



La representation dans le cadre de la composition et de la musicologie assistees par ordinateur & Parcours de recherche et creation

Mikhail Malt

► To cite this version:

Mikhail Malt. La representation dans le cadre de la composition et de la musicologie assistees par ordinateur & Parcours de recherche et creation . Musique, musicologie et arts de la scène. UNIVERSITÉ DE STRASBOURG ÉCOLE DOCTORALE DES HUMANITÉS [EA 3402 - ACCRA] 2015. <tel-01265276>

HAL Id: tel-01265276

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01265276>

Submitted on 2 Feb 2016

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

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

ÉCOLE DOCTORALE DES HUMANITÉS
[EA 3402 - ACCRA]

Parcours de recherche et création

présentée par :

MIKHAIL MALT

Dans le cadre de la soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches

soutenue le : **4 FÉVRIER 2015**

Discipline / Spécialité : **MUSICOLOGIE**

GARANT :

M. HASHER, Xavier

Professeur des Universités – Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

M. CHOUVEL, Jean-Marc

Professeur des Universités – Université de Reims

Mme GRABOCZ, Márta

Professeur des Universités – Université de Strasbourg

M. RISSET, Jean-Claude

Directeur de recherche émérite – CNRS

AUTRES MEMBRES DU JURY :

M. Andreatta, Moreno

Chargé de recherche habilité – CNRS - Ircam

M. Assayag, Gérard

Directeur de recherche - Ircam – CNRS

A l'impermanence et à l'interdépendance,
qui rendent la vie possible...

Table des matières

1	Introduction, la flûte et le « meccano »	9
2	Les antécédents	9
3	Le cadre	10
4	L'enseignement	11
5	La recherche	12
5.1	La CAO	12
5.2	Concepts	13
5.2.1	La notion d'écriture	13
5.2.2	Le solfège de modèles	14
5.2.3	Le sens des modèles – possibilités et limites	15
5.2.3.1	Modèles ensemblistes & combinatoires	15
5.2.3.2	Modèles probabilistes	17
5.2.3.3	Modèles chaotiques	18
5.2.3.4	Systèmes dynamiques et musique	19
5.2.4	Les deux logiques	19
5.3	Modélisation et formalisation	22
5.3.1	Analyse musicale	22
5.3.1.1	À l'ombre de Costère	22
5.3.1.2	Analyse symbolique par modélisation – le compositeur et ses modèles	22
5.3.1.3	L'analyse par modélisation	25
5.3.1.3.1	Achorripsis (1958), Xenakis, modélisation (2002-2005)	25
5.3.1.3.2	Structures IA (1952), P. Boulez, modélisation (1994-1995)	26
5.3.1.4	Analyse de la musique rituelle tibétaine	27
5.3.1.5	L'analyse audio, du symbolique vers le signal	30
5.3.1.5.1	Descripteurs audio, un changement d'échelle temporelle	30
5.3.1.5.2	Analyse en temps réel (zsa.descriptors)	30
5.3.1.5.3	La BStD	31
5.3.1.5.4	Analyse de la musique électroacoustique, Xenakis...	34
5.3.2	La modélisation d'œuvres ouvertes, assistance à l'interprétation - <i>Cagener</i>	35
5.3.2.1	L'interprétation assistée par ordinateur	36
5.3.2.1.1	Une problématique, les « œuvres ouvertes »	37
5.3.2.2	Cage, number pieces et Concert	38
5.3.2.3	Domaines (1968), Pierre Boulez	41
5.3.2.4	Duel (1959-1960) – Xenakis	45
6	Création	50
6.1	<i>Actrinou</i> (1992-1993)	50
6.1.1	Le projet artistique	50
6.1.1	La formalisation	51
6.2	<i>lambda 3.99</i> (1994)	59
6.2.1	Le projet artistique	59
6.2.1.1	Polyphonie virtuelle	59
6.2.1.2	Les gestes (formes) de base	60
6.2.1.3	La structure	62
6.2.2	La formalisation	62
6.2.2.1	Polyphonie virtuelle et système	63
6.2.2.2	La deuxième section de <i>lambda 3.99</i>	65
6.2.3	Conséquences dans <i>lambda 3.99</i>	68
6.3	<i>Khorwa</i> (2003)	70

6.3.1	Le projet artistique	70
6.3.2	La Formalisation	72
6.3.2.1	La formalisation de mon propre langage musicale	72
6.3.2.2	Les gestes (formes) de base	72
6.3.2.3	Les agents autonomes	73
6.3.2.4	Pourquoi des « agents » ?	73
6.3.2.5	L'implémentation et données génétiques	73
6.3.3	Conséquences dans <i>Khorwa</i>	76
6.4	Parcours (2013)	76
6.4.1	Le projet artistique	77
6.4.2	La formalisation	77
6.5	Le tapis de rêves de la bête (2014)	79
6.5.1	Le projet artistique	80
6.5.1.1	La formalisation	80
7	Interfaces & outils	81
7.1	Librairie <i>PW-alea</i> (1992), <i>OM-alea</i> (2002).	81
7.2	<i>CSound/Edit-sco</i> (1993)	81
7.3	Librairie <i>PW-chaos</i> (1994), <i>OMchaos</i> (2002),	81
7.4	Librairie « Combine » (1995)	81
7.5	Librairie <i>Profile</i> (1995)	81
7.6	Librairie <i>Rolmo</i> (2003)	82
7.7	Librairie <i>OMfil</i> (2005-2008)	82
7.8	Le <i>Psycho-lab</i> (2002-2006)	82
7.9	Les <i>IndescripTools</i> (2007-2014)	82
7.10	Le <i>Cagener</i> (2008-2014)	82
7.11	La librairie <i>Zsa.Descriptors</i> (2008-2010)	83
7.12	La librairie <i>Symb-desc</i> (2012-2014)	83
8	Recherche, création et développements	83
8.1	Modélisation et analyse	83
8.1.1	Modélisation et analyse d'œuvres ouvertes	84
8.1.2	Le groupe d'analyse des musiques électroacoustiques – SFAM	84
8.1.3	Un outil dédié aux musicologues	84
8.1.4	La segmentation	85
8.2	Sonification, création et performance	85
8.3	La représentation	86
8.4	Diverses activités, autour de la transmission	86
8.4.1	Le Coursus de l'Ircam	86
8.4.2	L'encadrement de travaux universitaires.	87
8.4.3	Le groupe d'étude autour du rythme (avec le compositeur Karim Haddad)	87
8.4.4	Le Master ATIAM	87
9	Bibliographie	89

1 Introduction, la flûte et le « meccano »¹

Ceci n'est pas un mémoire, ceux-ci sont des mémoires.

Lorsque je me penche sur mon parcours, je me rends compte qu'une table de matières linéaire n'est pas du tout appropriée pour le représenter. Ce parcours s'est fait de coïncidences, de rencontres, d'envies et d'intuitions. Force est de reconnaître qu'il n'y avait pas de grand plan, juste de la curiosité, une volonté d'action, des affinités et la rencontre avec des personnalités m'inspirant, m'encourageant, m'aidant ou me proposant des chemins.

Cependant, avec le recul je pourrais dire que de cette brume un profil se dégage, l'axe « composition – modélisation », soutenu par la problématique de la représentation, ayant comme contexte mon travail pédagogique.

Je présenterai ici les lignes principales, les articles, les publications et les faits que je considère comme majeurs sur la période de 1990 à nos jours. Si la période peut sembler longue, cela est dû à mon parcours personnel où création, recherche et enseignement étaient toujours intimement liés, l'un ne pouvant pas vraiment exister sans l'autre.

Concernant la recherche, elle sera considérée ici comme le parcours de chemins, d'apport de connaissances par l'émergence de faits, a priori connus, mais disjoints. La recherche que je pratique est plus proche de la recherche artistique que de la recherche scientifique. Une recherche tournée vers la quête de moyens pour l'expression et l'étude de la musique, soit en ce qui concerne la composition, soit ce qui concerne la performance.

2 Les antécédents

Au début était mon intérêt porté à la composition, à la création sonore aussi bien qu'aux rapports avec les mathématiques, les sciences et l'actualisation de ce rapport par le biais de la simulation et de l'aide informatique. Cet intérêt est survenu sans doute à cause de ma double formation, en ingénierie par l'École Polytechnique de l'Université de São Paulo et en composition et direction d'orchestre (cours suivi au début à l'« Escola de comunicações e artes » de l'Université de São Paulo, ensuite à la « Faculdade São Judas Tadeu », aussi à São Paulo). Encore au Brésil, au milieu des années 1980, cet intérêt s'est concrétisé par deux expériences de modélisation informatique et de composition algorithmique.

La première concernait la simulation de mélodies du grégorien, à partir d'une modélisation markovienne d'un ensemble de chants, dans le deuxième mode, du « Liber Usualis ». Cette expérience fut le fruit de ma rencontre avec Eleanor Florence Dewey

¹ « Méccano », © <http://www.meccano.fr/>.

(1912-2008), aussi connue comme mère Marie du Rédempteur, religieuse spécialisée dans la paléographie et l'interprétation du chant grégorien, avec qui j'ai étudié .

La deuxième expérience, préfigurant mon travail dans la composition assistée par ordinateur, fut la génération, la composition algorithmique d'une pièce pour percussion solo, issue de la lecture de *Musiques formelles* de Iannis Xenakis. Cette lecture a bénéficié de la gentillesse du professeur Giorgio Moscatti, physicien, intéressé aux arts, qui m'a apporté son aide pour la compréhension des écrits de Xenakis. Un programme en BASIC, sur un vieux ZX Spectrum, avec une mémoire de 48 Ko, quand même...

3 Le cadre

« À partir de 1970 environ, un nouveau terme spécialisé apparaît dans la langue française : « informatique musicale ». Son usage ne se généralise qu'au cours des années quatre-vingt, mais les premières occurrences de cette expression constituent un fait notable. De la « musique calculée » — comme on disait encore en France au début des années soixante — à « l'informatique musicale », la différence de sens n'est pas une simple nuance. Il est question, de toute évidence, de musique et d'informatique, mais le problème est de savoir si une transformation importante est associée à l'apparition et à l'utilisation de ce terme. »
[Veitl 2008, 1]

Je navigue dans le contexte, dans le cadre de ce qu'il est convenu de nommer d'« informatique musicale ». L'ennui avec cette dénomination est le fait qu'elle induit un glissement de sens par rapport au terme premier de « Computer Music », d'où elle est issue, et ne renseigne pas vraiment sur l'activité qu'elle est censé nommer. Dans le terme anglo-saxon, il est question de musique réalisée avec l'ordinateur, de l'utilisation de l'informatique à une finalité musicale (interprétation, composition et postérieurement l'étude) [Roads 1994, ix]. À partir d'une analyse grammaticale, assez superficielle, nous pourrions dire que « music » est le nom, dans ce cas précis le focus de l'expression et « computer » le qualificatif, l'épithète qui désigne une propriété du nom. « On » fait de la musique avec l'aide de l'informatique. En français, cette expression fut traduite comme « informatique musicale ». Cette traduction est ambiguë et équivoque.

Dans notre cas précis, le glissement de sens n'a pas tardé ; « informatique » est désormais le nom, le point central de l'expression et « musicale » la propriété, le qualificatif. « On » fait, alors, de l'informatique appliquée à la musique ! La musique est ici un champ d'application d'une discipline principale, l'informatique. C'est pourquoi, dans le cadre de mon travail, j'aimerais proposer le terme de « musique informatique ». Je considère l'informatique musicale comme étant de la recherche, et le développement, d'outils pour l'étude, l'interprétation et la composition musicale, tandis que la « musique informatique » est l'utilisation d'outils, proposés par l'informatique musicale, pour étudier, interpréter et composer de la musique. En musique informatique, on développe des méthodologies d'expression avec les outils.

Bien que cette différence puisse sembler académiquement un peu pédante, elle a une importance capitale dans l'établissement des objectifs dans un cadre plus large, principalement dans celui de la recherche et de la création. Pour en donner une

métaphore, l'informatique musicale est l'étude de la lutherie (dans tout ce qu'elle a de plus noble), tandis que la musique informatique est l'art de l'interprétation et de l'utilisation des « instruments » informatiques (et désormais des technologies en général) appliquées à la musique (étude, interprétation et composition). Évidemment, ces deux disciplines n'ont pas de frontières étanches. L'étude de la musique informatique se fera souvent avec un parcours dans les terres de l'informatique musicale. De même qu'un hautboïste (ou bassoniste) s'exerce à la confection d'anches, son but n'est pas perdu de vue, il est un interprète et non un luthier. Le champ d'étude et d'application dans lequel j'évolue se définit dans deux espaces : la recherche pour la création d'outils et la recherche pour l'utilisation d'outils. Dans la suite de ce texte, je m'attellerai à présenter mon expérience (pédagogique, de recherche et de création) dans un cadre assez précis qui est celui de la *musique informatique*, ou de la musique et des technologies, comme cela commence à être nommé de nos jours.

4 L'enseignement

Je dois en remercier quelques personnes, chacun à sa manière m'ayant montré une clef pour l'enseignement. Au professeur Abramo Garini, au professeur Mario Ficarelli et au professeur Giorgio Moscatti qui m'ont montré une grande générosité intellectuelle partageant sans compter ni temps ni énergie, leurs savoirs ; au professeur João Dias Carrasqueira qui m'a montré qu'enseigner en est la voie suprême pour apprendre et pour être ; au flûtiste Antonio Dias Carrasqueira qui m'a montré que la meilleure manière d'enseigner est de partager son plaisir et finalement à Mme Josette Feres qui m'a montré comment en être humble et respectueux devant ses élèves, en apprenant toujours avec eux. Grâce à ces personnalités, l'enseignement a toujours été un agent stimulant, et un moyen par lequel je pouvais partager mon plaisir par la musique, les sciences et les technologies.

Mon activité d'enseignement s'est développée dans un contexte très riche, et cela pour diverses raisons.

En France j'ai eu la chance d'enseigner dans des cursus exigeants et sélectifs², ayant eu devant moi des étudiants de haut niveau, aussi bien que des créateurs et créatrices accomplis, ce qui me permettait (et me permet encore) d'avoir des échanges riches et constructifs. Certaines de ces échanges se terminant même dans l'élaboration de concepts, d'outils informatiques tels comme le développement de la librairie « Profile », les « zsa.descriptors » et même dans l'écriture d'articles de recherche. Dans d'autres cas, comme les cours d'« outils mathématiques et technologies pour l'analyse musicale », dans le cadre du Master 1 recherche à Paris IV, ou mes cours de composition assistée par ordinateur (CAO) à l'Ircam, me permettaient, et me permettent de développer et partager mes recherches dans ces champs.

² Chargé de cours dans le département de musique de l'Université Marc Bloch, professeur associé au département de musique de la Sorbonne – Paris IV, professeur de composition assistée par ordinateur au sein du Coursus de l'Ircam et récemment coordinateur (avec Moreno Andreatta) de la partie « musique » au sein du Master ATIAM.

Ensuite, succédant à Tristan Murail pour l'enseignement de la CAO et à Gérard Assayag pour l'enseignement du langage Common-LISP, j'ai eu la chance d'enseigner une discipline en évolution. Comment enseigner la CAO ? Qu'a-t-on besoin de savoir, d'apprendre pour maîtriser la CAO ? Comment évolue cet apprentissage ? J'ai répondu à quelques-unes de ces questions dans l'article « *PEUT-ON APPRENDRE OPENMUSIC EN 3 JOURS ? – Quelques réflexions personnelles sur l'enseignement et l'apprentissage de l'écriture assistée par ordinateur* », présenté aux JIM 2012 [Malt 2011]. Je ne m'étendrai pas sur ce sujet, certes passionnant, mais je dirais simplement que dans mon cadre d'enseignement, il n'était pas seulement question de transmettre des connaissances, il y a eu un processus continu de construction de connaissances. Les outils, les concepts que j'enseignais n'avaient pas d'histoire, il fallait la créer. Par faute d'histoire, il n'existait pas d'utilisations, il n'existait pas d'exemples : il fallait les inventer. Ce fut (et s'en est encore) un processus riche et passionnant.

Les dernières années, cette activité pédagogique s'est enrichie par le fait que j'ai pu encadrer le travail de Master, de doctorat et de postdoctorat de plusieurs étudiants, en plus de participer à un certain nombre de soutenances de Master et doctorat comme jury. Évidemment, l'encadrement d'étudiants en doctorat et postdoctorat ne s'est pas fait avec une université française, mais principalement avec le département de musique de l'Université de Campinas, où je suis professeur associé depuis décembre 2007.

Je considère l'activité de relecture d'articles et de participation à des comités scientifiques, aussi comme une activité pédagogique. Ce sont des missions où je considère que l'évaluation ne doit pas être qu'un simple couperet, mais un guide ou des suggestions à proposer à des auteurs pour qu'ils perfectionnent leur travail. Dans ce cadre, j'ai eu l'occasion, et je continue à l'avoir de participer à plusieurs conférences comme membre du comité scientifique ou de relecture³.

5 La recherche

5.1 La CAO

Mon premier travail officiel en France, et à l'Ircam, a été comme compositeur en recherche au sein de l'équipe Représentations musicales⁴. Je suis toujours aussi reconnaissant à Gérard Assayag pour cette proposition qui a été marquante à plusieurs égards. Elle m'a plongé dans le monde d'une équipe de recherche, avec toutes les problématiques que j'allais rencontrer dans les années à venir, m'a confronté à cette nouvelle discipline qu'était la composition assistée par ordinateur et finalement m'a permis de développer une réflexion sur un sujet naissant. La CAO a été le contexte et le fil conducteur dans mes recherches sur les aspects épistémologiques en composition, aboutissant, d'un point de vue intellectuel, à l'inférence de deux hypothèses, le solfège de modèles et les deux logiques dans le processus de composition, que je présenterai plus en détail dans la suite de ce texte.

³ Voir CV p. 13.

⁴ D'octobre 1991 à février 1992.

De mon activité dans ce champ, quatre branches se sont développées : l'activité de recherche conceptuelle, la création, l'étude de la modélisation et de la formalisation de phénomènes sonores et finalement l'intérêt et le besoin du développement d'interfaces et d'outils logiciels pour mener à bien les recherches citées.

5.2 Concepts

Le besoin d'établir un cadre théorique et de développer des stratégies et méthodologies pour l'étude et la pratique de la composition assistée par ordinateur m'ont amené à développer quatre problématiques : la question de l'écriture, le développement du concept de « solfège de modèles », la question du rapport entre propriétés formelles et sonification de données et finalement l'hypothèse des deux logiques dans le processus de composition. Ces premiers éléments de mon travail se sont cristallisés principalement dans ma thèse de doctorat [Malt 2000] et dans plusieurs écrits par la suite. Dans les paragraphes suivants, j'exposerai et je détaillerai ces points.

5.2.1 La notion d'écriture

Dans le cadre de ma thèse [Malt 2000], j'avais proposé une formalisation de l'espace de composition. Mon hypothèse de base se fondait sur la possibilité de décomposer le processus de composition en trois espaces, pas nécessairement consécutifs, ni disjoints, mais étroitement reliés entre eux : l'espace conceptuel, l'espace d'écriture et l'espace d'interprétation. Dans mon cas précis, je m'étais consacré spécialement à l'étude des deux premiers espaces. J'avais exclu volontairement de cette étude l'étape de l'interprétation, pour me concentrer sur les rapports spécifiques entre la phase d'écriture et la phase conceptuelle⁵. Je ne reviendrais pas sur ces espaces, dont j'ai déjà exposé en détail les caractéristiques ([Malt 2000], [Malt 2006] et [Malt 2009]).

Dans ce contexte, j'avais alors besoin de définir l'espace d'écriture, l'endroit où les concepts prendront forme pour constituer l'œuvre. Pour rappel, l'espace d'écriture sera celui de la matérialisation des idées, tel comme l'espace d'une partition, l'espace de la bande, dans le cas d'une musique électroacoustique, ou l'espace de diffusion d'une œuvre, pour n'en citer que quelques exemples. Il est important de souligner que nous pouvons utiliser le mot *écriture* avec deux sens : *écriture* au sens graphique, c'est-à-dire comme moyen de notation, ou *écriture* au sens compositionnel, comme étant un processus à travers lequel le compositeur réussit à représenter et à fixer ses concepts et son imaginaire sonore sur un support quelconque. Dans mon cas précis, c'est la deuxième signification que j'ai utilisée pour le mot *écriture*, en admettant que l'écriture, au sens graphique, ne soit qu'une des manières possibles à un compositeur pour exprimer sa pensée. J'ai alors défini l'écriture musicale comme étant [Malt 2009, 203] :

« La détermination de positions d'objets dans un espace musical prédéfini par le compositeur. »

Un espace musical étant :

« Tout ensemble de paramètres représentant une réalité musicale et/ou sonore. »

⁵ Cependant, je n'ignore pas les rapports existants entre les contraintes d'exécution et d'écriture et l'interaction entre compositeur et interprète. Dans une grande partie des œuvres, l'écriture continue pendant la phase d'appropriation de l'œuvre et de répétition par l'interprète.

À partir de ces définitions, nous pouvons constater l'existence d'un espace de la partition graphique, d'un espace de diffusion sonore, d'un espace de la « bande » ou d'un espace d'une installation artistique multimédia (au sens de divers espaces artistiques). L'espace d'écriture sera le lieu de la réalisation et des choix qui permettent la réification des concepts. La définition de ce concept avait un but principalement opérationnel de proposer une vue pragmatique, et propice à la formalisation, du processus d'écriture. Cette définition s'est aussi montrée très utile dans l'enseignement de la CAO.

5.2.2 Le solfège de modèles

L'hypothèse du solfège de modèles est sans doute le concept le plus important sur lequel j'ai travaillé. En plus de résumer mes observations, en tant qu'acteur et enseignant, dans le champ de la composition assistée par ordinateur il s'est montré comme un puissant outil permettant de comprendre un certain nombre de mécanismes et de stratégies des compositeurs, utilisant la formalisation et le calcul dans leurs œuvres.

Le « solfège de modèles » n'est pas d'un solfège au sens d'un catalogue de modèles statiques, ou d'un solfège issu d'une typologie figée ; c'est plutôt le développement d'un savoir, de capacités intellectuelles et cognitives de la part du compositeur lui permettant soit de contrôler et maîtriser le résultat musical issu d'un modèle génératif formel quelconque, soit d'établir consciemment le lien entre des représentations graphiques, numériques et/ou textuelles de certains logiciels musicaux avec le résultat musical. Un solfège au sens d'aptitude à relier le comportement de deux espaces de caractéristiques différentes en tenant compte des particularités de chacun. Nous avons comme exemple le solfège classique où ce terme est utilisé dans le sens d'aptitude à relier le comportement d'évènements sonores (musicaux) au comportement d'un espace graphique de notation, soit dans le sens de l'espace graphique vers l'espace acoustique, soit de l'espace acoustique vers l'espace sonore. Dans notre cas précis, un « solfège de modèles » est la capacité d'interpréter, ou de relier le comportement d'un modèle formel (ou d'une représentation) à une situation musicale [Malt 2009, 215-220]. Ce solfège est dynamique, dépendant en grande mesure du contexte musical et conceptuel dans lequel il est appliqué. Par exemple, dans le cas de l'utilisation de modèles logiques, ce solfège dépendra des concepts qui sont en train de piloter ce modèle, et de comment le compositeur se représente l'espace musical à partir de ce modèle. Il est aussi important de signaler que nous ne parlons pas non plus de ce qui est communément connu sous l'anglicisme de « sonification » de données, soit la conversion de paramètres générés par un modèle formel quelconque dans des paramètres de l'espace musical tels que les hauteurs, des durées ou des rythmes. Ce concept me semble capital dans la compréhension du processus de composition dans le cadre informatique, où un des principaux problèmes, comme je l'avais écrit dans un texte précédant, était le fait que « pour beaucoup de compositeurs, la formalisation pouvait n'être qu'un choix, mais avec l'informatique et plus spécifiquement avec l'écriture assistée par ordinateur, la formalisation en est devenue une nécessité, un outil, un besoin impératif pour communiquer avec la machine » [Malt 2009, 214-215]. Le solfège de modèles devient cette capacité à relier, à réunir symbolique et sonore, un outil pour contrôler les processus de calcul. Comme l'écrit Xenakis : « les formules mathématiques sont ainsi apprivoisées et asservies par la pensée musicale » [Xenakis 1981b, 47], ainsi cette

habilité permet au compositeur d'asservir de calcul à la pensée musicale, et non l'inverse.

5.2.3 Le sens des modèles – possibilités et limites

Une des questions qui m'est apparue au moment de l'écriture de ma thèse [Malt 2000], issue du développement de l'idée de « solfège de modèles » fût : quel rapport existe-t-il entre les propriétés formelles de certains modèles de calcul et le matériau généré dans un espace musical donné (hauteurs, temps, intensités, etc.) ? Comment une structure formelle pourrait-elle induire, ou non, une signification musicale ? Existeraient des propriétés, des caractéristiques de certains systèmes formels induisant des caractéristiques musicales dès leur sonification dans un espace sonore donné ? Dans cette réflexion sommeillait déjà la graine de l'étude que j'ai développée récemment sur les représentations. Si un des objectifs était d'étudier les rapports cités, j'écrivais à ce moment : « *D'autre part, nous aimerions montrer que l'utilisation d'un modèle pour la formalisation n'est pas un choix neutre et révèle des aspects cachés dans les concepts sous-jacents du fait musical* » [Malt 2000, 301].

Cette réflexion, développée dans la troisième partie de ma thèse de doctorat [Malt 2000, 297 – 763], s'articulait en trois parties, chacune explorant un modèle mathématique particulier, les modèles ensemblistes et combinatoires, les modèles stochastiques et finalement les modèles chaotiques. Une autre proposition, aussi faite à cet instant, était de modéliser l'évolution d'une structure musicale par un système dynamique à états. Ensuite, entre 2001 et 2004, je procédai à une autre recherche/création sur les possibilités des modèles de vie artificielle, recherche issue principalement de mon travail sur les systèmes dynamiques. Dans les sous-chapitres suivants, je présenterai brièvement les conclusions relatives à l'étude de chacun des modèles énoncés.

5.2.3.1 Modèles ensemblistes & combinatoires

L'objectif de cette réflexion était double. D'une part, se poser la question de comment les pratiques musicales pouvaient être formalisées par des concepts mathématiques issus de la théorie des ensembles et de la combinatoire, et d'autre part proposer une approche pédagogique à des musiciens (notamment des compositeurs) de la théorie des ensembles.

Concernant les rapprochements entre propriétés et caractéristiques des modèles ensemblistes et combinatoires avec des pratiques musicales, j'avais proposé un tableau d'équivalences (Tableau 1), où nous pouvions constater le fait que les modèles ensemblistes se prêtent facilement à la formalisation de certains concepts musicaux. Par exemple, le concept mathématique d'ensemble imprègne grande partie de la pensée musicale (sinon humaine) par le fait de proposer une classification ou catégorisation de phénomènes ou objets en créant des ensembles de paramètres liés par des propriétés communes. La congruence, notamment la congruence modulo « n », permet de modéliser (ou de représenter) aisément des phénomènes circulaires ou répétitifs, tels que l'équivalence d'octave ou des formules rythmiques. Et ainsi de suite.

Modèles ensemblistes musicaux	Concepts	Opérations & Concepts abstraits
<ul style="list-style-type: none"> - La classification classique des instruments par familles de timbres - Articulation rythmique de l'espace temporel par des mesures - La tonalité - La notion d'échelle - La nomenclature musicale traditionnelle des hauteurs - Les notions classiques de phraséologie musicale - Le travail thématique de construction et de combinaison de fragments - Les applications d'un ensemble de valeurs vers un autre, - Les modes de Messiaen, - Les échelles non octaviantes de Xenakis 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensemble de paramètres liés par des propriétés communes - Groupes - Articulation d'un espace, à la base, homogène - L'équivalence de l'octave 	<ul style="list-style-type: none"> - Union, - Intersection - Produit d'ensembles (produit cartésien) - La fragmentation - Définition de relations entre les éléments de deux ensembles (relations binaires, applications et fonctions) - La congruence (relations d'équivalence entre les éléments constitutifs d'un ensemble) - L'utilisation de l'arithmétique modulo « n » - Cribles - La définition de structures algébriques (définition des opérations dont un ensemble est muni) - La substitution - La construction d'espaces de paramètres

Tableau 1 : Equivalences entre caractéristiques formelles et concepts musicaux

Cependant, le langage mathématique ayant une grande polyvalence sémantique permet de décrire le même phénomène avec deux modèles distincts. À ce titre, j'avais signalé les trois modélisations de l'échelle majeure à l'aide de cribles par Chemillier, par Xenakis et par Riotte, qui étaient différentes manières de modéliser le même phénomène amenant à des interprétations légèrement différentes [Malt 2000, 377-380]. Cette polyvalence sémantique permettra aussi d'utiliser le même modèle pour formaliser deux processus musicaux distincts, tels comme l'utilisation des modèles combinatoires, notamment la permutation, utilisée dans des contextes aussi divers que ceux des œuvres de Xenakis (ex. *Nomos Alpha*), de Grisey (*Partiels*) ou de Ferneyhough (l'ensemble de l'œuvre). Cette dernière conclusion permettra l'énonciation de l'hypothèse de l'existence « ... d'un ensemble d'opérations fondamentales dans la pratique de composition, soit un ensemble d'actions de base auxquelles tout procédé musical pourrait en être ramené » [Malt 2000, 457]. Un quanta procédural duquel toutes les autres opérations dériveraient.

Finalement, à ce moment, j'énonçais une autre hypothèse, dont je développerai les conséquences dans le mémoire d'HDR accompagnant cette courte biographie [Malt 2014], soit le fait « ... de dégager un bon nombre d'informations à partir de l'étude des modèles utilisés par le compositeur » [Malt 2000, 455]. Les modèles des compositeurs, leurs modèles de manipulation du matériau musical, étant des indices, des pistes pour accéder aux concepts fondamentaux guidant leur création. Cette hypothèse était principalement posée dans le cadre de l'étude de certains modèles combinatoires utilisés par Brian Ferneyhough, avec qui j'ai eu l'honneur de travailler entre 1993 et 1995, pour la formalisation de ses outils de composition de base, et leur implémentation en tant que librairie (librairie Combine, voir 7.4) pour l'environnement de CAO Patchwork ([Malt 1998], [Malt 2000, 413 — 455] et [Malt 2007]).

5.2.3.2 Modèles probabilistes

Si dans la partie précédente j'étais arrivé à un presque relativisme concernant les rapports entre les modèles mathématiques et leur utilisation musicale finale, il y avait encore une étude à faire concernant les rapports entre les caractéristiques des modèles et des données issues, par sonification, de modèles génératifs dans des espaces musicaux divers. Cette étude prenait pour point de départ la phrase de Xenakis dans l'édition en langue anglaise de *Musiques formelles* : « *Every probability function is a particular stochastic variation, which has its own personality (personal behavior of the particle)* »⁶ [Xenakis 1992, 246], et du beau travail de Denis Lorrain [Lorrain 1980], *Une Panoplie de Canons Stochastiques*. Le fait que Xenakis n'avait pas, hélas, développé plus cette assertion, et que le document de Denis Lorrain donnât de bonnes pistes de travail m'a semblé une opportunité de développer le sujet. Pour ce faire, j'ai développé un ensemble d'outils, sous forme de bibliothèques dans l'environnement d'aide à la composition Patchwork, pour générer des données numériques selon diverses distributions de probabilités, mais aussi pour modéliser des flux numériques par des matrices de Markov (voir 7.3). Ces outils me permettaient d'étudier, par la sonification, les rapports entre les caractéristiques des distributions de probabilités (des variables générées dans l'espace d'épreuves) et les caractéristiques des matériaux musicaux générés dans des espaces musicaux divers. Cela n'avait pas comme but de dresser un catalogue exhaustif des divers types de distributions ou de modèles stochastiques, mais de mettre en évidence et en relation les caractéristiques mathématiques de certains de ces modèles, et leur potentiel musical, comme Xenakis l'avait inféré. Autre cette phrase, Xenakis avait aussi inféré la possibilité qu'un auditeur puisse reconnaître par l'écoute répétée les divers types de distributions en les associant à des « logiques », c'est-à-dire d'avoir des modèles stochastiques comme potentiellement générateurs d'ordre ou de sens [Xenakis 1981b, 47-48]. Mes conclusions et mes expériences n'allaient pas dans le sens de Xenakis. En effet, d'après les théorèmes de Ramsey [Graham & Spencer 1990], et d'après le mathématicien Gregory Chaitin [Chaitin 1996] il est absolument impossible de démontrer qu'une suite particulière de données est aléatoire. Il est certes possible de déceler des pseudo hiérarchies locales, mais qui ne sont que des effets dus aux phénomènes de groupement auditif liés à des caractéristiques de registre, ou d'amplitude de variation de la variable stochastique.

