend cette synchronisation plus difficile encore quand le nombre de musicien augmente et prive souvent l'improvisation libre de transitions franches dans la pratique d'ensemble.

Le chef d'orchestre, lorsqu'il y en a un, fournit des repères temporels précis, par la battue et d'éventuelles indications pour le jeu. Outre les problèmes liés à la hiérarchie des relations, posés par le rôle d'un leader dans un groupe d'improvisation, et analysées par Clément Canonne dans [Can12], confier la direction d'une improvisation à une personne³³ reste limité par le fait qu'elle ne peut agir que dans le présent, et que cela exige une attention quasi-permanente des musiciens envers le chef, au détriment de celle qu'ils peuvent porter à leurs pairs. En effet, le chef d'orchestre est essentiellement dans un rapport d'immédiateté avec les musiciens, qui ne peuvent guère savoir quand aura lieu le prochain événement. À cet égard, la représentation offerte par John condense d'une certaine manière la partition et le chef d'orchestre

32. C'est-à-dire qu'il peut être totalement reconfiguré pendant la représentation pour offrir un tout autre ensemble de sons, de processus et de modes de jeu.

33. Comme c'est le cas dans le *Soundpainting* de Walter Thompson.

en un seul et même support visuel. Cette partition animée offre en effet des repères visuels qui indiquent la simultanéité de plusieurs événements musicaux, et son défilement sous la tête de lecture, accompagné de compte-à-rebours individuels, permet une synchronisation précise entre les musiciens lors des transitions.

Support visuel pour des repères musicaux

Malgré la disponibilité d'outils d'analyse³⁴ et l'existence d'un certain vocabulaire pour décrire les objets sonores et musicaux dans la musique électroacoustique³⁵, il n'existe aucune norme de notation prescriptive pour les **DMIs**. L'absence d'un vocabulaire unanime, la singularité des instruments et la formidable palette sonore qu'ils offrent, ne facilitent pas l'exercice consistant à identifier et discuter ce qui vient d'être joué lors d'une longue séance d'improvisation (manquant de pouvoir parler ici de "répétition"). Une partition minimale telle que celle proposée par John facilite cette identification et permet de retravailler des moments précis après une longue performance. La réduction que la notation symbolique opère sur le résultat sonore complexe d'une performance permet à chacun de se retrouver rapidement dans l'espace temporel d'une improvisation, plus rapidement du moins que si l'on devait se référer à l'enregistrement sonore.

Une écologie de l'attention

L'improvisation libre électroacoustique requiert une attention considérable des musiciens envers les autres musiciens, leur instrument et, de toute évidence, au son³⁶. À cet égard, les **DMI** présentent souvent l'inconvénient supplémentaire, par rapport aux instruments acoustiques, de capter une partie de l'attention visuelle en raison de la présence fréquente d'un écran, de nombreux paramètres d'interaction et d'une interface parfois dépourvue de retours ou de repères tactiles qui permettraient d'y accéder sans avoir besoin de les regarder. De plus, les musiciens numériques préparent souvent leur instrumentarium juste avant la représentation³⁷ avec un ensemble choisi d'éléments musicaux *ad hoc* (lorsqu'ils ne le codent pas en direct, comme c'est le cas dans le live-coding), ce qui complique encore la connaissance "kinesthésique" de l'ergonomie de l'instrument, sans aucune aide visuelle.

La conception de "John" a été ainsi motivée par une économie de la charge cognitive des musiciens. Pouvoir en partie personnaliser son interface de visualisation ne signifie donc pas y ajouter davantage de données visuelles, mais plutôt n'afficher que ce qui est nécessaire, au profit de l'attention mutuelle.

34. Tels que EAnalysis [Cou16] ou l'Acousmographe du **GRM** [FGL10].

35. en particulier les "objets sonores" de Pierre Schaeffer [Sch66], les "images-son" de François Bayle [Bay93] ou encore les **UST** du **MIM** [Del+96].

36. Il n'est pas question ici de prétendre que la musique non-improvisée ne requiert pas d'attention mutuelle des musiciens, mais elle se pose toutefois en des termes légèrement différents, les éléments "stables" de la partition y étant par définition plus nombreux.

37. Thor Magnusson et Kris Kiefer nomment cette préparation de code une "pre-grammation" dans [KM19]

Partitions pour humains et machines

Pendant la lecture de la partition, le serveur envoie des données au format MP³⁸ aux clients lorsque des événements commencent ou se terminent. Ces informations peuvent être utilisées par l'instrument du musicien (si toutefois son DMI est connecté au réseau). Mais, comme John n'est qu'un "semi-conducteur", ses messages peuvent tout aussi bien être soumis à l'approbation du musicien/client pour permettre une certaine flexibilité dans la façon dont le musicien adhère à la partition.

Ainsi, il est possible d'imaginer qu'un *karma* spécifique rappelle un pré-réglage dans l'instrument du musicien, correspondant à l'esprit de ce *karma*. Mais si le musicien est encore en train de jouer le *karma* précédent, il/elle ne voudra probablement pas que cette notification change automatiquement sa configuration avant d'avoir terminé la phrase musicale en cours. Cette "évaluation paresseuse"³⁹ rend l'utilisation de John un peu différente de celle des séquenceurs traditionnels.

Montrer la partition ?

Rendre lisible les interactions entre les musiciens dans les performances d'improvisation peut contribuer à l'appréciation globale de la performance par le public. Pourtant, avec les DMIs, le découplage spatial et énergétique entre les gestes de l'instrumentiste et la localisation de l'énergie sonore (sur un haut-parleur possiblement distant) brouille cette lecture. Les systèmes de partition sur écran offre la possibilité de partager l'affichage de la partition avec le public plus facilement que ne le permettent les partitions imprimées et peuvent ainsi aider à cette lisibilité avec le risque, cependant, qu'elle "entrave les aspects performatifs dramatiques de l'œuvre" parmi d'autres raisons suggérées par Cat Hope dans [HV11].

Bien que la partition de John n'ait jamais été montrée directement au public pour cette raison particulière, elle a été utilisée pour contrôler des effets vidéo et de lumières⁴⁰, à la fois des raisons scénographiques et pour aider l'écoute à la compréhension de la musique.

7.2.4 Perspectives

Les membres de ONE ont reconnu que John aidait le processus créatif. Cependant, il reste des questions ouvertes comme la synchronisation collective sur les passages rythmiques. En particulier, anticiper un processus dynamique n'est pas une tâche triviale et nécessiterait probablement des outils spécifiques à cette fin, telles que les animations proposées par Ryan Ross Smith dans [Smi15].

38. Cf. supra, section 5.3

39. J'emprunte ici ce terme utilisé dans le domaine de la programmation récursive, qui consiste à évaluer une expression uniquement quand le résultat de cette expression devient nécessaire. Dans notre cas toutefois, c'est possiblement le musicien qui décide de cette évaluation.

40. Il s'agissait par exemple d'éclairer les musiciens censés jouer, de modifier la teinte de la lumière en fonction des karmas, de projeter des ondes sonores agrégées comme traces de la partition, de synchroniser des vidéos, etc.

Le concept de vues *locale* et *globale* pourrait probablement être généralisé à d'autres paramètres partageables. Par exemple, pouvoir démarrer une lecture locale pour s'entraîner ou préparer son instrument par soi-même. De même, il serait utile de travailler sur une autre partition que celle chargée sur les autres clients. Cette désynchronisation soulève cependant des problèmes de conflits de versionnage, dont la prise en compte dépasse pour l'instant les possibilités offertes par John.

Le portage de John sur une technologie web a été en partie motivé par la possibilité de futurs concerts impliquant un grand nombre de musiciens et dans lesquels chaque musicien pourrait voir sa partie avec un simple navigateur web. D'autres développements seront nécessaires pour pouvoir réaliser de telles performances, qui posent là-encore des questions d'ergonomie visuelle.

Dans l'ensemble, les partitions informatisées laissent place à de nombreuses interactions possibles pendant la durée de la performance. Leur design pourrait probablement tirer parti du fait de les considérer comme un instrument collectif, dont chaque musicien, en incluant aussi le public et son écoute active, pourrait jouer.

7.3 Conclusion

Après avoir présenté et analysé certains aspects particuliers de la notation musicale qui prennent une importance critique dans la pratique des *DMIs*, j'ai retracé la naissance du logiciel John, un logiciel hybride servant d'outil collaboratif pour la création de partitions minimale, ainsi que de guide temporel durant la performance.

Ce logiciel s'est construit très empiriquement, sur la base des éléments ayant émergé durant les sessions d'improvisation de ONE. En particulier, la notion de "*karma*" comme unité musicale partagée⁴¹ fait écho à "l'entomologie musicale" évoquée au chapitre 2. Toutefois, cette notion agit de manière bidirectionnelle, car certains *karmas* ont été proposés (et acceptés ou rejetés par le groupe, selon les cas) sans qu'ils aient émergés de sessions d'improvisation, mais en tenant lieu de référence commune⁴².

À la différence de la plupart des logiciels de composition, John n'a pas été conçu selon la perspective notationnelle du compositeur, pour qui la partition occupe généralement une place centrale, mais selon la perspective performative des musiciens dans un contexte de musique improvisée, exigeant une attention mutuelle particulière. Son design visuel a été adapté en conséquence pour minimiser la charge cognitive des instrumentistes. Enfin, la possibilité de venir contrôler des processus externes depuis John permet d'envisager d'autres nuances dans l'articulation possible entre œuvre fixe et œuvre improvisée

41. partagée sans être pour autant consensuelle, tout le monde ne rattachant pas exactement les mêmes sons, ou les mêmes idées, aux mêmes *karmas*.

42. Par exemple, le *karma* "Géologie Sonore" fait référence à la pièce éponyme de Bernard Parmegiani

Conclusion

” MUSIQUE. *Coup de baguette et récapitulation des musiques précédentes ou musique source seule.*

Un temps.

PAROLES. — *Encore. (Un temps. Implorant.)*

Encore !

MUSIQUE. *Répète dernière musique telle quelle ou à peine variée.*

Un temps.

PAROLES. *Profond soupir.*

— **Samuel Beckett**

paroles et musique, Pièce radiophonique, 1962.

[Bec14]

La motivation initiale de ce travail était l'étude transversale des aspects de contrôle et de représentation à l'œuvre dans le design des **DMIs**, à travers les différents contextes que ce design implique : conception, fabrication, programmation et pratique musicale. Au terme de cette étude, on se rend compte que les contours de la notion d'instrument de musique en général sont mouvants, que son histoire est marquée par des apports et des évolutions permanentes et que sa pérennité ne s'établit que de manière relative, à l'aune d'un répertoire et d'une pratique associée.

Au second chapitre, nous avons étudié les différentes causes concourant à l'instabilité et l'éphémérité des **DMIs**. Certaines sont indésirables, telles que l'obsolescence – parfois programmée – des outils technologiques, mais d'autres apparaissent comme un élément intrinsèque à la performance musicale, et peuvent être souhaitées en tant que polarité artistiquement fertile. Les **DMIs** ajoutent à cette instabilité l'atomisation – c'est-à-dire la modularisation à l'extrême – du corps instrumental dû à la modularité intrinsèque au fonctionnement de l'informatique. Les reconfigurations possibles de l'instrument numérique, envisagé comme un agencement de fonctions instrumentales, qui se cristallisent dans une configuration contextuelle, lui ont fait perdre la stabilité relative qu'offrent les instruments acoustiques. À cette méta-instabilité semble s'opposer une émergence de composants recyclables qui dessinent en filigrane un répertoire embryonnaire de fonctions instrumentales. L'évolution

récente des logiciels de programmation audio semble y faire écho, en proposant des bibliothèques de modèles exportables contextuellement vers différentes plateformes.

Sur ce terrain aussi instable que des sables mouvants, l'élaboration et la pratique d'un **DMI** prennent la forme d'un processus co-dynamique, dans lequel s'opèrent des aller-retours permanents entre fabrication, programmation, pratique et écoute musicienne. La dissemblance des états de concentration psychique que requiert ces différentes activités implique toutefois de laisser à chacune le temps de se développer. Les artéfacts aussi imprévus que fertiles émergeant de l'usage, voire de l'abus, des **DMIs** bénéficie d'une pratique active de la sérendipité.

L'étude croisée de l'instrument, du geste instrumental et de leur perception relative par le public nous a amené, au troisième chapitre, à remettre en question la notion de "transparence" de l'instrument. Celle-ci, souvent invoquée comme une qualité nécessaire pour que le musicien puisse pleinement s'exprimer, nous est apparue inadéquate, sinon incomplète, pour décrire les intentions sous-jacentes à l'interaction instrumentale. La relation généralement causale et cohérente que présente l'instrument de musique acoustique apporte, de toute évidence, certaines preuves que la transparence de son fonctionnement peut, en effet, servir de modèle pour le design de l'interaction. Cependant, nous avons montré, en nous appuyant sur plusieurs exemples musicaux (dont certains basés sur l'instrument acoustique), que la création musicale s'appuie largement sur une subversion – davantage qu'une transparence – de la relation gestuelle-sonore. En étudiant les différentes inférences à l'œuvre entre le geste, l'instrument et le résultat sonore, nous avons dessiné quelques unes des stratégies possibles de subversion, qui s'appuient sur des soudures artificielles invisibles entre des inférences contradictoires.

L'analyse, au chapitre 4, des différents matériaux constituant le corps physique des **DMIs** a mis en évidence qu'ils ne sont plus nécessairement des "objets que l'on touche", et qu'ils procèdent de différents héritages – lutherie traditionnelle, design technico-industriel, schémas corporels, scénographie poétique de l'objet – qui s'agencent dans des proportions variables et propres au projet musical. Il en résulte un éventail très large de configurations instrumentales, de l'objet physique massif à sa disparition la plus complète, de sa référence à l'instrument traditionnel à sa prise de distance la plus manifeste, de sa fonctionnalité la plus technique à sa présence essentiellement scénographique et poétique.

Les constituants matériels d'un **DMI** étant très souvent, au moins partiellement, issus d'une fabrication industrielle dont les objectifs diffèrent de ceux de la création musicale, la conception de l'interface de jeu implique fréquemment une part de détournement et de "re-programmation" de l'usage de ces objets. L'analyse de la conception du *Filigramophone* et du *Xypre* a clairement mis en évidence ces aspects. La pratique "*Do It Yourself*" des lutherie numériques vient affirmer la singularité des instruments et constitue le versant complémentaire à la fabrication industrielle en

série des objets techniques qui implique, au contraire, des millions d'autres personnes et des usages génériques.

L'étude des matériaux algorithmiques au chapitre 5 a fait ressortir deux composantes essentielles venant articuler le fonctionnement des **DMIs**. D'une part la notion de "modèle intermédiaire", comme unité de transformation de signaux, permet notamment de définir les relations désirées entre les gestes de l'instrumentiste, les gestes programmés dans l'instrument et la production sonore. D'autre part, l'interconnexion entre ces modèles intermédiaires et les entrées/sorties de l'interface instrumentale nécessite de définir une syntaxe des flux circulants dans ce graphe relationnel. Les notions de signal synchrone et asynchrone reflètent la distinction perceptive entre le continu et le discret et se traduisent généralement dans des protocoles de communication distincts. Nous avons proposé un protocole (MP) permettant d'articuler ces deux aspects, de manière à permettre la création de soudures entre les modèles intermédiaires, évoquées lors de l'analyse de la relation geste/instrument/son. Le dessein principal de ce protocole est de permettre des soudures suffisamment fortes entre les modèles (en particulier, polyphoniques et continues) pour que puisse y circuler toute la richesse des modulations souhaitées, et suffisamment souples pour permettre des ré-affectations dynamiques à l'envie.

Sur la base de ce protocole de communication, nous avons ensuite élaboré un système de représentation graphique (mp.TUI) qui tire parti de la technologie des écrans tactiles *multitouch*, pour co-articuler contrôle et représentation dans des objets graphiques interactifs. Les possibilités de personnalisation de ces représentations sont au centre de la conception de cette librairie logicielle et proposent une réponse concrète aux besoins spécifiques et contextuels, qui viennent affirmer l'identité visuelle de l'instrument, au-delà du simple aspect fonctionnel de son contrôle et de son *monitoring*. La dimension esthétique du design de l'interface graphique permet de nouveaux modes d'interaction et de représentation avec des modèles complexes, en même temps qu'elle constitue un support d'expression visuelle à l'attention du spectateur/auditeur.

La pratique musicale, notamment au sein de l'ensemble ONE, a permis de confronter les différents outils conceptuels et logiciels développés durant ce travail de recherche et d'évaluer continûment leur pertinence (ou non) dans le présent du jeu musical. L'absence d'idiomes musicaux sur lequel s'appuyer pour l'improvisation collective nous a amenés à effectuer une "*entomologie musicale*" et constituer un répertoire de "*karmas*", unités sémiotiques singulières extraites de notre pratique d'ensemble. L'élaboration de "John", un outil collaboratif pour la *comprovisation* est également venu concrétiser un certain nombre d'aspects liés à la manière dont l'interaction musicale se construit, non seulement *entre le musicien et son instrument*, mais également *entre les instruments eux-mêmes* – qui peuvent s'échanger des données, et

surtout, *entre les musiciens* qui s’emparent, dans une anticipation permanente, des gestes et des sons de leurs partenaires.

