

JIM'09

14^{ÈMES} JOURNÉES D'INFORMATIQUE MUSICALE

Grenoble, 1^{er} - 3 avril 2009

Organisées par l'ACROE et le laboratoire ICA

sous l'égide de l'AFIM
Association Française d'Informatique Musicale

Avec le soutien de :
Ministère de la Culture et de la Communication
Groupe Grenoble INP
Ecole Phelma / Grenoble INP

Les JIM 2009

Multisensorialité / Pluridisciplinarité

Les JIM, sous l'égide de l'AFIM (Association Française d'Informatique Musicale), sont accueillies chaque année par l'un des organismes de la communauté française de l'informatique musicale. Il s'agit d'un colloque scientifique articulant exposés, tables rondes, ateliers et concerts. Les JIM réunissent pendant plusieurs jours des chercheurs français en informatique musicale, des scientifiques français et internationaux et différents acteurs de la vie musicale utilisant l'informatique comme moyen d'expression ou comme aide à la composition. Les Journées sont francophones, mais ouvertes également aux auteurs étrangers.

Le terme Informatique Musicale (en anglais *Computer Music*) recouvre un domaine qui relie l'art, la science et la technologie dans un ensemble d'activités où se développent, de manières parfois étroitement tissées, des activités de recherche, de développement technologique, de création et de pédagogie pour la musique.

La discipline est internationale et fortement représentée par un grand nombre d'organismes, tant universitaires que culturels et artistiques de par le monde. Mais la communauté française y est particulièrement active depuis l'origine, avec les travaux pionniers du physicien et compositeur Jean-Claude Risset, dès les années 60, en France et aux Etats-Unis, la fondation par Pierre Boulez, en 1975, du prestigieux centre de recherche Ircam, à Paris, mais aussi avec la création depuis les années 80 d'un grand nombre de centres où se mènent des activités liant l'informatique et la musique de différentes façons. L'ACROE, fondée en 1975 également, à Grenoble, fait partie des centres phares de cette discipline sur le plan international.

La communauté française s'est identifiée très tôt dans ce courant. Dès le début des années 80, des groupes de travail se sont constitués dans le but de fédérer des actions et d'aider à la reconnaissance de la discipline. L'Association Française d'Informatique Musicale, AFIM, fondée en 2002 avec le soutien de la Direction de la musique de la danse, du théâtre et des spectacles (DMDTS) du Ministère de la culture et de la communication, est issue de la fusion de deux associations : l'ADERIM et la SFIM, dont elle reprend les objectifs et les actions, en particulier le pilotage depuis 1994 des JIM. Elle a pour but le développement de l'informatique musicale en France, de ses relations avec les autres disciplines artistiques et scientifiques, de ses liens internationaux. L'AFIM est ouverte, à titre individuel ou à titre institutionnel à tous ceux et toutes celles qui développent une activité de recherche, de création, d'analyse ou de pédagogie musicales liée à l'informatique et aux technologies nouvelles.

Les JIM ont été organisées les cinq dernières années :

- à Albi, par le GMEA, Centre National de Création Musicale (2008),
- à Lyon, par le GRAME, Centre National de Création Musicale (2007),
- à Marseille, par le GMEM, Centre National de Création Musicale (2006),
- à Paris, par le CICM – Maison de Sciences de l'Homme Paris Nord (2005),
- à Paris, par l'IRCAM – Institut de recherche et de coordination acoustique/musique (2004).

14^{ème} édition des JIM, les **JIM'09** proposent, à travers les conférences, ateliers et concerts, des rencontres et débats sous le questionnement de la **pluridisciplinarité** et l'éclairage de la **multisensorialité**.

La multisensorialité et la pluridisciplinarité sont deux notions qui se répondent à des échelles différentes.