Toutefois, certains modèles, tels que la distribution exponentielle, la distribution de gauss ou la distribution bêta, par leurs particularités formelles, permettent de générer des matériaux musicaux très caractéristiques. Certaines de ces distributions sont particulièrement bien adaptées pour représenter des concepts tels que la polarisation, ou pour formaliser certains aspects temporels. Mais ces caractéristiques ne peuvent être décelées qu'avec un grand nombre d'échantillons (la loi des grands nombres). Quelques échantillons issus d'une distribution quelconque ne permettent pas de retrouver cette distribution, ni mathématiquement ni perceptuellement. En outre, comme nous l'avons déjà signalé, il existe une grande dépendance du résultat et du registre de variation des variables stochastiques pour certaines distributions. Seule la définition de ce registre permet de déceler les différences entre les modèles générateurs. Dans certaines

⁶ « Chaque fonction de probabilité est une variation stochastique particulière qui a sa propre personnalité (comportement personnel de la particule) »

conditions de registre, il serait très difficile de discerner entre un matériau généré par une distribution uniforme ou par une distribution de gauss [Malt 2000, 694 – 700].

5.2.3.3 Modèles chaotiques

Jusqu'aux années soixante-dix, les modèles stochastiques étaient le paradigme permettant aux compositeurs de représenter et de manipuler l'idée d'ordre et de désordre. L'aléatoire étant compris comme l'antithèse de l'ordre et de l'écrit⁷. D'autre part ces modèles ont été l'archétype des processus de composition algorithmique, au point que nombreuses publications et articles les citent comme étant un des processus de base pour l'utilisation de l'ordinateur en composition musicale, comme la référence dont fait Curtis Roads : « *From a historical viewpoint, stochastic processes represent one of the most important classes of compositional algorithms (Hiller and Isaacson 1959; Xenakis 1992). It is safe to say that most composers employing algorithmic composition techniques have used stochastic processes in some form* »⁸ [Roads 1998, 868]. Avec les modèles chaotiques, les compositeurs avaient à leur disposition de nouveaux outils permettant de résoudre certains problèmes posés par les modèles stochastiques. Les modèles stochastiques, rappelons-le, sont des modèles non déterministes et qui ne donnent pas la possibilité d'un contrôle local sans contraintes extérieures. À l'opposé, les modèles chaotiques sont eux totalement déterministes et, dans certaines conditions d'initialisation fixées, ils permettent de contrôler avec finesse le résultat local. Les compositeurs avaient alors à leur disposition un nouvel ensemble de modèles permettant de générer des structures contrôlables, et qui en plus présentaient des caractéristiques concrètes et conceptuelles qui excitaient l'imaginaire des compositeurs [Malt 2000, 706].

Une première application personnelle de cette recherche fut la pièce *IMAGES+C* pour bande et images numériques, où les propriétés des systèmes chaotiques, notamment la sensibilité aux conditions initiales, étaient utilisées à des fins artistiques pour contrôler l'évolution d'une masse de grains sonores.

⁷ Voir à ce sujet [Malt 2000, 535-538] et [Hall 1984, 87-91] qui montre comment le compositeur Birtwistle utilise des processus de hasard.

pour s'opposer au processus classique d'écriture musicale.

⁸ « *D'un point de vue historique, les processus stochastiques représentent l'une des classes les plus importantes d'algorithmes de composition (Hiller et Isaacson, 1959; Xenakis, 1992). On peut dire sans crainte que la plupart des compositeurs utilisant des techniques de composition algorithmiques ont utilisé des processus stochastiques sous une forme ou une autre* ».

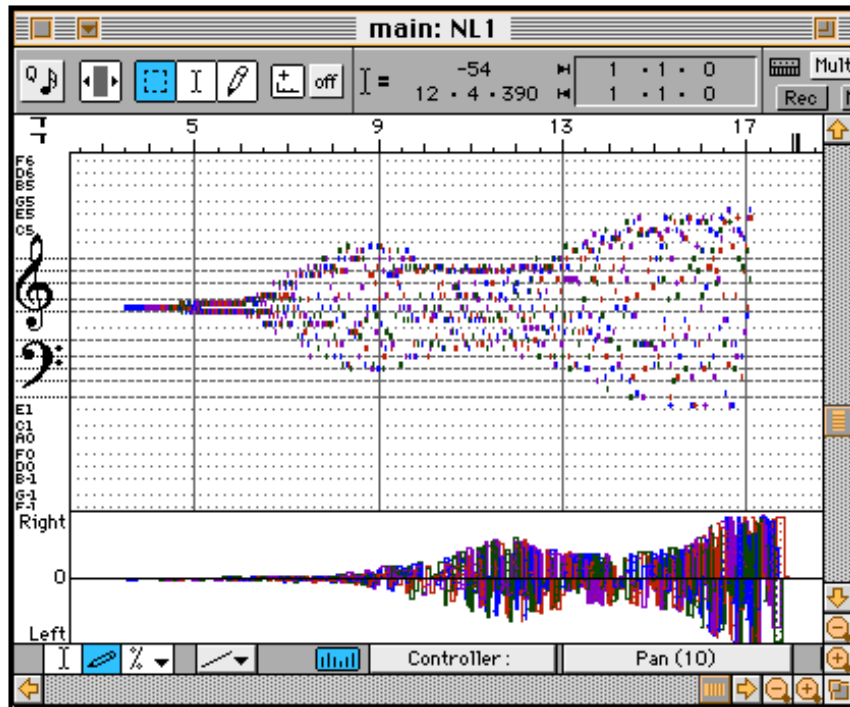


Figure 1 : Les quatre couches de matériaux superposés dans l'éditeur Studio Vision⁹

5.2.3.4 Systèmes dynamiques et musique

Un dernier point dans ma thèse fut de proposer le modèle de système dynamique à états comme modèle pour la formalisation de la structure évolutive de certaines œuvres. Cette proposition se fondait dans la continuité des travaux de Riotte [Riotte 1980], qui avait déjà proposé la formalisation de structures musicales par des automates. J'ai défini, à ce moment un système dynamique S comme étant le triplet $\{E, T, G\}$ où,

- E est un ensemble fini à p dimensions. Chaque élément $e_i \in E$ étant appelé un état de S , décrivant non un objet (musical) statique, mais toute une classe d'équivalence d'objets (musicaux).
- T est un ensemble strictement ordonné. Les éléments $t_i \in T$ sont appelés des dates.
- G est une application de T dans E , $G: T \rightarrow E$. G est appelée la fonction d'évolution de S .
- La séquence des e_i pour un T donné étant appelée une orbite de S .

Dans le cadre de mes expériences, j'avais utilisé comme fonction d'évolution G , soit des variables générées par des modèles stochastiques évoluant dans le temps (comme pour *Actrinou*, pour piano solo, voir 6.1), soit des modèles chaotiques (comme pour *lambda 3.99*, pour guitare et électronique, voir 6.2).

5.2.4 Les deux logiques

Par la suite, dans ma réflexion sur le rapport entre le calcul et le sens musical donné par les compositeurs, je me suis attardé sur la question de la logique de la pensée du compositeur dans le processus de composition. Il s'avère qu'en général les résultats des

⁹ © Opcode.

calculs sont adaptés pour se conformer à la réalité (musicale) ou à l'intuition musicale, et cela même avec des compositeurs comme Iannis Xenakis. La question à ce moment était : comment est-ce qu'un compositeur avec une rigueur logique (dans le sens de logique formelle) accepte de changer les données du calcul ? Comment peut-il gérer le décalage, la distance entre ces deux ensembles de données ? Pour répondre à cette question, je me suis remis à la formalisation de l'espace de composition, que j'avais déjà proposé ([Malt 2000], [Malt 2006a] et [Malt 2009]). Dans cette formalisation nous rencontrons l'espace conceptuel, où se trouve en général une phase d'axiomatisation, et l'espace d'écriture où se trouve l'explicitation, la réification des idées développées dans l'espace conceptuel. J'avais réalisé cette étude dans le cadre de la composition d'Achorripsis de I. Xenakis, vu que je disposais de la partition aussi bien que des textes du compositeur présentant sa propre axiomatisation.

Dans le cas précis de Xenakis, l'axiomatisation génère un ensemble de données E , l'ensemble des événements possibles. Dans l'espace d'écriture, il se donne le droit d'utiliser ces données avec une certaine liberté. Nous pouvons supposer que ces données soient transformées pour s'adapter à des contraintes musicales ou esthétiques implicites, lesquelles le compositeur, soit n'est pas conscient, soit il n'a pas réussi à les formaliser dans la phase d'axiomatisation. Cependant, Xenakis, même s'il admet qu'il n'existe pas toujours une identité entre les éléments d' E et d' E' , il n'admet pas non plus qu'ils soient différents. En dépit des changements que subiront ces données, un coefficient de corrélation garantit un degré d'appartenance entre les données telles quelles elles sont utilisées dans la composition et les données générées par le modèle. Ceci, autrement formulé, signifie qu'une cohérence est gardée entre l'axiomatique initiale et la composition finale, et que le concept d'identité est changé par celui de « similarité ».

À partir des faits présentés, nous pouvons remarquer que Xenakis a des conduites différentes, suivant qu'il est dans l'espace d'axiomatisation ou dans l'espace d'écriture. Nous pourrions inférer que lorsqu'il est dans l'espace d'axiomatisation, sa pensée et sa conduite sont régies par une logique classique. La logique formelle classique est, principalement une théorie d'inférence valide qui ne prend pas souvent en considération le contenu sémantique de l'argument. C'est une logique bivalente, excluant toute position intermédiaire entre vrai et faux. De ce point de vue soit un élément appartient (\in) soit il n'appartient pas (\notin) à une catégorie donnée. L'espace d'axiomatisation de Xenakis s'avère être régi par ce genre de logique.

Cependant, lorsqu'il est dans l'espace d'écriture, il existe que comme une fente épistémologique et sa pensée et sa conduite s'avèrent régies par une logique floue.

De ce point de vue, le coefficient de corrélation, utilisé par Xenakis, peut être rapproché de ce qu'on appelle la fonction d'appartenance dans la logique floue, puisqu'il est une sorte de mesure d'appartenance ou mesure de distance entre deux ensembles.

Soient, E l'espace de données générées par l'axiomatique, e_i étant un élément de E , et E' l'espace d'événements repérés dans la partition, e_i' étant un élément de E' . Nous avons contraint la cohérence entre l'axiomatique et l'écriture au fait que les éléments e_i et e_i' sont identiques, ce qui impliquerait que E' soit contenu dans E . Pourtant, Xenakis nous dit qu'il n'est pas nécessaire qu'ils soient identiques. En utilisant le coefficient de corrélation, il avance le fait que les ensembles E et E' ne sont pas nécessairement égaux, toutefois, il ne sont pas non plus différents. Nous pourrions inférer qu'ils sont alors « similaires », par rapport à une fonction de transformation. Même si les données

utilisées par le compositeur sont plutôt e_i' que e_i , Xenakis considère le matériau généré comme un ensemble de possibilités, un ensemble potentiel, duquel il dérivera d'autres structures, toujours avec un degré d'appartenance. Pour Xenakis, il existe similarité entre E et E' ($E \sim E'$), avec un degré défini par le coefficient de corrélation.

Les éléments de E' seraient alors issus d'une transformation appliquée aux éléments de l'espace E , telle que $e_i' = T(e_i)$ ce qui nous amène au fait que $E' = T(E)$. La fonction T sera une fonction d'adéquation des données, permettant au compositeur d'adapter l'axiomatisation au contexte musical. Cette fonction sera déterminée par des contraintes implicites et explicites liées au problème des choix dans l'espace d'écriture.

Pour qu'il y ait similarité, il est nécessaire qu'il y ait un moyen d'évaluer cette notion. La transformation des éléments de E , devra se faire avec des critères (explicites ou implicites) qui permettent au compositeur d'évaluer si l'élément transformé continue à avoir un rapport de similarité quelconque avec l'élément originel. Nous aimerions proposer l'existence d'une deuxième fonction, la fonction distance $d(e_i', e_i)$, qui évalue la distance (perceptive, logique, esthétique, etc.) entre les éléments de E et de E' .

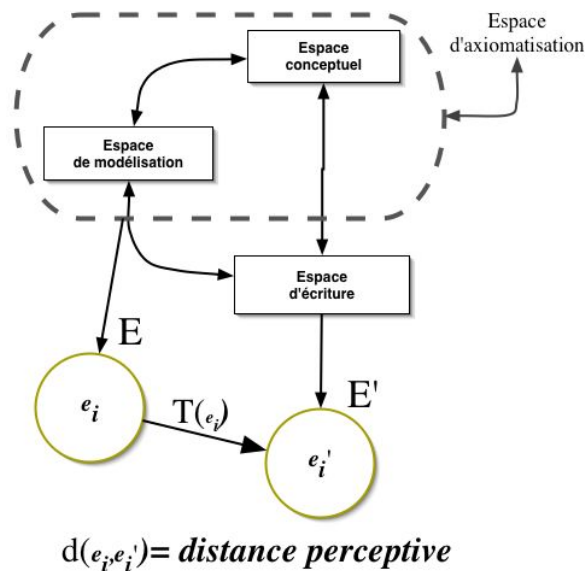


Figure 2 : L'espace d'axiomatisation, l'espace d'écriture et les deux fonctions

Comme nous l'avons vu, Xenakis, dans son travail de composition, adopte des conduites différentes en ce qui touche à l'axiomatisation et en matière d'écriture. Il utilisera l'axiomatisation, pour définir le cadre du travail à entreprendre. La logique utilisée à ce moment sera une logique classique lui permettant de déduire une théorie prescriptive.

Quand le compositeur se trouve dans l'espace d'écriture, l'axiomatisation établie, devra dialoguer avec l'intuition du compositeur et s'accommoder à des contraintes inconscientes (ou conscientes) et à des contraintes physiques imposées par le réel. Dans ce deuxième espace, l'appartenance sera un prédicat flou, et la notion d'identité substituée par la notion de similarité. Dans l'espace d'écriture, j'ai inféré l'existence de deux fonctions. Premièrement, une fonction de transformation, très personnelle, qui permet au compositeur de modifier, d'adapter le matériau généré par son axiomatique, sans que celui-ci sente nulle perte en ce qui concerne l'appartenance du matériau modifié, par rapport au matériau originel ; et une fonction distance qui permet au

compositeur d'évaluer de manière intuitive la consistance, la similarité ou la distance des données modifiées par rapport aux données proposées par l'axiomatique.

5.3 Modélisation et formalisation

La modélisation et la formalisation forment la pierre d'angle de mon travail, soit pour le développement de modèles comme des aides à la composition, dans le cadre de la CAO, soit pour le développement d'outils conceptuels et logiciels. C'est principalement ce travail qui m'a amené à l'étude théorique sur les représentations, mais aussi bien à la recherche de modèles utilisables en composition d'un point de vue opérationnel.

Si la recherche sur le plan théorique s'est poursuivie de manière traditionnelle, la recherche sur les modèles utilisables en composition s'est faite de manière très pragmatique en explorant les possibilités de différents modèles génératifs, et en s'appuyant sur l'analyse musicale, dans le but d'en déduire ou d'en comprendre les mécanismes, soit les modèles sous-jacents utilisés par les compositeurs. C'est cette dernière voie qui m'a fait m'intéresser par l'analyse musicale, aussi bien que par le développement d'outils dédiés.

5.3.1 Analyse musicale

Je considère l'analyse musicale, dans le contexte de mon travail, comme un exercice de style pragmatique de formalisation musicale, raison pour laquelle, dans un certain nombre de cas, cette analyse se finit en simulation. Dans ce cadre, j'ai entrepris quelques expériences concernant l'analyse de données symboliques, l'analyse par simulation, aussi bien que l'analyse musicale aidée par l'extraction de descripteurs audio.

5.3.1.1 À l'ombre de Costère

Une première expérience dans ce domaine fut le développement d'un coefficient de *consonances* et de *transition* d'accords fondé sur les théories d'Edmond Costère. Ce travail a été présenté aux Journées d'Informatique Musicale [Malt 1998a], et utilisé dans une bonne partie de mes pièces, dont les *Cinq reflets sur fond bleu* (2000) et les *Six contemplations* (2004), pour structurer le développement harmonique. Ce coefficient traduisait sous la forme d'une valeur numérique la sensation de *consonance* et les sensations de tension dans l'enchaînement de deux accords.

5.3.1.2 Analyse symbolique par modélisation – le compositeur et ses modèles

J'ai eu l'immense privilège de pouvoir travailler avec Brian Ferneyhough¹⁰ pour formaliser et implémenter quelques-unes de ses procédures de composition dans l'environnement d'aide à la composition Patchwork, le détail du travail se trouvant déjà exposé dans trois textes ([Malt 1998], [Malt 2000, 411-453] et [Malt 2007]). De cette collaboration est née la librairie Combine¹¹ durant les hivers de 1993, 1994 et 1995¹². Le

¹⁰ Notre première séance de travail a été entre mars et avril 1993.

¹¹ Voir [Malt 1995a] et [Malt 1996e]. Nous sommes en train de parler de la première version de cette librairie qui date de l'hiver de 1994. L'actuelle librairie « Combine » a été « réaménagée » de manière à proposer des fonctionnalités plus générales. Nous n'allons analyser que les fonctions et les procédures développées lors de la

premier but de cette collaboration était de passer la connaissance, le savoir-faire (déjà formalisé) du compositeur dans l'environnement d'aide à la composition Patchwork et de l'initier à l'EAO. Si pour la plupart des compositeurs l'approche proposée par la CAO, et plus particulièrement par l'EAO, est généralement difficile ce qui était intéressant dans le cas de Brian Ferneyhough est le fait qu'il a toujours composé en formalisant, en explicitant les relations entre les divers paramètres et entre les divers niveaux de la composition ; mais sans l'ordinateur. Pour lui la CAO n'a été qu'un pas de plus dans le sentier de l'abstraction. Comme nous l'avons déjà remarqué dans la première partie de ce travail : l'ordinateur propose un type d'approche du matériau et du contrôle des paramètres musicaux où le compositeur est sollicité à formaliser sa pensée, ce qui sans doute va changer sa sensibilité, l'enjeu sera, donc, une refonte complète de ses rapports entre l'abstrait et le concret [Barrière 1990]. Ce qui était intéressant dans le cas de Brian Ferneyhough est le fait d'avoir toujours composé en formalisant¹³, en explicitant les relations entre les divers paramètres et entre les divers niveaux de la composition ; mais sans l'ordinateur. Pour lui la CAO n'était qu'un pas de plus dans le sentier de l'abstraction. Si nous pensons qu'un modèle compositionnel (lui-même et non sa notion) puisse être le support matériel d'une musique pensée et l'explicitation d'une pratique, nous pourrions, aussi, considérer le modèle comme étant le regard (ou mieux encore l'écoute) du compositeur sur sa musique et celle des autres. De ce point de vue la librairie « Combine » nous fournit un nombre important d'informations qui nous permettent de mieux comprendre comment s'organise, au niveau de la syntaxe, le langage musical de Brian Ferneyhough.

C'est en travaillant avec Brian Ferneyhough, en appréciant sa manière de travailler qui m'est venue l'idée du concept de « solfège de modèles ». Brian Ferneyhough était (et en est encore) capable d'enchaîner quatre, cinq six de ses procédés de permutation, assez complexes, et de pouvoir en estimer le résultat, non seulement numériquement, mais aussi d'après son potentiel artistique et musical.

De cette période de collaboration, d'analyse de son langage musical et après réflexion sur les outils que propose la librairie « Combine », il m'a été possible de tirer certaines conclusions quant à la syntaxe du langage de Ferneyhough et quant à l'évolution de son utilisation de l'écriture musicale assistée par ordinateur, notamment par l'examen des modèles de calcul qu'il utilise :

- Les modèles ensemblistes et combinatoires sont utilisés comme un paradigme de la manipulation *discrète* des objets. Ce qui entraîne aussi un privilège de la manipulation symbolique du matériau musical, et témoigne, sans doute, de toute une conceptualisation de l'espace musical en classes d'équivalences discrètes, ou en catégories.
- Ces mêmes modèles sont utilisés comme une manière de générer et de transformer un matériau de base, comme une manière d'établir des liens syntaxiques et sémantiques entre les divers niveaux de la composition. La permutation et ses stratégies dérivées sont considérées comme une méthodologie pour établir des cohérences.

première version de cette librairie qui était beaucoup plus proche de la pensée compositionnelle de Brian Ferneyhough.

¹² Périodes durant lesquelles le compositeur enseignait au « Cours de Composition et d'Informatique Musical » à l'IRCAM.

¹³ Voir entre autres [BOROS 1990] et [BOROS 1994].

- En ce qui concerne le temps, nous pourrions dire :
 - Qu'il est envisagé comme un espace discret et fini (un espace de durées), et formalisé par le biais de la subdivision (ou multiplication) discrète d'unités de temps ;
 - Que les mesures ne sont pas utilisées de manière métrique, mais comme des segments temporels de tailles diverses, comme une manière de contrôler l'évolution de la densité des événements ;
 - Que la notion de densité est liée à une relation entre les subdivisions (ou nombre de pulsations) par unités de temps, à savoir les mesures ;
 - Enfin, que l'utilisation de schémas rythmiques se fonde sur des proportions issues d'un schéma fondamental par diverses opérations combinatoires (le compositeur, disions-nous, pousse le système des prolations jusqu'à ses limites).
- Les processus sont développés de manière à explorer leurs diverses facettes, voire leurs propres limites, par exemple dans la mise en abîme de structures autosimilaires par emboîtement et par jeux de proportions.
- L'informatique est utilisée comme une plate-forme pour générer un « champ de possibilités » qui sera filtré, pour ainsi dire, par l'esthétique et par les intuitions du compositeur. Nombre des processus développés par Brian Ferneyhough sont des dispositifs heuristiques générant des réseaux, des grilles à recombinaison, à retravailler et « reparcourir » par le compositeur.
- On constate une évolution générale vers une utilisation de l'environnement comme outil pour la génération et le traitement d'objets musicaux plus complexes, tels que des figures rythmiques avec plusieurs niveaux d'emboîtement. La trajectoire de Ferneyhough apparaît ainsi comme un approfondissement dans la complexité de la formalisation, comme une sorte de parcours dans son propre espace musical, une longue et patiente formalisation de son propre métier, allant des permutations des représentations rythmiques internes de la plate-forme informatique jusqu'à des formalisations qui s'approchent davantage des procédures heuristiques utilisées dans l'intelligence artificielle. Le compositeur ne manipule plus des représentations internes du logiciel, mais s'attaque à des structures de niveau supérieur telles que les cellules rythmiques et mélodiques. À partir de procédures combinatoires, il parvient à générer des morphologies, des gestes identifiables, à plusieurs niveaux¹⁴.
- Enfin, on est tenté de qualifier de *solfège de modèles* le savoir qui se dégage de l'examen de ces divers outils et de leur mise en œuvre : le compositeur se représente des paramètres et des processus musicaux par le biais de certains modèles logiques (modèles combinatoires). Ce qui nous induit à conclure que, dans le cas de Ferneyhough, l'utilisation de la formalisation n'est pas une croyance pythagoricienne en un pouvoir quelconque des nombres, mais une manière d'explicitier une pensée musicale.

¹⁴ Ferneyhough a par ailleurs utilisé la librairie « Morphologies » (de Frédéric Voisin et Jacopo Baboni Schilingi), qui permet l'analyse de régularités dans des structures séquentielles de données. Avant de procéder à des opérations combinatoires telles que l'insertion de matériau dans une structure primaire (comme dans les fonctions « Muzak »), le compositeur essaie de détecter des régularités structurelles pour déterminer les points d'insertion du matériau nouveau, de manière à obtenir un contrôle plus grand, non seulement sur le procédé, mais aussi sur le résultat musical.

Il est évident que cette première réflexion (syntaxique) ne permet pas d'expliquer et d'éclaircir sémantiquement tout le fonctionnement du langage musical dans l'œuvre de Brian Ferneyhough. Cependant, ce que nous avons voulu montrer est la possibilité de dégager un bon nombre d'informations à partir de l'étude des modèles utilisés par le compositeur. Il nous semble évident que toutes ces considérations nécessitent, encore d'une validation par la connexion avec la réalité de l'écriture dans des œuvres musicales.

Pour résumer, ce travail a permis d'émettre une autre hypothèse de travail, qui est celle que les modèles utilisés par les compositeurs sont une porte ouverte sur leur pensée.

5.3.1.3 L'analyse par modélisation

Avec le travail sur *Achorripsis* (1958) – Iannis Xenakis, commencé lors de mon D.E.A., avait commencé aussi une phase de mon travail dédié à l'analyse par modélisation.

La construction de modèles informatiques d'œuvres musicales n'est pas un processus neutre. Il est fondamental de bien connaître les œuvres en l'étude, de comprendre les contraintes proposées par le compositeur, ainsi que le contexte historique de sa création. Mais ces données sont quelques fois insuffisantes pour bien réussir, ou accomplir, le processus de modélisation. Dans le cadre informatique, il est souhaitable de pouvoir simuler le modèle construit, cela permet d'explorer la topologie de l'espace paramétrique aidant dans la compréhension des choix du compositeur. Chaque œuvre de a une partie de la liberté et d'ambiguïté. Ces « trous » doivent être colmatés pour qu'on puisse mener à bien le processus de modélisation. Cela nous oblige à prendre des décisions, soit en fonction de nos hypothèses de travail (fondées sur des bases musicales et musicologiques), soit par rapport à une étude sur la méthodologie du compositeur, soit finalement en émettant de nouvelles hypothèses.

Le processus de modélisation est ainsi transformé en une analyse pragmatique des phénomènes musicale.

5.3.1.3.1 *Achorripsis* (1958), Xenakis, modélisation (2002-2005)

La première question qu'on pourrait se poser est : « Encore *Achorripsis* ? »¹⁵ Ou pourrions-nous nous dire, comme Xenakis : « il ne faut pas réveiller les morts ! »¹⁶. En ce qui me concerne, *Achorripsis*, en raison des problèmes qu'elle soulève et des thèses qu'elle propose est l'une des œuvres capitales pour la compréhension de la pensée compositionnelle d'Iannis Xenakis. Il reprendra plusieurs de ces thèses pour la composition de toute une série de pièces à partir de 1962 (les pièces *ST* – *ST4*, *ST10* et *ST48*, *Morsima-Amorsima* et *Atrées*). Ce retour, quatre ans plus tard, nous montre comment les problèmes posés dans et par cette œuvre ont été importants, au point que Xenakis les reprenne au moment où il a eu les moyens informatiques appropriés.

¹⁵ Au début de l'année 1991, j'ai eu l'honneur de rencontrer pour la première fois Makis Solomos, sur les « bancs » du D.E.A. de Musique et Musicologie du XX^e siècle, à l'Ircam. En apprenant que je m'intéressait par Xenakis, il m'avait demandé sur quelle œuvre, à quoi j'avais répondu : « – *Achorripsis* », à quoi il s'exclama « – Encore *Achorripsis* ? ».

¹⁶ « *Il ne faut pas réveiller les morts* », c'est la réponse que Xenakis donnait d'habitude lorsqu'on lui posait des questions sur *Achorripsis*, pièce que le compositeur jugeait ratée. Cela m'a été rapporté par le compositeur palestinien, Anastas Mounir, élève de Xenakis début 1991.

Le contexte conceptuel de cette pièce fondée sur l'utilisation d'une certaine classe de modèles stochastiques, la question xenakienne « Quel est le minimum de contraintes logiques nécessaires à la fabrication d'un processus musical ? »¹⁷, ainsi que son importance historique pour la composition musicale, de ses liens avec des techniques de composition contemporaines, et finalement comme un témoin du processus de pensée de Xenakis en font d'*Achorripsis* une source encore non épuisée d'éléments de réflexion.

Après mon D.E.A., j'affrontais la recherche pour ma thèse, et dans ce contexte, je reprenais l'analyse commencée et je l'approfondissais. De ce travail sont issues deux simulations, une en temps différée (PatchWork et OpenMusic) et une autre en temps réel (Max/MSP). Ces deux travaux ont été présentés lors de l'« International Symposium Iannis Xenakis », à Athènes en mai 2005 [Malt 2005b].

Le modèle informatique de la pièce de Xenakis *Achorripsis* crée sous l'environnement d'aide à la composition OpenMusic est actuellement distribué par le Forum Ircam, dans le dossier « OM_Contributions », comme un exemple d'application.

5.3.1.3.2 Structures IA (1952), P. Boulez, modélisation (1994-1995)

L'implémentation de *Structures IA*, s'est faite d'après l'article de Ligeti [Ligeti 1960], pour une utilisation pédagogique et artistique.

Cette simulation n'a jamais été publiée, par contre une de ses conséquences a été son utilisation dans la pièce *IMAGES+C* (1995) pour bande et Images numériques. Dans la deuxième section de cette pièce, j'ai construit une couche de grains avec une évolution de leur densité. Cette couche avait une fonction de résonance par rapport à une autre couche de sons percussifs. Pour cela j'ai utilisé le processus algorithmique des Structures IA, avec l'application de fonctions de transfert pour la distorsion temporelle (pour construire un rallentando de la structure résonante) et une substitution des hauteurs par un autre réservoir, telle comme cela est illustré par la Figure 3.

¹⁷ Iannis Xenakis, *Musiques Formelles*, Paris, Stock, 1981, p. 33. Je pense que cette question pourrait se relier aux questionnements qui se développaient, au même moment, dans le contexte des arts plastiques, notamment dans le mouvement Gutai, où il était question de se poser la question de « quel était le matériau d'un œuvre d'art » ? L'œuvre d'Atsuko Tanaka, *Yellow Cloth* (1955), en est un exemple, puisqu'elle propose entre les lignes le même questionnement de Xenakis.

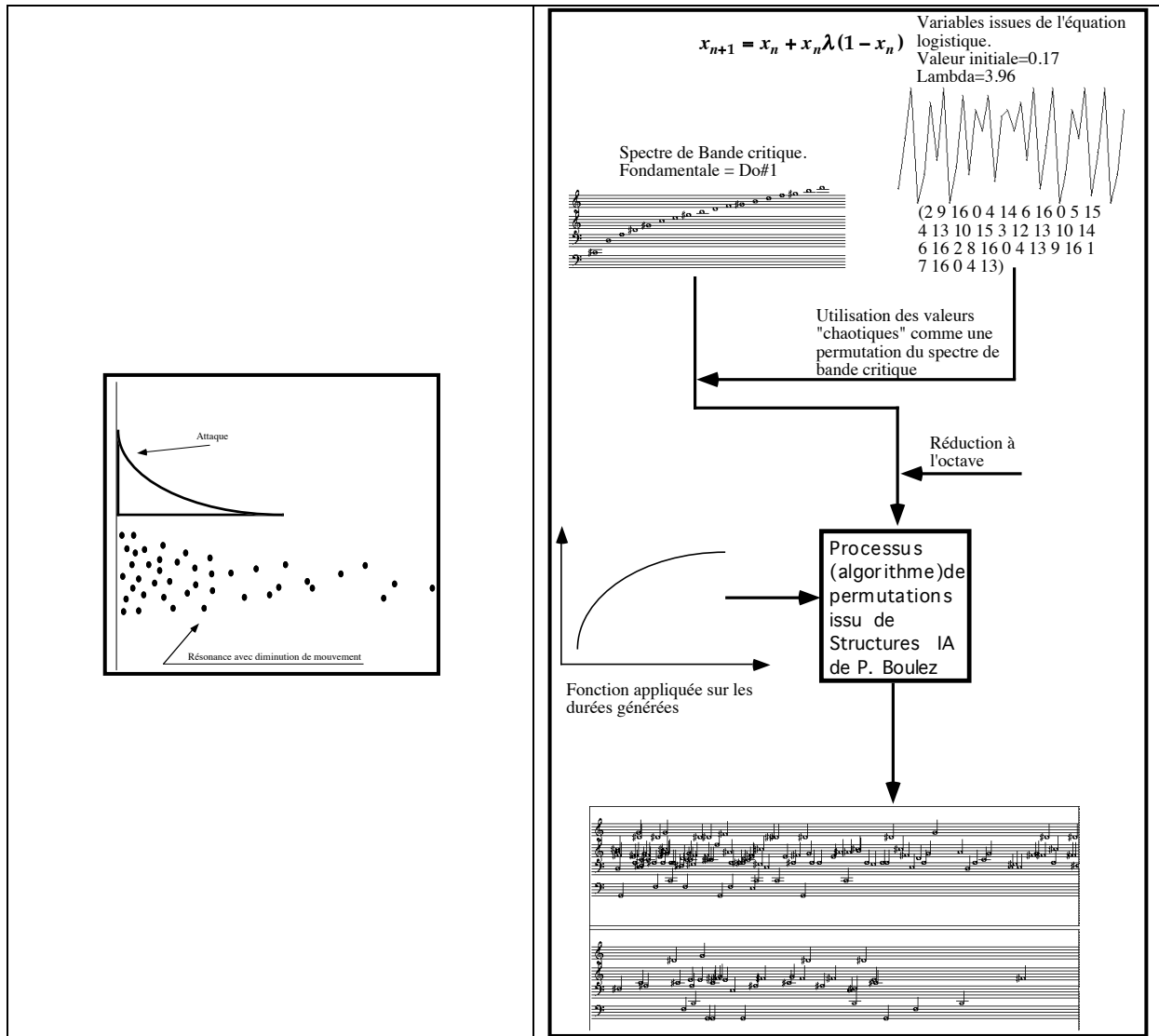


Figure 3 : Processus de distorsion structurelle utilisé dans la 2^é section de *IMAGES+C*

5.3.1.4 Analyse de la musique rituelle tibétaine

J'ai eu l'occasion (et l'honneur) de collaborer avec Mireille Helffer, ethnomusicologue dont le champ de travail est la musique rituelle tibétaine. Nous avons comme projet l'analyse et la modélisation de la musique rituelle tibétaine, notamment celles des ensembles (constitués de cymbales, tambours (*rnga*), trompes longues (*dung-chen*) et hautbois (*rgya-ling*). La motivation pour ce travail était fondée sur le fait que, pour les ensembles, cette notation était inexistante et même des documents permettant de définir ces rapports étaient aussi très rares. Il est important de remarquer qu'en général le tambour (*rnga*) double les cymbales (*sbug-chal*), qui sont jouées par le maître de chant. Ces deux instruments partageant la même organisation rythmique.