Cette reconfiguration générale de l’agencement possible d’un instrument permet d’écrire (de programmer) sur un médium commun (l’ordinateur), à la fois les relations gestuelles-sonores autrefois séparées dans les domaines distincts de la lutherie et de la composition, ainsi que de modéliser les mécanismes cognitifs propres à la perception de ces relations. Les conséquences de cette “*notation instrumentale*” pourraient s’apparenter à celles provoquées, il y a un millénaire, par l’émergence de la notation musicale. Notamment, si cette dernière a engendré une profusion de compositions – dont toutes n’ont pas traversé le temps – ainsi que le développement d’une théorie musicale riche et fertile sur les manières d’organiser les sons, la *notation instrumentale* engendre une profusion de nouveaux instruments et de nouvelles interactions musicales dont on ne peut qu’imaginer l’ampleur des développements possibles dans le futur.

Le poète et mathématicien Jacques Roubaud confiait, “*La poésie dit ce qu’elle dit en le disant. Ce qui exclut la paraphrase. On peut exposer ce que la poésie raconte, mais, si on le fait, on perd ce quelque chose d’essentiel qui est la poésie. À l’extrême opposé, la mathématique ne se développe qu’en se paraphrasant, qu’en se redisant d’une manière différente*”. On court ainsi toujours le risque, lorsqu’on cherche à expliquer les motivations sous-jacentes aux outils de création, souvent fortement entrelacées avec celles des œuvres elles-mêmes, de refermer l’horizon qu’elles ouvrent. Au terme des quelques décennies d’existence des instruments de musique numériques, il reste nécessaire de prendre garde à la calcification précoce de concepts développés lors de l’étude de ces instruments nouveaux, qui pourraient donner lieu à des fondations solides mais stériles. J’espère aussi que les concepts, les catégories et les modèles proposés dans ce travail contribueront à nourrir le champ des questions, peut-être davantage que celui des réponses, ayant trait à l’organologie des **DMIs**, ainsi qu’à l’épanouissement des possibilités créatives qu’ils offrent. Ils ont été, du reste, une manière pour moi de “*travailler mon instrument*”.

Appendices

Interview : Serge De Laubier

Biographie

Compositeur, chercheur et musicien, Serge de Laubier (né en 1958) fonde PUCE MUSE avec lequel il co-invente le Processeur Spatial Octophonique (brevet n°8600153). Il est aussi concepteur du Méta-Instrument et l'auteur des logiciels MIDI Formers (© INA-GRM) qui ont reçu le premier prix au Concours International de logiciels musicaux de Bourges 1996.

Il a obtenu plusieurs récompenses notamment le FAUST d'OR 1992, le Grand Prix du Festival Vidéo Art de Locarno 1994, le 1er prix de composition du concours international de Bourges 1995, le prix spécial du jury au SATIS 2001.

Ses dernières créations mêlent étroitement musique, images et nouvelles technologies. Elles ont souvent un caractère événementiel et monumental.

Site web : <http://www.pucemuse.com>

Transcript

Serge De Laubier, entretien du 17/07/2017, dans les studios de Puce Muse, Wis-sous.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : François Dumeaux

Biographie

François Dumeaux (Rodez, 1978). Sa musique a été jouée – par lui ou par d'autres – aux U.S.A. (Los Angeles, Chicago), au Canada, au Nigeria, à Singapour, en Allemagne, en Espagne, en Belgique (Festival l'Espace du son) et en France (Festival Futura, Festival Exhibitronic, Audible Festival, Instants Chavirés, RIAM, concerts SCRIME, Alcôme, etc.). Elle a aussi été diffusée sur France Musique, France Culture et Radio Campus Paris. Il a obtenu en 2006 un D.E.M. et le prix SACEM, dans la classe de composition électroacoustique de Christian Eloy et Christophe Havel, au C.N.R. de Bordeaux. Finaliste du concours de composition acousmatique Métamorphoses 2008, il a été à cette occasion édité sur la compilation éponyme. Pour le 80ème anniversaire de Bernard Parmegiani, il a composé « SRA » à la demande de Annette Vande Gorne. De 2011 à 2016 il a enseigné la composition électroacoustique au C.R.R. de Bordeaux, aux côtés de Christophe Havel.

Pratiquant l'improvisation libre et l'interprétation électronique en live, il a joué avec Joan Francés Tisnèr, Nicolas Godin, Alain Cadeillan, Jakes Aymonino, Christian Vieussens, Peire Boissière, Pôm Bouvier b., François Bessac, Prune Bécheau, Eva Darracq-Antesberger et dans [alveol], la família Artús, Shapeless, la Theory du Reptil, etc. Il réalise par ailleurs des créations radiophoniques, des documentaires sonores, de la sonographie pour les musées et des bandes-son pour le théâtre, la danse et le cinéma.

Site web : <http://elytres.net>

Transcript

François Dumeaux, entretien du 30/07/2017, dans son studio, Cuzorn, France.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Lucas Turchet

Biographie

Né à Vérone, Italie en 1982, Lucas Turchet obtenu une maîtrise en informatique de l'Université de Vérone en 2006, une maîtrise en guitare classique et composition du Conservatoire de musique de Vérone, en 2007 et 2009, un doctorat en technologie des médias de l'Université Aalborg, Copenhague, Danemark, en 2013, et une maîtrise en musique électronique du Royal College of Music de Stockholm, Suède, en 2015. Il est actuellement boursier Marie-Curie au Centre of Digital Music, Queen Mary University of London, Londres, Royaume-Uni. Il est également professeur adjoint au Département de génie de l'information et d'informatique de l'Université de Trente, Italie. Ses recherches scientifiques, artistiques et entrepreneuriales ont été soutenues par de nombreuses subventions de différents organismes de financement, dont la Commission européenne, le ministre italien des Affaires étrangères et le Conseil danois de la recherche. Ses principaux centres d'intérêt de recherche sont la technologie musicale, l'interaction homme-machine et la perception multimodale. Il fait partie des fondateurs de Mind Music Labs, une entreprise basée à Stockholm fabriquant des instruments augmentés.

Site web : <http://www.lucaturchet.it>

Transcript

Lucas Turchet, entretien du 23/08/2017, à Queen Mary University, en marge de la conférence AudioMostly'17, Londres.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Bruno Zamborlin

Biographie

Bruno Zamborlin (né en 1984) a effectué une thèse entre Goldsmith Univerity et l'IRCAM sur le sujet de l'appropriation des interfaces numériques pour la musique, avant de créer en 2013 une startup pour commercialiser les Mogeas, un dispositif captant les vibrations pour “transformer tout objet physique en instruments de musique”. En 2018, la startup Mogeas est devenue “HyperSurfaces” et étend la technologie des Mogeas à d'autres domaines que la musique, pour convertir des objets usuels en interfaces Homme-Machine via le traitement de leur vibration.

Site web HyperSurfaces : <https://www.hypersurfaces.com>

Transcript

Bruno Zamborlin, entretien du 23/08/2017, dans les bureaux de Mogeas, Londres.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Nicolas Collins

Biographie

Né en 1958 et élevé à New York, Nicolas Collins a passé la majeure partie des années 1990 en Europe, où il a été directeur artistique invité du **STEIM** (Amsterdam), et compositeur en résidence du DAAD à Berlin. Professeur à l'École de l'Institut des Beaux-Arts de Chicago depuis 1999 et chercheur à l'Institut Orpheus (Gand) depuis 2016, il a été, de 1997 à 2017, rédacteur en chef du Leonardo Music Journal. Un des premiers à adopter les micro-ordinateurs pour la performance musicale, Collins utilise également des circuits électroniques faits maison et des instruments acoustiques conventionnels. Son livre, "Handmade Electronic Music - The Art of Hardware Hacking" (Routledge), a influencé la musique électronique émergente dans le monde entier.

Site web : www.nicolascollins.com

Transcript

Nicolas Collins, entretien du 10/11/2017 à l'IRCAM, en marge du colloque "Music and Hacking".

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Adrien Mamou-Mani

Biographie

Adrien Mamou-Mani (né en 1980) a d'abord fait une thèse sur la vibration des tables d'harmonie, puis travaillé sur l'augmentation des instruments par contrôle actif des modes de résonance, avant de créer une startup développant une "smart guitar", guitare acoustique augmentée à l'aide d'un **DSP** contrôlant la résonance de la guitare et permettant autant de diffuser de l'audio directement via le corps de l'instrument, que de transformer en temps réel le timbre de la guitare et d'y ajouter des effets.

Site web de Hyvibes : <https://www.hyvibe.audio>

Transcript

Adrien Mamou-Mani, entretien du 20/12/2017 dans les bureaux de HyVibe, Paris.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Patrick Saint-Denis

Biographie

Patrick Saint-Denis (né en 1975) est un compositeur et artiste transdisciplinaire basé à Montréal. Son travail porte sur la robotique musicale, la lutherie numérique et le design interactif. À quelque part entre le concert, l'audiovisuel, l'art robotique et le théâtre physique, ses œuvres sont régulièrement présentées à Montréal et à l'étranger. Il a reçu plusieurs prix, notamment le prix de la Fondation pour les arts et les technologies émergentes (FETA) en 2017 et le prix Jules-Léger (Conseil des arts du Canada) en 2004. Il est actuellement chargé de cours à l'Université de Montréal.

Site web : <http://www.patricksaintdenis.com>

Transcript

Patrick Saint-Denis, entretien du 27/05/2018, dans son atelier, Montréal, Canada.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Nicolas Bernier

Biographie

Nicolas Bernier (né en 1977) crée des performances et des installations audiovisuelles visant à sculpter un dialogue entre le son et la matière tangible. Formé par son travail dans les domaines du cinéma, de la littérature, de la danse et du théâtre, son propre langage mêle des éléments de musique, de photographie, de design, de science, d'art vidéo, d'architecture, de lumière et de scénographie. Au milieu de cet éclectisme, ses préoccupations artistiques restent constantes : l'équilibre entre le cérébral et le sensuel, entre les sources organiques et le traitement numérique.

Lauréat du prestigieux Golden Nica au Prix Ars Electronica 2013 (Autriche), son œuvre est largement reconnue et présentée dans le monde entier : SONAR (Espagne), Mutek (Canada), Elektra (Canada), ZKM (Allemagne), Transmediale (Allemagne) et LABoral (Espagne) pour n'en citer que quelques-uns. Ses compositions sonores sont largement publiées sur les labels de musique électronique : 901 Editions (Italie), LINE (États-Unis), leerraum (Suisse), Entr'acte (Royaume-Uni) et empreintes DIGITALEs (Québec).

Il est titulaire d'un doctorat en arts sonores de l'Université de Huddersfield (Royaume-Uni). Il est membre des centres de recherche et développement en arts médiatiques Perte de signal, CIRMMMT et Hexagram basés à Montréal. Il enseigne dans le cadre du programme de musique numérique de l'Université de Montréal.

Site web : <http://nicolasbernier.com>

Transcript

Nicolas Bernier, entretien du 28/05/2018, dans un café à côté l'Université de Montréal, Canada. Les termes québécois sont traduits en français au fil du texte, à leur première occurrence.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Interview : Jose-Miguel Fernandez

Biographie

José Miguel Fernandez (né en 1978) a étudié la musique et la composition à l'université du Chili et au Laboratoire de recherche et de production musicale (LIPM) de Buenos Aires, Argentine. Il suit ensuite les cours de composition au Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Lyon et participe au Coursus de composition de l'IRCAM. Il compose des œuvres de musique instrumentale, électroacoustiques et mixtes. Ses œuvres sont créées en Amériques, Europe, Asie et Océanie, et il réalise des concerts de musique mixte et électroacoustique dans plusieurs festivals. Il a été sélectionné au concours international de musiques électroacoustiques de Bourges (2000) et il est lauréat des concours internationaux de composition Grame-EOC de Lyon (2008) et Giga Hertz Award du ZKM en Allemagne (2010). En 2014 il a été sélectionné par l'IRCAM pour suivre le programme de résidence en recherche artistique sur l'interaction en musiques mixtes. Il est actuellement doctorant du Doctorat de musique : recherche en composition, organisé en collaboration par Sorbonne Université, l'UPMC et l'IRCAM. Son projet de recherche se concentre principalement sur l'écriture de l'électronique et la recherche de nouveaux outils pour la création en musiques mixtes et électroacoustiques. Parallèlement à son activité de compositeur, il travaille sur divers projets pédagogiques et de création en lien avec l'informatique musicale.

Transcript

Jose-Miguel Fernandez, entretien du 13/06/2018, à l'IRCAM, Paris.

[Les entretiens ne sont pas disponibles publiquement.]

Glossaire

ACROE *Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression*: créée en 1976 par Claude Cadoz, Jean-Loup Florens et Annie Luciani à l'INP de Grenoble, avec le soutien du ministère de la Culture, l'ACROE a mené des travaux scientifiques, technologiques, artistiques et pédagogiques, dans le secteur des arts multisensoriels numériques. Elle a élaboré plusieurs outils de création artistique dont le paradigme central est la situation instrumentale, notamment le système **CORDIS-ANIMA**. 52, 53, 105, 110

ADSR *Attack Decay Sustain Release*: acronyme utilisé pour désigner une enveloppe temporelle, typiquement utilisée pour moduler l'amplitude d'un son produit par un synthétiseur et spécifiée par ces quatre paramètres : temps d'attaque (A), de décroissance (D), d'extinction (R), ainsi que la valeur de maintien (S). 145

AFIM *Association Francophone d'Informatique Musicale*: Fondée en 2002 avec le soutien de la Direction de la Musique de la Danse, du Théâtre et des spectacles, l'AFIM est issue de la fusion de deux associations : l'ADERIM et la SFIM, dont elle reprend les objectifs et les actions, en particulier le pilotage depuis 1994 des Journées d'Informatique Musicale (JIM). 230, 234

AHRS *Attitude and Heading Reference System*: ensemble de capteurs (3 gyroscopes, 3 accéléromètres, et une boussole à vanne de flux 3 axes) permettant de mesurer la position et l'orientation dans l'espace, grâce aux accélérations et aux champs magnétiques qu'ils subissent. 86, 92

ANR *Agence Nationale de la Recherche*: agence de moyens créée en 2005, qui finance la recherche publique et la recherche partenariale en France. 132, 172

APO33 Association créée en 1997 à Nantes, se définissant comme "un laboratoire artistique, technologique et théorique transdisciplinaire qui développe des projets collectifs divers alliant recherche, expérimentation et intervention dans

l'espace social." APO33 a réalisé de multiples projets dans le domaine des lutheries numériques, notamment la distribution logicielle APODIO, ou encore le Grand Orchestre d'Ordinateurs (GOO). 21

CAN *Convertisseur Analogique-Numérique*: (ou DAC pour *Digital to Analog Converter*) composant électronique dont la fonction est de transformer une valeur numérique (codée sur plusieurs bits) en une valeur analogique proportionnelle à la valeur numérique codée, généralement la tension électrique. 95

CCRMA *Center for Computer Research in Music and Acoustics*: centre de recherche multidisciplinaire en musique et acoustique de l'université Stanford, San Francisco, USA. 228

CD *Compact Disc*: disque optique développé par Sony et Philips, et introduit en 1982, utilisé pour stocker des données sous forme numérique. Notamment dans sa version CD-Audio, le CD permet d'enregistrer 74min (voire 80min) de son sur deux canaux encodés en 16bits. 98, 124

CEMAMu *Centre d'Études de Mathématique et Automatique Musicale*: institut de recherche et centre en musique contemporaine fondé en 1966 par le compositeur Iannis Xenakis. A l'origine nommé EMAMu, il devient par la suite le CEMAMu en 1972, puis Les Ateliers UPIC en 1985, puis le CCMIX en 2000. 19, 234

circuit-bending Activité consistant à détourner expérimentalement des appareils électroniques à des fins créatives, pour créer de nouveaux générateurs de sons ou d'images. Reed Ghazala est reconnu comme l'un des pionniers dans cette démarche entreprise à la fin des années 1960. 22

CLI *Command Line Interface* interface humain-machine dans laquelle la communication entre l'utilisateur et l'ordinateur s'effectue en mode texte. 229

CNC *Computer Numerical Control*: machine-outil à commande numérique. 89

CNMAT *Center for New Music and Audio Technologies*: centre de recherche multidisciplinaire du Département de Musique de l'Université de Californie, Berkeley, USA. 109, 137, 138, 235

CORDIS-ANIMA CORDIS - ANIMA est à la fois un formalisme générique et un langage. Il permet de concevoir et de décrire tout objet physique ou tout comportement dynamique que l'on souhaite modéliser et simuler à l'aide de l'ordinateur sous la forme d'un réseau de composants discrets élémentaires interconnectés. 53, 225