La *multisensorialité* est la caractéristique naturelle de nos relations avec le monde, avec les objets et le vivant qui nous environnent. Les uns et les autres apparaissent en effet à tous nos sens simultanément : nous voyons, entendons, touchons notre environnement dans le même temps que nous cherchons à le connaître, à nous y retrouver, à nous y faire (re)connaître, à le transformer par nos gestes, nos expressions, nos actes, nos actions. Or, lorsque les technologies nouvelles se sont immiscées dans nos relations avec le monde matériel et avec le monde vivant, nos sens se sont d'abord trouvés éclatés, séparés : on a d'abord su transmettre le son par l'électricité et les ondes hertziennes (avec le téléphone, puis la TSF), puis l'image (avec la télévision). Et ce n'est que très tardivement que ce qui concerne le geste, le contact tactile et corporel, pourtant premiers dans l'histoire du vivant, a été pris en considération, envisagé comme mesurable, enregistrable, transmissible, analysable, compréhensible et utilisable à des fins d'enrichissement des relations avec ou à l'aide des machines.

Pierre Schaeffer, avec l'enregistrement audio-magnétique, a pu inventer « l'objet sonore ». A-t-on seulement pensé aujourd'hui qu'avec les récents systèmes haptiques et autres manettes à retour d'effort, on pouvait finalement parler de « l'objet geste » ? Et que celui-ci peut être capté, mesuré, étudié, représenté, appris et transmis à distance à son tour.

Alors, maintenant que « tout le monde est au point », le moment d'une « re-synchronisation » est possible. C'est ici que, dans le cadre de l'utilisation et du développement des nouvelles technologies, de l'ingénierie pour la création artistique, la « multisensorialité », plus intime que le « multimédia », prend toute sa signification, toute son importance.

Il existe aujourd'hui des arts pour l'oreille, mais aussi, tout en entretenant un lien fort avec la musique, pour l'œil, le toucher, le corps tout à la fois. Les musiciens, les plasticiens, les sculpteurs, les animateurs d'images, les chorégraphes... sont tous aussi convaincus et tous déjà bien engagés sur ces chemins. Il est alors opportun de stimuler de nouvelles rencontres, d'envisager de nouvelles expéditions, non seulement au-delà des frontières, mais en absence de frontières.

La *pluridisciplinarité* est, chacun le sait bien, une nécessité. Rappelons les mots de Schrödinger, grand physicien du XXe siècle et aussi grand philosophe : « (...) *la connaissance isolée (...) dans un champ étroit (...) n'a de valeur que dans la synthèse qui la réunit à tout le reste de la connaissance et seulement dans la mesure où elle contribue réellement, dans cette synthèse, à répondre à la question : "qui sommes-nous" »*¹

Plus nécessaire encore aujourd'hui que ce que soulignait le physicien en 1951, elle est aussi beaucoup plus difficile, et ce n'est pas seulement une question de champ disciplinaire, comme au sein des sciences naturelles, physiques, humaines, politiques et sociales, ou des arts, ou des technologies, mais aussi de métiers. Il faudrait en effet pouvoir être tous au moins un peu artiste, chercheur, technologue, créateur, pédagogue, entrepreneur...

Alors que les technologies numériques ont introduit de puissants outils matériels et conceptuels pour la création artistique et ouvert à l'art de nouvelles dimensions fondamentales d'exploration, tant en ce qui concerne la nature et le contenu des objets (musicaux, visuels, multisensoriels,...) qu'en ce qui concerne le processus de leur création et de leur diffusion, elles demandent aussi que des métiers et des cultures, parfois bien différents, se côtoient et apprennent à connaître et à comprendre leurs représentations et leurs méthodes respectives.

Un des aspects essentiels de la pluridisciplinarité tourne autour des thèmes de la pédagogie, de l'apprentissage, de l'évaluation en art, sciences et technologies, sachant à la fois que les éléments de cette triade sont, dans leurs objectifs et leurs méthodes, aussi nécessaires qu'irréductibles les uns aux autres.

Un temps spécifique d'exposés thématiques et de discussion en table ronde est réservé aux deux thèmes de cette édition, la *multisensorialité* et la *pluridisciplinarité*. Il est clair que les deux séries de questions qu'ils recouvrent sont complexes, différentes mais complémentaires.