Les données primaires pour ce travail se constituaient d'enregistrements de terrain (réalisés par Mme Helffer) et de quelques de notations linéaires (ou chiffrées), concernant les cymbales (*sbug-chal*), les tambours (*rnga*) (Figure 4) et le petit tambour en sablier (*damaru* ou *cang-te'u*), et de notations neumatiques, concernant les trompes longues (*dung-chen*), les trompes courtes (*rkang-gling*), les conques (*dung-dkar*) et la

voix. Cependant, ces notations étaient très variables soit en fonction de la tradition à laquelle elles appartenaient (Nyingma, Kagiü, Sakia ou Geluk), soit par rapport au monastère qui les avait produites. Dans tous les cas, l'utilisation des diverses notations et de la synchronie entre les diverses parties instrumentales n'est presque pas notée (sauf dans le cas des « cymbales » et des « tambours » qui sont censés jouer « ensemble »), et dépend en grande partie d'une transmission orale. Certains instruments tels que les hautbois (*rgya-ling*) ou la petite cloche (*dril-bu*) n'ont pas de notation. Le répertoire est « mémorisé », et dans le cas d'instruments jouant par deux, comme les *rgya-ling*, l'exécution des morceaux se fait par « imitation ». L'instrumentiste moins habile suit « visuellement » le « doigté » de l'instrumentiste plus habile.

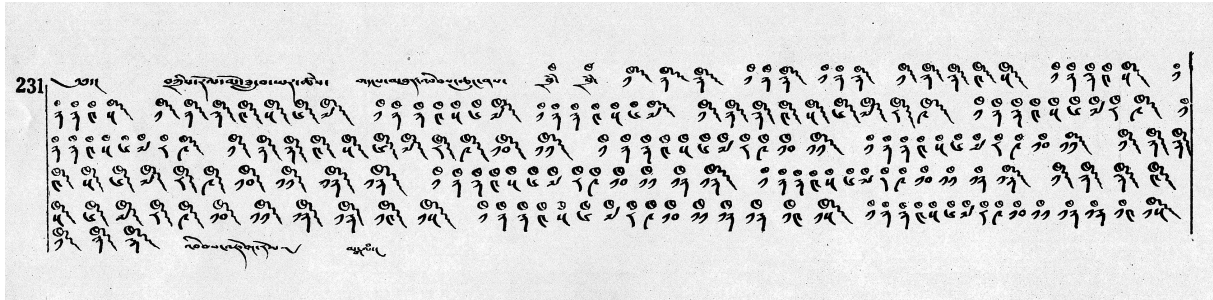


Figure 4 : Exemple de notation pour les cymbales (sbug-chal), tradition Nyingma

Nous nous rendîmes compte que le travail analytique nécessitait d'un support écrit et/ou graphique, la première étape de cette recherche nous amenant à la nécessité de générer ce support.

La première phase fût alors de proposer des outils permettant d'accélérer le travail de solfège, pour l'élaboration de partitions d'écoute et de travail. Cela était intéressant, puisque ça permettait de rapidement transcrire plusieurs matériaux. J'avais travaillé à ce moment en combinant l'Acousmographe et OpenMusic, en les reliant à travers la librairie Rolmo (voir item 7.6). Le processus de transcription commençait avec l'élaboration d'une partition schématique avec l'Acousmographe. Le sonagramme étant utilisé comme un repère pour identifier la hauteur des notes, le début et la fin des événements, dont la durée, et aussi les divers instruments, en fonction du registre où ils évoluaient. À partir de cette méthodologie, une première partition schématique fût élaborée (Tableau 2). Il est important de remarquer que dans ce travail de transcription nous sommes passé par plusieurs tentatives de notation et transcription, ce qui nous a amené naturellement à une réflexion au sujet des notations, notamment sur leurs propriétés heuristiques et du fait que chacune était un point de vue, une perspective, un éclairage sur notre objet d'étude.

1	<i>rgya-gling</i>													
	<i>sbug-chal</i>													
	<i>rnga</i>													
2	<i>rgya-gling</i>													
	<i>sbug-chal</i>													
	<i>rnga</i>	sbram sbram byes 1 2 3 byes 1 2 3 byes thang												
3	Notation tibétaine originale													
4	Trans-notation		<i>sbra</i> <i>m</i>	<i>sbram</i>	<i>djé</i>	1	2	3	<i>djé</i>	1	2	3	<i>djé</i>	<i>bram</i> + <i>thang</i>
			0	0	o	0	0	0	o	0	0	0	o	0~

Tableau 2 : Notations pour la transcription de la musique rituelle tibétaine

Malheureusement, nous n'avons pas pu finir la recherche, faute de cadre institutionnel ; cependant Mme Helffer a bien voulu publier une partie de nos travaux dans un article de 2004 [Helffer 2004].

Dans son article « Regard sur les formes dans la musique rituelle du bouddhisme tibétain » [Helffer 2004, 20-21], Mireille Helffer utilisera finalement la transcription de l'exemple 2 du Tableau 2 comme un essai de segmentation et de mise en tableau paradigmatique des mélodies des hautbois.

En plus de ce travail, nous avons aussi commencé à travailler sur le décryptage de l'interprétation de la notation pour longues trompes (*dung-chen*), Figure 5. J'avais l'intuition que derrière les graphies des notations musicales tibétaines se cachait une écoute, une perception du sonore associant plusieurs dimensions ou caractéristiques de l'espace musical. Ces notations, en forme de courbes, semblaient encoder plusieurs types d'actions : le changement d'harmonique, d'intensité, de hauteur, etc.

Si ce début de recherche n'a pas laissé de trace écrite, elle a bien laissé une trace dans mon esprit. Je remarquais à ce moment le besoin de méthodes permettant d'extraire de l'information à partir des sources audio, et je posais aussi l'hypothèse que les notations tibétaines (pour la voix et pour les longues trompes) reflétaient une manière d'écouter.

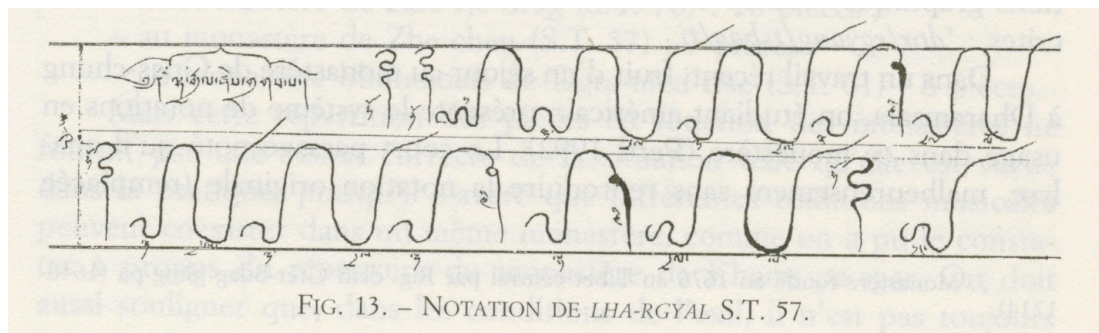


FIG. 13. – NOTATION DE LHA-RGYAL S.T. 57.

Figure 5 : [Helffer 1994], Le « Grand compatissant »

5.3.1.5 L'analyse audio, du symbolique vers le signal

Ces dernières recherches sur la signification des notations tibétaines pour les trompes longues, ainsi que l'écoute de Yangs (les chants rituels), m'avaient indiqué que l'analyse audio serait certainement très utile dans le processus de modélisation. Cela m'a amené tout naturellement à m'intéresser à l'extraction de données numériques à partir de flux audio, et par conséquent aux différentes descriptions analytiques : les « descripteurs audio de bas niveau ».

5.3.1.5.1 Descripteurs audio, un changement d'échelle temporelle

Une phase de recherche s'est suivie (nous sommes en 2003/2004). Il n'existait pas d'environnements disponibles pour l'analyse musicologique à partir de données audio. Il existait, certes des logiciels permettant l'analyse sonographique, comme l'Acousmographe ou Audiosculpt. Le travail de Geoffroy Peeters [Peeters 2004], récemment publié, n'était disponible que sous la forme de scripts matlab, encore non distribués librement.

À ce moment je commence une recherche sur les descripteurs audio, sur les manières de les calculer, sur leurs utilisations. J'avais fait un certain nombre de maquettes et d'implémentations en Max/MSP, en utilisant la librairie FTM. Cependant, cette première implémentation était lourde et gourmande en calcul. En collaboration avec Emmanuel Jourdan, réalisateur en informatique musicale chargé de l'enseignement à l'Ircam et ingénieur de développement à Cycling74, nous avons conçu la librairie « zsa.descriptors », permettant le calcul d'un certain nombre de descripteurs en temps réel. Cette nouvelle librairie nous proposait une plateforme d'expérimentation assez flexible [Malt, Jourdan 2008] ce qui nous a permis de mener un certain nombre d'expériences.

5.3.1.5.2 Analyse en temps réel (zsa.descriptors)

Un autre domaine, qui commençait à m'intéresser, pour des raisons personnelles (artistiques) et aussi pour des raisons pédagogiques était le temps réel. Depuis la fin de ma thèse, je commençais à transférer les connaissances développées pour les environnements de CAO dans des environnements temps-réel. L'installation *Khorwa* (voir 6.3) en sera une étape de ce processus.

En revenant à l'analyse, le problème posé à ce moment était : comment inférer de l'information à partir de flux audio en temps réel, notamment dans le cas de la musique mixte ? Le développement de la librairie `zsa.descripteurs` m'a poussé à m'intéresser en profondeur au monde du traitement du signal. L'analyse audio, les transformées de Fourier, les algorithmes de recherche de pics, les algorithmes de segmentation, etc. Avec Emmanuel Jourdan, nous avons conçu un outil bien intégré dans l'environnement Max, nous permettant de faire des expériences, en plus de pouvoir proposer aux jeunes compositeurs du Coursus de l'Ircam un moyen alternatif pour la détection d'évènements. Une série d'expériences, que nous avons décrites dans l'article « Real-Time Uses of Low Level Sound Descriptors as Event Detection Functions » publié dans le *Journal of New Music Research* [Malt, Jourdan 2011], s'en sont suivi. Dans cet article nous proposons trois expériences dédiées à la construction de fonctions de détection d'évènements fondées sur quatre descripteurs audio : la pente spectrale pour la détection d'attaques dans des conditions de captation sonore difficile (dans ce cas précis le basson), l'écart type spectrale pour la détection de percussions avec les clefs avec le sax et finalement la construction de descripteurs composés (la brillance et l'écart-type spectral) pour la détection de consonnes (fricatives et sibilantes). Ces méthodes ont été utilisées par plusieurs compositeurs en Coursus 1 et Coursus 2, et nous continuons à les enseigner.

5.3.1.5.3 La BStD

Ces expériences nous ont menés, avec Emmanuel Jourdan [Malt, Jourdan 2009], à développer une représentation, des caractéristiques audio d'une séquence audio, fondée sur trois descripteurs audio : la brillance (centroïde spectral), l'écart type spectral et l'énergie du signal. Cet intérêt se fondait sur deux faits. Premièrement, il y a déjà presque quarante ans que John Grey [Grey 1975] avait mis en évidence le fait que la brillance était un des trois principaux paramètres pour la caractérisation du timbre. Cette idée s'est vue renforcée et développée particulièrement par les travaux de Wessel [Wessel 1979] et McAdams [McAdams et coll. 1995]. Plus récemment, notamment dans le cadre du MIR (« Music Information Retrieval », soit de l'extraction, traitement et recherche de l'information musicale¹⁸), plusieurs travaux ont montré la pertinence de l'utilisation de la brillance [Livshin, Rodet 2004] comme étant l'un des 10 descripteurs les plus importants pour l'identification du timbre instrumental et comme un bon estimateur de la brillance spectrale perçue [Shubert, Wolfe 2006, p. 823-824].

En deuxième lieu, concernant l'écart-type spectral, Frédéric Chiasson [Chiasson 2007] avait suggéré qu'il pouvait être rapproché du paramètre musical appelé « volume » par Koechlin [Koechlin 1943]. Ce que Koechlin appelle volume étant l'épaisseur du son.

Notre objectif était de proposer une représentation de l'évolution de ces paramètres, dans une forme graphique où la position verticale (ordonnée) de son barycentre représentera la brillance, la hauteur (autour de la brillance) de cette forme l'écart-type spectral et la couleur, l'intensité du signal (Figure 6). Comme nous pouvons l'observer, la BStD est une représentation en trois dimensions. L'abscisse représente le temps d'évolution des paramètres, l'ordonnée l'espace des fréquences et la troisième dimension (soit la couleur ou le niveau de gris) représentant l'amplitude. Il est important de signaler que la forme qui est représentée dans l'axe vertical n'est pas un

¹⁸ Traduction donnée par Michel Fingerhut en communication personnelle aux auteurs le 9 octobre 2007.

sonagramme, mais une forme qui par la position de son barycentre indique la brillance et par son étendue verticale le « volume spectral » ou le « registre spectral ».

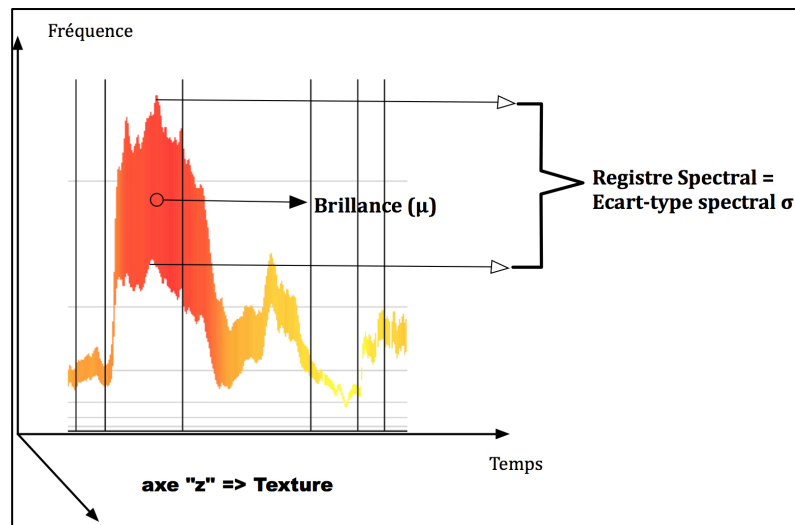


Figure 6 : La représentation graphique « Brillance-écart type » [Malt, Jourdan 2009]

Par la suite [Malt 2012], j'ai proposé que cette représentation puisse illustrer l'évolution de la « masse sonore » dans le cadre de l'analyse de musiques électroacoustiques, en définissant une « masse sonore » comme un registre spectral et une texture. Le registre spectral étant défini par le couple $\{(C - \frac{S}{2}), (C + \frac{S}{2})\}$, où C est la fréquence du « centroïde spectral », S l'écart-type spectral ($C + \frac{S}{2}$ étant la borne supérieure du registre et $(C - \frac{S}{2})$ la borne inférieure). La texture sera représentée par une ou plusieurs caractéristiques sonores, telles que l'amplitude du signal, son énergie, le flux spectral (ou variation spectrale), la « spectral flatness », la rugosité, ou autres. Ce qui est intéressant dans ce cas est la construction d'une représentation graphique à partir de trois descripteurs, soit trois représentations du contenu audio.

Pour en donner un exemple, soit un extrait (de 4'14 à 4' 28) de la deuxième partie, *Accidents/Harmoniques*, de *De Natura Sonorum* de Parmegiani, œuvre composée en 1975¹⁹.

Dans cet extrait, à un son tenu, de fréquence fondamentale à 436.465 Hz avec quatre harmoniques, se superposent trois évènements que nous pourrions appeler de « stationnaires », selon la nomenclature des UST. Les deux premiers (1er départ à 4'16", durée 3"544 et le 2e départ à 4'20" durée 3"267) présentent un caractère percussif avec des caractéristiques temporelles de « freinage », soit une enveloppe d'amplitude ondulatoire et amortie (voir l'évolution de l'amplitude dans la Figure 7). Le troisième évènement est une large bande de bruit (départ 4'25"449 durée 0.1"), courte et de

¹⁹ L'enregistrement utilisé est une numérisation du côté A du disque vinyle de la création (3 Juin 1975), réalisée par le « Avant Garde Project ». Le fichier original était en format FLAC. Celui-ci a été converti au format AIFF et traité, pour supprimer le bruit de fond avec l'outil de « noise removal » du logiciel Audiosculpt. Cette opération nous a été nécessaire compte tenu de la présence d'un bruit de fond trop importante, qui engendrait des distorsions considérables dans la forme générée.

caractère percussif. Dans la partition de diffusion de *De Natura Sonorum* [Thomas et al. 1983, 9], Bernard Parmegiani, ne détaille pas ces trois événements, mais note entre 4'20 et 4'30 deux événements dénommés « vibra ». En suivant l'évolution individuelle des trois descripteurs utilisés (Figure 7), nous constatons que cet extrait est un phénomène physiquement complexe. Même s'il existe une forte corrélation entre les trois descripteurs, chacun décrit un axe paramétrique différent. En les comparant, nous remarquons que la variation d'écart type spectral est proportionnellement plus importante que la variation du centroïde spectral, signifiant le poids de ce paramètre dans l'évolution de ces gestes.

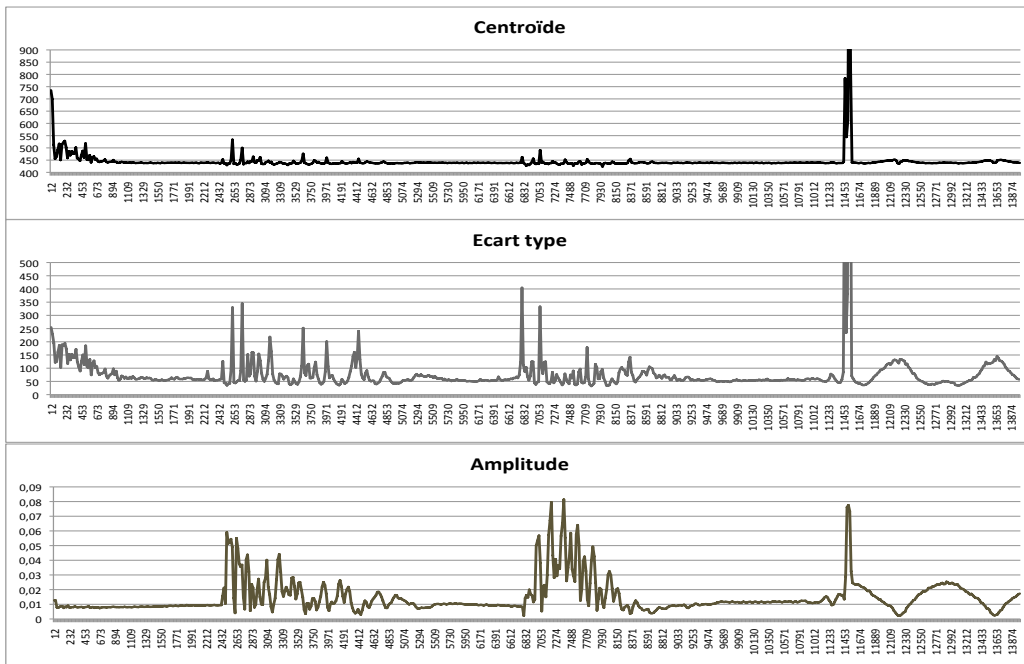


Figure 7 : L'évolution des trois descripteurs pour l'extrait de 2. *Accidents/Harmoniques*, (4'14 à 4'28)

Le centroïde varie peu pour les deux premiers gestes. Le pic pour le premier geste de +/- 534 Hz représentant un écart de 343 cents. Pour le deuxième geste, le pic est de 456 Hz, soit un écart d'approximativement 70 cents. Dans les deux cas, ces pics sont placés dans les transitoires d'attaque, ce qui signifie qu'ils sont pour ainsi dire cachés. En ce qui concerne la variation et l'ondoiement amorti de l'écart type, celui-ci est beaucoup plus important. L'écart type moyen, entre 4'15'' et le départ du premier geste est de +/- 60 Hz. À 4'16.769'' l'écart type a un pic de 344.9 Hz, soit une variation de 3028 cents, soit 30 demi-tons. Pour le deuxième geste un pic plus important, de 404.43 Hz, se trouve à 4'20.09'', soit l'équivalent à 3303 cents. Le troisième événement, présente un pic d'écart type de 2451 Hz à 4' 25.529'', caractérisant bien la bande de bruit. La Figure 8 présente la BStD, ou l'évolution de la masse sonore, en comparaison avec la représentation en forme d'onde et le sonagramme.

Il est aisé de s'en apercevoir comment la forme générée, par le rassemblement de ces trois représentations (aussi dénommés des descripteurs audio de bas niveau), épouse visuellement les phénomènes décrits, présentant clairement un aspect d'ondulation amortie, par la variation presque périodique de la dimension de l'écart type spectral et

par la variation, également périodique de l'amplitude. Cet extrait est un exemple de comment les formes générées par la BStD condensent l'information contenue dans trois descripteurs de bas niveau (Figure 7).

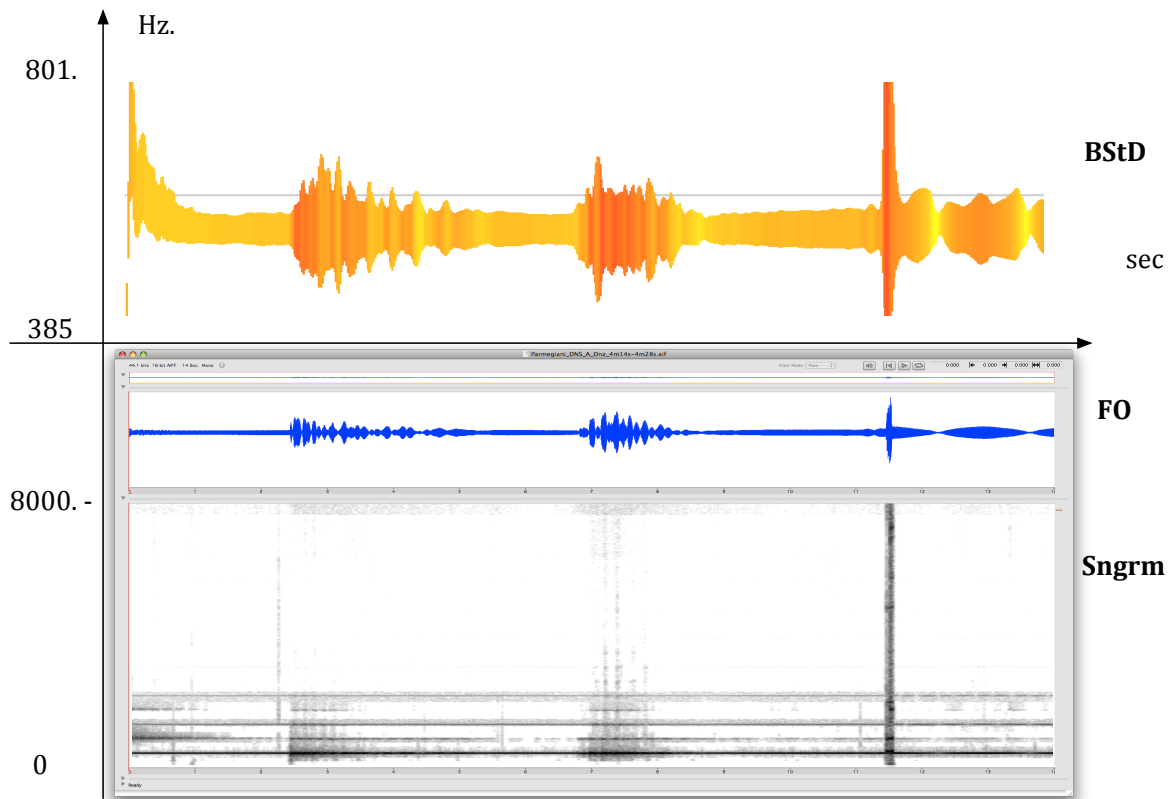


Figure 8 : *De Natura Sonorum*, Parmegiani, (1975), 2. Accidents/Harmoniques, (4'14 à 4'28), BStd, Représentation Forme d'onde (FO) et sonagramme (Sngm)

5.3.1.5.4 Analyse de la musique électroacoustique, Xenakis...

Par la suite [Malt 2012], j'ai appliqué cette même analyse à l'étude des musiques électroacoustiques de Xenakis. Il est apparu que cette représentation permettait d'inférer très rapidement certains faits, comme des points d'articulation aussi bien que l'évolution du matériau musical. Cette représentation s'est aussi montrée très utile pour l'étude de la forme. Par exemple, j'ai comparé deux de ces représentations, une de *Diamorphoses* (1957), durée 6 min 56 s et BStd évoluant entre 0 et 8300 Hz, et celle de la version de concert de *Orient-Occident* (1960), durée de 10 min 58 s et BStd évoluant entre 0 et 8100 Hz. La représentation graphique du temps nous autorise rapidement à nous affranchir des rapports entre les deux pièces pour les afficher à la même durée (Figure 9), une sorte de « normalisation temporelle ». Cette stratégie permet de se rendre compte de la similarité des deux représentations, dont de la forme globale de deux œuvres, en nous basant sur trois morphologies proposées par la BStd (Figure 9) : (1) Trajectoire ascendante ou descendante de la forme avec une évolution moindre du registre spectral, qui peut être approximée par une droite (2), large oscillation du centroïde spectral (+/- 4000 Hz), avec un registre spectral mince (+/- 1200 Hz), et (3) registre spectral épais (+/- 1000-1200 Hz), avec une tendance à une trajectoire horizontale, ou plutôt stable. Pour cette comparaison, nous avons considéré, pour les

sections centrales, un mouvement ascendant global des diverses morphologies, obtenant une articulation globale des catégories : {1 3} {1 2 1 3} {2 2}, ce qui nous retourne une structure tripartite, A-B-Coda, et deux « ponts » (représentés par des morphologies de la catégorie 3) entre les sections. Dans les deux cas, un point culminant (des masses sonores) se présente à la fin de la deuxième section, les sections finales présentant des textures, des masses sonores « statistiquement statiques », avec une fonction vraisemblablement de « pédale », de coda à la pièce (Figure 9).

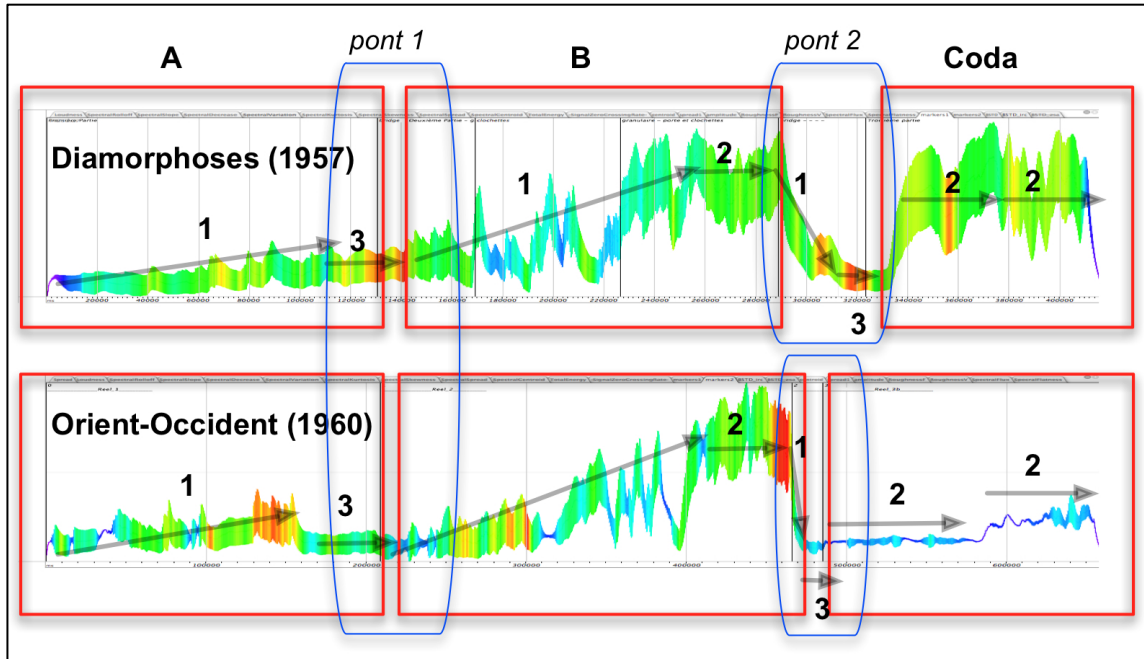


Figure 9 : Superposition des représentations de « masse sonore » (BStd), normalisation temporelle et affichage des articulations formelles

En plus de mes propres expériences sur l'utilisation de ce type de représentation, certains travaux commencent à explorer ses possibilités soit dans le cadre de l'analyse musicale²⁰, soit dans le cadre de l'analyse de l'interprétation, par exemple le mémoire de Master 2 de M. Michel Mahé sur [Mahé 2013] sur l'analyse de diverses interprétations du début de la *Sonate en Si mineur* de Franz Liszt. Cette forme de représentation est actuellement intégrée dans le logiciel d'aide à l'analyse de musiques électroacoustiques EAnalyses²¹ de Pierre Couprie.

5.3.2 La modélisation d'œuvres ouvertes, assistance à l'interprétation - *Cagener*

Même si la recherche que je vais décrire s'insère bien dans mes préoccupations et mes intérêts, la modélisation, la simulation et la conception d'outils, il faut bien reconnaître qu'elle s'est faite au gré du hasard et d'une heureuse rencontre. Benny Sluchin²², qui rentre dans mon bureau pour me demander :

²⁰ Cette représentation analytique est actuellement incluse dans le logiciel EAnalysis de Pierre Couprie.

²¹ http://logiciels.pierrecouprie.fr/?page_id=402.

²² Benny Sluchin est un tromboniste Israélien, résidant en France, soliste mondialement connu, dédicataire de plusieurs œuvres pour trombone dont *Keren* (1986) de Iannis Xenakis.

– Serait-il possible de trouver des moyens plus efficaces, et précis pour jouer les *Number Pieces* de Cage, notamment *Two*⁵ ?

– Est-ce que l’informatique au lieu de bâillonner, d’immobiliser la spontanéité de la performance, ne pourrait pas être le moyen pour la rendre au plus près de la pensée cagienne, pour permettre à l’interprète de réaliser la « non-intentionnalité » ?

Naissait le projet *Cagener*, issu d’un questionnement sur la performance d’œuvres ouvertes, et de comment l’informatique pourrait assister l’interprète. Mon travail d’analyse rejoignait mon activité de modélisation.

Quel drôle d’idée, modéliser une œuvre de John Cage ! De ce questionnement initial s’est suivie une recherche comportant une réflexion sur qu’est-ce que l’assistance informatique à l’interprétation, l’analyse musicale (par simulation) de plusieurs œuvres, de la conception d’interfaces dédiées à la performance pour ces mêmes œuvres et des divers concerts utilisant ces interfaces pour interpréter quelques œuvres de Cage (notamment *Concert* et *Number Pieces*).

5.3.2.1 L’interprétation assistée par ordinateur

L’utilisation d’outils comme auxiliaires dans la préparation d’interprétations et d’exécutions musicales n’est pas un fait nouveau (voir [Malt, Sluchin 2011]). Depuis l’utilisation du métronome, invention faussement attribuée à Maelzel²³, et du diapason, les instrumentistes ont régulièrement cherché des moyens pouvant les aider à la préparation et à l’étude des musiques qu’ils devraient interpréter. L’arrivée du phonographe et l’utilisation d’enregistrements sonores, par exemple, en sont une référence dans cette évolution. Leur utilisation s’est rapidement généralisée, dès les musiciens de jazz et de variété en général, qu’utilisaient les vinyles pour l’apprentissage de morceaux et d’improvisations, à l’utilisation des enregistrements « Music Minus One »²⁴ dans les années 1970, permettant à de jeunes interprètes d’apprendre et de goûter en solitaire, au jeu instrumental de la musique de chambre. De nos jours, il existe un grand nombre de techniques intégrant l’ensemble des technologies numériques, dont nous pouvons citer, par exemple l’« e-tuner »²⁵, diapason électronique, conçu par la chef d’orchestre Laurence Equilbey, pour une aide aux chanteurs et choristes, permettant de générer pratiquement n’importe quelle note, dans n’importe quel tempérament ; le système « SmartMusic »²⁶ de Coda, environnement informatique d’aide à l’apprentissage musical des interprètes et plus récemment le projet européen « i-Maestro »²⁷ destiné au développement des nouvelles méthodes pour l’apprentissage musical, fondées sur les technologies informatiques.