CPU *Central processing Unit* (micro)processeur central d'un ordinateur. 149, 155, 157, 172, 179

DIY *Do-It-Yourself*: pratiques et mouvement culturel, visant à créer et réparer soi-même des objets souvent techniques, sans nécessairement disposer d'une formation académique pour ce faire. La notion de DIY est apparue au début du XX^{ème} siècle en Amérique du Nord à travers un certain nombre de magazines grand public, avant de connaître un essor dans les années 1970 auprès du public étudiant, en écho à la révolution socio-culturelle de cette époque. Un second essor au XXI^{ème} siècle est lié à la disponibilité de ressources sur Internet, tels que des tutoriels vidéos et des forums en ligne. 22, 23, 54, 88, 89, 90, 202

DJ *Disc Jockey*: musicien dont la pratique consiste en la diffusion, le mixage d'enregistrements audio (à l'origine sur platine vinyle, mais d'autres supports existent depuis) ainsi que l'utilisation de différentes techniques permettant d'ajouter des effets et de redécouper le morceau dans le temps. L'apparition du DJ en tant que personne chargée de l'enchaînement de disque date des années 1930, mais l'expressivité musicale des DJs s'est réellement développée à la fin des années 1970, avec la naissance du break, requérant une performance technique conséquente et donnant lieu à des musiques dans lesquelles l'identité des morceaux originaux, utilisés de manière fragmentée, passe au second plan par rapport au travail du DJ lui-même. 7, 63, 76

DMI *Digital Musical Instrument*: instrument de musique numérique. 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 24, 25, 26, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 51, 53, 55, 56, 57, 60, 61, 63, 64, 65, 67, 72, 74, 76, 81, 82, 83, 84, 89, 90, 91, 92, 94, 97, 98, 101, 102, 103, 104, 107, 108, 109, 120, 121, 123, 125, 126, 127, 130, 133, 135, 138, 157, 159, 160, 162, 165, 166, 167, 169, 170, 180, 181, 190, 191, 192, 196, 197, 198, 199, 201, 202, 203, 204, 263

DSP *Digital Signal Processor*: Processeur de signal numérique. 19, 68, 95, 125, 150, 157, 217, 230, 232

fab-lab contraction de l'anglais fabrication laboratory, « laboratoire de fabrication ». Tiers-lieu de type **makerspace** cadré par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) et la FabFoundation. 23

FAUST *Functional Audio Stream*: langage de programmation fonctionnel développé par le **GRAME**, dédié à l'implémentation d'algorithmes de traitement du signal sous forme de bibliothèques, de plug-ins audio ou d'applications autonomes. <http://faust.grame.fr>. 34, 94, 97, 157

firewire nom commercial donné par Apple à une interface série multiplexée, aussi connue sous la norme IEEE 1394 et également connue sous le nom d'interface i.LINK, nom commercial utilisé par Sony. Il s'agit d'un bus informatique véhiculant à la fois des données et des signaux de commandes des différents appareils qu'il relie. 137

FM *Frequency Modulation*: Technique de traitement de signal consistant à moduler un signal basse fréquence par un autre de fréquence plus élevée (appelé onde porteuse), généralement utilisée à des fins de télécommunication, comme par exemple dans le cas de la bande radiophonique "FM". Cette même technique est à la base d'une synthèse sonore inventée par John Chowning en 1973 au **Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA)**, notamment utilisée dans le célèbre synthétiseur DX7 de Yamaha. 38, 135

FSR *Force Sensing Resistor*: Capteur de force résistif, produisant plus ou moins de résistance en fonction de la pression qui lui est appliquée. 25, 90, 92, 112, 120

FTS *Faster Than Sound* : *FTS est le nom du logiciel développé en 1989 par l'IRCAM pour le traitement et la synthèse audio en temps-réel. Il tournait à l'origine sur l'ISPW avant d'être intégré directement dans le logiciel Max.* 20, 232

GALS *Globalement Asynchrone, Localement Synchrone*: architecture pour la conception de circuits électroniques ou de programmes informatiques, qui répond au problème de la sécurité et de la fiabilité du transfert de données entre domaines d'horloge indépendants. Ce modèle de calcul apparu dans les années 1980 permet de concevoir des systèmes informatiques composés de plusieurs modules synchrones (en utilisant une programmation synchrone pour chacun de ces modules) interagissant avec d'autres modules en communication asynchrone. 135

GDIF *Gesture Description Interchange Format*: format développé pour le streaming et l'enregistrement de données de mouvement en relation à la musique. 138

GMEM *Groupe de Musique Expérimentale de Marseille*: Centre national de création musicale, créé à Marseille en 1972 par un collectif de compositeurs dont Georges Boeuf, Michel Redolfi et Marcel Frémiot. 150, 228

GMU *GMEM Microsound Universe*: environnement de synthèse granulaire pour Max, développé au **GMEM** par Laurent Pottier et Charles Bascou en 2003. 126, 150, 155, 157

- GPU** *Graphics Processing Unit* (micro)processeur principal d'une carte graphique, assurant les fonctions de calcul de l'affichage, optimisé pour le calcul d'image 2D et 3D par une structure de traitement parallèle de blocs de données telles que des matrices. 179
- GRAME** *Groupe de réalisation et de recherche appliquée en Musique Électroacoustique*: Centre national de création musicale, créé à Lyon en 1982 par Pierre Alain Jaffrennou et James Giroudon. 21, 34, 94, 191, 227
- GRM** *Groupe de recherches musicales*: Centre de recherche musicale dans le domaine du son et des musiques électroacoustiques fondé par Pierre Schaeffer en 1958 à Paris, France. 19, 20, 25, 49, 197
- GUI** *Graphical User Interface*: dispositif de dialogue humain-machine, dans lequel les objets à manipuler sont dessinés sous forme de pictogrammes à l'écran, de sorte que l'utilisateur peut utiliser en imitant la manipulation physique de ces objets avec un dispositif de pointage, le plus souvent une souris. Ce type d'interface est apparu dans les années 1970 pour remplacer notamment les interfaces (CLI), moins facile d'utilisation. 106, 172, 174, 176, 177, 179, 180
- HTML5** *HyperText Markup Language 5*: est la dernière révision majeure du HTML datant de 2014, définissant la syntaxe permettant de représenter les pages web. Cette version intègre notamment les langages CSS et Javascript. 195
- IA** *Intelligence Artificielle* : désigne l'intelligence des machines, par opposition à l'intelligence "naturelle" des humains. Ce terme est utilisé pour décrire l'ensemble des théories et des techniques (généralement informatiques) qui imitent les fonctions cognitives associées à l'esprit humain, telles que l'apprentissage et la résolution de problèmes. 21
- ICLC** *International Conference on Live-Coding* : Conférence Internationale sur le Live-Coding, conférence annuelle dont la première édition a eu lieu en 2015. 23
- ICLI** *International Conference on Live Interfaces* : conférence interdisciplinaire biennale axée sur le rôle des interfaces dans toutes les activités de performance artistique impliquant leur utilisation en direct. 5
- IDMIL** *Input Devices and Music Interaction Laboratory*: Laboratoire de recherche en IHM appliquée à l'interaction musicale, affilié au département de Musique de l'Université McGill (Montréal, Canada). 92

IHM *Interface Humain-Machine*. 9, 10, 11, 44, 49, 51, 63, 64, 69, 82, 88, 92, 168, 169, 229

IRCAM *Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique*: Centre français de recherche scientifique, d'innovation technologique et de création musicale, fondé par Pierre Boulez en 1970 à Paris, France. 19, 20, 21, 49, 56, 98, 100, 109, 138, 157, 190, 230, 233

IReMus *Institut de Recherche en Musicologie*: créé en 2014 du regroupement de trois équipes : l'OMF (Observatoire Musical Français) et PLM (Patrimoine et Langues Musicaux) de l'Université Paris-Sorbonne et l'IRPMF (Institut de recherche sur le patrimoine musical en France). <http://www.iremus.cnrs.fr>. 5

ISGS *International Society for Gesture Studies* : association internationale créée en 2002 et dédiée à l'étude du geste. <http://gesturestudies.com>. 44

ISPW *Ircam Signal Processing Workstation* : L'ISPW, développée en 1989 à l'IRCAM, était une plate-forme matérielle DSP faisant tourner un serveur de calcul audio temps-réel, pilotable par le logiciel Max. 20, 228

JIM *Journées d'Informatique Musicale* : conférence annuelle organisée par l'Association Francophone d'Informatique Musicale (AFIM) où se réunissent sur plusieurs jours, des chercheurs en Informatique Musicale, des scientifiques et différents acteurs de la vie musicale utilisant l'informatique comme moyen d'expression, comme aide à la composition ou comme outil pédagogique. 5

JSON *JavaScript Object Notation* : format de données textuelles proposé par Douglas Crockford en 2002, dérivé de la notation des objets du langage JavaScript et permettant de représenter de l'information structurée en paires clé / valeur. 195

LaBRI : unité mixte de recherche du CNRS (UMR 5800) installée sur le domaine universitaire de Talence-Pessac-Gradignan. Rattaché à l'Université Bordeaux I et à l'ENSEIRB, il dépend du département des sciences et technologies de l'information et ingénierie (ST2I). Le SCRIME lui est rattaché. 190, 233

LAM *Lutherie, Acoustique, Musique*: Equipe de recherche rattachée à l'Institut Jean-Le Rond d'Alembert de la faculté des Sciences de Sorbonne Université, et fondé en 1963 par Émile Leipp. 5, 104, 109, 110, 132

LFO *Low Frequency Oscillator*: circuit électronique (ou simulé en numérique) permettant la modulation d'un signal à des fréquences inférieures aux fréquences audio, permettant notamment des effets tel que le vibrato. 147

LIMS *Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur*: unité propre de recherche du Centre national de la recherche scientifique, associé à l'université Paris-Sud et situé à Orsay. Le groupe Audio-Acoustique y a notamment développé des dispositifs de synthèse de voix parlée et chantée contrôlés de manière expressive en temps-réel. 109

LLVM anciennement appelé Low Level Virtual Machine, infrastructure de compilateur conçue pour l'optimisation du code à la compilation et permettant notamment une compilation à la volée (*Just In Time*). 34

LMA *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille*: unité mixte de recherche sous tutelle Aix-Marseille Université, CNRS et Centrale Marseille. L'équipe "Son" s'intéresse notamment aux instruments de musique. 109

Logiciel Libre Logiciel dont le code source est disponible et libre (i.e. non-soumis à un brevet propriétaire), permettant sa redistribution et la création de travaux dérivés. 14

makerspace atelier de fabrication numérique, ouvert au public et mettant à disposition des machines-outils à commande numérique habituellement réservées à des professionnels dans un but de prototypage rapide ou de production à petite échelle. 23, 89, 90, 227

MAO *Musique Assistée par Ordinateur*: Ensemble des pratiques utilisant l'informatique à des fins de composition et d'interprétation musicale. 49

mapping Terme utilisé pour désigner la mise en relation de variables d'entrées (e.g. des données issues de capteurs) à des variables de sortie (e.g. des paramètres de synthèse audio). Cf. chapitre 5. 25, 137, 142

MIDI *Musical Instrument Digital Interface*: protocole de communication et format de fichier créés en 1984, dédiés à la musique, et utilisés pour la communication entre instruments électroniques, contrôleurs, séquenceurs, et logiciels de musique. 20, 21, 30, 39, 77, 83, 85, 88, 101, 104, 109, 110, 111, 112, 114, 116, 123, 125, 126, 135, 136, 137, 138, 139, 142, 143, 146, 149, 150, 151, 172, 232

- MIM** *Laboratoire Musique et Informatique de Marseille*: groupe de recherche pluridisciplinaire (compositeurs, plasticiens, vidéastes, scientifiques), fondé en 1984 par Marcel Frémiot et portant sa réflexion sur les pratiques musicales contemporaines. 46, 197, 234
- MIR** *Music Information Retrieval*: science interdisciplinaire, recourant notamment à l'informatique, l'acoustique, la musicologie, le traitement du signal, l'intelligence artificielle, etc. se focalisant sur la recherche (et l'extraction) d'informations musicales, en particulier à l'aide de méthodes automatisés et informatiques. Ce domaine est soutenu par l'International Society for Music Information Retrieval (ISMIR) créé en 2008 organisant la conférence éponyme qui existe depuis l'an 2000. 98, 185
- MIT** *Massachusetts Institute of Technology*: université américaine situés à Cambridge, Massachusetts, spécialisée dans les domaines de la science et de la technologie. Son *Media Lab* est un lieu important d'innovation dans de multiples domaines de l'interaction humain-machine. 21, 167, 173
- MMA** *MIDI Manufacturer Association*: organisation professionnelle sans profit, composée principalement de développeur de solutions matérielles et logicielles et travaillant sur les standards liés à la norme **MIDI**. 20, 142
- MPE** *Multidimensional Polyphonic Expression*: méthode d'utilisation du protocole MIDI qui permet d'ajuster de manière continue et polyphonique le pitch bend ainsi que d'autres dimensions de contrôle expressif. 20, 136, 137, 143, 146
- MSP** *Max Signal Processing*: extension **DSP**, basée sur **FTS**, ajoutée à Max en 1997 et permettant le traitement du signal en temps réel directement dans Max. 155
- MUSIC-N** **MUSIC-N** fait référence à une famille de programmes de musique par ordinateur et de langages de programmation issus ou influencés par le programme **MUSIC**, écrit par Max Mathews en 1957 aux Bell Labs. **MUSIC** a été le premier programme informatique à générer des formes d'ondes audionumériques par synthèse directe. 137
- NIME** *New Interfaces for Musical Expression*: Nouvelles Interfaces pour l'Expression Musicale, désignant aussi bien ces interfaces que la conférence éponyme qui leur est consacrée. 5, 25, 27, 32, 33, 44, 50, 53, 109, 128
- OS** *Operating System* (système d'exploitation): ensemble de programmes qui dirige l'utilisation des ressources d'un ordinateur par des logiciels applicatifs. Les

principaux sont MacOS, Windows, GNU/Linux ainsi qu'iOS et Android sur mobile. 102

OSC *Open Sound Control*: format de transmission de données entre ordinateurs, synthétiseurs, robots ou tout autre matériel ou logiciel compatible, conçu pour le contrôle en temps réel. Il utilise le réseau au travers des protocoles **UDP** ou **TCP** et apporte des améliorations en termes de rapidité et flexibilité par rapport à l'ancienne norme MIDI. 125, 126, 138, 139, 172, 195

OSI *Open Sound Control*: norme de communication, en réseau, de tous les systèmes informatiques, proposé en 1978 par l'International Organization for Standardization (ISO). 235

PMMA *Polyméthacrylate de méthyle*: polymère thermoplastique transparent, connu sous le nom commercial "Plexiglass". 90, 105, 112, 113, 114, 118

RIM *Réalisateur en Informatique Musicale*: (anciennement "tuteur", puis "Assistant Musical"), personne chargée d'aider un compositeur dans la partie technique, en particulier informatique, d'une œuvre musicale comprenant une part d'électronique. Ce statut est historiquement lié à l'**IRCAM** et ses contours encore sujet à discussion cf. [Zat13]. Il existe cependant depuis quelques années des cursus de formation destinés au métier de RIM. 49

RTP *Real-Time Transport Protocol*: protocole de communication informatique permettant le transport de données soumises à des contraintes de temps réel, tels que des flux média audio ou vidéo. 136

SCRIME *Studio de Création et de Recherche en Informatique et Musiques Expérimentales*: Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) et Artistique constitué de l'Université de Bordeaux, du CNRS, de Bordeaux INP, du Ministère de la Culture et de la Communication, de la Ville de Bordeaux et de la Région Aquitaine. Il est administré par le **LaBRI** et a pour objectifs principaux le développement de collaborations entre acteurs scientifiques et artistes à des fins de recherche et de création. 230

STEIM *STudio for Electro Instrumental Music*: association créée en 1969 à Amsterdam, Pays-Bas, par les compositeurs Misha Mengelberg, Louis Andriessen, Peter Schat, Dick Raaymakers, Jan van Vlijmen, Reinbert de Leeuw, et Konrad Boehmer. Le STEIM est un centre de recherche et de développement sur les nouvelles lutheries. Michel Waisvisz en fût le principal directeur artistique et y inventera le dispositif "The Hands". 215