Sans imaginer les épuiser, il s'agit plutôt de tenter d'en identifier l'essentiel et de dégager leurs liens avec l'objectif de donner des éclairages nouveaux et des mises en perspectives pertinentes pour les travaux et réflexions à mener dans le futur proche.

Un Atelier-concert et un concert, le mercredi 1^{er} avril, dans le Grand Hall de l'école Phelma du Groupe Grenoble INP (qui accueille par ailleurs toute la conférence) présentent au public quatre situations qui interrogent la notion d'instrument et les rapports entre le geste, le son et l'image dans le contexte des technologies numériques appliquées à la création artistique, puis quatre œuvres de compositeurs emblématiques de l'histoire de l'informatique musicale.

Claude Cadoz
Directeur de l'ACROE
Organisateur des JIM'09

¹ Erwin Schrödinger – *Physique quantique et représentation du monde* – Seuil, 1992 – Version originale : *Science and Humanism*, Cambridge University Press, 1951.

Comités

COMITE DE LECTURE

Carlos Agon
Daniel Arfib
Pascal Baltazar
Charles Bascou
Claude Cadoz
Nicolas Castagné
Marc Chemillier
Myriam Desainte-Catherine
Dominique Fober
Hugues Genevois
Sylvain Marchand
Bertrand Merlier
Yann Orlarey
Laurent Pottier
António de Sousa-Dias
Anne Sèdes
Olivier Tache

COMITE DE PILOTAGE DES JIM

Daniel Arfib
Gérard Assayag
Marc Chemillier
Myriam Desainte Catherine
Dominique Fober
François Giraudon
Mikhail Malt
Yann Orlarey
François Pachet
Laurent Pottier
Jean Michel Raczinski
Anne Sèdes

COMITE D'ORGANISATION ACROE

Claude Cadoz
Nicolas Castagné
Geoffrey Cerna
Maria Christou
Maria Guglielmi
Diana Herrera
Annie Luciani
François Poyer
Kevin Sillam
Olivier Tache

Sommaire

SESSION I – « TEMPS-REEL ET INSTRUMENTALITE »

**La pianotechnie ou notage des partitions musicales
pour une interprétation immédiate sur le métapiano** | 9
Jean Haury

**Utilisation musicale de dispositifs de captation
du mouvement de l'archet dans quelques œuvres récentes** | 19
Serge Lemouton

La polysémie du temps réel et du temps différé | 25
Karim Barkati

**Réflexions artisanes sur l'usage du « live-electronic »
dans nos musiques savantes** | 35
Sébastien Béranger

**Vers une approche physiologique de l'interface corporelle
pour les arts interactifs** | 41
Jean-François Baud, Anne Sèdes

SESSION II – « ECRIRE, NOTER, ANALYSER »

**Amélioration des méthodes d'estimation d'accords et de tonalité
depuis une représentation musicale symbolique** | 49
Thomas Rocher, Matthias Robine, Pierre Hanna

La librairie GUIDO, une boîte à outils pour le rendu de partitions musicales | 59
Christophe Daudin, Dominique Fober, Stéphane Letz, Yann Orlarey

Callimusic, un système de saisie de partitions par interaction orientée stylet | 65
Bruno Bossis, Sébastien Macé, Eric Anquetil

**Le logiciel Music V, technologie d'écriture musicale :
rappels historiques et éléments d'analyse** | 71
Anne Veitl

TRAVAUX DE CREATION EXPLIQUES

La Faktura, « outil conceptuel d'analyse ». | 77
Illustration avec STRIA de John Chowning
Olivier Baudouin

SESSION III – CONFERENCES INVITEES - « IMAGE, GESTE, MOUVEMENT »

La pensée gestuelle dans la peinture, la poésie, la musique ...et la science | 85
Jacques Mandelbrojt