²³ L’apport de Maelzel (1772–1838), fut la copie, l’amélioration et le dépôt de brevets pour cet instrument, originalement inventé par l’horloger hollandais Dietrich Nikolaus Winke (c1776–1826), à Amsterdam en 1812.

²⁴ « Music Minus-one » est une marque déposée (<http://www.musicminusone.com/>), d’une entreprise commercialisant des enregistrements de pièces musicales du répertoire, sans les parties solistes, destinées aux jeunes interprètes. Le brevet aurait été déposé par un inventeur philippin, Roberto del Rosario, début des années 1980. Ce même brevet sera aussi à l’origine du système de « karaoké ». <http://inventors.about.com/od/filipinoscientists/p/Karaoke.htm>

²⁵ <http://www.e-tuner.fr/>

²⁶ <http://www.smartmusic.com/>

²⁷ <http://www.i-maestro.org/>

La vulgarisation, la mise à disposition croissante de la technologie informatique, logicielle et matérielle, et le développement de normes de communication entre divers dispositifs informatiques dédiés à la musique (comme le MIDI²⁸) ont permis aussi que de plus en plus d'interprètes et d'utilisateurs, n'appartenant pas à des institutions, s'approprient de ces plates-formes en forgeant des outils personnalisés.

Comme nous venons de le voir, dans un certain nombre de situations, le métronome a cédé sa place au séquenceur, soit pour la réalisation de transcriptions d'aide, comme le cas que nous venons de voir, soit pour construire des séquences de « click-tracks » intelligents. Le diapason, quant à lui, cède sa place au « tuneur » (ou accordeur), anglicisme pour désigner ces nouveaux appareils électroniques. Cependant, l'histoire n'est pas encore finie. L'augmentation de la puissance de calcul des machines, l'évolution de différentes formes de représentations musicales et le développement d'outils de programmation graphique dédiés à la musique²⁹, font évoluer davantage l'utilisation des outils virtuels par les interprètes.

5.3.2.1.1 Une problématique, les « œuvres ouvertes »

Dès la fin des années 1990, de nouvelles applications d'« interprétation assistée par ordinateur » voient le jour, notamment pour résoudre certaines problématiques liées à l'interprétation et l'exécution d'« œuvres ouvertes »³⁰. Cette catégorie de production musicale se caractérise par une grande liberté donnée à l'interprète, soit dans l'interprétation, dans le choix de l'instrumentation ou dans l'agencement des différentes parties et structures constitutives de l'œuvre³¹. Nous pouvons citer comme exemples connus le *Klavierstück XI* (1956) de Karlheinz Stockhausen, la *Troisième Sonate pour piano* (1955-1957) de Pierre Boulez ; *Duel* (1959-1960) ou *Linaia-Agon* (1972) de Xenakis ; le *Concert for Piano and Orchestra* (1957-1958) de John Cage ou encore les *Archipels* (1967 - 1970) d'André Boucourechliev, entre un grand nombre de pièces existantes.

L'exécution et l'interprétation de ces pièces ne sont pas souvent aisées. Deux sont les facteurs principaux de cette difficulté : « les mécanismes » ou les règles de choix imposées par les compositeurs et la nature physique sur laquelle sont élaborés les partitions ou supports de lecture. Si certains compositeurs, comme Cage dans le *Concert*, ou Boulez pour *Domaines*, donnent un ensemble d'instructions assez directes pour ces choix, d'autres, comme Xenakis demandent de suivre des règles strictes par rapport à un modèle de calcul. Par exemple, dans le cas de *Duel* ou *Linaia-Agon*, Xenakis demande à l'interprète (le chef ou l'instrumentiste) de suivre un modèle mathématique fondé sur la « théorie des jeux ». Le musicien se voit non seulement contraint de faire des opérations de choix et d'interprétation pendant l'exécution, mais, en quelque sorte, de les calculer.

²⁸ MIDI : Musical Instrument Digital Interface. <http://www.midi.org/>

²⁹ Comme par exemple les langages de programmation graphique, dédiés à la musique, Max/MSP (© cycling' 74, <http://cycling74.com/>) et Puredata (puredata.info).

³⁰ Benny Sluchin, « À Computer-Assisted Version of Stockhausen's Solo for a Melody Instrument with Feedback », *Computer Music Journal*, Vol.24 n° 2, Juillet 2000, p. 39-46.

³¹ Umberto Eco, *La poétique de l'œuvre ouverte*, Collection «Points», Éditions du Seuil, Paris 1965, p. 15-40.

Cela n'est pas tout. Le musicien (le chef ou l'instrumentiste), qui voudrait suivre correctement les règles, ou les résultats des calculs, devrait aussi pouvoir passer facilement d'un élément musical à un autre, situé n'importe où dans la partition. Il n'est pas toujours facile de passer, naturellement et de manière fluide d'un élément de la page 3, situé sur la deuxième portée à un autre situé à la page 9, en bas à gauche de la page, en sachant que pour exécuter ce dernier, il y a un changement de sourdine sur l'instrument.

Ce que nous venons de décrire est le cadre idéal. Dans la pratique, et pour éviter les désagréments cités, une grande partie des interprètes préparent leurs calculs (et/ou leurs choix) et se fabriquent des partitions en conséquence³² pour le concert. C'est à cet instant que l'informatique peut intervenir pour assister l'interprète dans sa tâche, et essayer de fournir une aide, avec laquelle la vision première du compositeur pourra être rendue le plus fidèlement possible.

Les dernières quatre années, nous avons travaillé sur cette problématique, notamment sur les *Number Pieces*, le *Concert for Piano and Orchestra* (J. Cage), *Domaines* (P. Boulez) et sur *Duel* (I. Xenakis), nous questionnant sur les manières les plus adaptées pour rendre la pensée du compositeur, mais aussi en laissant un espace de liberté et création à l'interprète.

5.3.2.2 Cage, number pieces et Concert

Le *Concert for Piano and Orchestra* (J. Cage)³³, est une œuvre pour un piano, 13 instruments³⁴ et chef d'orchestre. La partition pouvant être jouée par n'importe quelle combinaison d'instruments, allant du solo, de n'importe quel instrument, à l'ensemble complet. À noter qu'une version sans instrument n'est pas exclue ! Cette œuvre ne possède pas de partition d'orchestre, mais est composée d'une partie pour chaque instrument, dont les pages comportent des événements musicaux, notés de manière très personnelle (Figure 10, Figure 11). Le compositeur propose, pour chaque instrument, des explications de la notation et des règles précises concernant l'exécution. Pour une durée d'exécution donnée, les interprètes suivent un chronomètre (le chef est une sorte de chronomètre vivant) et les règles données pour leur performance jusqu'à la fin du temps imparti.

³² C'est par exemple le cas d'interprétation de *Domaines*. Le compositeur, lui-même admet avoir une version préférée, qu'il utilise souvent en concert.

³³ Benny Sluchin, Mikhail Malt, « Interpretation and Computer Assistance in John Cage's Concert for Piano and Orchestra (1957-58) », in *7th Sound and Music Computing Conference*, Barcelonne, Espagne, 21 au 24 Juillet 2010.

³⁴ L'instrumentation complète est : Piano, violon 1, violon 2, violon 3, alto 1, alto 2, violoncelle, contrebasse, , flûte(aussi piccolo et flûte alto), clarinette en si bémol, basson (aussi saxophone baryton), trompette en si bémol, trombone à coulisse, tuba en fa et si bémol.

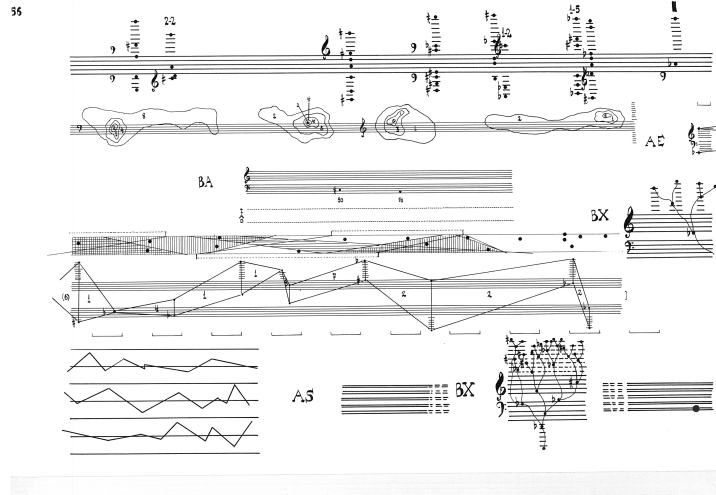


Figure 10 : Concert for piano and orchestra, John Cage, Peters, n° EP 6705, piano, p. 56

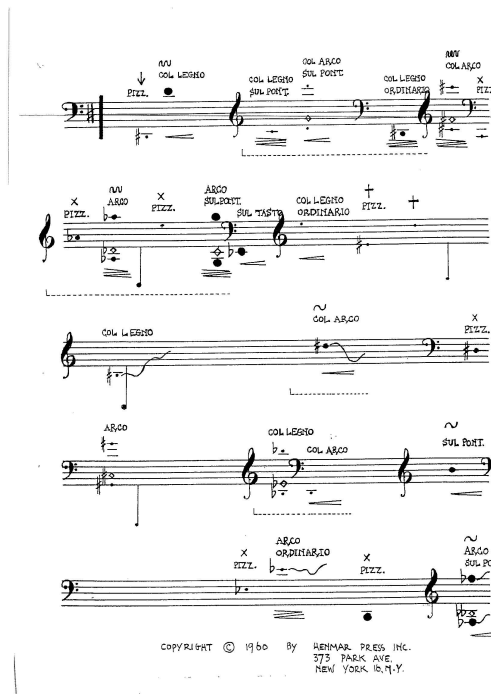


Figure 11 : Concert for piano and orchestra, John Cage, Peters, n° EP 6705, violoncelle, p. 93

Pour résoudre cette problématique, nous avons proposé trois possibilités d'interfaces informatiques pour les interprètes. Cette première interface, propose, simplement l'affichage des pages de la partition sur un écran d'ordinateur (Figure 12). L'interprète peut, à l'aide de certaines touches du clavier, sauter des pages au hasard, revenir, ou suivre l'ordre à partir de la page affichée. Cette proposition rend justice à la forme première de la partition, sans les désavantages de la gestion d'un support papier en concert. La partie de piano, étant plus complexe, a été jouée en utilisant cette première interface.

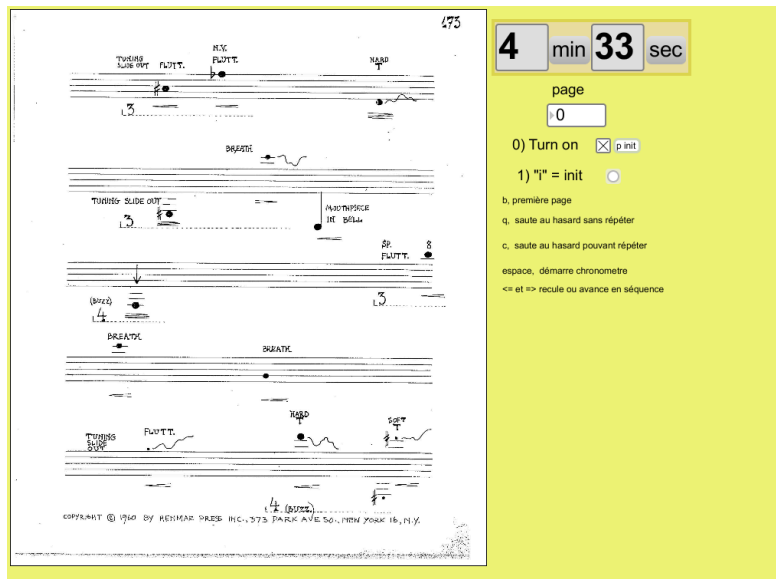


Figure 4 :

Figure 12 : Première interface (partition du trombone)

La deuxième interface (Figure 13) propose à l'interprète l'affichage d'un évènement à la fois. Nous avons, préalablement, numérisé les partitions et découpé tous les évènements. À partir d'un certain nombre d'algorithmes, l'interface pouvait choisir et afficher, avec un temps variable, chacun des évènements. L'instrumentiste, ne pouvant faire aucune prévision, il attend. Lorsqu'un élément s'affiche, il peut alors choisir de le jouer ou de l'ignorer, en attendant l'évènement suivant.

Cette option, même si c'est celle qui semble se rapprocher le plus des indications du compositeur, n'a pas encore été suffisamment testée en condition de concert. Je pense que Cage aurait bien apprécié cette solution !

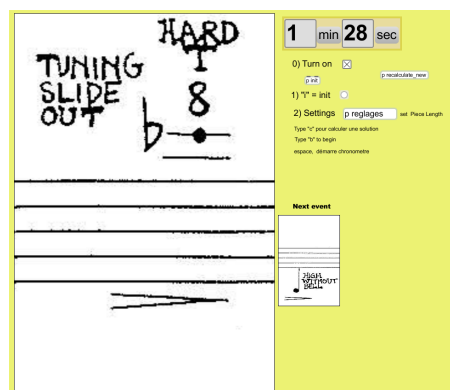


Figure 13 : Deuxième interface

Pour la dernière interface, nous avons construit une partition dynamique, en utilisant les mêmes algorithmes que ceux développés pour la deuxième. C'est-à-dire que nous avons donné la possibilité de réorganiser tous les évènements musicaux, de chaque instrument, de manière à créer une partition virtuelle sur écran. En fonction d'un certain nombre de paramètres, que l'interprète pouvait déterminer et régler à l'avance (densité

d'éléments par temps, caractéristiques graphiques de l'affichage, etc.), il était possible de recalculer une nouvelle partition, fondée sur les éléments donnés par Cage (Figure 14).

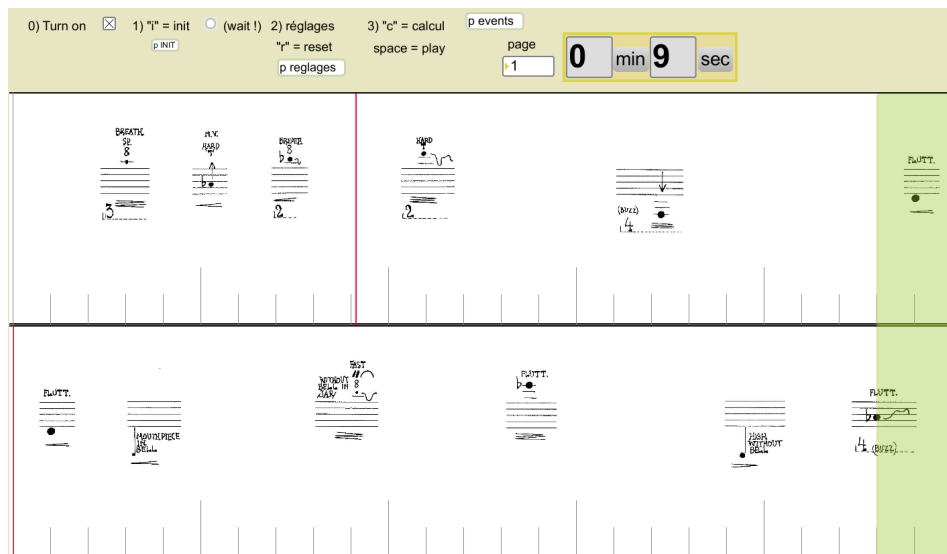


Figure 14 : Troisième interface, la partition virtuelle

Nous avons fait deux concerts³⁵, avec chaque instrumentiste ayant à sa disposition un ordinateur portable, avec la troisième interface, au lieu d'un pupitre et d'une partition papier. Les interprètes pouvaient alors se concentrer davantage sur leur jeu, sans devoir se préoccuper avec l'agencement ou la réorganisation de la partition pendant l'exécution.

Cette recherche s'est faite en tenant compte particulièrement des contraintes physiques et cognitives induites par le fait que la notation musicale ait comme support des feuilles en papier. J'ai présenté ces résultats dans le cadre de la *Notation in Contemporary Music: Composition, Performance, Improvisation Symposium* à la Goldsmiths, University de Londres, en octobre 2013 [Malt, Sluchin 2013].

5.3.2.3 Domaines (1968), Pierre Boulez

Domaines est une œuvre dans laquelle la rigueur de l'écriture du compositeur se trouve confrontée à une certaine indétermination formelle. L'ensemble est divisé en six groupes intitulés A à F se composant de la manière suivante :

- A Un quatuor de trombones (un alto, deux ténors et un basse)
- B Un sextuor à cordes (deux violons, deux altos et deux violoncelles)
- C Un duo (marimba et contrebasse)
- D Un quintette (flûte, trompette, saxophone alto, basson et harpe)

³⁵ Le premier au Triton (Les Lilas, France), le 27/05/2009, avec Fabian Fiorini – piano, Guillaume Orti – sax, Benny Sluchin, -trombone, Eric-Maria Couturier -violoncelle et Mikhail Malt à l'ordinateur. Le deuxième à Hateiva (Jaffa, Israël) le 29/10/2009, avec Amit Dolberg – piano, Yonatan Hadas – clarinette, Benny Sluchin – trombone et Eric-Maria Couturier au violoncelle.

- E Un trio (hautbois, cor et guitare)
- F Une clarinette basse

Les six groupes se disposent sur les sommets d'un hexagone autour du chef. Les sources sonores étant ainsi bien distinctes le rôle de l'espace bien déterminé. Du point de vue de l'exécution musicale, *Domaines* est une alternance entre un solo de clarinette et l'exécution d'un des six groupes instrumentaux. L'œuvre, consiste en deux parties : l'*Original* et le *Miroir*, ayant chacune six sous parties, dont l'ordre, est à déterminer. Pour l'*Original*, le clarinettiste détermine l'ordre d'exécution des six cahiers de cette partie (intitulés A à F) et commence à jouer dans l'ordre choisi. Après chaque solo de clarinette, le groupe instrumental qui correspond joue sa séquence *Original*. Par exemple, si le soliste a joué le cahier B, le groupe B (sextuor à cordes) jouera sa séquence, et ainsi de suite. Arrivé à la fin de la sixième séquence *Original*, le processus se poursuit avec les parties *Miroir*. Pour cette deuxième partie, le chef détermine l'ordre, et c'est au clarinettiste de jouer après les groupes instrumentaux le cahier qui correspond. L'enchaînement de parties se fait sans interruption. L'œuvre débutera et finira avec un solo de clarinette.

Du point de vue dramatique, l'œuvre se joue par deux agents : le clarinettiste et le chef d'orchestre, chacun devant déterminer une permutation de S_6 (le groupe symétrique d'ordre 6, sous-ensemble de $M_6(\mathbb{Z})$) afin de fixer l'ordre de l'*Original* et du *Miroir* en correspondance. Une version de *Domaines*, n'est pas seulement la succession des parties, mais aussi un parcours physique du son, une spatialisation, réalisée par le soliste, qui doit rejoindre les divers groupes, en fonction de la permutation choisie et de la position de chacun des 6 groupes d'instruments. Cette particularité crée une architecture sonore, un mouvement du son dans l'espace, qui est une conséquence de la combinatoire.

Dans cette œuvre aux « formes ouvertes » deux permutations donnent naissance à $(6!)^2=720^2=518400$ possibilités pour *Domaines*. Ceci concerne uniquement l'ordre des parties et ne prend pas en compte d'autres éléments non fixes. Les deux acteurs ont la tâche de déterminer les nuances, la lecture verticale ou horizontale dans les parties solistes, l'ordre des inserts pour le sextuor à cordes, etc. Les agents exécutent leurs parties en alternance, seule une courte superposition est recherchée afin d'avoir une continuité dans l'interprétation.

Dans l'étude de cette œuvre [Sluchin, Malt 2011a] nous nous sommes concentrés sur quatre aspects :

Premièrement, le rapport entre le choix d'une permutation σ et l'extension du déplacement du clarinettiste et des sources de l'ensemble, soit la distance angulaire totale parcourue T_σ .

En second, le rapport entre le choix d'une permutation σ et la structure formelle construite par rapport aux densités P_σ .

En troisième, le développement d'outils informatiques pour visualiser T_σ et P_σ . La Figure 15 présente cet outil avec la visualisation de T_σ et P_σ pour la version de *Domaines* jouée à Munich en 2005 par Pierre Boulez (direction) et Alain Damiens. Dans

la partie du haut de la figure sont représentés l'ordre des sections jouées (À D F E B C – C D E À B F), au milieu, sous forme de diagramme de barres l'évolution des densités et dans la partie du bas comme une séquence de cercles, la position du clarinettiste à chaque instant.

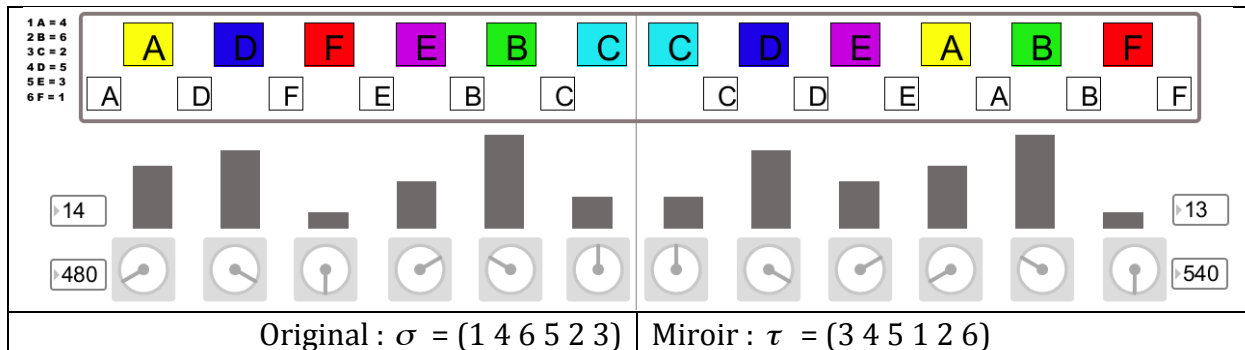


Figure 15 : Le parcours de la version « Boulez_Damiens » (Munich 2005)

Une autre outil, incorporé dans ce premier permettait de visualiser, dans une vue de haut, le parcours du soliste (Figure 16).

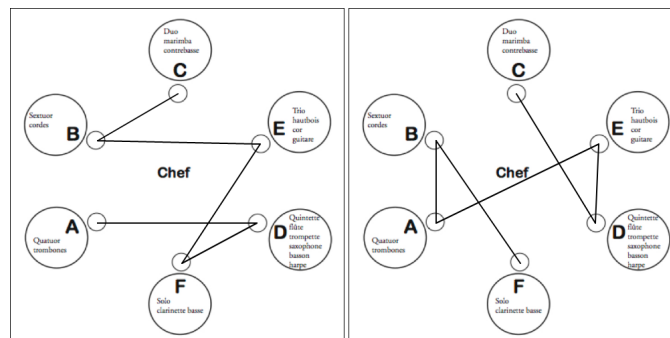


Figure 16 : parcours du soliste dans la version « Boulez_Damiens » (Munich 2005) de *Domaines*

Cette version est une référence, car dans ce cas précis, le compositeur est aussi bien le chef d'orchestre. Selon Boulez : « il a manqué du temps de répétition pour tester toutes les possibilités. Il existe des séquences de mouvements qui marchent mieux que d'autres. »³⁶ Commencer par un groupe homogène tel que **A** (quatre trombones) annonce bien l'œuvre, et finir par **F** (la clarinette basse), un groupe « soliste » qui a sa place au dos au public oriente le choix des deux permutations. Nous remarquons que le dernier élément de σ est aussi le premier de τ . En effet, Pierre Boulez, voulant retravailler le groupe **F** (marimba, contrebasse), la partie **Fm** (la partie *Miroir* de **F**) ne se trouve plus dans le matériel de *Domaines*. Elle a été modifiée et augmentée. Cette partie se trouve actuellement à la Fondation Sacher à Bâle. Ne disposant que de **Fo**, le compositeur l'a divisée en deux parties (qui contrairement à d'autres parties, partagent le même caractère). Dans cette version, la partie est jouée en entier entre *l'Original* et le *Miroir*.

Concernant *Domaines*, le quatrième, et dernier, point sur lequel nous avons travaillé a été la conception d'une interface dédiée au concert. Cette œuvre pose des problèmes

³⁶ Communication personnelle aux auteurs.

pratiques d'exécution. L'ouverture de *Domaines* nécessite une pratique et une attention particulières. On peut définir le parcours après une réflexion (solitaire ou en commun accord) mais pour le tester il faut disposer de conditions de concert et du temps de répétition. Il faut aussi être capable de réorganiser ses partitions rapidement et de mémoriser le parcours. Les enchaînements sont des points délicats à régler. C'est pour ces raisons que les interprètes ne laissent pas ces décisions pour le moment du concert. Les parcours sont décidés à l'avance et sont répétés avec le soliste et les musiciens. Raison pour laquelle une interface informatique permettrait d'ordonner rapidement le conducteur et de l'afficher sur ordinateur pourrait faciliter la démarche de jouer cette œuvre et de rendre compte de ses possibilités combinatoires.

L'interface proposée devrait se substituer à la partition du chef (Figure 17). Elle présenterait, en haut à gauche, la partition d'ensemble, en haut à droite la partition de la clarinette et en bas à droite le parcours du clarinetiste et sa position actuelle.

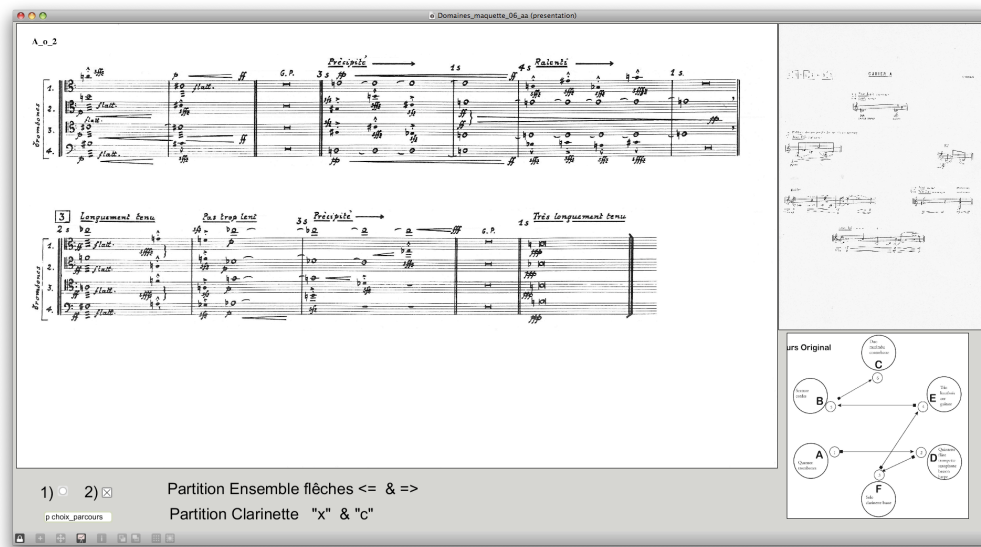


Figure 17 : Interface, pour le chef, proposée pour *Domaines*

Avant le début de l'exécution de l'œuvre, chef et soliste choisissent une permutation (Figure 18). De ce choix, l'interface réorganise la partition de manière à ce que le chef, sur l'interface principale (Figure 17), n'ait qu'à tourner les pages.

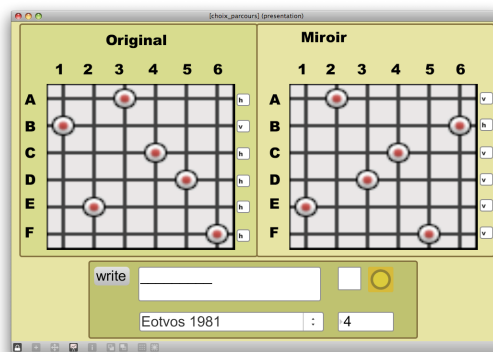


Figure 18 : Panel de réglages permettant de définir les permutations

5.3.2.4 *Duel (1959-1960) – Xenakis*

Duel (1959-60) de Iannis Xenakis est un jeu musical, pour deux chefs et deux orchestres, commandés par l'ORTF (Office de Radiodiffusion-Télévision Française). La création a eu lieu à Hilversum en 1971 par Diego Masson et Fernand Tuby. Chaque orchestre est composé par trois groupes : Vents, 1 petite flûte, 1 hautbois, 1 clarinette en Mi bémol, 1 clarinette basse en si bémol, 1 basson, 1 contrebasson, 2 trompettes, 1 trombone ; Percussions, 2 bongos, 3 congas, 1 caisse claire, 1 tambour ; Cordes, 6 premiers violons, 6 seconds violons, 4 violoncelles, 2 contrebasses.

Chacun des deux orchestres est placé à gauche et à droite de la scène, avec les chefs qui se donnent le dos, ou sur deux plateaux diamétralement opposés. Chaque chef a à sa disposition six constructions sonores, numérotées dans la partition de I à VI (que nous nommerons aussi tactiques) qui sont des structures stochastiques³⁷ (Tableau 3).

I	<i>Pointillisme des cordes</i>
II	<i>Tenues des cordes</i>
III	<i>Glissandi croisés des cordes</i>
IV	<i>Percussion</i>
V	<i>Vents</i>
VI	<i>Silence</i>

Tableau 3 : Les six tactiques fondamentales

La disposition sur scène est de deux fois trois groupes (Figure 19), soit six groupes et les deux chefs. Les deux agents étant en conflit, agissent et créent un mélange sonore que le compositeur leur a mis à disposition. Il existe donc en tout six tactiques que chacun des chefs peut faire exécuter par son orchestre.

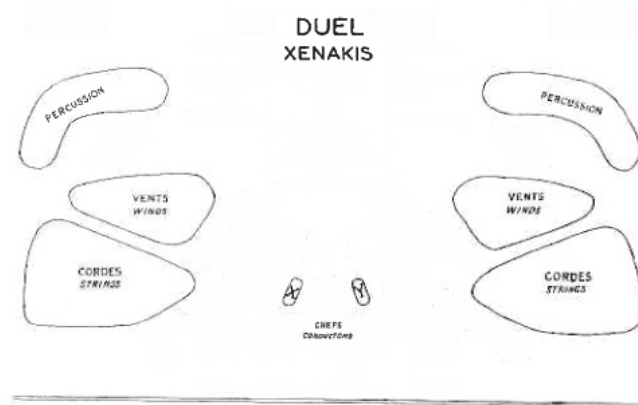


Figure 19 : Le schéma des deux orchestres sur scène (simplifié de la partition)

³⁷ Dans la suite nous faisons la différence entre la discussion dans *Musiques Formelles*, et la partition de la pièce dans laquelle les trois premières tactiques sont en effet des combinaisons de groupes :

À - Cordes (pointillisme (I) ou tenues (II) ou glissandi croisés (III))

B - À + percussion ou À + vents ou percussion et vents

C - À + percussion + vents

La matrice de jeu est la même.

Les choix des deux chefs sont gérés par une matrice de jeu ($M_6(Z)$) donné par le compositeur³⁸ (Tableau 4). Cette matrice est la *matrice de jeu* qui définit un jeu à deux adversaires à somme nul, un cas particulier dans la théorie mathématique des jeux.

	I	II	III	IV	V	VI
I	-1	+1	+3	-1	+1	-1
II	+1	-1	-1	-1	+1	-1
III	+3	-1	-3	+5	+1	-3
IV	-1	+3	+3	-1	-1	-1
V	+1	-1	+1	+1	-1	-1
VI	-1	-1	-3	-1	-1	+3

Tableau 4 : Matrice de jeu de Duel

Chacun des 36 éléments de cette matrice est un « gain » correspondant à une combinaison sonore. Le jeu musical *Duel*, consiste à un choix d'exécution par le chef X (jouant les lignes) pendant que l'autre chef Y joue une des *tactiques* (ou *stratégies*) de colonnes. Les valeurs positives sont les gains octroyés au chef « X » et les valeurs négatives sont les gains octroyés au chef « Y ». L'élément de la matrice résultant de ces choix donne le gain de X (en entier positif ou négatif) qui est égal à la perte de Y. Le but du jeu est de gagner un maximum de points à l'issue de l'exécution.

L'exécution de *Duel* n'est pas sans poser de problèmes et demande une préparation complexe de la part des deux agents. Certaines décisions préalables sont nécessaires à l'exécution de *Duel* :

1. L'attribution de lignes et de colonnes (par un jeu de pile ou face entre les deux chefs)
2. La détermination de la durée (par une durée arbitraire « m » en minutes, par le nombre de coups ou par la limite supérieure de points à atteindre)
3. La désignation du premier partant.

D'autres éléments restent à la discrétion des agents :

1. L'endroit dans la partition où commencer chaque tactique.
2. La durée de chaque coup. Cette durée est facultative, cependant le compositeur demande un minimum deux minutes.

Concernant les choix des tactiques par les chefs, Xenakis cite deux grandes possibilités :

1. De façon « dégénérée ». Soit par la détermination préalable d'une succession préétablie par les deux agents, soit en suivant arbitrairement leurs intuitions. Il est aisé de comprendre que cette possibilité n'est pas tenue en grande estime par le compositeur.