- TCP** *Transmission Control Protocol*: protocole asynchrone de transmission de données sur réseau, utilisant un mode de transmission avec accusé de réception. 149, 233
- TENOR** *Conference International sur les Technologies de la Notation et de la Représentation Musicale*: conférence annuelle créée en 2015 à la suite d'un groupe de travail de l'**AFIM** sur la question de la notation musicale. 185
- TUI** *Tangible User Interface*: interface utilisateur dans laquelle l'utilisateur interagit avec l'information numérique en agissant directement sur une représentation visuelle de celle-ci. L'objectif de développement des interfaces utilisateur tangibles est d'encourager la collaboration, l'éducation et le design (conception) en donnant à l'information digitale une forme physique, profitant ainsi des capacités humaines de saisir et de manipuler des objets physiques et des matériaux. 138, 140, 234
- TUIO** contraction de **TUI** et **IO** (*Input/Output*): protocole de communication conçu pour le développement de la *ReacTable*, permettant de récupérer les coordonnées d'une multitude de pointeurs, tels que des doigts ou des objets étiquetés. 116, 138, 174
- UDP** *User Datagram Protocol*: protocole asynchrone de transmission de données sur réseau, utilisant un mode de transmission sans accusé de réception. 138, 174, 233
- UPIC** *Unité Polyagogique Informatique du CEMAMu*: outil de composition musicale assisté par ordinateur, inventé par le compositeur Iannis Xenakis et développé au **CEMAMu**, à Paris, entre 1975 et 1977. Il se présente comme une grande tablette graphique permettant de dessiner des formes ensuite interprétées comme son. L'axe des abscisses représente le temps et celui des ordonnées les fréquences, mais les échelles de ces axes sont modifiables. Xenakis s'en servira notamment pour composer *Mycènes Alpha*. 19, 20
- USB** *Universal Serial Bus*: norme de bus informatique et de connecteurs associés, servant typiquement à relier des périphériques informatiques à un ordinateur. 39
- UST** *Unités Sémiotiques Temporelles*: éléments d'analyse musicologique proposé par le **MIM** et définis comme des "fragments sonores qui, même hors de leur contexte musical, possèdent une signification temporelle due à leur organisation". 46, 197

WFS *Wave Field Synthesis*: technique de rendu audio spatial basée sur la production de fronts d'ondes artificiels, synthétisés par un grand nombre de haut-parleurs à commande individuelle. De tels fronts d'onde semblent provenir d'un point de départ virtuel, la source virtuelle ou source fictive. Contrairement aux techniques traditionnelles de spatialisation telles que le son stéréo ou surround, la localisation des sources virtuelles dans WFS ne dépend pas de la position de l'auditeur et ne change pas avec elle. 96

ZIPI *Zeta Instrument Processor Interface*: projet de recherche initié par Zeta Instruments et le **CNMAT** en 1994, conçu comme le protocole de transport de nouvelle génération pour les instruments de musique numériques, en conformité avec le modèle **Open Systems Interconnection (OSI)**. 137, 138, 139, 142

Artistes et œuvres cités

- Actress (Cunningham, Darren J.,
alias —)
Ascending, 76
- Anderson, Laurie
Handphone table, 70
- Applebaum, Mark
Aphasia, 38
- Art of Failure (groupe), 24
- Avery, Tex, 75
- Babiole, Cécile
Donjon, 87
- Bacal, Jay
Le Sacre du Printemps, 32
- Bach, Johann Sebastian
Partita pour violon seul n° 3, 76
Variations Goldberg, 62
- Bayle, François, 197
- Beckett, Samuel
paroles et musique, 3, 201
- Beethoven, Ludwig van
Grande Fugue Op. 133, 78
- Bernier, Nicolas, 102
La chambre des machines, 101
Machine _ Variation, 101
- Bhagwati, Sandeep, 29
- Bouckaert, Laurence, 191
- Boulez, Pierre, 20, 150
- Brocquaire, Vincent
Screen to screen, 169
- Brown, Earle
December 1952, 187
- Cage, John, 50
4'33", 70
Imaginary landscape No 4, 186
Organ²/ASLSP, 28
Radio Happenings, 183
Variation V, 86
- Carinola, Vincent
Virtual Rhizome, 94
- Chamagne, Mathieu, 172
- Chion, Michel, 25
- Collins, Nicolas
The Royal Touch, 31
- Coltrane, John, 51
- Couprie, Pierre, 191
- Criton, Pascale, 104
- Cunningham, Merce
Variation V, 86
- Dallio, Patricia, 87
- Davis, Miles, 71
- De Laubier, Serge, 27, 191
Traverse de façade, 162
- Donnarumma, Marco, 82
- Dowland, John
First Booke of Songes or Ayres,
162
- Dudas, Richard, 29
- Dumas, Jean-Michel
Donjon, 87
- Dumeaux, François, 61, 102
- Feldman, Morton
Projection 1, 186

- Radio Happenings*, 183
 Ferneyhough, Brian, 51
 FlowMachines (groupe)
 Daddy's car, 32
 FORAGES (groupe)
 FIB_R, 164
 Freeman, Jason, 29

 Genevois, Hugues, 191
 Gordeff, Pierre, 33
 Goudard, Vincent, 191
 107724404x8, 125
 Donjon, 87
 Filigram, 110
 Media Music room, 110
 Media Music room, 22
 Gould, Glenn
 Variations Goldberg, 74
 Gourfink, Myriam, 86

 Hajdu, Georg, 29
 Hancock, Herbie, 71
 Harrison, Nate
 Can I Get An Amen ?, 62
 Hart, Victoria
 Shepard Tones, 72
 Haury, Jean, 191
 Grande Fugue Op. 133, 78
 Hill, Geoff, 19

 Jodlowski, Pierre
 Music, Violence and other stories,
 109

 Kagel, Mauricio, 51
 Kurtág, György
 Játékok : Veszekedés, 77
 Zwiegespräch, 63
 Kurtág, György, Jr., 191
 Hangsimogato N°2, 77
 Zwiegespräch, 63
 Kutiman (Kutiel, Ophir, alias —)
 ThruYOU, 24

 Lachenmann, Helmut, 81
 Leafcutter John (Burton, John,
 alias —)
 Light Thing, 82

 Machaut, Guillaume de
 Ma fin est mon commencement,
 185
 Maestri, Eric, 184
 Manoury, Philippe
 En Echo, 98
 Marier, Martin, 84, 87
 The Sponge, 101
 Martirano, Salvatore, 19
 Mathews, Max, 19
 McLean, Alex, 23
 Messier, Martin
 La chambre des machines, 101
 Machine _ Variation, 101
 de Mey, Thierry
 Light Music, 82
 Momeni, Ali, 112
 Mozart, Wolfgang Amadeus
 La Flûte enchantée, 50
 Mumma, Gordon, 29
 Murray Schafer, Raymond, 186

 Nordin, Jesper, 109
 Noto (Nicolai, Carsten, alias —)
 Unitxt, 31

 ONE (Orchestre National
 Électroacoustique), 191
 Onkyokei (scène), 50

 PanGenerator (groupe)
 Apparatum, 164
 Parmegiani, Bernard
 De Natura Sonorum, 199
 Partch, Harry, 29

 QBert (Quitevis, Richard alias —), 50

 Raboisson, Nathanaëlle, 62

Risset, Jean-Claude, 18
 Roquigny, Anne
 WJ-S, 24

 Saint Denis, Patrick
 LUNGTA, 87
 Satie, Erik
 Vexations, 28
 Savouret, Alain, 37
 Schaeffer, Pierre, 197
 Solomon, Mike
 Patchy the autobot, 29
 Sonami, Laetitia, 27
 Stockhausen, Karlheinz
 Kontakte, 150
 Strachey, Christopher, 19
 Stravinsky, Igor, 81, 186
 Le Sacre du Printemps, 32

 Thompson, Walter, 188

 Toeplitz, Kasper, 86
 Tomas, Enrique
 Tangible Scores, 59
 Tone, Yasuano
 Solo for Wounded CD, 31
 Tudor, David
 Variation V, 86

 Varèse, Edgar, 186

 Waisvisz, Michel, 27
 Wasabi, Shawn (Serrano, Shawn,
 alias —)
 Marble Soda, 39

 Xénakis, Iannis, 20, 109
 Concret PH, 150
 Mycènes Alpha, 187

 Zorn, John
 Cobra, 188

Bibliographie

- [ABF14] Pavlos ANTONIADIS, Frédéric BEVILACQUA et Dominique FOBER. „Gesture cutting through textual complexity : Towards a tool for online gestural analysis and control of complex piano notation processing“. In : *Conference on Interdisciplinary Musicology*. Berlin, Germany, 2014 (cf. p. 188).
- [Ala+12] Sarah Fdili ALAOUI, Baptiste CARAMIAUX, Marcos SERRANO et Frédéric BEVILACQUA. „Movement qualities as interaction modality“. In : *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*. ACM, 2012, p. 761-769 (cf. p. 47).
- [Alb17] Philippe ALBÈRA. *Pli selon pli de Pierre Boulez : Entretiens et études*. Éditions Contrechamps, 2017 (cf. p. 20).
- [APO03] APO33. „L’orchestre au XXIe siècle“. fr. In : *Volume! 2 : 1* (2003), p. 43-67. DOI : 10.4000/volume.2330 (cf. p. 21).
- [Arf+02] Daniel ARFIB, Jean-Michel COUTURIER, Loïc KESSOUS et Vincent VERFAILLE. „Strategies of mapping between gesture data and synthesis model parameters using perceptual spaces“. en. In : *Organised Sound 7.2* (août 2002), p. 127-144. DOI : 10.1017/S1355771802002054 (cf. p. 38, 53).
- [Ass+06] Gérard ASSAYAG, Georges BLOCH, Marc CHEMILLIER, Arshia CONT et Shlomo DUBNOV. „Omax brothers : a dynamic topology of agents for improvisation learning“. In : *Proceedings of the 1st ACM workshop on Audio and music computing multimedia*. ACM, 2006, p. 125-132 (cf. p. 63).
- [Aur94] Sylvain AUROUX. *La révolution technologique de la grammatisation : introduction à l’histoire des sciences du langage*. Philosophie et langage. Mardaga, 1994 (cf. p. 58).
- [Aus08] Philip AUSLANDER. *Liveness : performance in a mediatized culture*. en. 2. ed. OCLC : 237238617. London : Routledge, 2008 (cf. p. 48).
- [BA05] John BOWERS et Phil ARCHER. „Not Hyper, Not Meta, Not Cyber but Infra-Instruments“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Vancouver, BC, Canada, 2005, p. 5-10 (cf. p. 33).
- [Bac17] Baptiste BACOT. „Geste et instrument dans la musique électronique : organologie des pratiques de création contemporaines“. Thèse de doctorat. Paris, EHESS, 2017 (cf. p. 62).
- [Bac43] Gaston BACHELARD. *L’Air Et Les Songes : Essai Sur l’Imagination Du Mouvement*. Paris : José Corti, 1943 (cf. p. 46).

- [Bag14] Jeremy C. BAGUYOS. „Contemporary Practices in the Performance and Sustainability of Computer Music Repertoire.“ In : *Proceedings of the International Conference on Computer Music*. Athènes, Grèce : Michigan Publishing, 2014 (cf. p. 25).
- [Bay93] François BAYLE. *Musique acousmatique : propositions... positions*. INA-GRM, Buchet-Chastel, 1993 (cf. p. 37, 59, 197).
- [BB08] Alain BONARDI et Jérôme BARTHÉLEMY. „The preservation, emulation, migration, and virtualization of live electronics for performing arts : An overview of musical and technical issues“. en. In : *Journal on Computing and Cultural Heritage* 1.1 (juin 2008), p. 1-16. DOI : 10.1145/1367080.1367086 (cf. p. 25).
- [BC05] Alan F BLACKWELL et Nick COLLINS. „The Programming Language as a Musical Instrument.“ In : *Proceeding of PPIG*. 2005, p. 11 (cf. p. 23, 190).
- [Bec14] Samuel BECKETT. *Comédie et actes divers : Va-et-vient, Cascando, Paroles et musique, Dis Joe, Actes sans paroles I et II, Film, Souffle*. Éditions de minuit, 2014 (cf. p. 3, 201).
- [Ben+15] Simon BENACCHIO, Baptiste CHOMETTE, Adrien MAMOU-MANI et Victor FINEL. „Mode tuning of a simplified string instrument using time-dimensionless state-derivative control“. In : *Journal of Sound and Vibration* 334 (2015), p. 178-189. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.09.003> (cf. p. 100).
- [Ben10] Steve BENFORD. „Performing Musical Interaction : Lessons from the Study of Extended Theatrical Performances“. In : *Computer Music Journal* 34.4 (2010), p. 49-61. DOI : 10.1162/COMJ_a_00025 (cf. p. 65, 68).
- [Ben13] Walter BENJAMIN. *L'œuvre d'art à l'époque de sa reproductibilité technique*. (Première édition du texte final : 1939). Éditions Payot, 2013 (cf. p. 48).
- [Ben18] Sarah BENHAIM. „Aux marges du bruit. Une étude de la musique noise et du Do it Yourself“. PhD Thesis. 2018 (cf. p. 51).
- [Ber+13] Florent BERTHAUT, Mark T. MARSHALL, Sriram SUBRAMANIAN et Martin HACHET. „Rouages : Revealing the Mechanisms of Digital Musical Instruments to the Audience“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Daejeon, Republic of Korea : Graduate School of Culture Technology, KAIST, mai 2013, p. 164-169 (cf. p. 65, 69).
- [Ber+15] Florent BERTHAUT, David COYLE, James MOORE et Hannah LIMERICK. „Liveness Through the Lens of Agency and Causality“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. d'Edgar BERDAHL et Jesse ALLISON. Baton Rouge, Louisiana, USA : Louisiana State University, mai 2015, p. 382-386 (cf. p. 65).
- [Bha13] Sandeep BHAGWATI. „Notational perspective and improvisation“. In : *Sound & Score. Essays on Sound, Score and Notation*. 2013, p. 165-177 (cf. p. 188).
- [Bha17] Sandeep BHAGWATI. „Vexations of ephemerality. Extreme sight-reading in situative scores - for makers, performers, audiences.“ en. In : *Proceedings of the International Conference on Technologies for Music Notation and Representation*. 2017, p. 6 (cf. p. 29).

- [Bir+05] David BIRNBAUM, Rebecca FIEBRINK, Joseph MALLOCH et Marcelo M. WANDERLEY. „Towards a Dimension Space for Musical Devices“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Vancouver, BC, Canada, 2005, p. 192-195 (cf. p. 98).
- [BJD13] Florent BERTHAUT, David JANIN et Myriam DESAINTE-CATHERINE. „libTuile : un moteur d'exécution multi-échelle de processus musicaux hiérarchisés“. In : *JIM*. Saint-Denis, France, mai 2013, p. 45-50 (cf. p. 190).
- [BK14] Florent BERTHAUT et Jarrod KNIBBE. „Wubbles : A Collaborative Ephemeral Musical Instrument“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 499-500 (cf. p. 33).
- [Boe93] Paul BOERSMA. „Accurate short-term analysis of the fundamental frequency and the harmonics-to-noise ratio of a sampled sound“. In : *Proceedings of the institute of phonetic sciences*. T. 17. Amsterdam, 1993, p. 97-110 (cf. p. 98).
- [Bon98] Bert BONGERS. „Tactual display of sound properties in electronic musical instruments“. In : *Displays* 18.3 (1998), p. 129-133. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(98\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(98)00013-4) (cf. p. 98).
- [Bou11] Henri BOUTIN. „Active control methods of musical instruments. Cases of the xylophone bar and the violin.“ Theses. UPMC - Université Paris 6 Pierre et Marie Curie, nov. 2011 (cf. p. 100).
- [Bou87] Pierre BOULEZ. *Penser la musique aujourd'hui*. Gallimard, 1987 (cf. p. 150).
- [Bov+17] Till BOVERMANN, Alberto de CAMPO, Hauke EGERMANN, Sarah-Indriyati HARDJOWIROGO et Stefan WEINZIERL. *Musical Instruments in the 21st Century*. Springer, 2017 (cf. p. 33).
- [BP05] Charles BASCOU et Laurent POTTIER. „Gmu, a flexible granular synthesis environment in max/msp“. In : *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference (SMC'05), Salerno, Italy*. 2005 (cf. p. 150).
- [BS12] Edgar BERDAHL et J SMITH III. „An introduction to the Synth-A-Modeler compiler : Modular and open-source sound synthesis using physical models“. In : *Proceedings of the Linux Audio Conference*. 2012 (cf. p. 97).
- [BSF11] Frédéric BEVILACQUA, Norbert SCHNELL et Sarah FDILI ALAOUI. „Gesture capture : Paradigms in interactive music/dance systems“. In : *Emerging Bodies : The Performance of Worldmaking in Dance and Choreography*. Sous la dir. de Gabriele KLEIN et Sandra NOETH. T. 183. transcript Verlag, 2011, p. 183-193 (cf. p. 47, 86).
- [BSN12] Edgar BERDAHL, Julius O SMITH III et Günter NIEMEYER. „Feedback control of acoustic musical instruments : Collocated control using physical analogs“. In : *The journal of the acoustical society of america* 131.1 (2012), p. 963-973 (cf. p. 100).
- [Buc03] Christine BUCI-GLUCKSMANN. *Esthétique de l'éphémère*. fr. Paris : Galilée, 2003 (cf. p. 32).
- [Bux+07] Bill BUXTON et al. „Multi-touch systems that I have known and loved“. In : *Microsoft Research* 56 (2007), p. 1-11 (cf. p. 167, 168).