Rendu expressif | 91
Joëlle Thollot

Expérimentations virtuelles : vie artificielle pour la génération de formes et de comportement	93
<i>Hervé Luga</i>	
Forme, Image, Mouvement : vers un art du mouvement visuel	105
<i>Annie Luciani</i>	
 SESSION IV – « LA SONIFICATION »	
Sonification des données – nouvelle voie dans la compréhension des données (enseignement et projet tutoré à l'IUT de Bourges, département des mesures physiques)	115
<i>Jean-Pierre Martin, Alexander Mihalic</i>	
La sonification de séquences d'images à des fins musicales	121
<i>Jean-Marc Pelletier</i>	
 SESSION V – « FORMATIONS PLURIDISCIPLINAIRES EN ART, SCIENCE ET TECHNOLOGIE »	
Présentation du Master-2P « Musiques Appliquées aux Arts Visuels »	127
<i>Bertrand Merlier, Jean-Marc Serre</i>	
L'informatique musicale au département de Musique de l'Université de Paris 8	131
<i>Anne Sèdes</i>	
 TRAVAUX DE CREATION EXPLIQUES	
Questionner la notion d'instrument en informatique musicale : Analyse des discours sur les pratiques du Méta-instrument et de la Méta-mallette	133
<i>Caroline Cance, Hugues Genevois</i>	
Le corps sonore, entre écriture chorégraphique et écriture musicale	143
<i>Dominique Besson</i>	
 SESSION VI – « PLATES-FORMES POUR LA DIFFUSION ET POUR LA CREATION »	
Virage : une réflexion pluridisciplinaire autour du temps dans la création numérique	151
<i>P. Baltazar, A. Allombert, R. Marczak, J.M. Couturier, M. Roy, A. Sèdes, M. Desainte-Catherine</i>	
Genesis³ – Plate-forme pour la création musicale à l'aide des modèles physiques CORDIS-ANIMA	161
<i>Nicolas Castagné, Claude Cadoz</i>	
Vers un instrumentarium pour les modèles musicaux CORDIS-ANIMA	171
<i>Olivier Tache, Claude Cadoz</i>	
Déformations de structures vibroacoustiques ; simulation par réseaux masse-interaction - application à la synthèse de sons évolutifs	179
<i>François Poyer, Claude Cadoz</i>	
 INDEX DES AUTEURS	 189

LA PIANOTECHNIE OU NOTAGE DES PARTITIONS MUSICALES POUR UNE INTERPRÉTATION IMMÉDIATE SUR LE MÉTAPIANO

Jean Haury

Association Les Catamurons
34, rue de Torcy, 75018 Paris
jhaury@noos.fr

RÉSUMÉ

Le *métapiano* est un piano concentré en neuf touches seulement. Il peut être joué par quelques doigts, voire avec un seul. Comme le souligne son nom, le métapiano va au delà d'un instrument traditionnel puisqu'il intègre les notes qui vont être interprétées par le musicien. En pratique, la partition est analysée pour établir une structure réunissant relations mélodiques, harmoniques et contrapunctiques entre les notes. Seules les hauteurs des notes sont codées et mémorisées selon les règles de la *pianotechnie*. Cette structure de hauteurs peut être mise en sons en jouant sur un nombre restreint de touches du métapiano. Le musicien qui connaît « d'oreille » la pièce applique à la structure de notes rythmes, tempo, articulations, accents, phrasés dynamiques et agogiques pour l'interpréter. Un raccourci temporel s'opère entre le « notage » d'une partition et son interprétation immédiate sur le métapiano. Interpréter sans passer par la longue phase usuelle d'apprentissage propose d'inverser les questionnements du quoi et du comment. Cette inversion amène le musicien à envisager d'emblée diverses possibilités d'interprétation d'une oeuvre et à les réaliser instantanément.

1. GENÈSE D'UN INSTRUMENT

Notre travail s'est focalisé sur la recherche de conditions minimales d'exécution nécessaires au contrôle de l'expression et de l'interprétation d'une partition de musique. Pour atteindre cet objectif, nous avons exploré les possibilités offertes par une interface très commune : la touche d'un piano [8]. Le clavier représente historiquement le dispositif le plus efficace pour donner un maximum de possibilités de contrôles avec un accès aussi simple que sa touche. En comparaison des voix et des instruments à vent ou à cordes, qui demandent de générer le son de façon continue, la touche du clavier ne propose que deux instants de jeu, les moments d'enfoncement et de relâchement. Sur le piano, l'intensité gestuelle transmise à l'enfoncement est le troisième acteur du contrôle. Moments d'enfoncement, de relâchement, intensité instantanée, si peu de paramètres de jeu pour la création, l'exécution et l'interprétation de tant d'oeuvres, cela mérite d'y regarder de plus près.