³⁸ Dans le chapitre III de *Musique Formelles* [Xenakis 1963, 140 - 150] Xenakis décrit la façon d'élaborer cette matrice à partir de jugements subjectifs concernant les couples de événements sonores simultanés.

2. En tenant compte de la matrice et de ses valeurs soit en faisant le choix d'après le gain éventuel, soit en tirant une bille d'une urne à billes portant des numéros de 1 à 6, mais de proportions différentes. Car c'est un jeu musical, et le fait de gagner n'est pas sans orienter le conflit.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes focalisés sur deux aspects dans l'étude de *Duel*, la dynamique formelle qui se dégage de l'utilisation du formalisme proposé par Xenakis et la proposition d'une interface permettant d'assister les chefs et les interprètes en concert. Dans les deux cas, nous avons utilisé la simulation informatique comme assistance.

Commençons par la question de l'interface. *Duel* est un défi en ce qui concerne une exécution selon les vœux du compositeur. Les deux chefs doivent communiquer avec leurs orchestres pour leur faire savoir quelle est la tactique suivante et à quel endroit ils vont reprendre. Puisque le choix « VI » correspond au silence, il faut éviter le silence qui résulte d'une hésitation ou nécessaire à la communication. C'est pour cette raison que cette œuvre nécessite d'une interface aussi bien pour l'affichage des résultats du jeu que pour la communication. Xenakis en avait conçu une interface électrique fondée sur l'utilisation d'interrupteurs, relais et potences avec des ampoules électriques de couleurs diverses. La nécessité de pouvoir changer de partition rapidement selon le choix de la tactique, fait aussi penser à utiliser l'ordinateur pour l'affichage de la partition.

Notre proposition est une solution mixte associant l'informatique pour le choix des stratégies, pour la signalisation aux interprètes des parties à être jouées et pour le comptage des points, et une solution papier. C'est-à-dire que les interprètes continuent à utiliser leurs partitions.

Cependant, le point le plus intéressant de cette recherche a été pour nous la simulation informatique du système idéalisé par Xenakis. Pour pouvoir réaliser cette simulation, nous avons conçu une interface (Figure 20), permettant de suivre l'évolution des choix de deux chefs hypothétiques (chef X et chef Y) et leur influence sur la structure générée. Cette interface de simulation permettait d'obtenir l'évolution des tactiques (qui sont en effet des textures musicales, ou orchestrales), l'évolution des mouvements des deux chefs et, finalement, l'évolution du gain du jeu. Ces paramètres correspondent aux courbes de la Figure 20, du haut (évolution des tactiques), vers le bas (la dernière étant le gain du jeu).

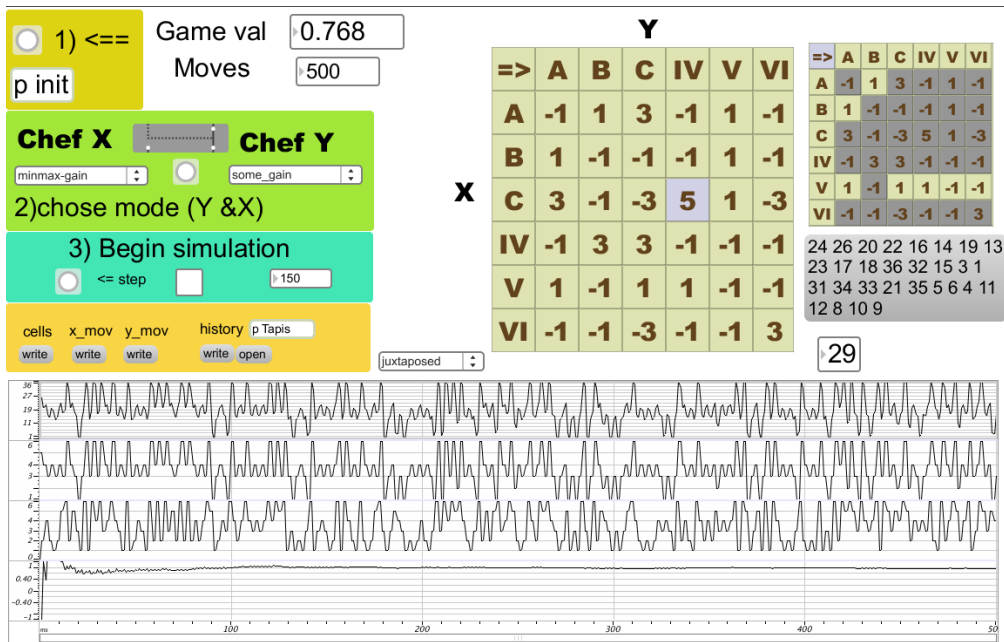


Figure 20 : Interface de simulation de la dynamique de *Duel*

Ces courbes nous retournent des informations importantes, comme les cycles qui se formaient, après un certain nombre de tours. La Figure 21 présente cette évolution pour un jeu où chaque chef utilise la tactique visant à maximiser ses propres gains. Il est facile de constater qu'un certain nombre de cycles se forment, comme {21 → 24 → 36 → 33 → 21}, {16 → 15 → 21 → 23}, {3 → 1 → 13 → 18 → 36 → 33}, ou {16 → 18 → 36 → 33 → 3 → 4}.

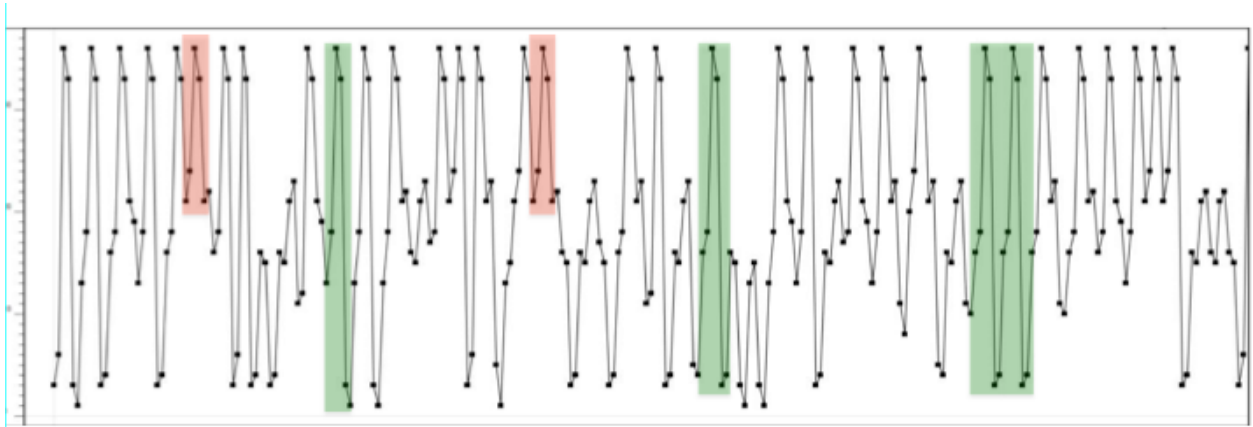


Figure 21 : Evolution des tactiques, chaque chef utilisant la tactique visant à maximiser ses gains

En plus de ces courbes issues de l'interface principale (Figure 20) nous avons conçu une interface permettant de visualiser l'évolution des tactiques et leur superposition (Figure 22). La Figure 22 présente cette visualisation et la structure générée, en assumant l'hypothèse que le chef X utilise une stratégie pour maximiser son propre gain, tandis que le chef Y utilise une stratégie visant à minimiser le gain de son adversaire.

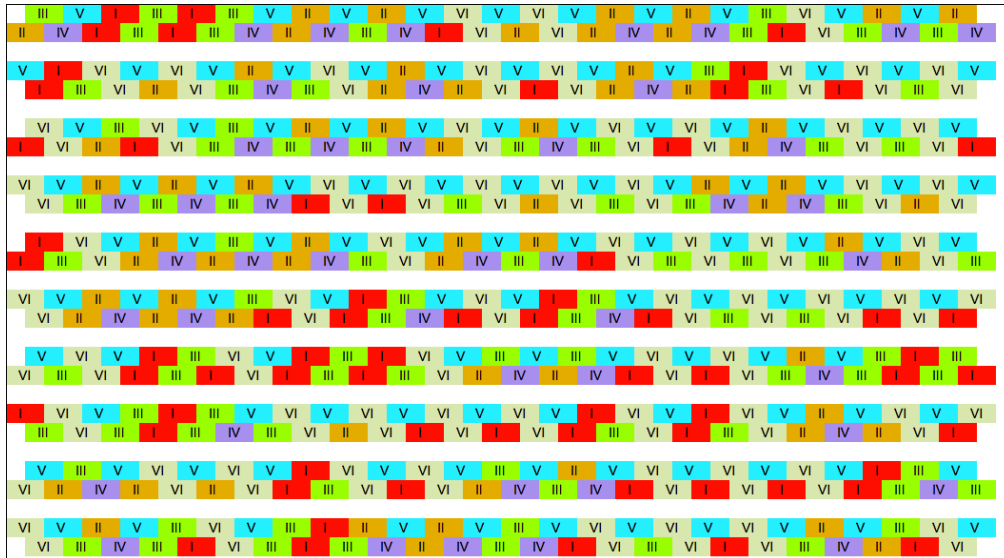


Figure 22 : structure de *Duel* générée par la simulation informatique

Les nombres romains (de I à VI) renvoient vers les stratégies, ou textures orchestrales présentées dans le Tableau 3. Ici, à nouveau, il est intéressant de constater l'existence de textures mixtes produites par le raccord entre les changements de tactiques. Ce point important, puisque *Domaines* et *Duel* étant deux œuvres ouvertes, à peu près de la même période, elles traitent l'agencement formel et le rendu musical de deux manières totalement différentes.

Dans *Domaines* l'agencement des parties est rendu par un modèle combinatoire fondé sur des permutations. Dans *Duel*, l'évolution de la pièce se fonde sur un modèle issu de la théorie des jeux. Pour *Domaines*, l'ordre des séquences est décidé à l'avance, pendant que pour *Duel*, le compositeur insiste sur le fait que les séquences doivent être décidées pendant la performance de la pièce. Dans *Domaines* Boulez autorise (ou ne mets pas de veto) un choix des permutations selon des considérations musicales, acceptant le fait que « certaines permutations fonctionnent mieux que d'autres ». Pour *Duel*, Xenakis demande aux interprètes (aux chefs) de ne pas se déranger avec ces considérations musicales. Il leur demande de jouer selon les règles de la matrice de jeu, assumant toute responsabilité du rendu sonore. *Domaines* est un discours séquentiel avec un degré minimal de superposition des événements. La superposition se résume à un court tuilage entre les sections, ayant comme fonction de garantir la fluidité du discours musical. Dans *Duel* la superposition est l'élément de base. Pour finir, *Domaines* possède une longueur fixe, avec une forme finale qui peut être vue comme une variante du rondo. *Duel* a son tour, a une longueur indéterminée avec une forme fondée sur des répétitions de séquences et de cycles résultantes de la dynamique de la matrice de jeu.

6 Création

Parallèlement à ce travail de recherche, une mise en pratique, mise en situation des thèses et hypothèses a été développée. Ce travail de création se fonde, d'un point de vue technique dans l'utilisation des modèles formels comme générateurs de matériau et de forme musicale. Pour cela, je me suis principalement reposé sur l'idée de la musique comme un système à états. Cette hypothèse de travail avait été posée dans ma thèse avec une très courte analyse formelle du neuvième *Klavierstück* de Stockhausen [Malt 2000, 746-747]. Ce modèle a été décliné dans un certain nombre de réalisations en temps différé et en temps réel, dont nous pouvons citer notamment : *Actrinou* (1992-1993) pour piano solo, *lambda 3.99* (1994) pour guitare et électronique, *IMAGES+C* (1995) pour images plus bande, *Le tapis de rêves de la bête* (2014) pour bande quadriphonique, *Khorwa* (2003) installation en temps réel, *Passages* (2013) installation en temps réel et *La demeure sans demeure* (2014), installation/performance en cours de réalisation. Je m'étendrai plus sur *Actrinou* et *lambda 3.99*, puisqu'elles portent en elles les principaux concepts guidant mon travail.

6.1 *Actrinou* (1992-1993)

6.1.1 Le projet artistique

Actrinou (1992-1993) est une pièce pour piano seul où j'avais commencé une réflexion approfondie sur l'application de la notion de système à l'écriture musicale et l'utilisation ciblée de certaines distributions de probabilités. Nous pourrions aussi dire que c'est un système dynamique fondé sur des fonctions de transitions aléatoires, et sur les propriétés des distributions de probabilité étudiées lors de mon doctorat.

La structure de cette pièce, qui est en quatre parties (Tableau 5), est liée à la transition entre les divers gestes ou entités musicales (Tableau 6) et aussi à la transition entre des champs harmoniques construits à partir de la notion de bande critique³⁹.

-PARTIE-	-FORMES-	CHAMPS
A	Accords->trilles -> nodules	Bruit -> Mi
B	Nuage-> note répétée-> nodules	Bruit -> Mi
C	Nuage->RW-> trilles -> tremolos-> nodules -> notes répétées-> accords	MI-> bruit
D (Coda)	Nuage->trilles-> tremolos -> RW	Bruit+MI (50%)

Tableau 5 : Sections constitutives de « *Actrinou* »

³⁹ La bande critique étant une région, autour d'une fréquence de base, dans laquelle des autres fréquences ne sont pas individuellement distinguées. Il est évident, alors, que, en fonction de la fréquence de base de la note pivot, la bande critique est différente. [PARNCUTT 1989, 85] nous donne la formule suivante pour la bande critique W_{bc} (en demi-tons) au tour d'une hauteur P (aussi en demi-tons): $W_{bc} = \frac{5}{1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + 44}}}$, où

$$x = \frac{P}{5} - 10.$$

Formes de base	Index	Morphologie de hauteurs	Articulation	Profil dynamique	Structure temporelle locale
Accords	6	Quatre hauteurs au tour de la note pivot avec des intervalles proches de la bande critique	Tenuto	Fortissimo-toujours	Double-croches de sextolet
Trilles	4	Oscillation de la note pivot avec le demi-ton supérieur	Legato	Piano	Le plus rapide possible
Tremolos	5	Oscillation de la note pivot avec une note supérieure ayant un intervalle d'un ton à un triton	Legato	Piano	Le plus rapide possible
Nodules	3	Evolution d'un trille de demi-ton à un nuage de hauteurs uniformément distribuées autour de la note pivot	Legato	Crescendo de \emptyset à FF	Triple-croches d'un groupe de douze
Note-répétée	1	Répétition de la note pivot	Staccato	Piano	Le plus rapide possible
Rw	2	Promenade aléatoire simple en partant de la note pivot	Legato	Mezzo-forte	Triple-croches d'un groupe de douze
Nuage (notes)	0	Nuage de hauteurs uniformément distribuées autour de la note pivot	Staccato	Mezzo-forte	Double-croches

Tableau 6 : Caractéristiques des figures pour un tempo égale à 60 M.M. à la noire

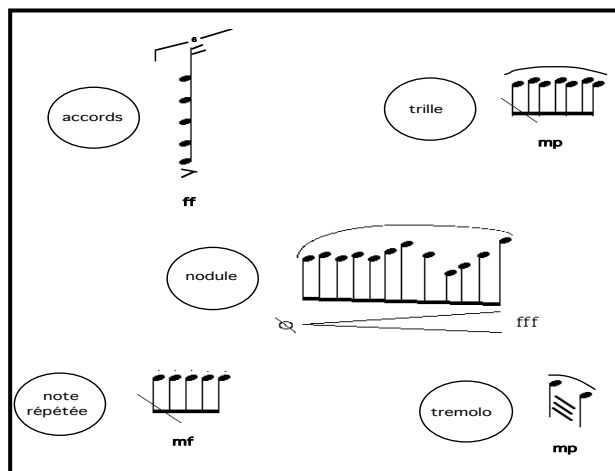


Figure 23 : Ensemble de « gestes » de base utilisés dans « Actrinou »

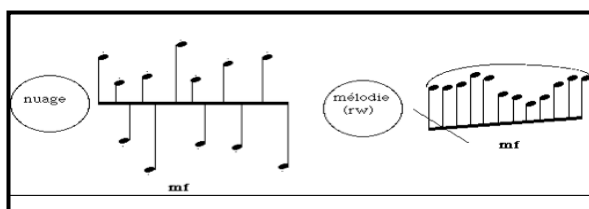


Figure 24 :

6.1.1 La formalisation

La réalisation de l'idée de transition, entre des régions dominées par certaines des entités musicales que nous avons citées, a été concrétisée par l'utilisation d'un modèle

de distribution multinomiale. Imaginons qu'on puisse associer un vecteur de probabilité, où chaque composante de ce vecteur désigne la probabilité d'apparition d'une de ces entités. Certainement, si ce vecteur de probabilité est statique il ne serait pas possible de faire évoluer ce système, puisqu'il se rendra stationnaire par la simple répétition, en fonction des probabilités, des éléments choisis. En vue de ce problème, nous avons tenu à faire évoluer dans le temps l'ensemble des probabilités. Pour cela à chaque entité une table lui était associée (voir Figure 25 et Figure 26). Chaque table montre la probabilité relative d'apparition des entités. Par exemple, la première table (Figure 25) attribuée à l'entité appelée « notes » montre qu'au début de la séquence cette entité a toutes les probabilités d'apparaître, mais au fur et à mesure de l'évolution de la pièce la probabilité d'apparition de cette entité s'approche de zéro.

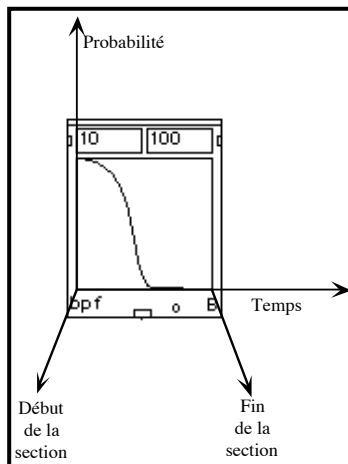


Figure 25 : Détail de la table « notes »

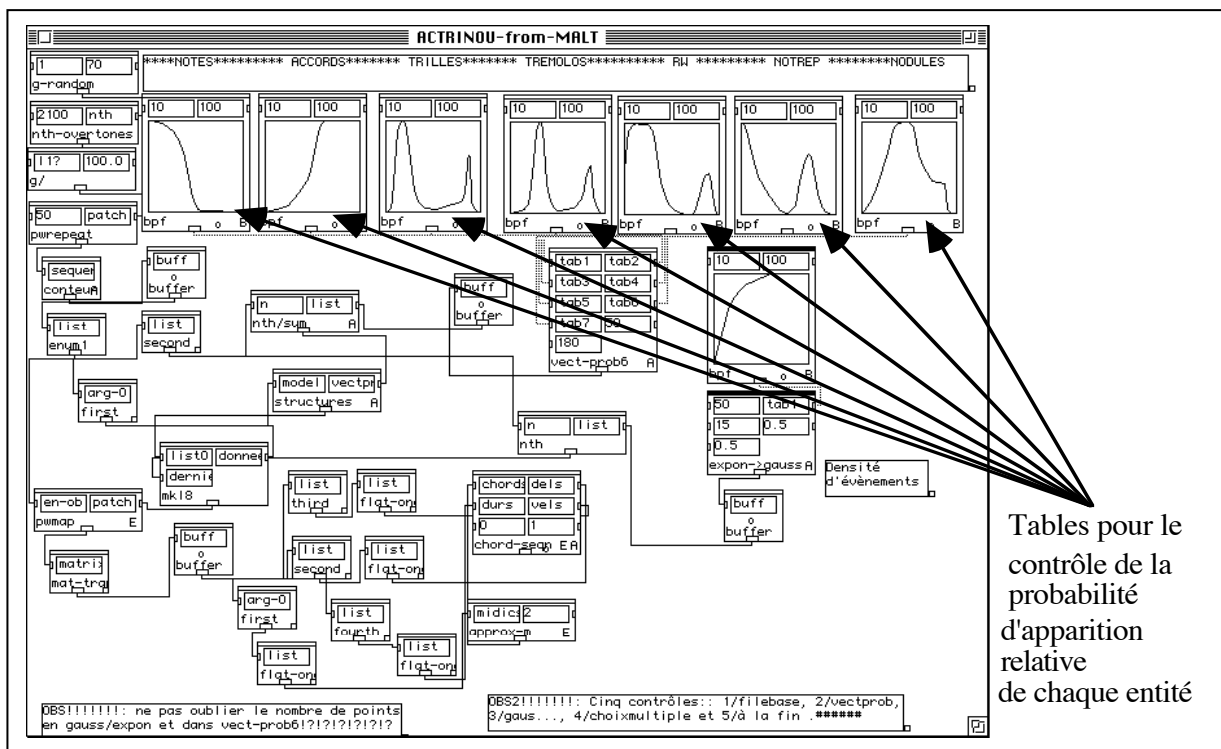


Figure 26 : Patch qui calcule l'évolution des gestes dans la troisième partie de « Actrinou »

À chaque entité, une table similaire est attribuée. Nous appelons ces probabilités de probabilités relatives d'avènement, puisque chaque table traduit seulement une tendance.

Un échantillonnage en parallèle de ces tables (sept tables, représentant les sept gestes), nous rend un ensemble de vecteurs décrivant, en termes de proportionnalité, l'évolution des probabilités (Figure 27).

```
((100 0 0 0 53 49 0) (100 0 1 0 65 49 1) (99 1 2 0 77 49 2)
(99 1 2 1 84 49 2) (99 1 3 1 89 46 3) (99 1 5 1 91 44 5)
(98 2 8 1 92 42 6) (98 2 14 1 94 40 8) (98 2 26 2 96 38 9)
(98 2 37 2 97 35 10))
```

Figure 27 : Les dix premiers vecteurs de proportionnalité

Ensuite ces mêmes vecteurs sont normalisés de manière à devenir des vecteurs de probabilité, c'est-à-dire que la somme, de ses éléments, soit égale à « 1 » (Figure 28).

```
((0.5 0.0 0.0 0.0 0.26 0.24 0.0) (0.46 0.0 0.0 0.0 0.3 0.23 0.0) (0.43 0.0 0.01 0.0 0.33 0.21 0.01)
(0.42 0.0 0.01 0.0 0.35 0.21 0.01) (0.41 0.0 0.01 0.0 0.37 0.19 0.01) (0.4 0.0 0.02 0.0 0.37 0.18 0.02)
(0.39 0.01 0.03 0.0 0.37 0.17 0.02) (0.38 0.01 0.05 0.0 0.37 0.16 0.03) (0.36 0.01 0.1 0.01 0.35 0.14 0.03)
(0.35 0.01 0.13 0.01 0.35 0.12 0.04))
```

Figure 28 : Les dix premiers vecteurs de probabilité

Le résultat est un ensemble de n vecteurs de probabilité décrivant l'évolution, en parallèle, des sept gestes dans le temps. Dans la Figure 29, nous pouvons vérifier que ce principe génère un ensemble d'index évoluant entre zéro et six. Pour chaque vecteur un choix aléatoire est fait en respectant les probabilités. Par exemple dans le dixième choix, nous avons le vecteur (0.35 0.01 0.03 0.01 0.37 0.17 0.02), représentant une probabilité de 35 % d'avoir le premier geste (les notes/nuage), de 1 % d'avoir le deuxième geste (les promenades aléatoires), et ainsi de suite.

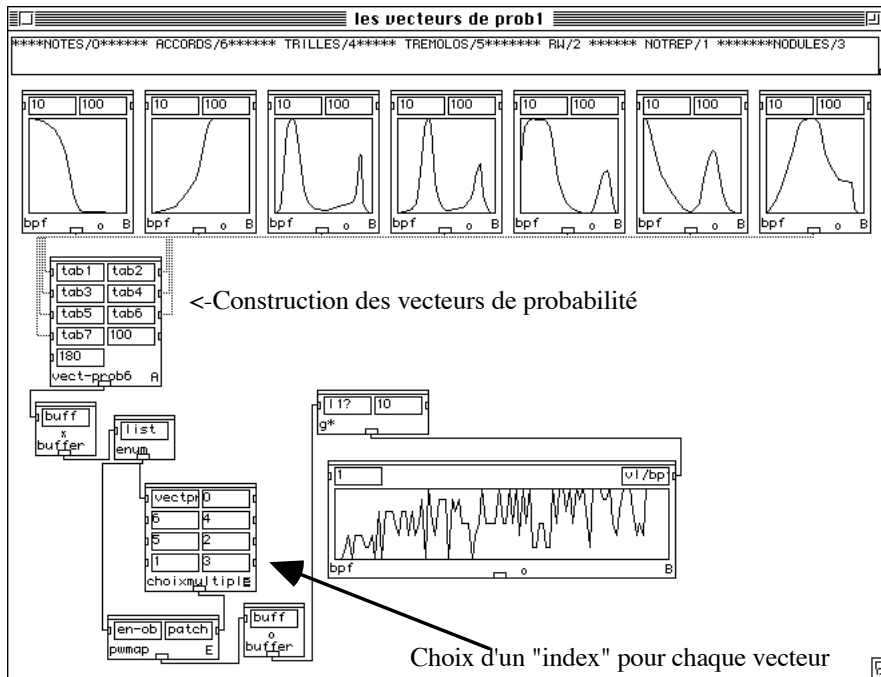


Figure 29 : Le principe de la génération de vecteurs de probabilité évoluant dans le temps

En associant des index à chaque entité, nous pouvons avoir une représentation de leur évolution (Figure 29). Comme nous sommes en train de manipuler un système stochastique, à chaque évaluation ou calcul nous aurons des résultats qui seront globalement identiques (même direction globale), mais localement différents (Figure 30).

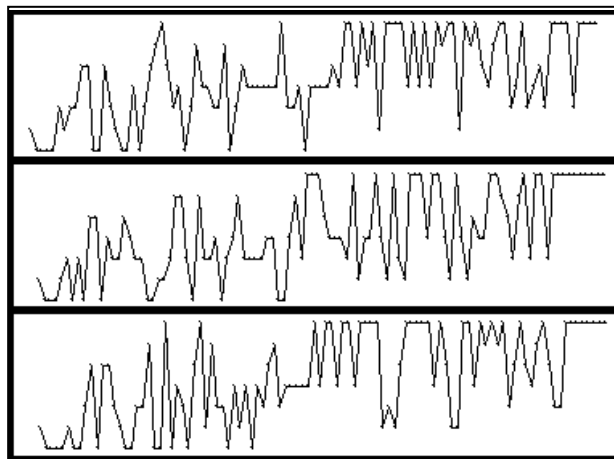


Figure 30 : Trois évaluations différentes de l'évolution d'un système stochastique avec des vecteurs de probabilité variables en fonction du temps.

De cette manière, nous aurons à chaque instant un vecteur de probabilité qui sera utilisé dans l'abstraction <structures> (Figure 31). Cette abstraction présente deux entrées. La première, <model>, est responsable de l'information harmonique. La deuxième, <vectp>,

fournit le vecteur de probabilités au module <choix-multiple>⁴⁰, qui fera un tirage en fonction de ce vecteur en choisissant une des entités disponibles.

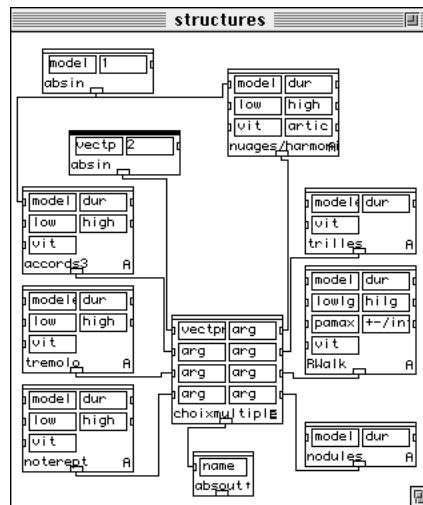


Figure 31 : Détail de « l'abstraction » <Structures>

Il est important de remarquer que ce procédé permet, entre autres, l'introduction d'une mémoire, ce qui permet au compositeur de contrôler d'une manière non linéaire et globale l'évolution de son matériau, qui dans ce cas est une évolution du geste « nuage » vers le geste « accords » (Figure 32).

nuage->(note-répétée<->RW<->Nodules<->Trilles<->Tremolos)->Accords

Figure 32

Un dernier exemple qui pourra nous faire comprendre ce que nous entendons par caractéristiques de chaque distribution est l'utilisation que nous avons faite d'une « interpolation » entre deux modèles stochastiques.

Dans la troisième partie d'*Actrinou* (1992/93) j'avais besoin d'un développement temporel qui puisse évoluer d'un espace raréfié amorphe (sans une pulsation implicite) à un espace strié, dans le sens d'un espace contenant une pulsation sous-jacente. D'après les études et les simulations que nous avons faites au sujet des caractéristiques des différentes distributions, il nous semblait que d'une part la distribution exponentielle avait les caractéristiques nécessaires pour modéliser ce que nous appelions d'un espace raréfié et que la distribution de gauss avait les caractéristiques qui nous permettaient de générer un espace strié. La solution a été de calculer une transition contrôlée entre deux ensembles de durées. Le premier ayant été généré à partir de la distribution exponentielle et le deuxième, généré à partir de la distribution de gauss. Cette transition a été calculée dans l'abstraction <gauss-expon> (Figure 33), où le module <strucmiw0> était au cœur du procédé. Le module <strucmix0> calcule la combinaison de deux structures selon la relation $a * struc1 + b * struc2$, où $a + b = 1$ | $a, b \geq 0$, a étant un facteur de « mixture » en pourcentage. Le facteur a a été contrôlé à partir d'une fonction par segments. De cette manière il a été possible de régler l'évolution des événements

⁴⁰ <Choix-multiple> fait partie de la librairie PW-Alea.

d'une manière beaucoup plus souple, puisque cette évolution ne dépendait pas seulement des valeurs des durées, mais d'une interaction avec les autres paramètres tels que les hauteurs, les dynamiques, les registres, etc.

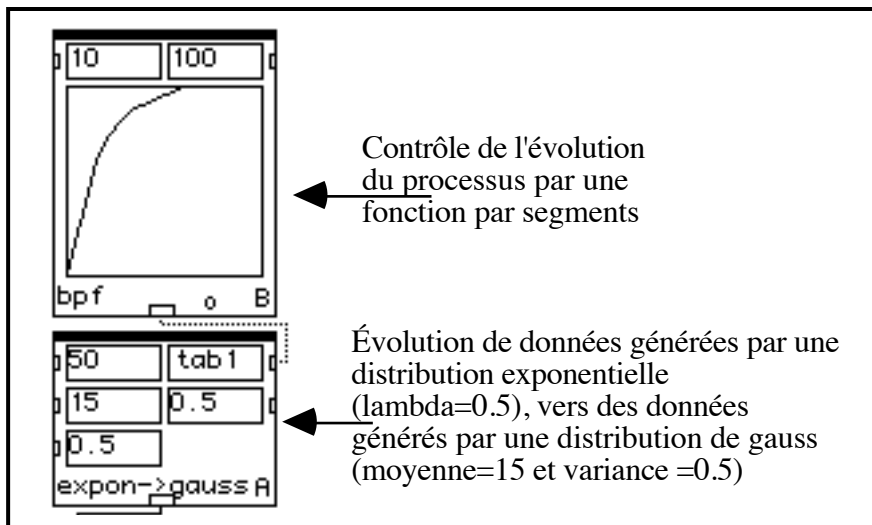


Figure 33 : Détail qui montre la partie consacrée au calcul de l'évolution de durées entre les événements

Les résultats obtenus à partir de cette interpolation d'espaces rythmiques peuvent être vus, ci-dessous, sous forme de diagramme de durées. La Figure 34 présente quatre évaluations du même processus. N'oublions pas que ces processus étant stochastiques ils présentent de multiples solutions, chaque évaluation n'étant qu'une solution possible.