- [Bux97] Bill BUXTON. „Artists and the art of the luthier“. In : *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 31.1 (1997), p. 10-11 (cf. p. 31).
- [BV06] John BOWERS et Nicolas VILLAR. „Creating Ad Hoc Instruments with Pin & Play & Perform“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Paris, France, 2006, p. 234-239 (cf. p. 33).
- [Cad94] Claude CADOZ. „Le geste canal de communication homme/machine : la communication instrumentale“. In : *Technique et science informatiques* 13.1 (1994), p. 31-61 (cf. p. 53, 101).
- [Cag15] John CAGE. *Radio happenings : enregistrés à Wbai, New York, juillet 1966-janvier 1967*. Paris : Éditions Allia, 2015 (cf. p. 183).
- [Cag61] John CAGE. *Silence : Lectures and Writings*. Wesleyan University Press, 1961 (cf. p. 8).
- [Can12] Clément CANONNE. „Improvisation collective libre et processus de création musicale : création et créativité au prisme de la coordination“. fr. In : *Revue de musicologie* 1 (2012), p. 42 (cf. p. 196).
- [Car+14] Baptiste CARAMIAUX, Jules FRANÇOISE, Norbert SCHNELL et Frédéric BEVILACQUA. „Mapping Through Listening“. In : *Computer Music Journal* 38.3 (2014), p. 34-48. DOI : 10.1162/COMJ_a_00255 (cf. p. 56, 127).
- [Cas00] Kim CASCONE. „The Aesthetics of Failure : “Post-Digital” Tendencies in Contemporary Computer Music“. en. In : *Computer Music Journal* 24.4 (2000), p. 7 (cf. p. 31).
- [Cas15] Michèle CASTELLENGO. *Ecoute musicale et acoustique*. Eyrolles, 2015 (cf. p. 44, 75).
- [Cel+15] Jean-Michaël CELERIER, Pascal BALTAZAR, Clément BOSSUT et al. „OSSIA : Towards a unified interface for scoring time and interaction“. In : *TENOR2015*. Paris, France, mai 2015 (cf. p. 139, 190).
- [CF10] Arthur CLAY et Jason FREEMAN. „Preface : Virtual Scores and Real-Time Playing“. In : *Contemporary Music Review* 29.1 (2010), p. 1-1. DOI : 10.1080/07494467.2010.509587 (cf. p. 190).
- [CF78] Claude CADOZ et Jean-Loup FLORENS. „Fondement d’une démarche de recherche informatique/musique“. In : *Revue d’acoustique* 45 (1978), p. 86-101 (cf. p. 52).
- [CGD12] Caroline CANCE, Hugues GENEVOIS et Danièle DUBOIS. „What is instrumentality in new digital musical devices? A contribution from cognitive linguistics & psychology“. en. In : *La musique et ses instruments*. 2012, p. 283-298 (cf. p. 43).
- [CHA+12] Delphine CHADEFaux, Marcelo WANDERLEY, Jean-Loic LE CARROU, Benoît FABRE et Laurent DAUDET. „Experimental study of the musician / instrument interaction in the case of the concert harp“. In : *Acoustics 2012*. Sous la dir. de Société Française D’ACOUSTIQUE. Nantes, France, avr. 2012 (cf. p. 55).
- [Cha02] Joel CHADABE. „The Limitations of Mapping as a Structural Descriptive in Electronic Instruments“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Dublin, Ireland, mai 2002, p. 38-42 (cf. p. 127).
- [Cha84] Daniel M. CHAPIRO. „Globally-Asynchronous Locally-Synchronous Systems.“ Thèse de doct. Stanford, CA : Université de Stanford, 1984 (cf. p. 135).

- [Cha93] Chris CHAFE. „Tactile audio feedback“. In : *Proceedings of the International Computer Music Conference*. INTERNATIONAL COMPUTER MUSIC ASSOCIATION, 1993, p. 76-76 (cf. p. 98).
- [Cha96] Joel CHADABE. *Electric Sound : The Past and Promise of Electronic Music*. Pearson, nov. 1996 (cf. p. 83).
- [Chi13] Michel CHION. *L'audio-vision : son et image au cinéma*. 3^e éd. (1^{ère} édition : 1990). Armand Colin, 2013 (cf. p. 75).
- [Chi77] Michel CHION. „La musique du futur a-t-elle un avenir?“ In : *Cahiers recherche/musique* 4 (1977) (cf. p. 25).
- [Cla08] Arthur CLAY. „Inventing Malleable Scores : From Paper to Screen Based Scores“. en. In : *Transdisciplinary Digital Art. Sound, Vision and the New Screen*. Sous la dir. de Randy ADAMS, Steve GIBSON et Stefan Müller ARISONA. T. 7. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 255-269. DOI : 10.1007/978-3-540-79486-8_22 (cf. p. 189).
- [CLF81] Claude CADOZ, Annie LUCIANI et Jean-Loup FLORENS. „Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux, transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental“. In : *Revue d'acoustique* 4.59 (1981), p. 279-292 (cf. p. 52, 95).
- [CLF83] Claude CADOZ, Annie LUCIANI et Jean-Loup FLORENS. „Synthèse sonore par modélisation mécanique de l'instrument : le langage CORDIS“. In : 1983 (cf. p. 52).
- [CMM09] Nicholas J CONARD, Maria MALINA et Susanne C MÜNDEL. „New flutes document the earliest musical tradition in southwestern Germany“. In : *Nature* 460.7256 (2009), p. 737 (cf. p. 18, 43).
- [Col02] Nick COLLINS. „The BBCut Library“. In : *Proceedings of the 2002 International Computer Music Conference, ICMC 2002, Gothenburg, Sweden, September 16-21, 2002*. 2002 (cf. p. 130, 131).
- [Col06] Nicolas COLLINS. *Handmade Electronic Music — the art of hardware hacking (First Edition)*. New-York : Routledge, avr. 2006 (cf. p. 22).
- [Col13] Nicolas COLLINS. „Semiconducting – Making Music After the Transistor“. In : 2013 (cf. p. 30, 31, 97).
- [Cou04] Jean-Michel COUTURIER. *Utilisation avancée d'interfaces graphiques dans le contrôle gestuel de processus sonores*. 2004 (cf. p. 109).
- [Cou16] Pierre COUPRIE. „EAnalysis : developing a sound-based music analytical tool“. In : *Expanding the Horizon of Electroacoustic Music Analysis*. Cambridge University Press, 2016, p. 170-194 (cf. p. 185, 197).
- [Cou18] Pierre COUPRIE. „Le Méta-Instrument : genèse et évolution d'un nouvel instrument.“ In : COUPRIE, Pierre. *Le Méta-Instrument : genèse et évolution d'un nouvel instrument. Musique-Images-Instruments. Revue française d'organologie et d'iconographie musicale*, 17 (2018), p. 230-245 (cf. p. 27, 84).
- [Cro07] John CROFT. „Theses on liveness“. In : *Organised Sound* 12.1 (2007), p. 59-66 (cf. p. 65, 68).

- [CW00] Claude CADOZ et Marcelo M. WANDERLEY. „Gesture - Music“. In : *Trends in Gestural Control of Music*. Sous la dir. de Marcelo M WANDERLEY et Marc BATTIER. Paris : IRCAM, Centre Pompidou, mar. 2000 (cf. p. 52, 53).
- [DA05] Myriam DESAINTE-CATHERINE et Antoine ALLOMBERT. „Interactive scores : A model for specifying temporal relations between interactive and static events“. In : *Journal of New Music Research* 34.4 (2005), p. 361-374 (cf. p. 190).
- [Dab96] Diana S DABBY. „Musical variations from a chaotic mapping“. In : *Chaos : An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 6.2 (1996), p. 95-107 (cf. p. 127).
- [dAl09] Nicolas D’ALESSANDRO. „Realtime and Accurate Musical Control of Expression in Voice Synthesis“. Thèse de doct. 2009 (cf. p. 109).
- [Del+96] François DELALANDE, M FORMOSA, M FRÉMIOT et al. „Les Unités Sémiotiques Temporelles-Éléments nouveaux d’analyse musicale“. In : *Marseille : Edition MIM* (1996) (cf. p. 46, 197).
- [Del03] Gilles DELEUZE. *Deux régimes de fous. Textes et entretiens 1975-1995 (Paradoxe) (French Edition)*. Paris : Éditions de minuit, oct. 2003 (cf. p. 159).
- [Del80] Gilles DELEUZE. *Mille plateaux*. Paris : Éditions de minuit, 1980 (cf. p. 33, 137).
- [Del81] Gilles DELEUZE. *Francis Bacon, Logique de la sensation*. Paris : Editions de la Différence, 1981 (cf. p. 58, 79, 170).
- [Del88] François DELALANDE. „Le Geste, outil d’analyse : quelques enseignements d’une recherche sur la gestique de Glenn Gould“. In : *Analyse musicale* 10 (1988), p. 43-46 (cf. p. 54).
- [Der14] Jacques DERRIDA. *L’écriture et la différence*. Paris : Éd. Points, 2014 (cf. p. 29).
- [Der67] Jacques DERRIDA. *De la grammatologie*. Éditions de minuit. 1967 (cf. p. 41, 58).
- [Deu13] Diana DEUTSCH. *Psychology of music*. Elsevier, 2013 (cf. p. 75).
- [DHS17] Maurin DONNEAUD, Cedric HONNET et Paul STROHMEIER. „Designing a Multi-Touch eTextile for Music Performances“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 7-12 (cf. p. 91).
- [DK02] Alain DE CHEVEIGNÉ et Hideki KAWAHARA. „YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music“. In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 111.4 (2002), p. 1917-1930 (cf. p. 98).
- [DK06] Christopher DOBRIAN et Daniel KOPPELMAN. „The E in NIME : Musical Expression with New Computer Interfaces“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Paris, France, 2006, p. 277-282 (cf. p. 59, 66).
- [DLS01] Anind K DEY, Peter LJUNGSTRAND et Albrecht SCHMIDT. „Distributed and disappearing user interfaces in ubiquitous computing“. In : *CHI’01 extended abstracts on Human factors in computing systems*. ACM, 2001, p. 487-488 (cf. p. 88).
- [Don17] Marco DONNARUMMA. „On Biophysical Music“. In : *Guide to Unconventional Computing for Music*. Springer, 2017, p. 63-83 (cf. p. 82).
- [Doo04] Paul DOORNBUSCH. „Computer sound synthesis in 1951 : the music of CSIRAC“. In : *Computer Music Journal* 28.1 (2004), p. 10-25 (cf. p. 19).

- [DRG11] Théo DE LA HOGUE, Julien RABIN et Laurent GARNIER. „Jamoma Modular : une librairie C++ dédiée au développement d'applications modulaires pour la création“. fr. In : *Actes des Journées d'Informatique Musicale*. 2011 (cf. p. 138).
- [Duc08] Marcel DUCHAMP. *Notes*. Paris : Flammarion, 2008 (cf. p. 31).
- [Dud10] Richard DUDAS. „Comprovisation" : The various facets of composed improvisation within interactive performance systems“. In : *Leonardo Music Journal* 20 (2010), p. 29-31. DOI : 10.1162/LMJ_a_00009 (cf. p. 29, 188).
- [Dun99] Anthony DUNNE. *Hertzian tales : Electronic products, aesthetic experience and critical design*. Art Books Intl Ltd, 1999 (cf. p. 50).
- [Dur94] Jean DURING. *Quelque chose se passe : le sens de la tradition dans l'Orient musical*. Verdier, 1994 (cf. p. 32).
- [Eco15] Umberto ECO. *L'œuvre ouverte*. Trad. par Chantal ROUX DE BÉZIEUX et André BOUCOURECHLIEV. édition italienne : 1962. Paris : Points, 2015 (cf. p. 47, 187).
- [Fau00] Anne FAURE. „Des sons aux mots, comment parle-t-on du timbre musical ?“ fr. Thèse de doct. École des Hautes-Études en Sciences Sociales, 2000 (cf. p. 74).
- [FC10] Rebecca FIEBRINK et Perry R COOK. „The Wekinator : a system for real-time, interactive machine learning in music“. In : *Proceedings of The Eleventh International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2010)(Utrecht)*. 2010 (cf. p. 56).
- [Fel04] S. FELS. „Designing for Intimacy : Creating New Interfaces for Musical Expression“. en. In : *Proceedings of the IEEE 92.4* (avr. 2004), p. 672-685. DOI : 10.1109/JPROC.2004.825887 (cf. p. 36).
- [Fér10] François-Xavier FÉRON. „L'art du trompe-l'oreille rythmique“. In : *Intermédialités : histoire et théorie des arts, des lettres et des techniques/Intermediality : History and Theory of the Arts, Literature and Technologies* 16 (2010), p. 145-165 (cf. p. 72).
- [FGL10] Emmanuel FAVREAU, Yann GESLIN et Adrien LEFÈVRE. „L'acousmographe 3“. In : *Journées d'Informatique Musicale (JIM 2010)*. 2010 (cf. p. 185, 197).
- [FGM02] Sidney FELS, Ashley GADD et Axel MULDER. „Mapping transparency through metaphor : towards more expressive musical instruments“. en. In : *Organised Sound* 7.2 (août 2002), p. 109-126. DOI : 10.1017/S1355771802002042 (cf. p. 66, 68, 89).
- [FGS09] A. Cavan FYANS, Michael GUREVICH et Paul STAPLETON. „Where Did It All Go Wrong ? A Model of Error From the Spectator's Perspective“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Pittsburgh, PA, USA, 2009, p. 171-172 (cf. p. 66).
- [FGS10] A. Cavan FYANS, Michael GUREVICH et Paul STAPLETON. „Examining the Spectator Experience“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sydney, Australia, 2010, p. 451-454 (cf. p. 66).
- [FH14] Antoine FALAIZE et Thomas HÉLIE. „Modélisation d'un haut parleur électrodynamique : approche dans le cadre des Systèmes à Hamiltoniens à Ports“. In : *12e Congrès Français d'Acoustique*. Poitiers, France, avr. 2014 (cf. p. 100).

- [Fie11] Rebecca FIEBRINK. „Real-time Human Interaction with Supervised Learning Algorithms for Music Composition and Performance“. Thèse de doct. Princeton, NJ, USA : Princeton University, jan. 2011 (cf. p. 127).
- [FIJ10] Ivar FROUNBERG, Kjell Tore INNERVIK et Alexander R. JENSENIUS. „Glass Instruments – From Pitch to Timbre“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sydney, Australia, 2010, p. 287-290 (cf. p. 91).
- [Fit54] Paul M FITTS. „The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement.“ In : *Journal of experimental psychology* 47.6 (1954), p. 381 (cf. p. 107).
- [FLD11] Lionel FEUGÈRE, Sylvain LE BEUX et Christophe D’ALESSANDRO. „Chorus Digitalis : polyphonic gestural singing“. In : *1st International Workshop on Performative Speech and Singing Synthesis (P3S 2011)*. Vancouver, Canada, mar. 2011 (cf. p. 109).
- [FMS11] Adrian FREED, John MACCALLUM et Andrew SCHMEDER. „Composability for Musical Gesture Signal Processing using new OSC-based Object and Functional Programming Extensions to Max/MSP“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Oslo, Norway, 2011, p. 308-311 (cf. p. 138, 146).
- [Fol+13] Sean FOLLMER, Daniel LEITHINGER, Alex OLWAL, Akimitsu HOGGE et Hiroshi ISHII. „inFORM : dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation.“ In : *Uist*. T. 13. 2013, p. 417-426 (cf. p. 105, 169).
- [FOL12] Dominique FOBER, Yann ORLAREY et Stephane LETZ. „Inscore-an environment for the design of live music scores“. In : 2012 (cf. p. 191).
- [Fra08] Angelo FRAIETTA. „Open Sound Control : Constraints and Limitations“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Genoa, Italy, 2008, p. 19-23 (cf. p. 138).
- [Fra15] Jules FRANÇOISE. „Motion-Sound Mapping by Demonstration“. Theses. UPMC, mar. 2015 (cf. p. 56, 127).
- [Fra84] Robert FRANCÈS. *La perception de la musique (2ème ed.)* T. 14. Paris : Vrin, 1984 (cf. p. 44).
- [Fre08a] Adrian FREED. „Application of new Fiber and Malleable Materials for Agile Development of Augmented Instruments and Controllers“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Genoa, Italy, 2008, p. 107-112 (cf. p. 91).
- [Fre08b] Jason FREEMAN. „Extreme Sight-Reading, Mediated Expression, and Audience Participation : Real-Time Music Notation in Live Performance“. en. In : *Computer Music Journal* 32.3 (sept. 2008), p. 25-41. DOI : 10.1162/comj.2008.32.3.25 (cf. p. 29, 193).
- [Fri+17] Claudia FRITZ, Joseph CURTIN, Jacques POITEVINEAU et Fan-Chia TAO. „Listener evaluations of new and Old Italian violins“. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114.21 (2017), p. 5395-5400 (cf. p. 75).