Sur la partition une figure de note est imprimée en un unique point, concentrant symboliquement le début, la durée et la fin d'un son. La notation proportionnelle ne positionne sur la partition que le début de la note. La durée et la fin de la note ne sont pas représentées graphiquement. On sait où commence une note, on doit penser à quel moment elle cesse. Ainsi, la notation musicale usuelle ne traite pas de façon égale le début et l'arrêt des notes. Ceci explique peut-être l'attention prépondérante donnée à l'attaque des sons au détriment de l'attention portée à l'arrêt de ces sons. Si les ouvrages pédagogiques et méthodes de piano sont nombreux qui développent un enseignement centré sur la façon d'attaquer une note, infiniment peu d'entre eux mettent en avant la gestion de son arrêt. Citons à ce propos une formule sujette à polémique que E. Bernard faisait en 1918: « Ce n'est pas la façon dont on enfonce une touche de piano qui peut influencer sur la qualité du son produit... La beauté du son dépend uniquement de la façon dont le son cesse de se faire entendre. C'est donc à l'étouffoir et non au marteau qu'est dévolu ce rôle » [3]. Un tel renversement des rôles amène à examiner plus à fond le jeu d'une note sur un piano.

1.1. Un mode de jeu instantané

Jouer une note fait parcourir à la touche un cycle de trois phases enchaînant enfoncement, maintien et relâchement. Ce cycle met en œuvre la mécanique sous-jacente. [6] À l'enfoncement, le marteau se rapproche des cordes, percute sa corde et la laisse vibrer ; au relever, l'étouffoir amortit les vibrations de la corde et les vibrations de résonance de la table d'harmonie s'estompent. Deux actions instantanées du doigt mettent successivement en jeu deux mécaniques indépendantes du piano, la mécanique à marteau et la mécanique à étouffoir. Étonnants dispositifs couverts d'un matériau unique, le feutre, pour générer deux actions contraires, la mise en vibration et l'amorti d'un son.

1.2. L'enfoncement

L'intensité gestuelle est transmise au son, c'est le paramètre de jeu propre au piano. L'intensité ne peut être exprimée (dans le sens artistique comme dans le sens technique) qu'à l'enfoncement de la touche, c'est-à-dire en un instant. C'est pourquoi l'attention donnée à

l'attaque d'une note dans le jeu du piano est prépondérante. Prévoir, pré-entendre ce qui va être exprimé par l'enfoncement de la touche est une nécessité, après, il est trop tard pour se reprendre : l'instrumentiste a réussi son niveau sonore ou l'a manqué. La gestion de l'intensité résulte d'un apprentissage permanent mettant en relation geste exciteur et intensité du son. L'instrumentiste développe une mémoire de ce couple geste/intensité en relation étroite avec la mécanique sur laquelle il travaille et l'intensité de son produite. C'est la composante sensible du toucher qui est unique à chaque piano.

1.3. La tenue

La note, une fois émise selon un moment et une intensité voulus, ne peut que décroître. Elle évolue vers l'extinction lorsque l'on maintient la touche enfoncée. Aucune action n'est possible sur l'irréversible décroissance du son sinon l'écoute attentive de cette disparition. Au relever de la touche, l'étouffoir vient accélérer l'amorti naturel des vibrations vers le silence. La place qu'occupe ce relâchement dans cette tenue n'est pas indifférente puisqu'il peut se situer à tous les degrés de décroissance du son. Cette décroissance est en relation directe non seulement avec la hauteur de la note mais aussi avec son intensité. Les sons graves du piano ont une décroissance naturelle très lente alors que les aigus s'éteignent spontanément très rapidement. De même, pour toute hauteur, plus forte est l'intensité de l'attaque plus longue sera la décroissance du son. En jouant et écoutant la tenue d'une note de piano on pourra percevoir sa dégradation suivant deux perspectives : combien, selon l'intensité de son attaque, elle est longue ou courte ; comment, selon sa hauteur dans la tessiture, elle est lente ou rapide.