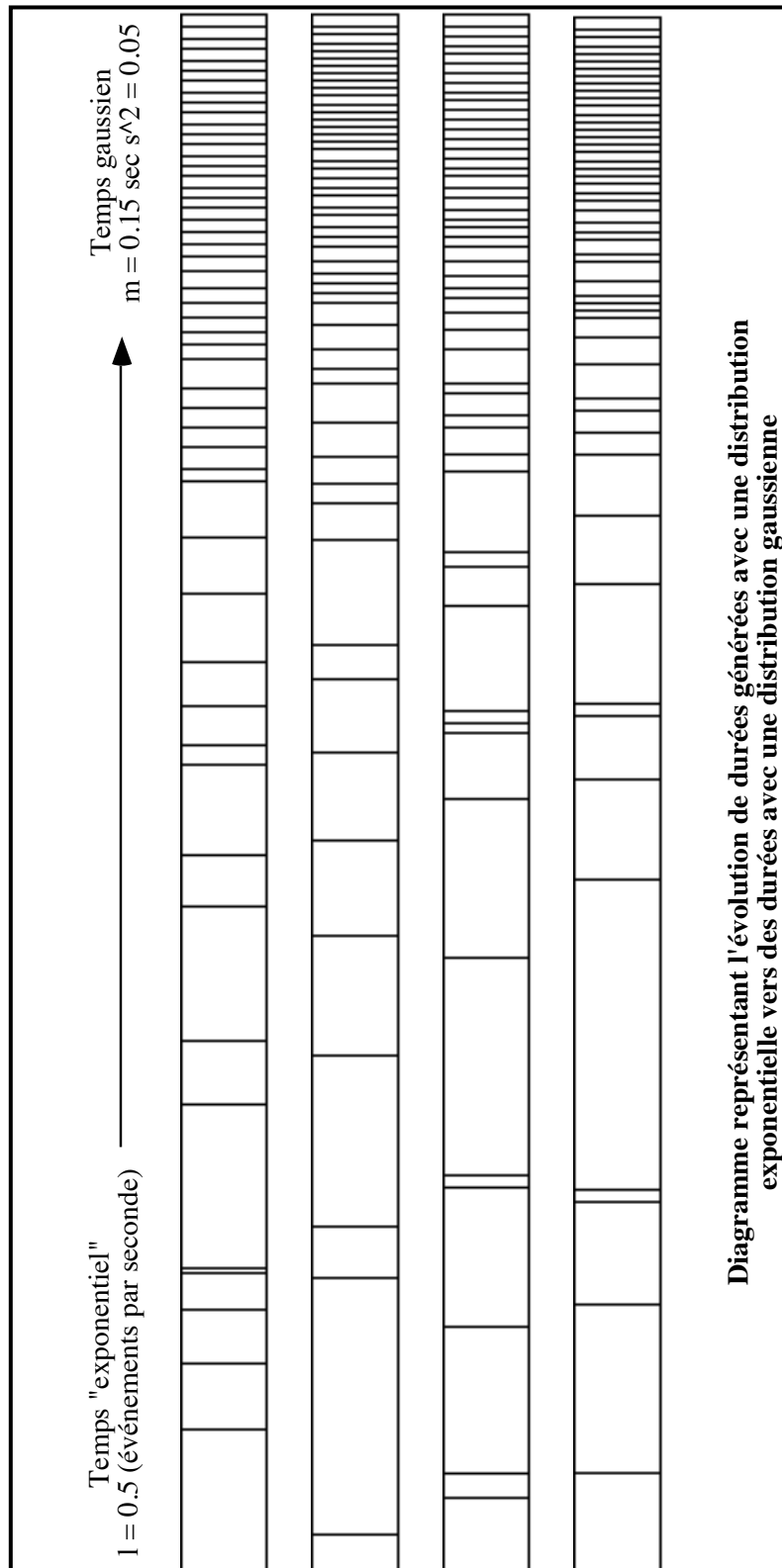


Figure 34 : Interpolation entre un « temps exponentiel » et un « temps gaussien »

Le premier diagramme représente l'exemple que nous venons de montrer en notation symbolique et trois autres évaluations du même processus. La Figure 35 présente le premier diagramme de la Figure 34 utilisé pour contrôler la distance entre des gestes musicaux.

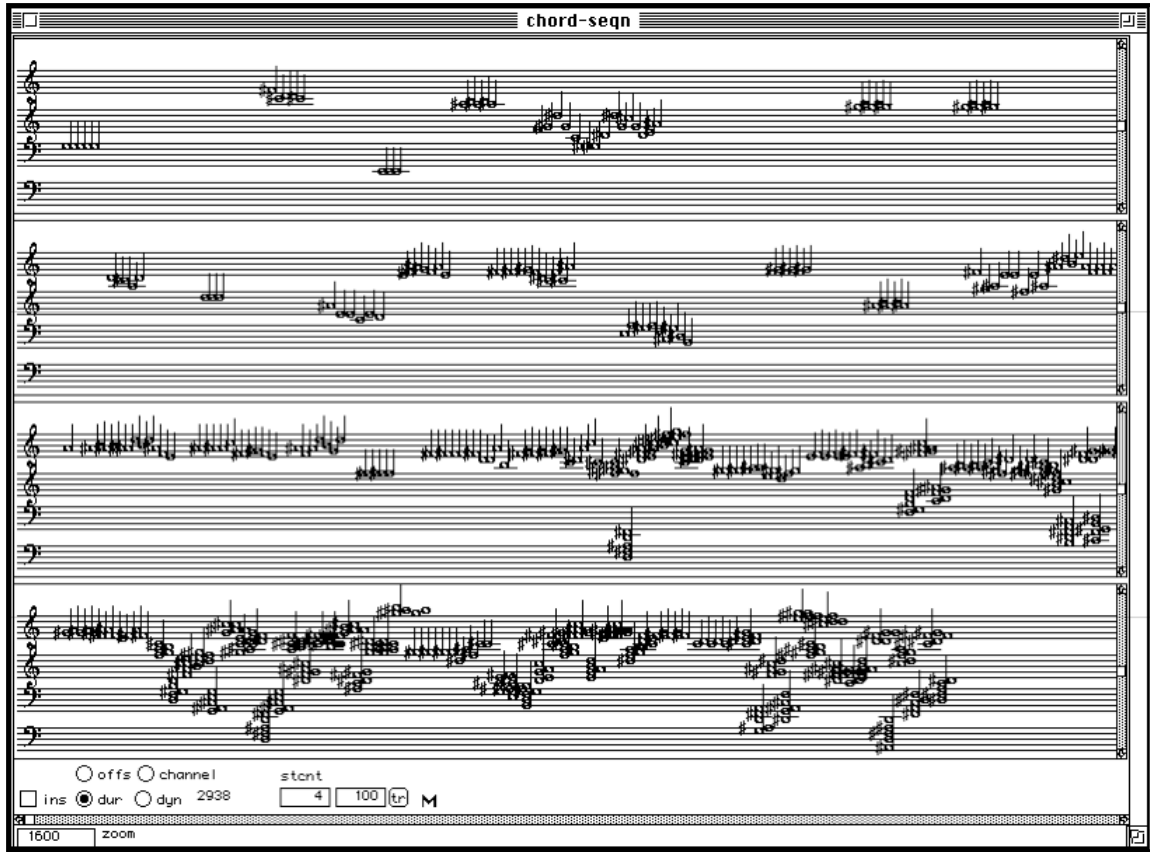


Figure 35 : actualisation du processus d'interpolation de temps stochastiques

Dans les deux représentations que nous venons de voir, soit en diagramme de durées, soit en notation symbolique proportionnelle, on peut constater une évolution qui nous fait passer d'un espace rythmique irrégulier et raréfié, à un autre espace régulier et plus dense. Le point important à retenir est d'avoir pu mettre en phase des idées musicales, telles que l'interpolation de durées, avec les caractéristiques mathématiques des modèles que j'ai utilisées.

6.2 *lambda 3.99* (1994)

6.2.1 Le projet artistique

La question qui se pose maintenant est : comment aller plus loin, et faire le lien entre ces caractéristiques mathématiques et des possibles utilisations musicales ? Quels sont, enfin, les liens possibles entre une conceptualisation musicale et une formalisation logique, dans un cadre autre que la stochastique ?

lambda 3.99 pour guitare et synthétiseur répond à certaines de ces questions. D'une manière générale, *lambda 3.99* peut être considéré comme un système dynamique polyphonique⁴¹ (un système dynamique pour la partie instrumentale et un autre pour l'électronique), utilisant des fonctions de transitions chaotiques caractéristiques par leurs propriétés d'autosimilarité.

6.2.1.1 Polyphonie virtuelle

Pour *lambda 3.99*, une des idées principales est le concept de polyphonie virtuelle, selon lequel il est possible, à partir d'un jeu strictement séquentiel de simuler une polyphonie. C'est-à-dire, que le système auditif isole certains événements dans le temps, et dans l'espace des hauteurs, de façon à construire des flux auditifs (comme dans les suites, sonates et partitas pour instruments seuls de J. S. Bach). Dans ce cas précis, ce concept serait alors appliqué non à la note isolée, mais à des structures plus complexes.

Nous savons, même si d'une manière subjective, que les effets perceptifs d'un son, d'une séquence ou d'un objet musical quelconque dépendent du contexte musical dans lequel il s'inscrit. La perception de plusieurs paramètres musicaux associés à un son, tel que la hauteur, le timbre, l'intensité, l'articulation, la durée, le tempo, etc. sont aussi largement influencés par les caractéristiques des sons qui le précèdent, qui coïncident avec lui et même ce qui le suivent dans le temps. Il est possible, alors pour un compositeur de se servir de ce phénomène et constituer ce qui est appelé en psychoacoustique les flux musicaux (Figure 36).

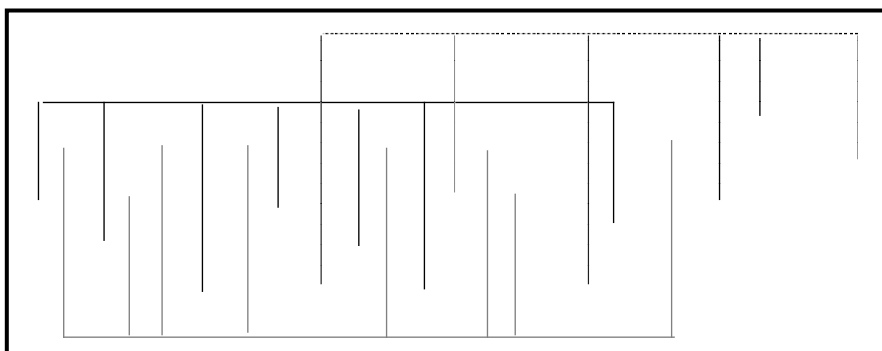


Figure 36 : Des flux auditifs

Un « flux » est une organisation psychologique qui représente mentalement une source physique comme une séquence d'événements acoustiques émanant d'un même endroit. [Mc ADAMS 1987)], et possédant une certaine cohérence ou continuité interne. Ceci

⁴¹ Je suis conscient de l'abus de langage de ma part.

permet à cette séquence d'être interprétée comme un tout. Un des points importants pour le compositeur est de savoir quand s'opère la scission d'une séquence en flux plus petits? Quels sont les paramètres à manipuler? Quels sont les facteurs qui autorisent le groupement auditif à se constituer? McAdams et Bregman [McAdams, Bregman 1987], nous montrent que la formation de flux est conditionnée par trois facteurs principaux :

1. Les grands écarts au niveau des fréquences induisent le système perceptif à grouper des événements par registres.
2. Plus le tempo est rapide, plus le degré de rupture ou de décomposition de la séquence en flux plus petits est grand.
3. Des discontinuités de timbre induisent aussi la formation de flux.

En partant de ces hypothèses, j'ai formalisé et construit une dizaine de gestes de base qui devraient permettre à l'audition le groupement d'événements dans le temps et la constitution de flux auditifs se superposant virtuellement.

6.2.1.2 Les gestes (formes) de base

Il était alors nécessaire que chaque geste soit reconnaissable au niveau perceptif et facilement différencié des autres. En fonction de ces contraintes, chaque geste a été construit de façon à posséder certaines caractéristiques propres :

- a) Une morphologie de hauteurs,
- b) Une articulation,
- c) Une dynamique d'intensités et de hauteurs,
- d) Une structure temporelle locale propre et
- e) Une texture propre qui était le résultat de l'assemblage des paramètres

antérieurs.

De cette première réflexion, résultèrent dix gestes, ou organismes de base :

- a) Accords percutés sur le pont de la guitare.
- b) Accords rasgueado.
- c) Trémolos percussifs sur la table de la guitare.
- d) Nodules.

Les nodules sont un geste constitué de notes répétées qui évoluent vers un nuage de hauteurs dispersées dans un registre d'à peu près une quinte, avec un profil dynamique de crescendo et une articulation legato.

- e) Nuages de points

Ensemble de notes très rapides jouées par le synthétiseur avec une articulation legato et un profil dynamique en allant d'un profil de cloche à un profil chaotique ascendant.

- f) Séquences mélodiques statiques (en septolet) « sul ponticello ».
- g) Notes répétées avec une articulation très détachée.
- h) Appoggiatures

Succession d'une ou plusieurs notes, uniformément distribuées avec une faible intensité suivie d'une note pivot avec une harmoniquement définie.

- i) Percussions

Groupes rythmiques réguliers construits selon un modèle de grammaires génératives et joués par le synthétiseur.

- j) Séquences mélodiques.

L'ensemble de ces dix gestes est représenté en notation musicale par la Figure 37.

Figure 37 : Ensemble des dix gestes de base

Ces gestes n'étaient pas des entités statiques, mais chacun correspondait à une classe d'équivalence évoluant continuellement pendant le déroulement de la pièce. En établissant cette première conceptualisation, nous pouvions déduire l'existence de deux couches temporelles superposées (Figure 38) :

a) Un temps local défini par les caractéristiques structurales de chaque organisme, telles que les durées, densité d'événements, et dynamique interne de ses composantes, et

b) Un temps global qui gèrait l'évolution des ces mêmes organismes.

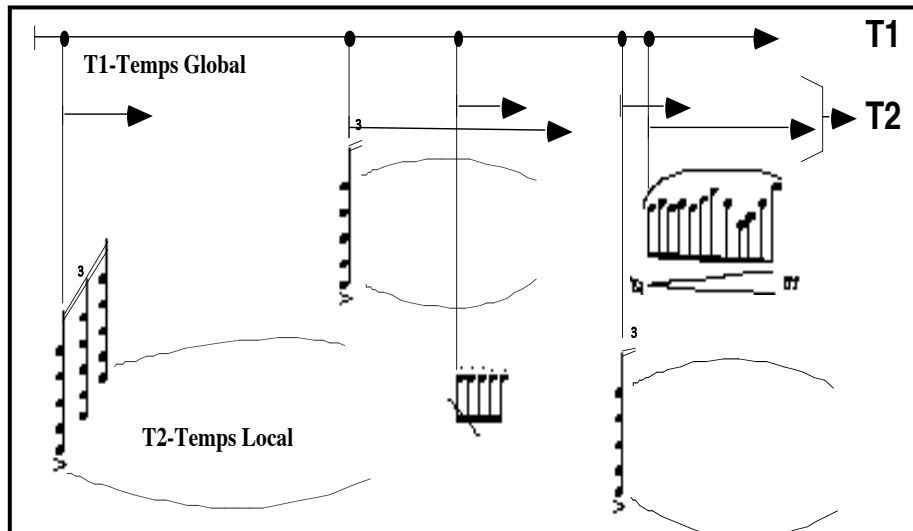


Figure 38 : La dialectique entre un temps global et un temps local

Il n'existait pas de contraintes particulières associant ces deux couches temporelles, vu que leurs fonctions étaient nettement différentes. Tandis que la couche **T2** est responsable par la morphologie des gestes, la couche **T1** est responsable par l'évolution globale de la pièce et par conséquent de sa forme.

6.2.1.3 La structure

lambda 3.99 est articulée en trois parties qui reposent sur des transitions entre certaines formes, comme le montre le Tableau 7.

-Partie-	
A	Des percussions sur le pont et des nuages vers les séquences mélodiques
B	Des séquences mélodiques vers les accords « rasgueado »
C	De l'accord « rasgueado » vers les nuages de points

Tableau 7 : La structure tripartite de *lambda 3.99*

6.2.2 La formalisation

En ce qui concernait la formalisation des concepts que nous avons exposés, nous avons trois hypothèses de base qui guidaient notre travail :

a) Tout processus musical peut être analysé comme étant la concaténation et la superposition de l'évolution de plusieurs formes indépendantes, ayant chacune une évolution propre ;

b) Il est possible de représenter ce type d'évolution par un modèle de système dynamique et ;

c) Les modèles chaotiques peuvent être un choix convenable pour les fonctions d'évolution G d'un système dynamique, tel que nous l'avons définie.

6.2.2.1 Polyphonie virtuelle et système

En fonction du cadre que nous avons défini, nous avons généré une polyphonie virtuelle par la mise en séquence de petits gestes, associés à des états d'un système dynamique, où notre fonction d'évolution G était de la forme $G = Q[F[t]]$ avec $F[t] = F[t - 1] * \lambda * (1 - F[t - 1])$, où la fonction $Q[x]$ est une fonction de quantification et de mise à l'échelle à partir de laquelle nous établissions une correspondance entre l'ensemble des orbites de $F[t]$ et un ensemble fini d'entiers correspondant à des index de morphologies. Par exemple, l'utilisation de l'équation logistique comme fonction d'évolution semblait être un bon choix. Certaines des propriétés, comme les symétries et les morphologies autour des points d'équilibre instable, pourraient être utiles pour organiser l'évolution des gestes de base. Une fonction d'évolution qui génère des schémas semblables avec une oscillation entre répétition et renouveau nous permettrait non seulement d'avoir un ensemble de données organiques, mais aussi simuleraient, en quelque sorte, une des caractéristiques de l'acte compositionnel, c'est-à-dire d'être un processus qui essaye toujours d'avancer en introduisant pas à pas des éléments nouveaux tout en ayant des traces du passé (Figure 39).

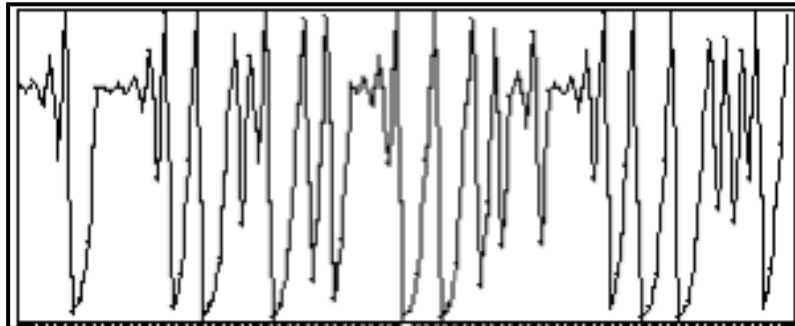


Figure 39 : Evolution de l'équation logistique avec un lambda = 3.99

Ceci pourrait bien fonctionner pour une période courte de temps, mais nous nous trouverions rapidement confrontés à un problème important. La continue variation des paramètres sur le même registre, la répétition, avec de petites variations, des mêmes schémas et sur les mêmes valeurs conduirait forcément à une certaine immobilité. La solution me semblait la plus intéressante était de chercher de donner une direction (un sens) à l'évolution de ce système, en essayant de garder le plus possible les caractéristiques d'autosimilarité et d'alternance entre des morphologies et des régions non typées, et que l'évolution du système puisse parcourir les diverses régions formées par les états qui lui étaient associés. Par pragmatisme, j'ai choisi de contrôler l'évolution avec des fonctions $f_1[t]$ et $f_2[t]$ (Figure 40), ou des courbes, construites manuellement.

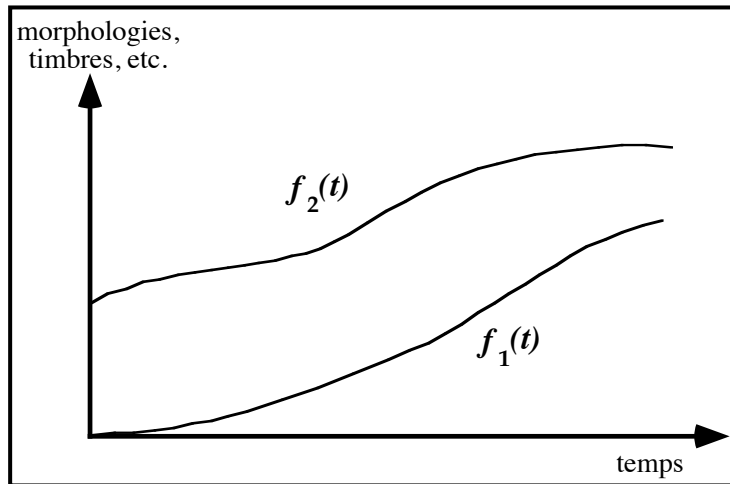


Figure 40 : Fonctions de mise à l'échelle

De cette manière je transformais la fonction d'évolution $F[t]$ de la manière suivante, $G[t] = \sigma[t] * F[t] + \alpha[t]$, avec, $F[t] = F[t - 1] * \lambda * (1 - F[t - 1])$, ayant les conditions initiales $F[t_0] = 0.512$ et $\lambda = 3.99^{42}$, et où $\sigma[t]$ est une fonction de contraction, telle que $\sigma[t] = \frac{f_2[t] - f_1[t]}{b - a}$, où $b - a$ est le registre de variation de $G[t]$. Dans notre cas précis a est approximée par 0 (zéro) et b par 1 (un). Et $\alpha[t]$ est une fonction de translation, soit $\alpha[t] = f_1[t]$ (Figure 41).

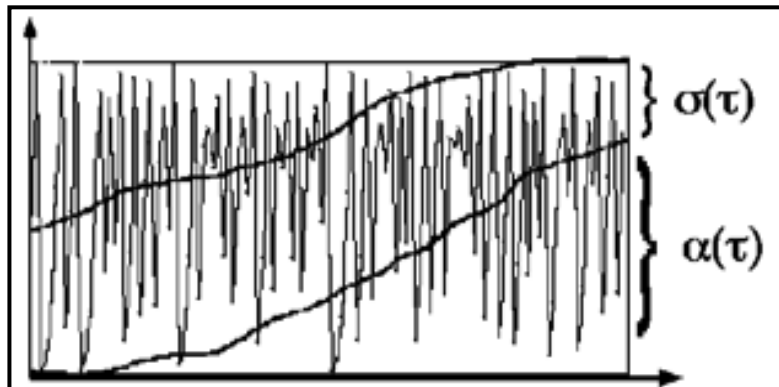


Figure 41 : Les deux fonctions de mise à l'échelle sur la fonction de transition $F(t)$

De la manière dont j'ai utilisé les deux fonctions, $f_1[t]$ et $f_2[t]$, chacune joue un rôle précis. La fonction $f_2[t]$, contrôle l'évolution supérieur de $F[t]$ et détermine, en quelque sorte le degré d'informations nouvelles introduites dans le système, pendant que $f_1[t]$ gère la mémoire du système, en oubliant ou en se rappelant certaines morphologies. Même si nous avons utilisé ces deux fonctions avec une directivité prononcée, il serait possible de penser que les deux fonctions puissent évoluer avec d'autres morphologies. Cette procédure me permettait de manipuler le matériau (l'orbite de $F[t]$) d'une manière toute à fait plastique.

⁴²D'où le nom de la pièce.

Je ne peux rien affirmer au sujet de la linéarité des deux fonctions $f_1[t]$ et $f_2[t]$, mais je peux au moins affirmer que cette transformation est localement linéaire. Cependant, la structure résultante présente encore des morphologies analogues à celles générées par les *points d'équilibre instable* (Figure 42), tout en ayant une direction dans l'espace des index.

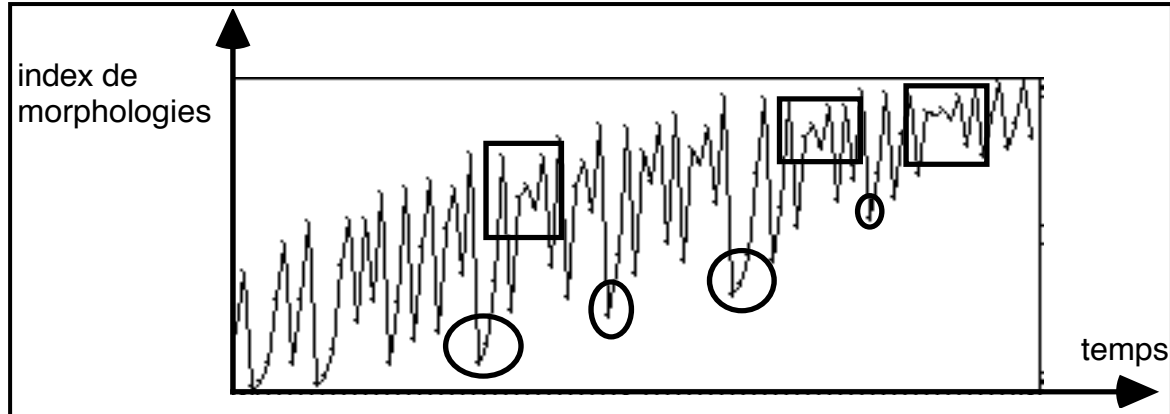


Figure 42 : La fonction d'évolution finale

6.2.2.2 La deuxième section de lambda 3.99

Cette fonction d'évolution ainsi définie a été utilisée pour gérer l'évolution des morphologies à partir d'une association que j'avais faite entre les morphologies et un espace d'index entiers. Par exemple, dans la deuxième section l'espace des index était $I = \{0,1,2,3,4,5\}$ correspondant aux index cités dans le Tableau 8.

Index	Gestes
0	Séquence mélodique (« j »)
1	Appoggiature (« h »)
2	Virus (évolution d'une note répétée vers un nodule) (de « g » vers « d »)
3	Percussions (« i »)
4	Accords (d'un accord joué très sec vers un « rasgueado ») (« b »)
5	Séquences mélodiques statiques en septolet (« f »)

Tableau 8 : Correspondance entre gestes et index

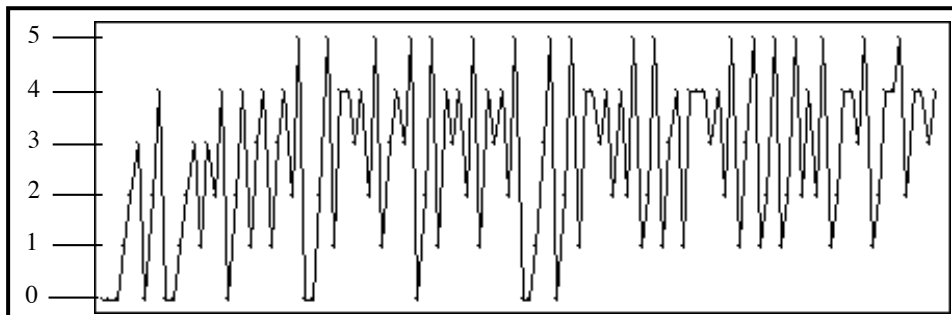


Figure 43 : Séquences des index générés par $G[t]$, pour la deuxième section

Le retour de cette fonction d'évolution (Figure 43) était interprété comme l'évolution des diverses classes de gestes représentées par les index :

0 0 1 2 3 0 2 4 0 0 1 2 3 1 3 2 4 0 etc..

Comme signalé, chacun de ces états (chaque geste, ou chaque morphologie) est en effet une classe d'équivalence. Voyons par exemple la classe appelée *appoggiatura*.

Cette classe de gestes se définit par une *succession d'une ou plusieurs notes, uniformément distribuées avec une faible intensité suivie d'une note pivot*. Les notes précédant la note principale (soit la dernière) ayant une distribution aléatoire autour de celle-ci. La définition d'un ensemble de base se fonde sur une suite ordonnée de gestes ayant un nombre croissant d'éléments, d'un intervalle de variation aussi croissant et d'une diminution graduelle de l'intensité de la note principale par rapport à une augmentation de l'intensité de l'ensemble de l'*appoggiatura*. Ce type de geste crée une évolution entre une *appoggiatura* et un nuage harmoniquement indéfini (Figure 44).

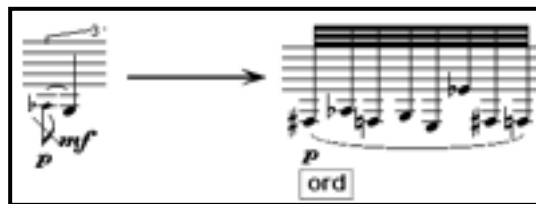


Figure 44 : La classe *appoggiatura*

L'ensemble *appoggiatura* peut être visualisé dans la figure suivante, où nous avons une des évolutions possibles de sept types de base de cette classe (Figure 45).

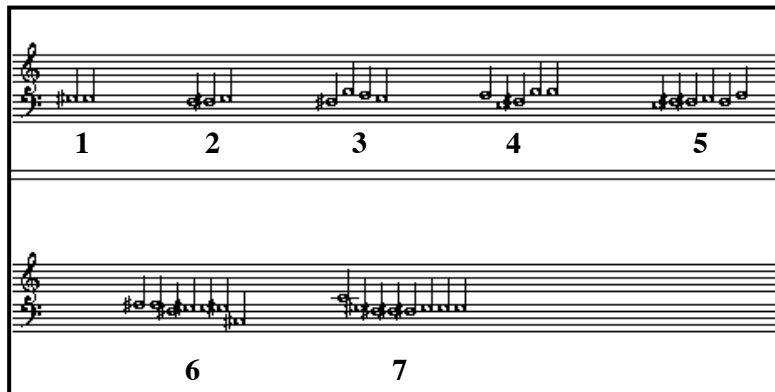


Figure 45 : Un exemple de réification de la classe *appoggiatura*

Pour chaque geste une classe d'équivalence a été créée. Comme nous l'avons vu cette deuxième section était une évolution de la classe *séquence mélodique* (Figure 46), en passant par d'autres gestes⁴³ tels que le *rasgueado* (décliné de plusieurs formes), la *note répétée*, les *séquences statiques*, l'*appoggiatura* (Figure 47) jusqu'aux accords *rasgueado* (Figure 48).

⁴³Dans la Figure 47 nous avons successivement un geste *accord arpégé*, *note répétée*, *séquence statique*, *appoggiatura* et accord *rasgueado*.

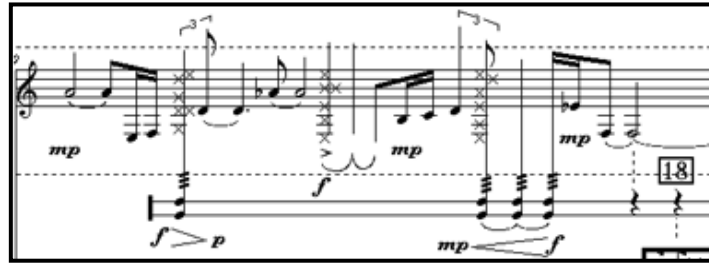


Figure 46 : Une instance de la classe *séquence mélodique*

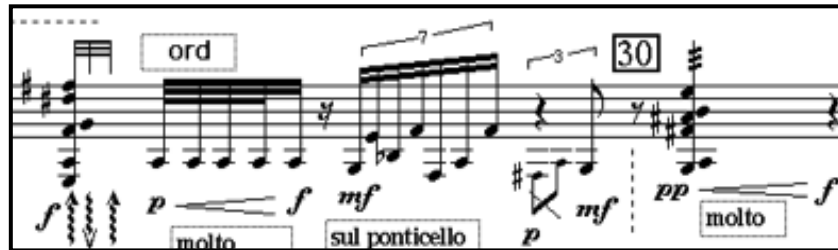


Figure 47 : Séquences de gestes



Figure 48 : Les rasgueados

Dans ce cas précis, chacune de ces formes définit une classe d'équivalence, évitant la répétition et favorisant une perception d'évolution de chaque forme. Les gestes n'étaient certes pas pris dans l'ordre linéaire de leur position dans chaque classe, mais dans un ordre similaire à l'évolution globale des formes, c'est-à-dire pour chaque forme nous avons défini un ensemble d'états (générés à partir d'une évolution linéaire du geste) et une fonction d'évolution $G[t]$ comme pour l'évolution globale, transformée avec des fonctions de compression et décalage, sauf dans le cas de la séquence mélodique qui a été prise dans l'ensemble de ses interpolations.

Dans la Figure 43 (Séquences des index générés par $G[t]$) nous remarquons que la classe *virus* est choisie vingt-trois fois, mais à chaque choix nous ne choisissons pas la même morphologie. Pour cette morphologie (*virus*) une fonction d'évolution permettait de progresser dans cette classe, de manière que l'ensemble des choix suivait l'ordre suivant : (2 2 2 3 6 8 3 5 5 2 3 3 7 12 7 14 9 15 7 10 15 12 15) selon la courbe de la Figure 49.

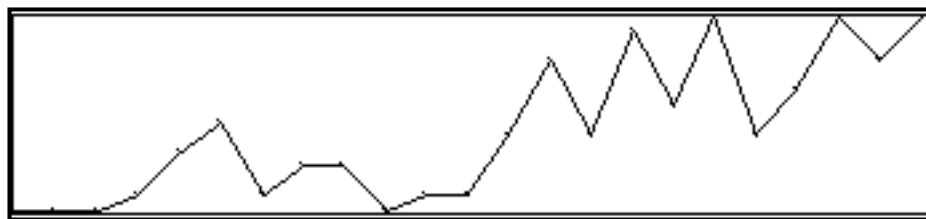


Figure 49 : Courbe d'évolution de la classe « virus »

Le résultat de l'ensemble des choix de cette classe est présenté dans la Figure 50.

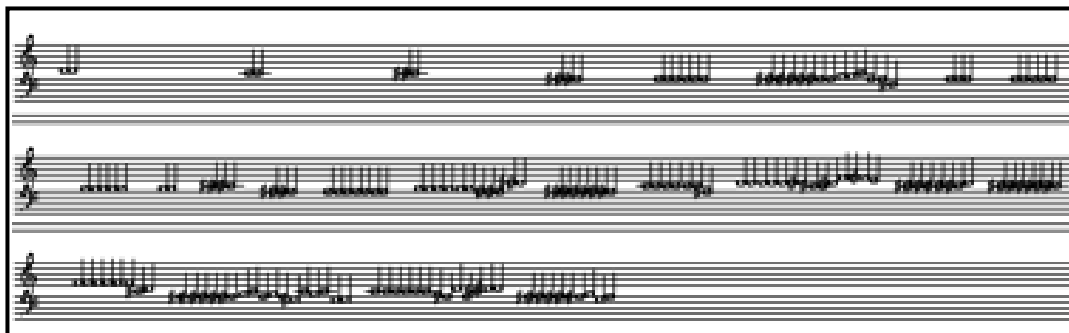


Figure 50 : Évolution des notes répétées vers les nodules, selon une fonction d'évolution chaotique

Ce type de procédure a été utilisé dans toute la pièce pour créer un processus d'évolution en transformation continue, soit pour contrôler l'évolution des index des gestes, soit pour contrôler l'évolution de chaque geste⁴⁴.