- [GC11] Michael GUREVICH et A. CAVAN FYANS. „Digital Musical Interactions : Performer–system relationships and their perception by spectators“. en. In : *Organised Sound* 16.2 (août 2011), p. 166-175. DOI : 10.1017/S1355771811000112 (cf. p. 66).
- [GD99] Hugues GENEVOIS et Raphaël DE VIVO, éd. *Les nouveaux gestes de la musique*. Editions Paenrhèses. Collection eupalinos. Marseille, 1999 (cf. p. 18, 38, 44).
- [GDG12] Vincent GOUDARD, Boris DOVAL et Hugues GENEVOIS. „Un modèle intermédiaire dynamique génératif basé sur l’automate cellulaire du jeu de la vie“. In : *Actes des Journées d’Informatique Musicale*. Sous la dir. de Thierry DUTOIT, Todor TODOROFF et Nicolas D’ALESSANDRO. Mons, Belgique : Université de Mons, mai 2012, p. 163 (cf. p. 133).
- [Gen99] Hugues GENEVOIS. „Geste et pensée musicale : de l’outil à l’instrument“. In : *Les nouveaux gestes de la musique*. Parenrhèses, 1999, p. 25 (cf. p. 45).
- [GGF14] Vincent GOUDARD, Hugues GENEVOIS et Lionel FEUGÈRE. „On the playing of monodic pitch in digital music instruments“. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Music*. Sous la dir. d’Anastasia GEORGAKI et Giorgos KOUROUPETROGLOU. Athènes, Greece : National et Kapodistrian University of Athens, sept. 2014, p. 1418 (cf. p. 107, 131, 133).
- [GHJ05] Rolf Inge GODØY, Egil HAGA et Alexander Refsum JENSENIUS. „Playing “air instruments” : mimicry of sound-producing gestures by novices and experts“. In : *International Gesture Workshop*. Springer, 2005, p. 256-267 (cf. p. 55).
- [GHJ06] Rolf Inge GODØY, Egil HAGA et Alexander Refsum JENSENIUS. „Exploring music-related gestures by sound-tracing : A preliminary study“. In : *Proceedings of the COST287-ConGAS 2nd International Symposium on Gesture Interfaces for Multimedia Systems*. Leeds, UK., 2006, p. 27-33 (cf. p. 55, 56).
- [Gia14] Jean-Louis GIAVITTO. „Du temps écrit au temps produit en informatique musicale“. fr. In : *Produire le temps*. Hermann. Paris, 2014, p. 73-105 (cf. p. 58, 187).
- [GL10] Rolf Inge GODØY et Marc LEMAN. *Musical gestures : Sound, movement, and meaning*. Routledge, 2010 (cf. p. 44).
- [God06] Rolf Inge GODØY. „Gestural-Sonorous Objects : embodied extensions of Schaeffer’s conceptual apparatus“. en. In : *Organised Sound* 11.2 (août 2006), p. 149-157. DOI : 10.1017/S1355771806001439 (cf. p. 56).
- [Gou+11] Vincent GOUDARD, Hugues GENEVOIS, Emilien GHOMI et Boris DOVAL. „Dynamic Intermediate Models for audiographic synthesis“. In : *8th Sound and Music Computing Conference*. Padova University Press, 2011, p. 486 (cf. p. 39, 133).
- [Gou02] Camille GOUDESEUNE. „Interpolated mappings for musical instruments“. en. In : *Organised Sound* 7.2 (août 2002), p. 85-96. DOI : 10.1017/S1355771802002029 (cf. p. 92).
- [Gou18] Vincent GOUDARD. „John, the Semi-Conductor : A Tool for Comprovisation“. In : *Proceedings of the International Conference on Technologies for Music Notation and Representation – TENOR’18*. Sous la dir. de Sandeep BHAGWATI et Jean BRESSON. Montreal, Canada : Concordia University, 2018, p. 43-49 (cf. p. 39).

- [Gra16] Roger GRAYBILL. „Whose Gestures? Chamber Music and the Construction of Permanent Agents“. En. In : *New Perspectives on Music and Gesture*. Sous la dir. d'Anthony GRITTEN et Elaine KING. SEMPRE Studies in The Psychology of Music. Routledge, 2016, p. 247-268 (cf. p. 63).
- [Had+17] Don Derek HADDAD, Xiao XIAO, Tod MACHOVER et Joseph PARADISO. „Fragile Instruments : Constructing Destructible Musical Interfaces“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 30-33 (cf. p. 33).
- [Hai18] Malou HAINE. „Les classifications des instruments de musique en France de 1761 à 1819 et l'élaboration d'une terminologie organologique.“ fr. In : *Musique-Images-Instruments. Revue française d'organologie et d'iconographie musicale* 15.1 (2018), p. 230-245. DOI : 10.2307/20141602 (cf. p. 27).
- [Haj16] Georg HAJDU. „Disposable Music“. en. In : *Computer Music Journal* 40.1 (mar. 2016), p. 25-34. DOI : 10.1162/COMJ_a_00342 (cf. p. 29, 30, 189).
- [HAM19] Stacy HSUEH, Sarah Fdili ALAOUÏ et Wendy E MACKAY. „Understanding Kinesthetic Creativity in Dance“. In : *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2019, p. 511 (cf. p. 47).
- [Hau99] Jean HAURY. „Petite histoire illustrée de l'interface clavier“. fr. In : *Les nouveaux gestes de la musique*. Sous la dir. d'Hugues GENEVOIS et Raphaël DE VIVO. Collection eupalinos. Editions Parenthèses, 1999, p. 93-110 (cf. p. 162).
- [Heg07] Paul HEGARTY. *Noise Music : A History*. Continuum, août 2007 (cf. p. 51).
- [Hei11] Ville-Matias HEIKKILÄ. „Discovering novel computer music techniques by exploring the space of short computer programs“. In : *CoRR abs/1112.1368* (2011) (cf. p. 190).
- [HK00] Andy HUNT et Ross KIRK. „Mapping Strategies for Musical Performance“. en. In : (2000), p. 28 (cf. p. 128).
- [HP16] Gaëtan HADJERES et François PACHET. „DeepBach : a Steerable Model for Bach chorales generation“. In : *CoRR abs/1612.01010* (2016) (cf. p. 32).
- [HS08] Kouki HAYAFUCHI et Kenji SUZUKI. „MusicGlove : A Wearable Musical Controller for Massive Media Library“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Genoa, Italy, 2008, p. 241-244 (cf. p. 91).
- [HS17] Terence K.L. HUI et R Simon SHERRATT. „Towards disappearing user interfaces for ubiquitous computing : human enhancement from sixth sense to super senses“. In : *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 8.3 (2017), p. 449-465 (cf. p. 88).
- [Hug08] Andrew HUGILL. *The digital musician*. en. OCLC : ocn173299004. New York : Routledge, 2008 (cf. p. 9, 31).
- [HV11] Cat HOPE et Lindsay VICKERY. „Screen Scores : New Media Music Manuscripts“. In : *Proceedings of the International Conference on Music Computing*. Huddersfield, UK, 2011 (cf. p. 188, 189, 198).
- [HW02] Andy HUNT et Marcelo M. WANDERLEY. „Mapping performer parameters to synthesis engines“. en. In : *Organised Sound* 7.2 (août 2002), p. 97-108. DOI : 10.1017/S1355771802002030 (cf. p. 127, 129, 135).

- [HW06] Avrum HOLLINGER et Marcelo M WANDERLEY. „Evaluation of commercial force-sensing resistors“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Paris, France*. 2006, p. 4-8 (cf. p. 92).
- [HWK00] Andy HUNT, Marcelo M WANDERLEY et Ross KIRK. „Towards a Model for Instrumental Mapping in Expert Musical Interaction“. en. In : *Proceedings of the International Computer Music Conference*. Berlin, Allemagne., 2000, p. 4 (cf. p. 127, 129).
- [Iaz00] Fernando IAZZETTA. „Meaning in musical gesture“. In : *Trends in gestural control of music*. Sous la dir. de Marcelo M WANDERLEY et Marc BATTIER. Paris : IRCAM, Centre Pompidou, 2000, p. 259-268 (cf. p. 51).
- [IU97] Hiroshi ISHII et Brygg ULLMER. „Tangible bits : towards seamless interfaces between people, bits and atoms“. en. In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '97*. Atlanta, Georgia, United States : ACM Press, 1997, p. 234-241. DOI : 10.1145/258549.258715 (cf. p. 168).
- [JB15] Angela Cresswell JONES et Rebecca Jane BENNETT. *The digital evolution of live music*. en. OCLC : 936413555. Oxford : Chandos, 2015 (cf. p. 48).
- [JIF10] Alexander R. JENSENIUS, Kjell Tore INNERVIK et Ivar FROUNBERG. „Evaluating the Subjective Effects of Microphone Placement on Glass Instruments“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sydney, Australia, 2010, p. 208-211 (cf. p. 91).
- [Jor04] Sergi JORDÀ. „Digital Instruments and Players : Part I – Efficiency and Apprenticeship“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Hamamatsu, Japan, 2004, p. 59-63 (cf. p. 25).
- [Jor05] Sergi JORDÀ. „Digital Lutherie Crafting musical computers for new musics' performance and improvisation“. PhD Thesis. Universitat Pompeu Fabra, 2005 (cf. p. 128, 168).
- [Joy09] Jérôme JOY. „Une époque circuitée“. In : *Intermédialités : histoire et théorie des arts, des lettres et des techniques/Intermediality : History and Theory of the Arts, Literature and Technologies* 13 (2009), p. 56-76 (cf. p. 24).
- [Kal+05] Martin KALTENBRUNNER, Till BOVERMANN, Ross BENCINA, Enrico COSTANZA et al. „TUIO : A protocol for table-top tangible user interfaces“. In : *Proc. of the The 6th Int'l Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation*. 2005, p. 1-5 (cf. p. 138).
- [Ken04] Adam KENDON. *Gesture : Visible action as utterance*. Cambridge University Press, 2004 (cf. p. 47).
- [KH90] Gordon KURTENBACH et Eric A HULTEEN. „Gestures in Human-Computer Communication“. In : *The art of human-computer interface design*. Sous la dir. de Brenda LAUREL et S. Joy MOUNTFORD. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1990, p. 309-317 (cf. p. 64).
- [KM19] Chris KIEFER et Thor MAGNUSSON. „Live coding machine learning and machine listening : a survey on the design of languages and environments for live coding.“ In : *Proceedings of the International Conference on Live Coding*. Media Lab, Madrid, Espagne, jan. 2019 (cf. p. 36, 197).

- [Koj11] Juraj KOJS. „Notating action-based music“. In : *Leonardo Music Journal* (2011), p. 65-72 (cf. p. 186).
- [Kur18] György KURTÁG. *György Kurtág : entretiens, textes, écrits sur son œuvre*. Éditions Contrechamps, 2018 (cf. p. 77).
- [Lac96] Helmut LACHENMANN. *Musik als existentielle Erfahrung : Schriften 1966-1995*. Wiesbaden Frankfurt : Breitkopf & Härtel Insel, 1996 (cf. p. 81).
- [LC84] Anasthasie LUCIANI et Claude CADOZ. „Modélisation et animation gestuelle d'objets : le système ANIMA“. In : *1° Colloque Image : traitement, synthèse, technologies et applications, FRA, 1984*. GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images, 1984 (cf. p. 52).
- [Lem08] Marc LEMAN. *Embodied music cognition and mediation technology*. Mit Press, 2008 (cf. p. 89).
- [Lep93] Richard LEPPERT. *The sight of sound : Music, representation, and the history of the body*. Univ of California Press, 1993 (cf. p. 64).
- [Ler64] André LEROI-GOURHAN. *Le geste et la parole*. Paris : Albin Michel, 1964 (cf. p. 18, 26, 32, 57).
- [LFC12] Sang Won LEE, Jason FREEMAN et Andrew COLLELA. „Real-Time Music Notation, Collaborative Improvisation, and Laptop Ensembles“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Ann Arbor, Michigan : University of Michigan, 2012 (cf. p. 189).
- [Lok95] Ishantha Joseph LOKUGE. „Dynamic magical environments : Engaging interaction based on the art of illusion“. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1995 (cf. p. 69).
- [Mac91] Tod MACHOVER. „Hyperinstruments : A composer's approach to the evolution of intelligent musical instruments“. In : *Organized Sound* (1991), p. 67-76 (cf. p. 21).
- [Mae16] Eric MAESTRI. „Notation as Temporal Instrument“. In : *Proceedings of the International Conference on Technologies for Music Notation and Representation*. Cambridge, U.K., 2016 (cf. p. 184).
- [Mag09] Thor MAGNUSSON. „Of Epistemic Tools : musical instruments as cognitive extensions“. In : *Organised Sound* 14.2 (2009), p. 168-176. DOI : 10.1017/S1355771809000272 (cf. p. 41, 57, 162).
- [Mag11] Thor MAGNUSSON. „Algorithms as scores : Coding live music“. In : *Leonardo Music Journal* (2011), p. 19-23 (cf. p. 185, 190).
- [Mag17] Thor MAGNUSSON. „Musical Organics : A Heterarchical Approach to Digital Organology“. en. In : *Journal of New Music Research* 46.3 (juil. 2017), p. 286-303. DOI : 10.1080/09298215.2017.1353636 (cf. p. 24).
- [Mag18] Thor MAGNUSSON. „Ergomimesis : towards a language describing instrumental transductions“. In : *Proceedings : ICLI 2018, 4th International Conference on Live Interfaces. Inspiration, Performance, Emancipation*. Universidade do Porto, 2018, p. 78-85 (cf. p. 92).
- [Mag19a] Thor MAGNUSSON. „Ergodynamics and a semiotics of instrumental composition“. In : *Tempo* 73.287 (2019), p. 41-51 (cf. p. 31, 108).

- [Mag19b] Thor MAGNUSSON. *Sonic writing : technologies of material, symbolic, and signal inscriptions*. Bloomsbury Academic, 2019 (cf. p. 103, 120).
- [Mal+19] Joseph MALLOCH, Jérémie GARCIA, Marcelo M WANDERLEY et al. „A design WorkBench for interactive music systems“. In : *New Directions in Music and Human-Computer Interaction*. Springer, 2019, p. 23-40 (cf. p. 93).
- [Mam+14] Clayton MAMEDES, Mailis RODRIGUES, Marcelo M. WANDERLEY et al. „Composing for DMIs Entoa, a Dedicate Piece for Intonaspacio“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 509-512 (cf. p. 25).
- [Man01] Lev MANOVICH. *The language of new media*. MIT press, 2001 (cf. p. 123).
- [Mar+09] Mark T. MARSHALL, Max HARTSHORN, Marcelo M. WANDERLEY et Daniel J. LEVITIN. „Sensor Choice for Parameter Modulations in Digital Musical Instruments : Empirical Evidence from Pitch Modulation“. In : 2009 (cf. p. 92).
- [Mar10] Martin MARIER. „The Sponge A Flexible Interface“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sydney, Australia, 2010, p. 356-359 (cf. p. 87).
- [Maz+18] Guerino MAZZOLA, René GUITART, Jocelyn HO et al. *The Topos of Music III : Gestures*. Springer, 2018 (cf. p. 47, 63).
- [MBP10] Joe MARSHALL, Steve BENFORD et Tony PRIDMORE. „Deception and magic in collaborative interaction“. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2010, p. 567-576 (cf. p. 69).
- [McC02] James MCCARTNEY. „Rethinking the Computer Music Language : SuperCollider“. en. In : *Computer Music Journal* 26.4 (déc. 2002), p. 61-68. DOI : 10.1162/014892602320991383 (cf. p. 23).
- [McN05] David MCNEILL. *Gesture and thought*. en. Chicago : University of Chicago Press, 2005 (cf. p. 47).
- [MD18] Alex MCLEAN et Roger T. DEAN, éd. *The Oxford handbook of algorithmic music*. En. Oxford University Press, 2018 (cf. p. 190).
- [Mer64] Maurice MERLEAU-PONTY. *L'Œil et L'Esprit*. Gallimard, 1964 (cf. p. 17).
- [Mer76] Maurice MERLEAU-PONTY. *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, mai 1976 (cf. p. 47).
- [Meu+15] Thibaut MEURISSE, Adrien MAMOU-MANI, René CAUSSÉ, Benny SLUCHIN et David B. SHARP. „An active mute for the trombone“. In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 138.6 (2015), p. 3539-3548. DOI : 10.1121/1.4936901 (cf. p. 100).
- [MF14] Tom MAYS et Francis FABER. „A Notation System for the Karlax Controller“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 553-556 (cf. p. 25).
- [MH02] Marcel MAUSS et Henri HUBERT. „Esquisse d'une théorie générale de la magie“. In : *Année sociologique* 1903 (1902) (cf. p. 69).