1.4. Le relâché

Si, comme on l'a dit plus haut, l'attaque du son se fait dans l'expectative d'une intensité voulue, l'étouffement intervient, lui, dans une perception du dégradé de cette intensité. Le moment du relâchement se choisit pendant une phase d'écoute. Enfoncer une touche demande d'anticiper l'ampleur du son, relâcher la touche demande d'estimer le degré de la décroissance. Lors du relâchement instantané du doigt, l'étouffoir se rapproche et se pose sur les cordes en vibration. L'infime temps nécessaire à l'extinction du son et du retour au silence dépend de la facture de l'étouffoir et de la résonance de la table d'harmonie.

Ainsi, actions digitales et phases d'écoute alternent dans l'enchaînement de l'attaque, de la décroissance de la tenue, de l'étouffement et du silence qui suit. L'expression (technique et esthétique) que le musicien veut donner à une note résulte de l'intensité d'attaque et de la durée de maintien seulement, et ceci, dans la mesure où il a anticipé la naissance de cette note et estimé sa décroissance pour accélérer son déclin.

partition : la figure de note concentre en un point les trois phases de la note				
note	début	durée	fin	silence
touche	enfoncement descente	maintien repos	relâchement remontée	repos
mécanique	percussion du marteau	vibration de la corde	amorti de l'étouffoir	repos
son	attaque	décroissance	étouffement	résonance
jeu	anticipation action	écoute estimation	action	écoute

Figure 1. Une note selon la lecture, l'instrument et le jeu.

1.5. Une touche pour interpréter

Mais, au clavier, jouer une touche, une note unique, ne fait pas musique. Que se passe-t-il lorsque l'on enchaîne des rythmes successifs sur cette seule touche ? Le jeu répété et rythmé de la touche fait apparaître une suite de sons ayant chacun une intensité et une durée propre. Sur cette hauteur de note unique, on peut entonner, « intoner » un air célèbre, une mélodie, une marche que l'on connaît d'oreille. La rythmique et l'intonation qu'on lui donne par certains accents suffisent à faire reconnaître l'air. Tapoter, tambouriner, pianoter d'un doigt sur une touche, sur une note, la rythmique d'une Marseillaise montre comment on accentue naturellement les notes correspondant aux appuis phonétiques des syllabes « fants » et « tri » (accent métrique) ; comment on peut allonger certaines notes (voyelles) pour une expression pathétique (accent agogique) ; comment la rythmique peut être modulée tout en étant respectée (*accelerando*, *ritardando*, *rubato*) ; comment on articule la succession des notes (syllabes) en les détachant ou au contraire en cherchant à les lier (*staccato*, *legato*) ; comment selon le *tempo* on donne une allure guerrière ou au contraire on pastiche un grand élan lyrique ; comment enfin on organise rythmes, durées et intensités dans un phrasé agogique et dynamique mettant en valeur l'acmé de la mélodie (ici la syllabe tri du mot patrie), son point culminant, suivi d'une chute par une cadence finale (i-e). Toutes ces intentions « d'intonation » (intonation dans le sens du ton de la voix parlée et non de la justesse de la voix chantée) se transmettent au toucher, aux touchers successifs, aux mouvements de la touche, à l'enchaînement des sons et deviennent les acteurs d'une interprétation. L'intonation est prise ici dans son sens prosodique qui structure le discours : intonation marquant une interrogation, une exclamation, une exhortation, etc. et indiquant l'état d'esprit du musicien mais n'affectant pas l'enchaînement structurel des notes. C'est l'intonation qui met en son la phrase musicale écrite et la module par des phénomènes recherchés d'accentuation, de fluctuation subtiles de durée, de rythme, de tempo et d'articulation des notes. Cette intonation est le « comment » du jeu. Elle donne à l'exécution sa valeur d'interprétation.