6.2.3 Conséquences dans *lambda 3.99*

L'important n'est pas d'avoir trouvé des correspondances universelles, mais de se diriger vers une utilisation des modèles mathématiques, spécialement en ce qui concerne l'écriture assistée par ordinateur, qui tient compte des caractéristiques logiques des modèles et d'une conceptualisation musicale. Une attitude que je tiens à éviter est celle de conférer aux modèles et aux symboles un privilège par rapport aux processus qu'ils représentent, ce qui voudrait dire en d'autres mots qu'une logique formelle n'implique pas forcément une logique musicale. Une idolâtrie, pour ainsi dire. Ceci appliqué à l'expérience que je viens de décrire voudrait dire que les propriétés morphologiques de l'ensemble de valeurs, générées par l'équation logistique, n'ont pas de signification musicale si elles sont déconnectées d'une réalité sonore. Cet ensemble numérique n'a eu qu'un sens au moment qu'il a été utilisé pour formaliser la notion de mémoire au sein d'un processus musical. Les morphologies, créées par le phénomène des « points d'équilibre instable », ont été utilisées pour créer des relations dans le temps entre le matériau musical qu'elles contrôlaient : des gestes. Nous pourrions dire que cette caractéristique a été utilisée pour essayer de formaliser la mémoire dans ce processus musical. Ces morphologies (celles de l'équation logistique) n'ont pas été seulement utilisées pour gérer ou positionner les gestes de base dans le temps, mais

⁴⁴La partie électronique étant un autre système indépendant du système de la guitare, et non seulement un accompagnement de la partie instrumentale.

aussi pour élaborer d'autres entités de degré supérieur. En analysant la partition, nous nous rendons compte de l'émergence de nouvelles formes par l'association de deux ou trois gestes en séquence. Les symétries contenues dans l'ensemble de valeurs générées par l'équation logistique ont contribué à faire ressortir de nouvelles configurations, par la répétition de certaines séquences (par exemple *note répétée*-séquence statique en septolet) qui ont gagné par leur tour, une vie propre. Avoir appliqué des transformations à la fonction d'évolution, en donnant une direction au processus, pousse ces *nouvelles configurations* à évoluer en suivant l'évolution des schémas graphiques montrés. Parmi ces configurations, quelques-unes sont particulièrement remarquables comme la séquence *virus + septolet* (Figure 51). La séquence composée du geste *virus*, plus la séquence statique terminant avec *l'appoggiatura* (Figure 52). Et la séquence *appoggiatura* plus accords *rasgueado* (Figure 53).



Figure 51 : Le geste composé *virus + septolet*

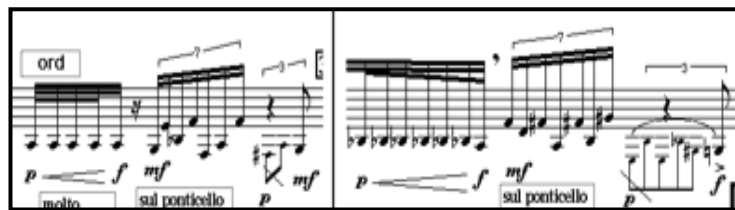


Figure 52 : Gestes composés



Figure 53 : Gestes composés, *appoggiatura+rasgueado*

Le problème de la notion de système est le même. Cette notion a été utilisée aussi pour formaliser une des hypothèses de base de mon travail : tout processus musical peut être analysé comme étant l'évolution de plusieurs formes indépendantes, ayant chacune une évolution propre, et aussi pour permettre de représenter le concept que nous avons nommé de polyphonie virtuelle.

Finalement, le sens qui se dégage de l'utilisation d'un modèle mathématique, en composition musicale, est la conjonction d'un ensemble de facteurs, tels que les concepts musicaux qu'il est censé représenter, la manière dont l'ensemble des paramètres a été conduit dans le temps, et sans doute le contexte esthétique du compositeur. Cependant, il nous paraît clair que les caractéristiques seules d'un modèle ne sont pas une condition suffisante pour créer un sens musical. La connaissance des caractéristiques et du

comportement d'un modèle, de même que la connaissance des caractéristiques d'un instrument musical sont importantes pour pouvoir l'asservir à la pensée et non pour asservir cette pensée au joug d'un système formel quelconque.

6.3 Khorwa (2003)

Avec *Khorwa*, commençait une nouvelle phase dans mon travail. C'était le moment où, en plus d'un questionnement musical, je me proposais de transférer une partie de mes acquis en CAO (en temps différé) au temps réel. Cette phase marque un approfondissement dans le développement de compétences personnelles en musique générative.

6.3.1 Le projet artistique

Khorwa est une installation sonore en temps réel fondée sur la création d'une société d'êtres « musicaux » en utilisant un modèle de vie artificielle, les « agents autonomes ». Cette installation a été créée à l'Ircam Paris/France pendant l'événement « Résonances 2003 ». Ce projet se voulait aussi une réflexion humaine/numérique sur le concept de vie. Proposant, en temps réel et sans intervention humaine, l'évolution musicale d'un matériau musical préalable de la même manière qu'on cultive des microorganismes dans une « boîte de Petri⁴⁵ ». Chaque être musical naîtra, vivra, interagira avec son environnement, sera influencé par lui, aura un nom (une généalogie se construira), se reproduira et mourra. La surface musicale générée devra avoir comme but la formalisation de certains aspects de notre écriture musicale. Cette écriture se fonde sur l'utilisation de petits gestes musicaux qu'évoluent dans le temps [Malt 1996].

Ce projet s'est articulé principalement au tour de trois questions principales :

- 1) Peut-on imaginer une musique qu'évolue comme un être vivant ?
- 2) Quels sont les rapports possibles entre modèles formels et musique ?
- 3) Comment simuler en « temps réel » une écriture musicale ?

Dans *Khorwa*, une « population » d'êtres musicaux, représentés par des « rectangles » sur un écran projeté (Figure 54), est créée.

⁴⁵ Petite boîte stérilisée qui permet de cultiver et d'observer facilement les bactéries.

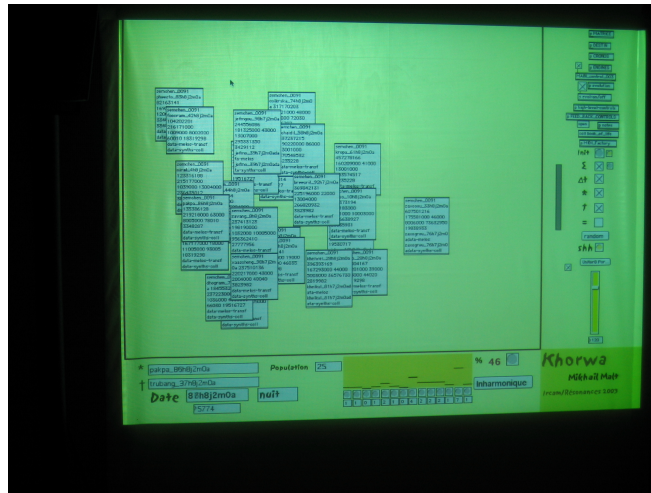


Figure 54 : La projection de l'environnement informatique

Chaque rectangle représente un « individu », possédant : un nom, un temps de vie maximal (hérité génétiquement), cycle de répétition de sa tâche (temps), un niveau de perception (rayon d'écoute), un sexe, un potentiel de reproduction, un rôle (action musicale, tâche) et un comportement vis-à-vis de ses congénères. La position de chaque individu sur l'écran conditionne sa diffusion dans l'espace quadriphonique. Cette population a une évolution, avec des mutations et des évolutions de son « patrimoine génétique musical ». Pendant son existence, chaque agent accomplit sa tâche en appliquant des mutations. Au moment de la reproduction, il passera à sa progéniture un matériel chromosomique évolué.

Le temps dans *Khorwa* se constitue de journées de 100 heures, des mois de 10 jours et d'années de 10 mois. L'activité des êtres musicaux dépend de l'heure de la journée, ils sont plus actifs en milieu de journée et se calment pendant la nuit.

Dans cette installation, l'unique aspect visuel est la projection du programme graphique utilisé pour construire l'environnement artificiel. L'espace visuel est rescrit au strict minimum pour polariser la perception du visiteur vers l'espace sonore quadriphonique.

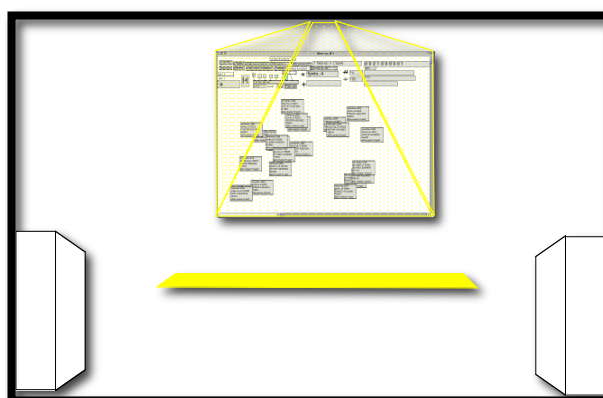


Figure 55 : Schéma de disposition de l'installation

6.3.2 La Formalisation

Dans le cas de *Khorwa* je voulais trouver un modèle qui puisse être plus qu'une simple simulation des choix possibles d'un compositeur, qui puisse être un modèle de contrôle du matériau musical, en me rapprochant le plus possible d'un modèle génératif simulant une écriture musicale. L'utilisation d'un modèle basée sur des agents autonomes me semblait être une solution intéressante, puisqu'il proposait une solution fondée sur l'évolution de petites entités musicales, qui interagissent entre elles de manière à dégager une structure complexe. L'unique modèle d'agent disponible pour une application musicale au niveau de l'écriture musicale et en temps réel, était « boids » de Craig Reynolds, « implémenté » dans MAX par E. Singer. Cependant, comme le modèle avait une orientation graphique explicite, il ne permettait pas son extension dans le sens que je l'imaginai, ce qui m'a amené à développer mon propre environnement.

6.3.2.1 La formalisation de mon propre langage musicale

Dans le cas précis de « *Khorwa* », les agents autonomes ont servi à modéliser ma propre écriture. Cette écriture, comme je l'ai présentée, se fonde principalement sur l'utilisation de « flux » d'événements et de l'utilisation de gestes, ou de morphologies sonores. Ici les gestes se réfèrent à des « catégories » de gestes. En effet, je me suis fondé sur les expériences que j'avais eues avec *Actrinou* (1992/1993), *lambda 3.99* (1994), *Images+C* (1995) et *8-Paths* (1997).

6.3.2.2 Les gestes (formes) de base

Comme je l'ai déjà expliqué, pour *Actrinou* et *lambda 3.99*, afin de modéliser une surface musicale, de la manière décrite, il est nécessaire que chaque geste soit reconnaissable au niveau perceptif, et facilement différencié des autres. De cette première réflexion, résultèrent 14 gestes, ou organismes de base :

- 1) Nuage aléatoire (le fou)
- 2) Le point
- 3) Bruit filtré I (avec RW)
- 4) Profil évolutif I (bactérie)
- 5) Note répétée (diplocoque)
- 6) Séquence de notes répétées
- 7) Profil II
- 8) Lecture d'échantillons modulée (RM)
- 9) John (FM)
- 10) Grains aléatoires + profil dynamique
- 11) Échantillons à vitesse variable
- 12) Pafs (le chanteur)
- 13) Bruit filtré II
- 14) Résonateurs aléatoires

Ces gestes n'étaient pas des entités statiques, mais chacun correspondait à une classe d'équivalence évoluant continuellement pendant le déroulement de la pièce. La question des « catégories » de gestes. Comme signalé dans les paragraphes précédents, chacun des états (chaque geste, ou chaque morphologie) est en effet une classe d'équivalence.

6.3.2.3 Les agents autonomes

Depuis l'apparition de ce concept, au milieu des années soixante-dix dans le champ de l'intelligence artificielle distribuée, la dénomination d'« agent » est utilisée pour désigner soit des entités informatiques logicielles soit des entités informatiques matérielles (comme les robots). De ce fait il n'existe pas, de nos jours, un consensus sur la définition « d'agent ». Pour les besoins de mon travail, j'ai utilisé la définition donnée par M. Wooldridge : « Un agent est un système informatique, situé dans un environnement et qui est capable d'actions autonomes dans cet environnement de manière à atteindre ses objectifs de conception » [Weiss 2000, 29]. J'ajouterai qu'« autonomie » signifie que l'agent doit être capable d'agir, réagir et interagir dans son environnement sans l'intervention d'autres systèmes (humains ou informatiques). Ceci nous amène au fait qu'un agent est une entité possédant : un état interne (dynamique) et des règles de comportement.

6.3.2.4 Pourquoi des « agents » ?

L'intérêt dont peut avoir l'utilisation d'un modèle d'agents dans le contrôle d'événements musicaux vient du fait qu'il fait partie des « modèles orientés individus » [Reynolds 2001]. Ces modèles sont des simulations basées sur les conséquences globales d'interactions locales entre les membres d'une population. L'action de contrôle se fait au niveau de l'individu, c'est-à-dire des règles qui commandent son comportement. Ceci revêt une importance majeure si on confronte ce type de modèle aux modèles statistiques. Bien que ces deux types de modèles aient comme vocation la génération d'informations de contrôle pour des situations globales, dans les modèles statistiques, le contrôle se fait sur des caractéristiques moyennes de la population, tandis que pour les « modèles orientés individus », le contrôle se fait plutôt au niveau des règles de comportement de l'individu. Parmi les « modèles orientés individus », il existe aussi le modèle d'automate cellulaire, qui a été utilisé par plusieurs compositeurs [Miranda 1994]. Cependant, ce modèle n'étant pas capable de représenter des données complexes (ou multidimensionnelles) ni de représenter une « diversité » d'individus, puisque toutes les « cellules » sont semblables, n'était pas adapté à mes besoins. En revanche, le modèle d'« agent » permet une gestion d'espaces « n » dimensionnels et la représentation d'une grande diversité d'individus. De ce point de vue, ce modèle laissait entrevoir la possibilité de simuler d'une manière satisfaisante l'évolution d'« entités » musicales avec l'ensemble des paramètres nécessaires à leur représentation.

Même si tout espace de représentation ou tout outil présente des affordances, un outil formel est toujours neutre du point de vue de la sémantique musicale et du rapport à un espace musical donné ; c'est au compositeur de définir le cadre esthétique et d'établir le rapport entre les paramètres générés et l'espace de composition.

6.3.2.5 L'implémentation et données génétiques

L'implémentation de ce modèle s'est faite dans l'environnement MAX/MSP. L'environnement des agents est une fenêtre MAX (Figure 56), et chaque agent est un « patcher » chargé dynamiquement (Figure 57).

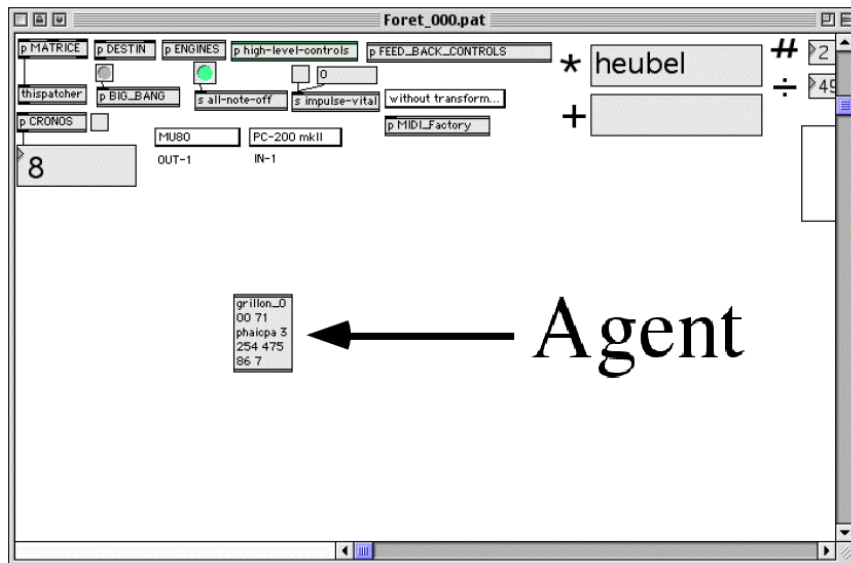


Figure 56 : L'implémentation des agents

À sa naissance, chaque « individu » possédait un « patrimoine génétique » qui se constituait de neuf chromosomes, ainsi distribués :

Ch1) Le nom de l'être musical

Un nom, pour permettre entre autres son identification et de nommer les diverses variables pour l'envoi et la réception de messages « personnels ».

Ch2) Les positions « x » et « y » (localisation spatiale) et un rayon d'écoute (rayon d'interaction et de perception)

Une position spatiale fixe, pour permettre de fixer des repères virtuels et d'orienter la diffusion de chaque individu.

Un rayon d'écoute, pour restreindre l'appareil « cognitif » de chaque agent.

Ch3) Temps de vie maximale

Cycle de répétition de sa « tâche »

Un âge maximal de vie, génétiquement déterminé ; au fur et à mesure qu'un agent vieillit, la probabilité de mort augmente.

Ch4) Sexe

Potentiel de reproduction

Deux états sexuels ont été utilisés. La possibilité de se reproduire. Le deuxième tiers de la vie maximale prévue, est la « période fertile », à ce moment chaque agent peut se reproduire en transmettant une partie de son nom, son l'âge maximal, son rôle et son comportement.

Ch5) Rôle (action musicale)

Comportement

Un rôle (un geste musical). Actuellement, il existe 10 rôles⁴⁶, chaque rôle étant associé à un geste musical (l'événement simple, la répétition, une « protomélodie », éléments de synthèse, échantillons, etc.).

Un mode de comportement. Chaque agent est capable de connaître les agents qui sont à l'intérieur de son rayon d'« écoute », et de modifier certaines caractéristiques de son comportement et de son rôle en fonction de ses voisins. Par exemple, dans un mode de comportement « sociable », chaque agent tend à faire évoluer son geste musical vers la moyenne des « notes pivots » de ses voisins. Par contre, un mode de comportement « antisocial » fera évoluer l'agent à l'opposé de ses congénères.

Ch6) Premier groupe de paramètres du « rôle », divisé en trois gènes : 6a, 6b et 6c.

Ch7) Deuxième groupe de paramètres du « rôle », divisé en trois gènes : 7a, 7b et 7c.

Ch8) Premier profil gestuel :

Ch9) Groupe de profils gestuels (courbes d'évolution de paramètres)

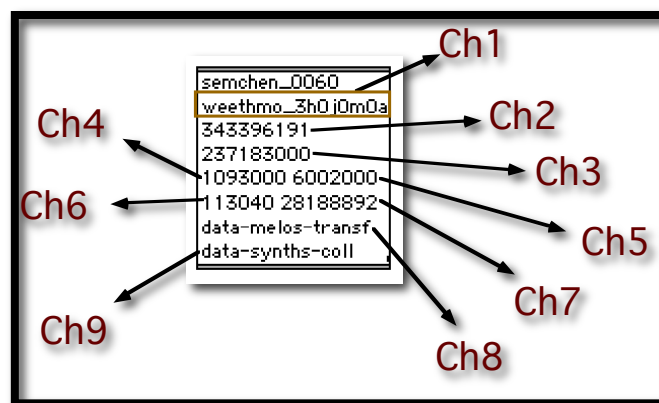


Figure 57 : Un « être » et ses neuf gènes

Chaque agent a un temps de vie et son action dans l'environnement est toujours transitoire. Chaque agent peut aussi se reproduire de manière à transférer une partie de son patrimoine génétique (son nom, son rôle, son matériau, son comportement et sa position spatiale) à sa progéniture. Le résultat final de l'interaction entre les divers agents est la construction d'une « surface musicale ». Les « individus » sont générés de deux manières. La première est appelée « God_generated » et la deuxième est une reproduction asexuée, « Self_generated ». Le mode « God_generated » permet d'initialiser le système, de contrôler le nombre d'agents (évitant la disparition de la « société » créée, ou une surpopulation), et également d'introduire de nouveaux éléments (gènes) en favorisant la variété. Le mode « Self_generated » permet la reproduction des agents de manière à perpétuer des noms, des rôles, des modes de comportement et des matériels génétiques divers (MIDI et audio).

⁴⁶ Les rôles actuels sont en train d'évoluer de manière qu'il est possible que ce nombre change prochainement.

6.3.3 Conséquences dans *Khorwa*

D'après les expériences que nous avons menées, nous pouvons constater que le modèle d'agent autonome offre des avantages spécifiques. C'est un modèle qui possède une mémoire implicite. Il permet de faire évoluer un matériau musical par le biais de la transmission génétique lors de la reproduction, associant ainsi les idées de variation et d'interpolation (au sens musical). Il incorpore aussi la notion « d'organicité » du matériau musical. Le fait que chaque agent puisse « communiquer » avec d'autres agents permet que le matériau généré par une entité soit toujours corrélé avec les matériaux générés par des entités voisines. Évidemment, cette corrélation dépend en grande mesure des règles de comportement qui ont été imposées aux agents.

Comme l'action de chaque agent est toujours dépendante de celle d'autres agents, la notion d'émergence a été fondamentale dans ces expériences. Cette notion s'exprime comme l'apparition d'un sens nouveau lors de l'agrégation d'éléments au sein d'un contexte. Ce sens nouveau qui était explicitement absent des éléments individuels est le résultat de l'interaction entre ces éléments. La dispersion spatiale des agents induisant aussi l'émergence de plusieurs plans musicaux, caractérisés par des groupes familiaux caractéristiques. À partir de ces expériences, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une « surface musicale » pourra être vue comme un système auquel correspondra une dynamique instable, mue par une multiplicité de forces en interaction. La composition sera vue comme un processus en mouvement permanent, une recherche permanente de « sens » entre les divers niveaux de l'espace musical considéré, avec des moments de stabilisation, des moments de déstabilisation et principalement des phénomènes d'émergence.

6.4 Parcours (2013)

Si jusqu'ici, la formalisation avait comme objectif de donner un cadre formel à une idée musicale, pour qu'elle puisse s'exprimer dans l'espace informatique de la simulation, avec *Parcours* j'aborde plus précisément, et plus spécifiquement le problème de la « sonification » de données.

La problématique de la sonification apporte le germe du problème fondamental en épistémologie des sciences, soit du rapport entre l'être humain et le monde, l'univers qui l'entoure, et la manière dont l'humain décode les données qu'il perçoit. Toutes ces données ne sont que des représentations diverses. Si Norwood Russell Hanson [Hanson 1958] nous dit que « *toutes les données portent une théorie* », le regard de l'artiste est aussi un regard porteur de concepts, d'esthétiques, de « pré-jugées » de tout ordre et de tous niveaux. Israel Scheffler, remarque que « *our expectations strongly structure what we see, but do not wholly eliminate unexpected sights... Our categorizations and expectations guide us by orienting us selectively towards the future; they set us, in particular to perceive in certain ways and not in others. Yet they do not blind us to the unforeseen.* » [Scheffler 1967, 44]. Comme je le propose dans mon mémoire d'HDR, [Malt 2014], notre regard par rapport à l'interprétation, ou au décodage, des représentations n'est pas un regard neutre.

Ni notre raison, ni notre perception ne sont fiables. Cela est une excellente nouvelle du point de vue de la création artistique. L'ambiguïté, l'incertitude, l'ambivalence et l'équivoque sont des éléments fondamentaux dans l'œuvre d'art.

L'avantage artistique apporté par la sonification est la possibilité d'appliquer des structures non adaptées, non prévues, pour le contrôle de certains processus ou paramètres, de manière à obtenir des matériaux inouïs. La sonification, en plus de proposer des liens conceptuels, est aussi une stratégie permettant d'aller au-delà de ses propres filtres, de ses propres représentations et de se voir proposer des matériaux et des structures auxquelles on n'aurait jamais pensé, faute de notre prison cognitive. Les structures musicales issues de la sonification peuvent présenter, ou proposer, des cohérences locales, cependant, ces structures sont rarement porteuses de sens « musical » *per se* à un niveau structurel.

D'un point de vue artistique, il n'y a pas de vrai lien entre les données et le résultat. Le lien sera le champ conceptuel créé au tour de l'œuvre à partir de l'axiomatique proposée par le compositeur. Une des avantages au XX^e, XXI^e siècle est le fait que le processus et les concepts sont devenus des matériaux artistiques d'égale importance que les autres aspects des œuvres d'art, le son, la lumière ou la matière.

6.4.1 Le projet artistique

Le projet artistique a consisté en un parcours, un chemin frayé à travers un ensemble de peintures de l'artiste Damien Brohon (les « Exercices cosmogoniques »). Ce projet comporte quelques contraintes et défis. Comment, à partir d'une dynamique visuelle, déduire une dynamique sonore ? Comment déduire tout le matériau sonore à partir de l'espace graphique ? Quel est le sens de l'objet d'une telle démarche ?

6.4.2 La formalisation

Les peintures des « Exercices cosmogoniques » ont été regroupées (par similarité chromatique et figurative) dans des ensembles, du « minéral » à « l'humain ». Un réseau de possibilités de parcours a été établi, avec des paramètres permettant une irrégularité des « temps de présentation », des chemins statistiquement possibles, et un séquençement basé sur du « fondu enchaîné ». Une représentation en forme de graphe a été utilisée pour générer les parcours (Figure 58).

La première étape a consisté à construire une dynamique visuelle fondée sur le parcours du graphe, par un fondu enchaîné des différentes images. Un système avec mémoire gérait le temps moyen d'affichage de chaque image, et le changeait lors de la répétition d'une image.

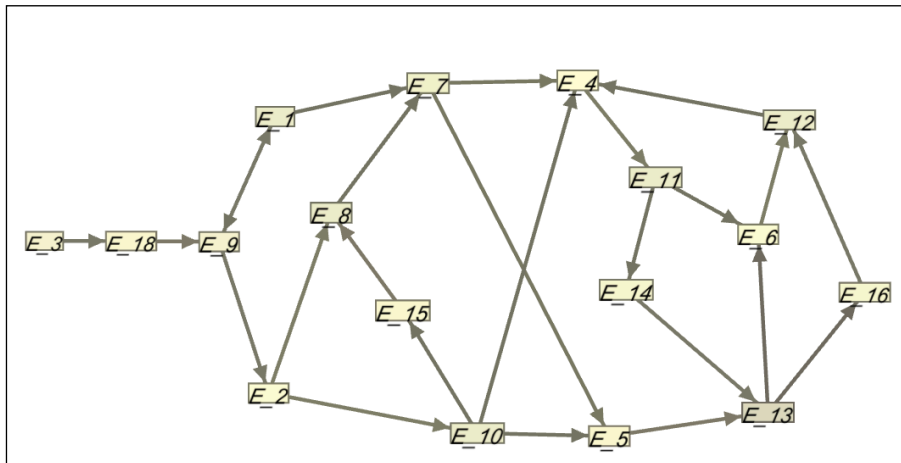


Figure 58 : Graphe utilisé pour représenter le parcours dans *Parcours* (2013)

L'espace sonore s'est construit comme la sonification de l'espace visuel et de sa dynamique par quatre couches :

1. À chaque entrée dans un nouvel ensemble, un échantillon de cloches ponctuait le début d'une nouvelle séquence de peintures. Cela était l'unique élément préalable, non sonifié.
2. Le fond harmonique. L'image affichée était échantillonnée pour créer une atmosphère harmonique sonore, en transposant les couleurs à des fréquences et d'autres paramètres sonores pour piloter des filtres résonants.
3. Dans une troisième couche, quelques échantillons de couleurs, statistiquement prélevées, créent des traits presque mélodiques.
4. Une dernière couche tissait des « commentaires », par la matérialisation des images, des gestes présents dans le contenu spectral des sons. Les extraits graphiques étaient considérés comme des sonagrammes desquels je déduisais le son correspondant.

Une dynamique visuelle et sonore est alors créée. Les chemins possibles (très nombreux) sont parcourus, et la combinatoire finale, importante. La séquence présentée, ne sera qu'un extrait sur un « Parcours » beaucoup plus long, presque infini...

Le sens ? Presque toujours, une construction personnelle... Quelques possibilités,

- L'aspect figuratif, ou non, des images et les qualités diverses des sons évoqueront, en nous, d'autres images, des références que nous assemblerons pour construire des contenus personnels, des interprétations de nos perceptions. Le sens sera une projection.
- On ne considère que les qualités élémentaires des divers espaces. Couleurs, formes, textures, rythme, etc. Une « perception réduite », pour paraphraser Pierre Schaeffer. Le sens est encore une projection.
- On se repose simplement dans la perception de chaque espace. La sémantique comme perception, avec un minimum de conceptualisation.

6.5 Le tapis de rêves de la bête (2014)

Le tapis de rêves de la bête (2014) est une bande de musique électroacoustique quatre pistes destinées à habiller musicalement une sculpture de faïence (Figure 59), l'*Ovomaniak* (nommée, pendant la création « la bête »), de l'artiste Michel Costiou, en résidence à la Faïencerie HB-Henriot à Quimper.



Figure 59 : L' Ovomaniak, ou « la bête », de Michel Costiou

6.5.1 Le projet artistique

Le projet artistique se fondait sur l'idée que « la bête », en faïence, ait pu écouter et ressentir tout ce qui se passait autour d'elle. Elle a pu écouter les sons de l'usine, les machines, les sonneries, les gens, les « peintuses »⁴⁷ et leurs radios, la voix de l'artiste et même ressentir ses gestes qui la façonnaient, ses caresses et celles de Stéphane, technicien assistant de Michel Costiou. Mais le tout se trouve tissé, entrecroisé, comme sur un tapis. C'est un tapis, ou peut être un couvre-lit à l'ancienne, ou les motifs, presque répétitifs racontent une histoire, mais sans direction précise. C'est une répétition asymétrique. Il n'y a pas de narration. C'est un rêve contemplatif. On reconstitue l'histoire comme on reconstruit un puzzle, comme on reconstitue une mémoire, avec un caractère légèrement surréaliste et inquiétant, en faisant référence à d'autres situations. Une bête (avec des rêves surréalistes) en rappelle d'autres. C'est la raison pour laquelle, quelques éléments reviennent presque toujours les mêmes. Une espèce de névrose, de cycle, d'habitude difficile à briser. Un tissu, un tapis à écouter. Ça demande une attitude contemplative du visiteur. Contemplative dans le sens de « Considérer attentivement ; s'absorber dans l'observation de. » (selon le Grand Robert), et non dans un sens religieux ou exotique. Une contemplation à l'occidentale. Cette attitude est fondamentalement différente de l'écoute qu'on a dans un concert, où il y a l'expectative d'une narration donnée, dans un espace de temps donné. Ici, il y a l'espace physique, mais le temps à consacrer est défini par le visiteur.

6.5.1.1 La formalisation

D'un point de vue technique la bande se constitue de cinq catégories de matériaux audio :

1. Les sons originaires de la manipulation des objets de faïence **mof**,
2. Les sons issus de l'ambiance de l'usine (machines, etc.) **adu**,
3. Des sons liés à l'humain (conversations, radio, etc.) **slh**, et
4. Un premier ensemble de matériaux électroniques, issu de transformations diverses (changements de vitesse, transpositions, etc.) des trois premiers groupes **td**, et
5. Un deuxième ensemble de matériaux électroniques issu de l'analyse et resynthèse des différents éléments **arde**.

Le tout a été considéré comme un système dynamique à cinq états (En se rappelant que chaque état ne contient pas qu'un son, mais fait référence à une catégorie, à une famille de matériaux sonores) chaque état évoluant indépendamment, simplement contrôlé par une densité d'évènements par seconde. L'unique état dépendant des autres, mais que d'un point de vue harmonique, était la couche **arde**. Cette couche assurait la cohérence harmonique et la fusion entre les quatre autres groupes⁴⁸.

⁴⁷ Les artisanes, qui peignent manuellement les motifs sur les divers supports (plats, bols, sculptures, etc.) sont appelés « peintuses » pour les différencier de l'artiste peintre, malgré leurs talents évidents.

⁴⁸ Tel comme des cors dans un orchestre classique.

7 Interfaces & outils

Comme cela a déjà été remarqué, certaines recherches ne pouvaient se faire sans des outils appropriés, raison pour laquelle une partie de mon travail a dû se tourner vers l'élaboration et le développement d'outils et d'interfaces logicielles dédiées. J'énumère dans la suite les développements les plus importants.

7.1 Librairie *PW-alea* (1992), *OM-alea* (2002).

Librairie de modèles stochastiques, pour les environnements de CAO PatchWork et OpenMusic, constituée de : générateurs de suites de variables aléatoires selon plusieurs distributions de probabilités, et de modèles de promenades aléatoires
Environnement de développement : langage de programmation Common-Lisp dans Patchwork et OpenMusic. Cette librairie est actuellement distribuée par le Forum Ircam. Cette librairie a été fondamentale pour ma recherche sur l'utilisation de modèles stochastiques en musique.