- [MH06] Ali MOMENI et Cyrille HENRY. „Dynamic independent mapping layers for concurrent control of audio and video synthesis“. In : *Computer Music Journal* 30.1 (2006), p. 49-66 (cf. p. 127, 129, 132).
- [MH18] Rémy MULLER et Thomas HÉLIE. „Power-Balanced Modelling Of Circuits As Skew Gradient Systems“. In : *Proceedings of the 21st International Conference on Digital Audio Effects* (. Aveiro, Portugal, 2018 (cf. p. 100).
- [MH19] Remy MÜLLER et Thomas HÉLIE. „A minimal passive model of the operational amplifier : application to sallen-key analog filters“. In : *Proceedings of the 22nd International Conference on Digital Audio Effects*. Birmingham, Royaume-Uni, 2019 (cf. p. 100).
- [Mic+16] Romain MICHON, Julius O SMITH, Chris CHAFE, Matthew WRIGHT et Ge WANG. „Nuance : Adding multi-touch force detection to the iPad“. In : *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference (SMC-16), Hamburg, Germany*. T. 31. 2016 (cf. p. 112).
- [Mic+18] Romain MICHON, Julius SMITH, Chris CHAFE, Ge WANG et Matthew WRIGHT. „The faust physical modeling library : a modular playground for the digital luthier“. In : *International Faust Conference*. Mainz, Germany, 2018 (cf. p. 97).
- [Mir+19] Eduardo Reck MIRANDA, Aurélien ANTOINE, Jean-Michaël CELERIER et Myriam DESAINTE-CATHERINE. „i-Berlioz : Towards Interactive Computer-Aided Orchestration with Temporal Control“. In : (2019) (cf. p. 190).
- [MM17] Fabio MORREALE et Andrew MCPHERSON. „Design for Longevity : Ongoing Use of Instruments from NIME 2010-14“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 192-197 (cf. p. 25, 27, 102).
- [MM78] John MACDONALD et Harry MCGURK. „Visual influences on speech perception processes“. In : *Perception & Psychophysics* 24.3 (1978), p. 253-257 (cf. p. 55).
- [Mom05] Ali MOMENI. „Composing Instruments : Inventing and Performing with Generative Computer-based Instruments“. en. Thèse de doct. Berkeley : University of California, 2005 (cf. p. 98, 112).
- [Moo06] James R MOONEY. „Sound diffusion systems for the live performance of electroacoustic music“. PhD Thesis. Citeseer, 2006 (cf. p. 98).
- [Moo88] F Richard MOORE. „The dysfunctions of MIDI“. In : *Computer music journal* 12.1 (1988), p. 19-28 (cf. p. 136).
- [Mum67] Gordon MUMMA. „Creative aspects of live-performance electronic music technology“. In : *Audio Engineering Society Convention 33*. Audio Engineering Society, 1967 (cf. p. 29).
- [MW06a] Mark T. MARSHALL et Marcelo M. WANDERLEY. „Vibrotactile Feedback in Digital Musical Instruments“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Paris, France, 2006, p. 226-229 (cf. p. 98).
- [MW06b] Eduardo Reck MIRANDA et Marcelo M. WANDERLEY. *New digital musical instruments : control and interaction beyond the keyboard*. T. 21. AR Editions, Inc., 2006 (cf. p. 43).

- [MW10] Alex McLEAN et Geraint WIGGINS. „Tidal-pattern language for the live coding of music“. In : *Proceedings of the 7th sound and music computing conference*. 2010 (cf. p. 23).
- [MW14] Carolina MEDEIROS et Marcelo WANDERLEY. „A comprehensive review of sensors and instrumentation methods in devices for musical expression“. In : *Sensors* 14.8 (2014), p. 13556-13591 (cf. p. 92).
- [MWS17] Sandor MEHES, Maarten van WALSTIJN et Paul STAPLETON. „Virtual-Acoustic Instrument Design : Exploring the Parameter Space of a String-Plate Model“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 399-403 (cf. p. 98).
- [MWW94] Keith McMILLEN, David L WESSEL et Matthew WRIGHT. „The ZIPI music parameter description language“. In : *Computer Music Journal* 18.4 (1994), p. 52-73 (cf. p. 136, 137).
- [Myl+15] Mikko MYLLYKOSKI, Kai TUURI, Esa VIIRRET et al. „Prototyping hand-based wearable music education technology“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. d'Edgar BERDAHL et Jesse ALLISON. Baton Rouge, Louisiana, USA : Louisiana State University, mai 2015, p. 182-183 (cf. p. 91).
- [Nat87] Jean-Jacques NATTIEZ. *Musicologie générale et sémiologie*. C. Bourgois, 1987 (cf. p. 184).
- [Nia+15] Hadi T NIA, Ankita D JAIN, Yuming LIU et al. „The evolution of air resonance power efficiency in the violin and its ancestors“. In : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471.2175 (2015), p. 20140905 (cf. p. 160).
- [Nol67] A Michael NOLL. „Cepstrum pitch determination“. In : *The journal of the acoustical society of America* 41.2 (1967), p. 293-309 (cf. p. 98).
- [OBH11] Dan OVERHOLT, Edgar BERDAHL et Robert HAMILTON. „Advancements in Actuated Musical Instruments“. In : *Organised Sound* 16.2 (2011), p. 154-165. DOI : 10.1017/S1355771811000100 (cf. p. 21).
- [OFL08] Yann ORLAREY, Dominique FOBER et Stephane LETZ. „FAUST : an Efficient Functional Approach to DSP Programming“. en. In : *New Computational Paradigms for Computer Music*. T. 290. Paris, France : Delatour, 2008, p. 33 (cf. p. 34, 94).
- [OK13] Jean-Paul OLIVE et Susanne KOGLER. *Expression et geste musical*. 2013 (cf. p. 59).
- [OMo01] Maura Sile O'MODHRAIN. *Playing by feel : incorporating haptic feedback into computer-based musical instruments*. Stanford University, 2001 (cf. p. 105).
- [One+19] Steve ONEY, Rebecca KROSNICK, Joel BRANDT et Brad MYERS. „Implementing Multi-Touch Gestures with Touch Groups and Cross Events“. In : *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2019, p. 355 (cf. p. 180).
- [Pac03] Francois PACHET. „The continuator : Musical interaction with style“. In : *Journal of New Music Research* 32.3 (2003), p. 333-341 (cf. p. 63).

- [Par+19] Laurel PARDUE, Kuriijn BUYS, Dan OVERHOLT, Andrew P. MCPHERSON et Michael EDINGER. „Separating sound from source : sonic transformation of the violin through electrodynamic pickups and acoustic actuation“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. de Marcelo QUEIROZ et Anna Xambó SEDÓ. Porto Alegre, Brazil : UFRGS, juin 2019, p. 278-283 (cf. p. 100).
- [Pd13] Olivier PERROTIN et Christophe D’ALESSANDRO. „Adaptive mapping for improved pitch accuracy on touch user interfaces“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Daejeon, Republic of Korea : Graduate School of Culture Technology, KAIST, mai 2013, p. 186-189 (cf. p. 133).
- [PHM15] Laurel PARDUE, Christopher HARTE et Andrew P MCPHERSON. „A low-cost real-time tracking system for violin“. In : *Journal of New Music Research* 44.4 (2015), p. 305-323 (cf. p. 98).
- [Pic91] François PICARD. „Chine : le xiao, ou souffle sonorisé“. In : *Cahiers d’ethnomusicologie. Anciennement Cahiers de musiques traditionnelles* 4 (1991), p. 17-26 (cf. p. 60).
- [Pin01] Trevor J. PINCH. „Why you go to a music store to buy a synthesizer : path dependence and the social construction of technology“. En. In : *Path dependence and creation*. Sous la dir. de Raghu GARUD et Peter KARNOE. Psychology Press, 2001, p. 381-400 (cf. p. 85, 160).
- [PIR06] Aniruddh D. PATEL, John R. IVERSEN et Jason C. ROSENBERG. „Comparing the rhythm and melody of speech and music : The case of British English and French“. In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 119.5 (2006), p. 3034-3047 (cf. p. 74).
- [PNG19] Gabriela PATIÑO-LAKATOS, Benoît NAVARRET et Hugues GENEVOIS. „Paradigmes et expériences pour une sémiotisation des sensations vibrotactiles“. In : *Alter* 13.3 (2019), p. 155-167. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.alter.2019.03.002> (cf. p. 99).
- [Puc11] Miller PUCKETTE. „Infuriating nonlinear reverberator“. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Music*. 2011 (cf. p. 97).
- [RC17] Nathanaëlle RABOISSON et Pierre COUPRIE. „Une expérience de captation et d’analyse de l’interprétation acousmatique“. In : *Journées d’informatique musicale*. Sous la dir. de Pierre COUPRIE, Cécile DAVY-RIGAUX, Hugues GENEVOIS et al. Journées d’informatique musicale. Paris, France : Collegium Music\ a e, mai 2017 (cf. p. 62).
- [RD18] Ben Luca ROBERTSON et Luke DAHL. „Harmonic Wand : An Instrument for Microtonal Control and Gestural Excitation“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. de Thomas Martin LUKE DAHL Douglas Bowman. Blacksburg, Virginia, USA : Virginia Tech, juin 2018, p. 72-77 (cf. p. 98).
- [Rea58] Leonard Edward READ. *I, pencil*. T. 8. 12. Freeman, 1958 (cf. p. 18).
- [Reb10] Pedro REBELO. „Notating the unpredictable“. In : *Contemporary Music Review* 29.1 (2010), p. 17-27 (cf. p. 187).

- [Ree+05] Stuart REEVES, Steve BENFORD, Claire O'MALLEY et Mike FRASER. „Designing the spectator experience“. In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, 2005, p. 741-750 (cf. p. 67, 68).
- [RH00] Joseph ROVAN et Vincent HAYWARD. „Typology of tactile sounds and their synthesis in gesture-driven computer music performance“. En. In : *Trends in gestural control of music*. Sous la dir. de Marcelo M WANDERLEY et Marc BATTIER. Paris : IRCAM, Centre Pompidou, 2000, p. 297-320 (cf. p. 98).
- [Ric06] John RICHARDS. „32kg : Performance Systems for a Post-Digital Age“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Paris, France, 2006, p. 283-287 (cf. p. 101).
- [Ris10] Jean-Claude RISSET. „A propos d'interdisciplinarité-informatique musicale : synthèse, traitement, perception; musicologie et STIC; oeuvre musicale et mixité“. In : *Journées d'Informatique Musicale*. 2010 (cf. p. 43, 80).
- [Ris14] Jean-Claude RISSET. „Sound and Music Computing Meets Philosophy (key-note)“. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Music*. Athènes, Grèce : A. Georgaki et G. Kouroupetroglou (Eds.), 2014 (cf. p. 29).
- [Ris92] Jean-Claude RISSET. „Le son numérique : une acoustique affranchie de la mécanique?“ In : *Le Journal de Physique IV 2.C1* (1992), p. C1-3 (cf. p. 79, 80).
- [Rov+97] Joseph Butch ROVAN, Marcelo M WANDERLEY, Shlomo DUBNOV et Philippe DEPALLE. „Instrumental gestural mapping strategies as expressivity determinants in computer music performance“. In : *Kansei, The Technology of Emotion. Proceedings of the AIMI International Workshop*. Citeseer, 1997, p. 68-73 (cf. p. 128, 142).
- [RUO01] Jun REKIMOTO, Brygg ULLMER et Haruo OBA. „DataTiles : a modular platform for mixed physical and graphical interactions“. In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, 2001, p. 269-276 (cf. p. 117).
- [Rya91] Joel RYAN. „Some remarks on musical instrument design at STEIM“. In : *Contemporary music review* 6.1 (1991), p. 3-17 (cf. p. 49, 50, 101).
- [Sav10] Alain SAVOURET. *Introduction à un solfège de l'audible : l'improvisation libre comme outil pratique*. Lyon : Symétrie, 2010 (cf. p. 37, 103).
- [SB02] Norbert SCHNELL et Marc BATTIER. „Introducing Composed Instruments, Technical and Musicological Implications“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Dublin, Ireland, mai 2002, p. 156-160 (cf. p. 29, 59).
- [SC14] Matteo STOPPA et Alessandro CHIOLERIO. „Wearable electronics and smart textiles : a critical review“. In : *sensors* 14.7 (2014), p. 11957-11992 (cf. p. 91).
- [Sch+18] Rodrigo SCHRAMM, Federico VISI, André BRASIL et Marcelo O. JOHANN. „A polyphonic pitch tracking embedded system for rapid instrument augmentation“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. de Thomas Martin LUKE DAHL Douglas Bowman. Blacksburg, Virginia, USA : Virginia Tech, juin 2018, p. 120-125 (cf. p. 98).

- [Sch12] Diemo SCHWARZ. „The Sound Space as Musical Instrument : Playing Corpus-Based Concatenative Synthesis“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Ann Arbor, Michigan : University of Michigan, 2012 (cf. p. 38, 53, 127).
- [Sch13] Norbert SCHNELL. „Playing (with) Sound-Of the Animation of Digitized Sounds and their Reenactment by Playful Scenarios in the Design of Interactive Audio Applications“. Thèse de doct. Graz, Austria : Institute of Electronic Music, Acoustics, University of Music et Performing Arts, 2013 (cf. p. 62).
- [Sch66] Pierre SCHAEFFER. *Traité des objets musicaux*. Pierres vives. Le Seuil, 1966 (cf. p. 8, 37, 56, 76, 197).
- [SD04] Bernard STIEGLER et Nicolas DONIN. „Le circuit du désir musical : L'interprète, le compositeur, l'auditeur — organes et instruments“. In : *Circuit : Musiques contemporaines* 15.1 (2004), p. 41-56. DOI : <https://doi.org/10.7202/902340ar> (cf. p. 59).
- [Seb92] Miroslav SEBESTIK. *Écoute*. Documentaire. 1992 (cf. p. 32).
- [Sel97] Eleanor SELFRIDGE-FIELD. *Beyond MIDI : The Handbook of Musical Codes*. The MIT Press, 1997 (cf. p. 136).
- [Ser+14] Stefania SERAFIN, Stefano TRENTO, Francesco GRANI et al. „Controlling Physically Based Virtual Musical Instruments Using The Gloves“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 521-524 (cf. p. 91).
- [Sèv13] Bernard SÈVE. *L'instrument de musique : une étude philosophique*. Le Seuil. L'Ordre philosophique. Le Seuil, mar. 2013 (cf. p. 30).
- [SG79] Raymond Murray SCHAFFER et Sylvette GLEIZE. *Le paysage sonore*. J.-C. Lattès Paris, 1979 (cf. p. 186).
- [Sil+14] Diego SILANG MARANAN, Sarah FDILI ALAOUI, Thecla SCHIPHORST et al. „Designing for movement : evaluating computational models using LMA effort qualities“. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2014, p. 991-1000 (cf. p. 47).
- [Siu+18] Alexa F SIU, Eric J GONZALEZ, Shenli YUAN, Jason B GINSBERG et Sean FOLLMER. „Shapeshift : 2D spatial manipulation and self-actuation of tabletop shape displays for tangible and haptic interaction“. In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2018, p. 291 (cf. p. 169).
- [Sla06] Giles SLADE. *Made to break : technology and obsolescence in America*. en. OCLC : ocm62679850. Cambridge, Mass : Harvard University Press, 2006 (cf. p. 30).
- [Sma98] Christopher SMALL. *Musicking : The meanings of performing and listening*. Wesleyan University Press, 1998 (cf. p. 8, 45).
- [Smi15] Ryan Ross SMITH. „An atomic approach to animated music notation“. In : *Proc. Int. Conf. On New Tools for Music Notation and Representation*. 2015 (cf. p. 190, 198).