Mais le mot intonation revêt plusieurs significations. L'intonation, prise maintenant dans son sens strictement musical, indique de manière précise la hauteur des notes de musique jouées ou chantées et les rapports qu'elles ont entre elles. Sur le clavier du piano, jouer une note de musique, c'est avant tout lui donner la bonne hauteur, c'est-à-dire sélectionner et enfoncer la bonne touche parmi les 88. Aucun état d'âme ne participe à la virtuosité de la sélection si ce n'est que le geste doit être rigoureusement précis et juste, un geste qui mobilise doigts, mains, avant-bras, bras, le corps tout entier sur large étendue d'un clavier de 88 touches. Aucune déviation n'est autorisée, tout écart entraîne une faute sans possibilité de correction.

1.6. Une matrice de hauteurs

Cette intonation-là représente le « quoi » des notes, leur hauteur exclusivement. Un quoi qui résulte de l'enchaînement des notes en lignes mélodiques, de leur superposition en accords harmoniques, de leur répartition en lignes et voix contrapunctiques. La partition à jouer présente une structure de notes organisée de manière séquentielle comme de manière synchrone que le musicien doit dérouler fidèlement pendant l'exécution. Puisque sur le piano, instrument à sons fixes, chaque hauteur de la tessiture est attribuée à une touche particulière, établir des relations entre les hauteurs revient à établir des relations entre les touches. L'intonation et l'organisation des hauteurs peuvent se résumer en une tablature de touches. Telle une matrice à m lignes et n colonnes, la partition des hauteurs peut être transcrite en ses numéros de touches, rangés en lignes mélodiques et en colonnes harmoniques.

Les deux significations de l'intonation permettent donc de distinguer interprétation et exécution. D'un côté, une touche pour l'intonation et l'expression, une touche d'interprétation ; de l'autre, une matrice pour l'intonation des hauteurs, une matrice d'exécution de touches. Une commande gestuelle temporelle et dynamique d'une part, une mémoire physique mélodique et harmonique d'autre part. Est-il possible d'interfacer commande et matrice pour que d'une touche unique on puisse conduire une partition transcrite en tablature de touches. Une seule touche suffirait-elle alors pour interpréter une partition ?

1.7. L'Unitouche

Jean-Baptiste Acklin, fils d'un facteur d'orgue de Grenoble, et organiste lui-même déposait en 1846 un brevet pour : « un Unitouche, ou mécanisme propre à toucher l'orgue ou le piano avec une seule touche » [1]. L'instrument et son principe sont décrit dans les revues et ouvrages de l'époque. Ainsi, le Comte de Pontécoulant écrit dans son Organographie : « Le mécanisme inventé par M. Acklin consiste dans le percement du papier aux endroits où l'on met ordinairement les notes... En plaçant ce papier dans la mécanique et en touchant une touche, suivant le mouvement rythmique, on fait jouer l'air écrit. » [13]. Dans la revue Musicale de 1849, le même Pontécoulant poursuit : « Il ne s'agit, pour

exécuter un air, que d'imprimer le mouvement à l'Unitouche, selon le rythme de l'air donné. On peut donc, en changeant le rythme, faire à volonté d'un adagio un allegro, convertir une valse en polka... Les personnes qui ne savent pas lire la musique peuvent jouer les air connus : l'Unitouche dispensant entièrement du doigter. L'Unitouche emploie un système de notation qui consiste à percer du papier : cette notation est facile et à la portée de tout le monde » [12]. L'invention de Acklin avait pour but de pourvoir les églises qui n'avaient pas de titulaires pour leur orgue, d'un dispositif d'interprétation assistée, comme on dirait de nos jours. Pratiquement, le joueur, connaissant la musique à jouer, faisait avancer avec l'unitouche une notation perforée de la partition. Cette notation dépourvue de rythme et de durée actionnait les touches du clavier. En manipulant en rythme et en durée l'unitouche, le suppléant organiste faisait avancer le plain-chant ou la fugue cran à cran avec toutes les subtilités temporelles de son cru. Le mécanisme adapté au piano devait transmettre en outre l'intensité de chaque coup sur l'unitouche aux différentes touches du piano mises en action [2].