7.2 *CSound/Edit-sco* (1993)

Librairie pour la génération de « scores » (partitions) de données pour l'environnement de programmation Csound. Librairie pour l'environnement de CAO PatchWork. Cette librairie a été portée et augmentée, pour OpenMusic par Karim Haddad. Environnement de développement : langage de programmation Common-Lisp dans Patchwork. Librairie développée pour le contrôle de la synthèse utilisant Csound.

7.3 Librairie *PW-chaos* (1994), *OMchaos* (2002),

Librairie de modèles chaotiques et de fractales, pour les environnements de CAO PatchWork et OpenMusic, constituée de : générateurs de suites chaotiques déterministes selon divers modèles « non linéaires », générateurs de structures « auto similaire » (fractales) selon les modèles de « mid point » et de « IFS » (Iterated Function System). Environnement de développement : langage de programmation Common-Lisp dans Patchwork et OpenMusic. Cette librairie est actuellement distribuée par le Forum Ircam.

7.4 Librairie « *Combine* » (1995)

Librairie de fonctions combinatoires et de permutation, fondée sur le travail de composition de Brian Ferneyhough, pour l'environnement de « composition assistée par ordinateur » PatchWork. Cette librairie a été portée, pour l'environnement et OpenMusic par Kylian Sprote. Environnement de développement : langage de programmation Common-Lisp dans Patchwork. Cette librairie est actuellement distribuée par le Forum Ircam, dans le dossier « OM_Contributions ».

7.5 Librairie *Profile* (1995)

Cette librairie, de modèles de transformation géométrique appliquée à des structures mélodiques, a été réalisée en collaboration avec Jacopo Baboni Schilingi pour PatchWork. Cette librairie a été portée, pour l'environnement OpenMusic et PWGL par Jacopo Baboni Schilingi. Cette librairie, dans sa version pour OpenMusic, est

actuellement distribuée par le Forum Ircam. Environnement de développement : langage de programmation Common-Lisp.

7.6 Librairie *Rolmo* (2003)

Librairie de fonctions pour la transcription musicale de la musique rituelle tibétaine, assistée par ordinateur, pour OpenMusic. Ce développement a été utilisé par Mireille Helffer pour la transcription de divers extraits musicaux. Mireille Helffer a utilisé les résultats de cet environnement, notamment dans : Mireille Helffer, Traditions musicales dans un monastère du bouddhisme tibétain, *L'Homme*, 171-172, Musique et anthropologie, 2004 (<http://lhomme.revues.org/document1334.html>) et dans Mireille Helffer, Regard sur les formes dans la musique rituelle du bouddhisme tibétain, in *Cahiers de musiques traditionnelles*, vol. 17, p. 262-295, 2004, p. 285-288.

Environnement de développement : langage de programmation Common-Lisp dans OpenMusic.

7.7 Librairie *OMfil* (2005-2008)

Librairie de filtres de données pour OpenMusic. Cette librairie est encore en cours de développement. Environnement de développement : Langage de programmation « Common-Lisp » dans OpenMusic. L'utilisation de cette librairie vise le lissage de séries temporelles, notamment celles issues d'analyses de descripteurs audio.

7.8 Le *Psycho-lab* (2002-2006)

Ensemble d'applications didactiques pour l'enseignement de l'acoustique et de la psychoacoustique. Environnement de développement : Max (© www.cycling74.com).

7.9 Les *IndescripTools* (2007-2014)

Cet outil était à la base un ensemble d'applications à but pédagogique, destinées à initier les musicologues à l'utilisation des descripteurs sonores (énergie, fréquence fondamentale, attaques, brillance) dans l'analyse musicologique. J'avais utilisé ces outils dans le cadre de mon enseignement de M1, « Analyse du signal musical » à Paris IV, Sorbonne. Environnement de développement : MAX/MSP » (© www.cycling74.com). Actuellement, cet outil se développe pour devenir un environnement d'exploration de descripteurs audio pour l'analyse musicale. Il comprend l'analyse d'une cinquantaine de descripteurs audio plus la possibilité d'importer des analyses d'autres sources (zsa.descriptors, Ircamdescriptors~, Sonic Visualiser, etc.), et de procéder à des analyses statistiques, telles que la ACP (analyse de composantes principales) pour la réduction de l'espace de données.

7.10 Le *Cagener* (2008-2014)

Projet en cours de développement, réalisé en collaboration avec Benny Sluchin, concerne un ensemble d'outils (interfaces) pour l'aide à l'interprétation d'une certaine catégorie de pièces de Cage (« Number pieces », solo, etc.), Boulez (Domaines), Xenakis (Stratégie & Duel) et Stockhausen (Solo), fondés sur le principe d'œuvre ouverte et de l'improvisation. Ces outils visent la construction d'interfaces pour l'interprétation, aussi

bien que des programmes graphiques permettant d'étudier et générer des données pour la reconstruction de ces pièces. Environnement de développement : Langage de programmation Common-Lisp dans OpenMusic et Max.

7.11 La librairie *Zsa.Descriptors* (2008-2010)

Projet réalisé en collaboration avec Emmanuel Jourdan (Réalisateur en informatique musicale chargé de l'enseignement à l'Ircam et développeur chez cycling74). Librairie d'outils d'analyse de descripteurs sonores en temps réel.

7.12 La librairie *Symb-desc* (2012-2014)

Projet en cours, réalisé en collaboration avec Stéphane Schaub, dans le cadre de ma collaboration avec le département de musique de l'Université de Campinas, São Paulo, Brésil, d'outils d'analyse de bas niveau de séries temporelles issues de données symboliques de partitions. Ce projet se présente comme un ensemble de fonctions dans l'environnement OpenMusic, pour l'aide à l'analyse musicale.

8 Recherche, création et développements

Cela n'est pas une conclusion, juste une halte pour signaler où j'en suis et où je me dirige. L'invariant, ou l'élément servant de fil conducteur est, et continue à être, la problématique de la modélisation et de la composition, soutenue par une réflexion sur la représentation. Comme je l'ai signalé au début de ce texte, de ce fil conducteur émane un ensemble de questions et de sujets qui guident mon travail de recherche et de création, dont :

- Modélisation et analyse. L'étude de l'expressivité des modèles formels en CAO, et dans la musique générative en temps réel, et la modélisation d'œuvres ouvertes dans le cadre de l'interprétation assistée par ordinateur.
- Le développement d'outils conceptuels et analytiques pour l'extraction d'informations de données symboliques, aussi bien que du signal audio. L'implémentation de savoirs, issus de MIR, pour l'analyse musicologique. Ce travail est une aide importante au processus de modélisation ;
- L'étude des possibilités expressives et artistiques de la sonification ;
- Une réflexion sur la question de la représentation.

Et finalement, les diverses activités à un niveau académique, de publication et de coordination d'actions.

8.1 Modélisation et analyse

Cette partie de ma recherche s'articule en trois volets, la modélisation et analyse d'œuvres ouvertes, la participation au groupe d'analyse des musiques électroacoustiques et le développement d'outils pour l'analyse musicale.

8.1.1 Modélisation et analyse d'œuvres ouvertes

Le travail, avec le développement d'interfaces et l'analyse d'œuvres ouvertes, en collaboration avec Benny Sluchin se poursuit. La prochaine étape concerne la généralisation de l'interface développée pour Two⁵ à toutes les autres *Number Pieces*. Ensuite, nous commencerons la modélisation de Solo de K. Stockhausen et la préparation d'une possible collaboration avec le chef d'orchestre Arturo Mayo, pour la réalisation des interfaces informatiques pour la performance de *Stratégie* de I. Xenakis, en 2015 avec l'ensemble Intercontemporain.

8.1.2 Le groupe d'analyse des musiques électroacoustiques – SFAM

Actuellement le développement de méthodologies d'analyse fondées sur l'utilisation de descripteurs audio de bas niveau m'ont tout naturellement amené à rejoindre le groupe d'analyse de la musique électroacoustique⁴⁹ composée de :

- Alain Bonardi, CICM – EA1572 Université Paris 8, Ircam ;
- Bruno Bossis, APP Université Rennes 2, OMF-MINT Université Paris- Sorbonne ;
- Pierre Couprie, OMF-MINT Université Paris- Sorbonne, MTIRC De Montfort University ;
- Frédéric Dufeu, CeReNeM University of Huddersfield ;
- Laurent Pottier, CIEREC – EA3068 Université Jean Monnet Saint-Etienne et
- moi-même.

Avec ce groupe nous mettons en commun différentes approches d'analyse de la musique électroacoustique, dès l'analyse sémiotique à l'extraction de descripteurs audio pour l'analyse. Outre les réunions ordinaires, nous avons réalisé deux colloques :

Analyse par segmentation des musiques électroacoustiques, le Lundi 21 janvier 2013 de 10 h 30 à 17 h 30 - Salle du conseil bâtiment G Université Jean Monnet, Saint - Étienne

Analysis of Electroacoustic Music: Contexts, Methods, Perspectives, le mardi 18 mars 2014 à l'University of Huddersfield, organisé en collaboration avec le *Centre for Research in New Music* (CeReNeM) de l'Université de Huddersfield, à Huddersfield Angleterre.

Et un atelier *Outils pour l'analyse de la musique électroacoustique*, dans le cadre des Journées d'Informatique Musicale 2013, le 15 mai 2013 à la Maison des Sciences de l'Homme, Paris Nord.

Ce groupe continu ayant comme prochains objectifs la participation à l'EMS2014 (dont nous avons déjà l'acceptation de nos propositions), et la publication d'un ouvrage avec les différents points de vue exprimés. Cela est une excellente opportunité de faire évoluer mes travaux en les confrontant périodiquement à la discussion et à l'analyse de mes pairs.

8.1.3 Un outil dédié aux musicologues

Je réalise le manque d'outils destinés aux musicologues, désireux de profiter des nouveautés apportées par les recherches en MIR (Music Information Retrieval, ou Music

⁴⁹ Site en construction à <http://ame.sfam.org/>.

Information Research) dans leur travail. Certes, il existe un certain nombre d'outils, que s'approprient les musicologues, comme Praat, Audiosculpt, etc. Cependant, actuellement il existe peu d'outils destinés aux musicologues tels que *Sonic Visualiser*⁵⁰, l'Acousmographe ou EAnalyse. Un autre point est le manque d'une méthodologie, ou d'une proposition de flux de travail. Les musicologues désireux d'emprunter cette voie, de l'extraction d'informations audio, se voient tiraillés entre au moins cinq ou six logiciels, avec toutes les conversions de formats nécessaires, pour être capables d'analyser, de représenter et de présenter leur travail.

Évidemment, je n'ai pas la velléité de résoudre tout le problème. Cependant, dans ce cadre, je continue à développer un outil d'étude et de recherche pour l'utilisation de descripteurs audio de bas niveau en analyse musicologique, les *IndescripTools*, et la librairie *Symb-desc* (avec Stephan Schaub) pour l'analyse de données musicaux symboliques. Ces développements se font aussi dans le cadre d'une collaboration avec le « NICS » (Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora) de l'Université de Campinas à São Paulo, Brésil. Ce travail suit la voie commencée par le développement de la librairie *zsa.descripteurs* (avec Emmanuel Jourdan) et poursuivie par l'élaboration de la représentation BStD.

8.1.4 La segmentation

La segmentation me semble être l'action principale, l'action fondatrice par le biais de laquelle commence un processus d'analyse. Savoir où finit et commence un phénomène, une action. C'est après avoir procédé à l'identification d'articulations que nous commençons à identifier, cataloguer, relier, interpréter, etc.

Cela est la raison pour laquelle, le prochain pas, concernant l'analyse assistée et le développement d'outils se fondera aussi sur une étude des processus existants de segmentation automatique, de leurs possibles utilisations dans le cadre musicologique et de l'implémentation de certains d'entre eux.

8.2 Sonification, création et performance

Suite aux problématiques soulevées par l'étude de la représentation, en lien avec les possibilités créatrices et sémantiques offertes par les systèmes génératifs, une nouvelle phase de recherche en création se développe. En plus de la réalisation d'installations sonores (avec le peintre Damien Brohon)⁵¹, je développe aussi un travail d'improvisation avec le peintre Michel Costiou. Dans cet exercice de style, la sonification du geste de l'artiste devient le matériau pour un tissu musical qui évolue en contrepoint avec la réalisation d'une œuvre plastique. Ce travail, mêlant performance, vidéo et audio, est en cours de recherche, une des premières réalisations étant la sonification de sa sculpture en faïence, présentée le 22 mars 2014 à Quimper, avec *Le tapis des rêves de la bête*.

En parallèle je commence aussi à évaluer le potentiel artistique de modèles de ADN et de processus tels que ceux de la réplification.

⁵⁰ <http://www.sonicvisualiser.org/>.

⁵¹ En ce moment, je finalise l'installation *Demeure* (avec des peintures de Damien Brohon), qui devrait être créée en mai 2014, à Bourges lors des JIM 2014.

8.3 La représentation

Comme je l'ai signalé dans le mémoire qui s'associe à ce parcours de recherche et création une nouvelle phase dans mon étude, de la représentation commence. Cette phase, se fondera principalement, d'un point de vue philosophique, sur les apports de la philosophie bouddhique du Mahayana (notamment dans le cadre des écoles Cittamatra et Madhyamika du bouddhisme tibétain) concernant les questions de cognition et celle des deux réalités. Pour cela je commencerai avec une étude approfondie de la conférence « Musique et bouddhisme », de Jonathan Harvey lors de l'académie Acanthes en 2004 à Metz. Dans cette conférence le compositeur présente une introduction sérieuse, et relie de manière très raisonnée les éléments philosophiques bouddhiques à certains faits musicaux.

8.4 Diverses activités, autour de la transmission

8.4.1 Le Coursus de l'Ircam

Même si j'ai diversifié les disciplines enseignées⁵², je continue à enseigner principalement la composition assistée par ordinateur au sein du Coursus de Composition et d'Informatique Musicale⁵³ de l'Ircam.

Les 50-60 dernières années ont vu le métier du compositeur évoluer de manière spectaculaire. Si dans les années 50 jusqu'au milieu des années 80 les ordinateurs étaient des ressources chères et seulement disponibles dans le contexte de grandes institutions, de nos jours ils sont largement disponibles au grand public. Nous avons une puissance de calcul nettement supérieure qu'il y a 60 ans. Évidemment, calculer plus ne signifie pas qu'on calcule mieux, ou que les solutions artistiques sont meilleures. Cependant, le fait de pouvoir calculer plus et plus rapidement, permet aux créateurs de pouvoir contrôler ces nouvelles ressources avec plus d'interactivité. Si au début des années 1990, la synthèse par modèles physiques (avec le logiciel Mosaic, sur un PDP-10) d'une vingtaine de secondes pouvait prendre de 3 à 5 heures, ce temps est aujourd'hui divisé à peu près par 300 ! Le calcul peut presque suivre la vitesse de l'intuition.

En plus de la vitesse, les créateurs disposent aussi de ressources électroniques et robotiques permettant, à tout public, la construction de dispositifs divers fondés sur l'interaction et la commande informatique. L'espace de création musicale s'est élargi. Si le compositeur écrivait des notes sur du papier pour des interprètes humains jouant d'instruments acoustiques, actuellement ce même compositeur code aussi des instructions pour que des dispositifs informatiques créent les évènements sonores qu'il souhaite. Crayon et papier ne sont plus les seuls outils disponibles. Ce même compositeur construit aussi de dispositifs mécaniques, électroniques et informatiques, bâtissant des œuvres mixtes, se déployant sur plusieurs espaces artistiques. Le contexte actuel propose de grands défis. Le métier de compositeur est en pleine mutation. Nous avons actuellement, en plus du compositeur classique, le créateur sonore, le designer sonore et le « performeur ».

Le Coursus, étant premièrement une formation visant donner au compositeur des connaissances sur les outils conceptuels, matériels et logiciels des technologies

⁵² J'enseigne aussi la synthèse et l'analyse du signal.

⁵³ Même si dans mon esprit, c'est plutôt une formation à la musique informatique !

disponibles pour l'expression artistique, notamment la musique, elle nous pousse à nous poser constamment, d'un point de vue pédagogique et artistique, un bon nombre de questions :

- Comment faire évoluer la formation avec les ressources technologiques existantes ?
- Quelles sont les connaissances qu'un compositeur a vraiment besoin d'avoir pour utiliser pleinement les moyens technologiques actuels pour son expression artistique ?
- Comment adapter cette formation pour que l'intégration des nouvelles formes d'expression permette aux jeunes créateurs une réflexion sur leur pratique artistique ?

Ces questions ne sont pas de la pure spéculation intellectuelle, elles sont, de mon point de vue, fondamentales pour faire évoluer la pratique de la composition et de la création sonore en général.

8.4.2 L'encadrement de travaux universitaires.

À un niveau académique, je poursuis l'encadrement d'étudiants pour des mémoires et des thèses⁵⁴. Au moment où j'écris ces lignes, j'encadre :

Le stage de pos doctorat de Lúcia Cervini. Pianiste, professeure à l'Université de Pelotas (Rio Grande do Sul, Brésil), faisant une recherche sur l'improvisation pianistique et les nouvelles technologies, et le mémoire de Master de Johan Raghbate, à l'école Louis Lumière, Paris.

Je devrais aussi codiriger le stage de postdoctorat de Tatiana Catanzaro, compositrice, sur le sujet de l'analyse musicale de la musique spectrale. Cet encadrement se fera en conjoint avec Jonatas Manzoli, dans le cadre de ma collaboration avec le département de musique de l'Université de Campinas, São Paulo, Brésil.

8.4.3 Le groupe d'étude autour du rythme (avec le compositeur Karim Haddad)

Dans le cadre de l'Ircam, je coordonne (avec le compositeur Karim Haddad) un groupe d'études au tour du rythme. Ce groupe a comme vocation de s'interroger sur l'utilisation du rythme dans le contexte de création musicale. Ce groupe existe depuis 2012.

8.4.4 Le Master ATIAM

Je fais partie du corps enseignant du Master ATIAM depuis 2009, avec la coordination (avec Moreno Andreatta) de deux unités pédagogiques : MSV (musique et sciences) et CMC (création musicale contemporaine). Cette collaboration continue pour l'année qui suit avec une reformulation des enseignements, dû au dépôt de la nouvelle maquette.

⁵⁴ Voir CV p. 27.

9 Bibliographie

BARRIERE, Jean-Baptiste (1990), « Devenir de l'écriture musicale assistée par ordinateur: formalismes, formes, aides à la composition », *Revue d'analyse musicale*, 3^{ème} trimestre, Paris, p. 52-68.

CARPENTIER, Grégoire (2008), *Approche computationnelle de l'orchestration musicale Optimisation multicritère sous contraintes de combinaisons instrumentales dans de grandes banques de sons*, thèse de doctorat, UPMC - Paris-6.

CHIASSON, Frédéric (2007), « L'orchestration selon Koechlin : recherche d'un point de rencontre entre la pratique musicale et les sciences cognitives », in *Actes du Colloque international : « Composer au XXI^{ème} Siècle – Processus et Philosophies »*, OICM, Montréal (Québec) Canada, 28 février – 3 mars 2007.

EDLUND, Jonas (2004), *The Virtues of the Musifier: A Matter of View*, 01 Septembre 2004. <http://www.interamus.com/techTalk/musificationAndView.html> (23/04/2014).

GREY, John (1997), « Multidimensional perceptual scaling of musical timbres », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 61 (5), p. 1270-1277.

HALL, Michael (1984), *Harrison Birtwistle*, Robson Books, London.

HANSON, Norwood Russell (1958), *Patterns of Discovery*, Cambridge University Press.

HELFFER, Mireille (1994), *Mchod-rol, Les instruments de la musique tibétaine*, Paris : CNRS Éditions ; Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme.

HELFFER, Mireille (2004), « Regard sur les formes dans la musique rituelle du bouddhisme tibétain », *Cahiers d'ethnomusicologie* n° 17. <http://ethnomusicologie.revues.org/566> (27/03/2013).

KELLER, Damian , Brian FERNEYHOUGH (2004), « Analysis by modeling: Xenakis's ST/10 080262 », *Journal of New Music Research*, vol. 33 (2), p. 161-171.

KOECHLIN, Charles (1943), *Traité d'Orchestration*, Max Eschig, Paris.

LANGTON, Cristopher C. (1996), *Artificial Life, an overview*, Cristopher C. Langton editor, MIT Press.

LEVY, Pierre (1987), *La Machine Univers*, Editions la Découverte, Paris-France.

LIGETI, Gyorgy (1960), « Pierre Boulez: Decision and Automation in Structures Ia », *Die Reihe*, Northcott, Bayan, édition anglaise, n° 4, p. 36 – 62.

LIVSHIN, Arie A., Xavier RODET (2004), « Musical instrument identification in continuous recordings », *Proc. of the 7th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-04)*, Naples, Italie, 5-8 Octobre, p. 222-226.

LORRAIN, Denis (1980), *Une Panoplie de Canons Stochastiques*, Rapport Ircam n° 30, Paris.

MAHE, Jean-Michel (2013), *Analyser l'interprétation pianistique avec sonic visualiser et la BStD*, Mémoire de recherche de Master 2, sous la direction de madame le professeur Danièle Pistone, UFR de Musique et Musicologie, Paris IV – Sorbonne, 2013.

MALT, Mikhail (1994), « Modèles Mathématiques et Composition Assistée par Ordinateur, Modèles stochastiques et Modèles chaotiques », *I Simposio Brasileiro de Computação e Musica*, Caxambu MG, Brasil, p. 125-132.

MALT, Mikhail (1995), « Descente au Paradis, notes sur la composition de la musique pour la séquence visuelle *Descente au Paradis* » de Sabine PORADA, *JIM 95, II^e Journées d'informatique Musicale*, LAFORIA, Université Paris VI, Paris, p. 41-52.

MALT, Mikhail (1996), « lambda 3.99, Chaos, et Composition », *JIM96, III^e Journées d'informatique Musicale*, Ile de Tatihou - France, p. 44-54.

MALT, Mikhail (1998a), « Un modèle empirique pour la détermination d'un coefficient de transition pour les accords », *JIM98, V^e Journées d'informatique Musicale*, La Londe-les-Maures, France, du 5 au 7 mai 1998, p. B4_1 – B4_10.

MALT, Mikhail (1998b), « L'utilisation de la composition Assistée par Ordinateur par Brian Ferneyhough », *Cahiers « Compositeurs d'aujourd'hui », textes réunis par Peter Szendy*, Ircam, Paris, p. 61-106.

MALT, Mikhail (2000), *Les mathématiques et la composition assistée par ordinateur – Concepts, outils et modèles*, thèse de doctorat, pour l'obtention du grade de Docteur en Musique et Musicologie du XX^e siècle, EHESS, 18 décembre 2000.

MALT, Mikhail (2001a), « Growing an Artificial Musical Society », in *ALMMÀ 2001, Workshop on Artificial Life Models for Musical Applications*, Sixth European Conference on Artificial Life, Prague, p. 29-36.

MALT, Mikhail (2001b), « In Vitro, un système multi-agents en MAX/MSP », *JIM2001, VIII^e Journées d'informatique Musicale*, Bourges, p. 73 - 80.

MALT, Mikhail (2002), « Artificial Life and Music, some reflections », *L'Incursion - 4, the proceedings of DSP Summer School 2002*, Tokyo, p. 33-37.

MALT, Mikhail (2004), « Khorwa, a musical experience with autonomous agents », in *ICMC proceedings 2004*, p. 59 - 62, Miami, Floride, USA.

MALT, Mikhail (2005a), « Autour d'Achorripsis de Xenakis, la logique dans le processus de création », in *Actes de la journée du 24 mars 2004, 1^{res} Rencontres Interartistiques de l'OMF*, textes réunis et édités par Bruno Bossis, n° 19, Paris IV, Sorbonne, Paris, France, p. 41-56.

MALT, Mikhail (2005b), « La modélisation d'Achorripsis en OpenMusic et MAX/MSP », tutorial dans le cadre du *International symposium Iannis Xenakis Workshops*, Université d'Athènes, Athènes, Grèce, 18 mai 2005.

MALT, Mikhail (2006a), « Concepts et modèles, de l'imaginaire à l'écriture dans la composition assistée par ordinateur », *Musique, instruments, machines. Autour des musiques électroacoustiques*, textes réunis et édités par Bruno Bossis, Anne Veitl et Marc Battier, MINT, série Musique et nouvelles technologies, n°2, Paris IV, Sorbonne, Paris, p. 213-234.

MALT, Mikhail (2006b), « Fractales et écritures, six contemplations fractales », *The OM Composer's Book v. 1*, textes réunis et édités par Agon C., Assayag G., Bresson J., Collection Musique/Sciences, Ed. Delatour/Ircam, p. 147-162.

MALT, Mikhail (2007), « Some Considerations on Brian Ferneyhough's Musical Language Through His Use of CAC: Part I - Time and Rhythmic Structures », *The OM Composer's Book.2*, textes réunis et édités par AGON C., ASSAYAG G., BRESSON J., Collection Musique/Sciences, Ed. Delatour/Ircam, 2007, p. 7-21.

MALT, Mikhail (2009), « La composition assistée par ordinateur, modèles et calcul, quelques éléments de réflexion », *Le calcul de la musique*, ouvrage collectif, coordonné par Laurent POTTIER, préface de Pierre-Albert Castanet, Publications de l'Université de Saint-Etienne, p. 163-224.

MALT, Mikhail (2010), « Quelques propriétés des représentations, le cas de la notation musicale », *Revista do Conservatório de Música da UFPel Pelotas*, n°3, p. 1-26.
http://www2.ufpel.edu.br/conservatorio/revista/artigos3_pdf/Artigo%2001%20-%20Mikhail%20Malt%20%281-26%29.pdf (23/04/2014)⁵⁵.

MALT, Mikhail (2011), « Peut-on apprendre OpenMusic en 3 jours ? Quelques réflexions personnelles sur l'enseignant et l'apprentissage de l'écriture assistée par ordinateur », Journées d'informatique musicale, St. Etienne, France.

MALT, Mikhail, Emmanuel JOURDAN (2008), « Zsa.Descriptors: a library for real-time descriptors analysis », in *5th Sound and Music Computing Conference*, Berlin, Allemagne, 31 Juillet au 3 Août 2008, p. 134-137.

⁵⁵ Une traduction en espagnol (par Francisco Villanueva) est disponible à <http://www.tallersonoro.com/anterioresES/23/Articulo2.htm>.

MALT, Mikhail, Emmanuel JOURDAN (2009), « Le « BSTD » – Une représentation graphique de la brillance et de l'écart type spectral, comme possible représentation de l'évolution du timbre sonore » dans le cadre de l'édition des textes du colloque international *L'ANALYSE MUSICALE AUJOURD'HUI, Crise ou (r)évolution?*, Université de Stransbourg/SFAM, 19-21 novembre 2009, 19/11/2009, Edition de Xavier Hasher et Mondher Ayari, en cours d'édition.

MALT, Mikhail, Emmanuel Jourdan (2011), « Real-Time Uses of Low Level Sound Descriptors as Event Detection Functions », *Journal of New Music Research*, vol. 40 (3), p. 217-223.

MALT, Mikhail, Jacopo Baboni SCHILINGI (1995), « PROFILE- libreria per il controllo del profilo melodico per Patchwork », *XI Colloquio di Informatica Musicale*, Bologna, p. 237-238.

MALT, Mikhail, Benny SLUCHIN (2011), « L'interprétation assistée par ordinateur », *Le journal de l'Association des Anciens de Sciences et Musicologie*, Hors-série, n° 1, Avril 2011, p. 17-21.

MALT, Mikhail, Benny SLUCHIN (2013), « Computer Representations for some Open Form Works », *Notation in Contemporary Music: Composition, Performance, Improvisation Symposium*, Goldsmiths, University of London, 18-20 octobre 2013.

PEETERS, Geoffroy (2004), *A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project*, Rapport du projet Cuidado, Paris: Ircam.

MCADAMS, Stephen, Albert BREGMAN (1987), « L'audition des flux musicaux », *Marsyas*, Institut de pédagogie musicale et chorégraphique, La Villette, Paris, 3-4 décembre 1987, p. 97-118.

MCADAMS, Stephen, Suzanne WINSBERG, Sophie DONNADIEU, Geert DE SOETE, Jochen KRIMPHOFF (1995), « Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes », *Psychological Research*, vol. 58, p. 177-192.

MIRANDA, Eduardo R. (1994), « Music composition using cellular automata », *Languages of Design*, USA, vol. 2, pp. 105-117.

MIRANDA, Eduardo R. (éd.) (2000), *Readings in Music and Artificial Intelligence*, Contemporary Music Series, Harwood Academic Publishers, vol. 20, Amsterdam.

MURAIL, Tristan (1984), « Spectes et lutins », *L'Ircam: Une pensée Musicale*, Éditions des archives contemporaines, Paris, p. 167-181.

MURAIL, Tristan (1989), « Questions de cible », *Entretiens* n° 8, Paris, p. 147-172.

POTIER, Martin (2012), *De la sonification à la «musification» des systèmes complexes*, Stage Master MPRI, Université Paris Diderot, encadré par Moreno ANDREATTA et Wiebke DRENCKHAN, 6 septembre 2012.

REYNOLDS, Craig W. (1987), « Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model », *Computer Graphics*, SIGGRAPH 87 Conference Proceedings, vol. 21 (4), p. 25-34. <http://www.red3d.com/cwr/papers/1987/boids.html> (23/04/2014).

REYNOLDS, Craig W. (1999), « Steering Behaviors For Autonomous Characters » *Conference Proceedings of the 1999 Game Developers Conference*, p. 763-782. <http://www.red3d.com/cwr/steer/> (23/04/2014).

REYNOLDS, Craig W. (2001), « Individual-Based Models, an annotated list of links ». <http://www.red3d.com/cwr/ibm.html> (23/04/2014).

ROADS, Curtis (1994), *The Computer Music Tutorial*, Cambridge: MIT Press.

SCHEFFLER, Israel (1967), *Science and Subjectivity*, New York: Bobbs Merrill.

SCHUBERT, Emery, Joe WOLFE (2006), « Does timbral brightness scale with frequency and spectral centroid? », *Acta Acustica united with Acustica*, 92(5), p. 820-825.

SLUCHIN, Benny, Mikhail MALT (2010), « Interpretation and Computer Assistance in John Cage's Concert for Piano and Orchestra (1957-58) » *SMC 2010*, p. 1-8. <http://smcnetwork.org/files/proceedings/2010/58.pdf> (25/07/2013).

SLUCHIN, Benny, Mikhail MALT (2011a), « Open Form and Two Combinatorial Musical Models: the Cases of Domaines and Duel » *MCM 2011 - Proceedings of the Third international conference on Mathematics and computation in music*, p. 255-269.

SLUCHIN, Benny, Mikhail MALT (2011b), « Play and game in Duel and Strategy », *Xenakis International Symposium*, London.

SLUCHIN, Benny, Mikhail MALT (2012), « A computer aided interpretation interface for John Cage's number piece Two5 » *Actes des Journées d'Informatique Musicale (JIM 2012)*, Mons, Belgique, p. 211-217.

VEITL, Anne (1983), *Musique serieuse et informatique : la formation du domaine de « l'informatique musicale » en France - Repères chronologiques : XIX^e siècle -> 1983*, 2008. pp. 1-25. www.tscimuse.org/biblios/veitl/chronologie19siec1e-1983.pdf (23/04/2014).

WEISS, Gerhard (éd.) (2000), *Multiagent Systems, a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT Press.

WESSEL, David L. (1979), « Timbre space as a musical control structure », *Computer Music Journal*, vol. 3 (2), p. 45-52.

XENAKIS, Iannis (1992), *Formalized Music*, Pendragon Press, Stuyvesant NY.



Mikhail MALT



Parcours de recherche et création

Résumé

Représentation, Composition Assistée par Ordinateur, Musicologie computationnelle

Ceci n'est pas un mémoire, ceux-ci sont des mémoires.

Lorsque je me penche sur mon parcours, je me rends compte qu'une table de matières linéaire n'est pas du tout appropriée pour le représenter. Ce parcours s'est fait de coïncidences, de rencontres, d'envies et d'intuitions. Force est de reconnaître qu'il n'y avait pas de grand plan, juste de la curiosité, une volonté d'action, des affinités et la rencontre avec des personnalités m'inspirant, m'encourageant, m'aidant ou me proposant des chemins. Cependant, avec le recul je pourrais dire que de cette brume un profil se dégage, l'axe « composition – modélisation », soutenu par la problématique de la représentation, ayant comme contexte mon travail pédagogique.

Abstract

Representation, Computer Aided Composition, Computational Musicology

When I look back at my career, I realize that a linear table of contents is not an appropriate way to represent it. This path made of coincidences, encounters, desires and intuitions. I must recognize that there was no "big scheme", just curiosity, willingness to act, affinities and coming across inspiring personalities, encouraging people that helped and offered me options in this path that led to my actual career. However, in retrospect I could say that from this fog an outline emerges: "composition - modeling", supported by the problematic of representation, having as background my pedagogical work.