- [Son06] Laetitia SONAMI. „On my work“. In : *Contemporary Music Review* 25.5-6 (2006), p. 613-614. DOI : 10.1080/07494460600990877 (cf. p. 27).
- [SPB13] Mike SINCLAIR, Michel PAHUD et Hrvoje BENKO. „TouchMover : actuated 3D touchscreen with haptic feedback“. In : *Proceedings of the 2013 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces*. ACM, 2013, p. 287-296 (cf. p. 105).
- [SS09] Daniel SCHLESSINGER et Julius O. SMITH. „The Kalichord : A Physically Modeled Electro-Acoustic Plucked String Instrument“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Pittsburgh, PA, United States, 2009, p. 98-101 (cf. p. 98).
- [SSP12] Matthieu SAVARY, Diemo SCHWARZ et Denis PELLERIN. „DIRTI —Dirty Tangible Interfaces“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Ann Arbor, Michigan : University of Michigan, 2012 (cf. p. 91).
- [STH14] Diemo SCHWARZ, Pierre Alexandre TREMBLAY et Alex HARKER. „Rich Contacts : Corpus-Based Convolution of Contact Interaction Sound for Enhanced Musical Expression“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 247-250 (cf. p. 98).
- [Sti10] Bernard STIEGLER. *For a new critique of political economy*. Cambridge Malden, MA : Polity, 2010 (cf. p. 26).
- [Str75] Igor STRAVINSKY. *An Autobiography*. Marion Boyars, oct. 1975 (cf. p. 81).
- [TAB16] Giuseppe TORRE, Kristina ANDERSEN et Frank BALDÉ. „The Hands : The Making of a Digital Musical Instrument“. In : *Computer Music Journal* 40.2 (2016), p. 22-34. DOI : 10.1162/COMJ_a_00356 (cf. p. 27).
- [Tan04] Atau TANAKA. „Mobile Music Making“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Hamamatsu, Japan, 2004, p. 154-156 (cf. p. 82).
- [TD14] Robert TUBB et Simon DIXON. „The Divergent Interface : Supporting Creative Exploration of Parameter Spaces“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 227-232 (cf. p. 38, 127).
- [TD19] Atau TANAKA et Marco DONNARUMMA. „The body as musical instrument“. In : *The Oxford Handbook of Music and the Body* (2019), p. 79 (cf. p. 86).
- [Ter07] Daniel TERUGGI. „Technology and musique concrete : the technical developments of the Groupe de Recherches Musicales and their implication in musical composition“. In : *Organised Sound* 12.3 (2007), p. 213-231 (cf. p. 19).
- [Thé97] Paul THÉBERGE. *Any Sound You Can Imagine : Making Music / Consuming Technology*. Wesleyan University Press, mai 1997 (cf. p. 19, 45, 48).
- [TK14] Enrique TOMÁS et Martin KALTENBRUNNER. „Tangible Scores : Shaping the Inherent Instrument Score“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. London, United Kingdom : Goldsmiths, University of London, juin 2014, p. 609-614 (cf. p. 59, 113).

- [TK19] Akito Van TROYER et Rebecca KLEINBERGER. „From Mondrian to Modular Synth : Rendering NIME using Generative Adversarial Networks“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. de Marcelo QUEIROZ et Anna Xambó SEDÓ. Porto Alegre, Brazil : UFRGS, juin 2019, p. 272-277 (cf. p. 164).
- [Tsa13] Chia-Jung TSAY. „Sight over sound in the judgment of music performance“. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.36 (2013), p. 14580-14585 (cf. p. 64).
- [Tuf01] Edward R TUFTE. *The visual display of quantitative information*. T. 2. Graphics press Cheshire, CT, 2001 (cf. p. 170).
- [UV99] Tamas UNGVARY et Roel VERTEGAAL. „Cognition and Physicality in Musical CyberInstruments“. en. In : *Trends in Gestural Control of Music*. Sous la dir. de Marcelo M WANDERLEY et Marc BATTIER. Paris : IRCAM, Centre Pompidou, 1999, p. 371-386 (cf. p. 92).
- [Ver91] Ronald T VERILLO. „Vibration sensing in humans“. In : *Music Perception* 9.3 (1991), p. 281-302 (cf. p. 98).
- [Vic14] Lindsay VICKERY. „The Limitations of Representing Sound and Notation on Screen“. en. In : *Organised Sound* 19.3 (déc. 2014), p. 215-227. DOI : 10.1017/S135577181400020X (cf. p. 188, 189).
- [VTR93] Francisco J VARELA, Evan THOMPSON et Eleanor ROSCH. *L'inscription corporelle de l'esprit : sciences cognitives et expérience humaine*. 1993 (cf. p. 89).
- [VUK96] Roel VERTEGAAL, Tamas UNGVARY et Michael KIESLINGER. „Towards a musician's cockpit : Transducers, feedback and musical function“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. T. 96. 1996, p. 308-311 (cf. p. 92, 93, 162, 167).
- [VW12] Gabriel VIGLIENSONI et Marcelo M. WANDERLEY. „A Quantitative Comparison of Position Trackers for the Development of a Touch-less Musical Interface“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Ann Arbor, Michigan : University of Michigan, 2012 (cf. p. 92).
- [VW66] Edgard VARÈSE et Chou WEN-CHUNG. „The liberation of sound“. In : *Perspectives of new music* 5.1 (1966), p. 11-19 (cf. p. 8).
- [VWD04] Doug VAN NORT, Marcelo M. WANDERLEY et Philippe DEPALLE. „On the Choice of Mappings Based on Geometric Properties“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Hamamatsu, Japan, 2004, p. 87-91 (cf. p. 127).
- [VWD06] Vincent VERFAILLE, Marcelo M. WANDERLEY et Philippe DEPALLE. „Mapping strategies for gestural and adaptive control of digital audio effects“. en. In : *Journal of New Music Research* 35.1 (mar. 2006), p. 71-93. DOI : 10.1080/09298210600696881 (cf. p. 127).
- [Wan+00] Marcelo M WANDERLEY, Jean-Philippe VIOLLET, Fabrice ISART et Xavier RODET. „On the Choice of Transducer Technologies for Specific Musical Functions.“ In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. 2000 (cf. p. 92, 109).

- [Wan99] Marcelo M. WANDERLEY. „Non-obvious Performer Gestures in Instrumental Music“. In : *Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction*. Sous la dir. d'Annelies BRAFFORT, Rachid GHERBI, Sylvie GIBET, Daniel TEIL et James RICHARDSON. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1999, p. 37-48 (cf. p. 55).
- [WB00] Marcelo WANDERLEY et Marc BATTIER, éd. *Trends in gestural control of music*. Paris : IRCAM, Centre Pompidou, 2000 (cf. p. 37, 44).
- [WC03] Ge WANG et Perry R. COOK. „ChucK : A Concurrent, On-the-fly, Audio Programming Language“. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Music*. 2003 (cf. p. 23).
- [WD10] Lonca WYSE et Nguyen D. DUY. „Instrumentalizing Synthesis Models“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sydney, Australia, 2010, p. 140-143 (cf. p. 127).
- [Wei91] Mark WEISER. „The Computer for the 21 st Century“. In : *Scientific american* 265.3 (1991), p. 94-105 (cf. p. 88).
- [Wes79] David L. WESSEL. „Timbre Space as a Musical Control Structure“. en. In : *Computer Music Journal* 3.2 (juin 1979), p. 45. DOI : 10.2307/3680283 (cf. p. 38, 127).
- [WF+97] Matthew WRIGHT, Adrian FREED et al. „Open SoundControl : A New Protocol for Communicating with Sound Synthesizers“. In : *Proceedings of the International Conference on Computer Music*. 1997 (cf. p. 138).
- [Win04] Gerhard E WINKLER. „The real-time score. A missing-link in computer-music performance“. en. In : *Proceedings of the Sound and music computing conference*. Paris, 2004, p. 6 (cf. p. 189).
- [Win95] Todd WINKLER. „Making Motion Musical : Gesture Mapping Strategies for Interactive Computer Music“. In : *Proceedings of the 1995 International Computer Music Conference*. Banff Centre for the Arts, Banff, Canada, 1995 (cf. p. 55).
- [WO17] Peter WILLIAMS et Daniel OVERHOLT. „Pitch Fork : A Novel tactile Digital Musical Instrument“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 62-64 (cf. p. 98).
- [WP17] Irmandy WICAKSONO et Joseph PARADISO. „FabricKeyboard : Multimodal Textile Sensate Media as an Expressive and Deformable Musical Interface“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 348-353 (cf. p. 91).
- [WSR98] Marcelo M. WANDERLEY, Norbert SCHNELL et Joseph Butch ROVAN. „ESCHER — modeling and performing composed instruments in real-time“. en. In : *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)*. T. 2. San Diego, CA, USA : IEEE, 1998, p. 1080-1084. DOI : 10.1109/ICSMC.1998.727836 (cf. p. 127).

- [WWS02] David WESSEL, Matthew WRIGHT et John SCHOTT. „Intimate Musical Control of Computers with a Variety of Controllers and Gesture Mapping Metaphors“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Dublin, Ireland, mai 2002, p. 192-194 (cf. p. 127).
- [Xia+19] Xiao XIAO, Grégoire LOCQUEVILLE, Christophe D’ALESSANDRO et Boris DOVAL. „T-Voks : the Singing and Speaking Theremin“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Sous la dir. de Marcelo QUEIROZ et Anna Xambó SEDÓ. Porto Alegre, Brazil : UFRGS, juin 2019, p. 110-115 (cf. p. 109).
- [YMW17] Gareth YOUNG, Dave MURPHY et Jeffrey WEETER. „A Qualitative Analysis of Haptic Feedback in Music Focused Exercises“. In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. Copenhagen, Denmark : Aalborg University Copenhagen, 2017, p. 204-209 (cf. p. 105).
- [Yu+11] Neng-Hao YU, Li-Wei CHAN, Seng Yong LAU et al. „TUIC : enabling tangible interaction on capacitive multi-touch displays“. In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2011, p. 2995-3004 (cf. p. 117, 180).
- [Zat13] Laura ZATTRA. „Les origines du nom de RIM (Réalisateur en informatique musicale)“. In : *Actes des Journées d’informatique musicale*. 2013 (cf. p. 49, 233).
- [Zby+07] Michael ZBYSZYNSKI, Matthew WRIGHT, Ali MOMENI et Daniel CULLEN. „Ten years of tablet musical interfaces at CNMAT“. en. In : *Proceedings of the 7th international conference on New interfaces for musical expression - NIME ’07*. New York, New York : ACM Press, 2007, p. 100. DOI : 10.1145/1279740.1279758 (cf. p. 91, 109).
- [Zic91] David ZICARELLI. „Communicating with meaningless numbers“. In : *Computer Music Journal* 15.4 (1991), p. 74-77 (cf. p. 137).
- [ZM14] Victor ZAPPI et Andrew MCPHERSON. „Design and use of a hackable digital instrument“. In : *Proceedings of the International Conference on Live Interfaces*. 2014 (cf. p. 90).

Table des figures

2.1	Méta-Orchestre, jouant collectivement sur le logiciel Méta-Mallette . . .	22
2.2	<i>Media Music room</i> , transformation d'un lieu en instrument de musique	22
2.3	Eobody, Arduino, Raspberry Pi, Bela	23
2.4	Alex McLean, live-coding avec le langage Tidal Cycles	23
2.5	Lady's Glove, The Hands, Méta-Instrument : durabilité vs. adoption . .	27
2.6	Détail d'un instrument de Pierre Gordeff	34
2.7	Entomologie musicale	40
3.1	Les instruments ne sont pas des interfaces utilisateur	50
3.2	Une courbe d'automation dans le logiciel Ableton Live	58
3.3	Partition tangible d'Enrique Tomás	58
3.4	Métaphore poétique et animale dans la pédagogie du Guqin	61
3.5	Gestes attendus, désirés, et captés sur une interface	65
3.6	Transparence pour le musicien et l'auditoire (Fels)	68
3.7	Stratégies de design d'interfaces pour le spectateur (Benford)	68
3.8	Stratégies de design d'interaction instrumentale pour le spectateur . .	69
3.9	<i>Handphone table</i> de Laurie Anderson	71
3.10	Inférences entre gestes, instrument, son et leur perception.	73
3.11	"The Sound of Glenn Gould", une inférence gestuelle	74
3.12	Exemple de gestes non-sonores dans les <i>Játékok</i> de György Kurtág . . .	78
4.1	Filigramophone : vue d'ensemble	82
4.2	Xypre : vue d'ensemble	82
4.3	La Smart Guitar de HyVibe	85
4.4	La Smart Mandolin de Luca Turchet	85
4.5	L'interface du système 360 d'IBM	85
4.6	L'interface MIDI Novation Launch-Control-XL	85
4.7	"The Sponge" de Martin Marier	87
4.8	LUNGTA de Patrick Saint-Denis	87
4.9	Donjon, performance audiovisuelle utilisant des bornes d'arcade	88
4.10	Matériaux sur la table d'un luthier numérique	88
4.11	Contreplaqué ou massif : deux usages du bois dans les DMIs	90
4.12	Adéquation entre fonction musicale, transducteur et retour primaire .	93
4.13	Agencement des capteurs et fonction musicale	94
4.14	Portabilité et permanence du contact avec l'interface.	102

4.15	La Table Sonotactile Interactive	104
4.16	La Table Sonotactile Interactive : détail du pad	104
4.17	Bande adhésive comme repère tactile de la zone d'interaction	105
4.18	Gravure d'une ligne de repère tactile sur le Filigramophone	105
4.19	Fretage virtuel par retour vibro-tactile	107
4.20	Le Fairlight CMI	110
4.21	L'UPIC de Iannis Xenakis	110
4.22	Tablette wacom	111
4.23	Filigramophone - vue d'ensemble, débranchée	112
4.24	Transducteur piezo entre la vitre et le châssis sur le Filigramophone	113
4.25	HP tactile sur le Filigramophone	113
4.26	Captation du son sur la surface du Filigramophone	114
4.27	Filigramophone et prototype du Xypre sur scène	115
4.28	Xypre v2 - plans de conception	115
4.29	Xypre - vue d'ensemble, débranchée	115
4.30	Cadre multitouch à technologie infra-rouge	117
4.31	Transducteur piezo pseudo-symétrique sur le Xypre	117
4.32	HP tactile sur le Xypre	117
4.33	Montage pseudo-symétrique de transducteurs piezo-électriques	118
4.34	Liaison acoustique entre piezo et haut-parleur tactile sur le Xypre	118
4.35	Xypre v1 inauguré durant une performance avec ONE	119
5.1	Représentation du mapping #1	129
5.2	Représentation du mapping #2	129
5.3	Représentation du mapping #3	129
5.4	Représentation du mapping #4	129
5.5	Aperçu très partiel d'un patch Max	130
5.6	Modèles intermédiaires dynamiques pour la synthèse audio-graphique	132
5.7	Clavier isomorphe dans Max	133
5.8	Correction dynamique de la hauteur	133
5.9	Utilisation d'un diagramme de Voronoï dans FIB_R	134
5.10	Représentation schématique d'un <i>MP-event</i>	141
5.11	Représentation schématique d'un <i>MP-block</i>	144
5.12	<i>mp.simpleSynth</i> : encapsulation de la synthèse	145
5.13	<i>mp.simpleSynth</i> : patcher de synthèse	145
5.14	MP : mapping avec une fonction pure	147
5.15	MP : mapping avec une fonction récursive	147
5.16	MP : <i>guestlist</i> et mapping divergent	148
5.17	MP : <i>guestlist</i> et mapping convergent	148
5.18	Sagrada : exemple de patch	152
5.19	Sagrada : horloge synchrone et assignation	154
5.20	Sagrada : schéma fonctionnel du <i>jump-buffer</i>	155

5.21	Sagrada : gestion de flux de grains	156
5.22	Contrôle de flux Sagrada avec MP	156
6.1	Évolution de la forme des ouïes du violon et projection acoustique . . .	160
6.2	Brevet sur l'amélioration du clétage des flûtes de Boehm	160
6.3	Clavier à 27 touches de Mersenne	161
6.4	Grille de hauteur micro-tonale dans MP.TUI	161
6.5	Partition "de table" à plusieurs voix	163
6.6	Interface visuelle adaptée pour 6 joueurs	163
6.7	IRCAM Spat Revolution	163
6.8	Projection monumentale, Puce Muse	163
6.9	Représentation numérique et visuelle des paramètres	164
6.10	Skeuomorphisme dans les logiciels audio	165
6.11	Apparatum, par PanGenerator	165
6.12	Visualisation temporelle à l'aide de chronomètres visuels	166
6.13	Deux échelles temporelles différentes d'un flux audio	166
6.14	Le clavier multitouch du synthétiseur Buchla music easel	168
6.15	Le Lemur de Jazz Mutant et son écran multitouch	168
6.16	Repères visuels sur différentes interfaces instrumentales.	169
6.17	Modèle intermédiaire stochastique manipulé sur écran	171
6.18	<i>Le phonétogramme</i> , application réalisée à l'aide de la librairie MP.TUI .	175
6.19	Un simple slider dans la librairie MP.TUI	175
6.20	Aperçu de quelques composants graphiques de la librairie MP.TUI . . .	176
6.21	Patch Max implémentant un groupement de composants MP.TUI. . . .	177
6.22	Composants MP.TUI groupés	177
6.23	Exemple de GUI composite avec mp.TUI.canvas	178
6.24	Maintien d'un contrôle par un objet physique	179
6.25	Maintien d'un contrôle par un objet virtuel	179
7.1	La partition de <i>Projection 1</i> de Morton Feldman	186
7.2	Partitions de <i>December 1952</i> et <i>Mycènes Alpha</i> (extraits)	187
7.3	Les membres de ONE et leurs DMIs	192
7.4	John : capture écran de l'interface client	194

Les illustrations dont l'auteur.e n'est pas précisé.e dans la légende ont été réalisées par l'auteur de la thèse et sont sous licence Creative Commons CC BY-NC-SA.

Liste des tableaux

4.1	Évolution de l'ordinateur : taille, accessibilité et capacités audio	95
-----	--	----

Colophon

Ce document a été rédigé en $\LaTeX 2_{\epsilon}$. Sa feuille de style est basée sur le modèle *Clean Thesis* développé par Ricardo Langner. Elle utilise les polices de caractère TeX Gyre Heros, Latin Modern et Charter.

Document compilé le 21 février 2020.