1.8. Deux touches pour articuler

Une seule touche suffit-elle pour interpréter une partition? Le musicien peut-il trouver dans l'unitouche tous les moyens usuels d'exécution et d'expression pour interpréter une œuvre?

Sur l'unitouche, la vitesse est nécessairement réduite. La vitesse de répétition d'un doigt sur une touche ne peut atteindre la célérité d'enchaînement habituelle d'un pianiste avec ses dix doigts. Le jeu d'une touche n'autorise qu'une rapidité limitée. En doublant la touche, cette limite disparaît. Le jeu alterné de deux doigts dans un battement rapide, un trille, permet toutes les audaces de virtuosité.

L'ajout d'une seconde touche apporte le moyen d'expression supérieur du piano qui manque à l'unitouche : le jeu *legato*. Sur une touche unique, le musicien ne peut pas lier un son à un autre comme le fait un chanteur ou un instrument à vent dans un seul souffle. On l'a vu, les manipulations répétées d'une touche unique font alterner percussions du marteau et amortis de l'étouffoir en intercalant obligatoirement un silence aussi court soit-il. Entre relâchement et nouvel enfoncement il y a nécessairement une pause séparant les sons. Par le jeu du doigt, tentant d'enchaîner relâchement et enfoncement dans le plus bref délai, le musicien peut minimiser à l'extrême cette pause, mais il ne peut l'éliminer¹.

En manipulant deux touches, il met en rapport deux durées : la durée de jeu et la durée de rythme. On définit par durée de jeu le temps entre un enfoncement et un relâchement d'une même touche, c'est-à-dire, la durée de son d'une note. On définit par durée de rythme le temps

¹ Sur le piano à queue, Erard a résolu ce problème en mettant au point en 1822 son mécanisme à répétition, le double échappement qui autorise un jeu répété du marteau en conservant l'étouffoir à distance des cordes. Sur le piano droit le problème demeure.

entre deux enfoncements successifs, c'est-à-dire deux attaques de notes qui se suivent. Le jeu sur une touche n'autorise qu'un type de rapport entre les deux durées : la durée de jeu est toujours inférieure à la durée de rythme. Un silence est obligatoirement généré entre les cycles de la touche. En revanche, le jeu sur deux touches autorise tous les rapports possibles entre les deux durées. La durée de jeu peut être inférieure, égale ou supérieure à la durée de rythme.

- La durée de jeu est inférieure : on relâche une touche avant d'enfoncer l'autre en insérant une pause. Il y a lacune entre les deux cycles de touches.

- La durée de jeu égale la durée de rythme : on a relâché la touche et enfoncé la seconde simultanément. Un échange parfait entre les deux phases des cycles est réalisé.

- La durée de jeu est supérieure à la durée de rythme : pendant un instant de chevauchement les deux touches sont maintenues enfoncées. Il y a superposition des cycles de touches.

Ces trois façons d'envisager le jeu de deux touches montrent encore l'importance qu'il faut accorder au relâché des touches, à la fin des notes et à l'arrêt des sons. C'est toute l'articulation du discours musical qui est concernée par le relâché des touches [6].

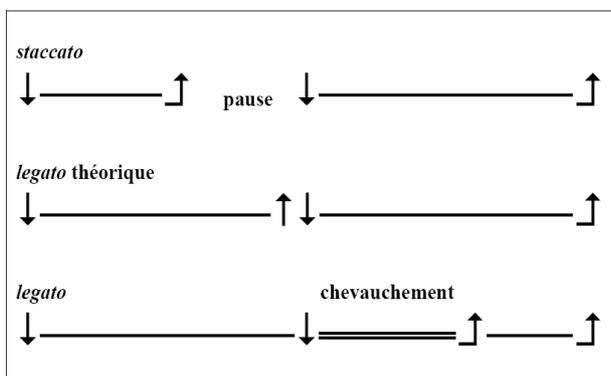


Figure 2. *Staccato* et *legato* selon les cycles de touches.

Les sons peuvent être séparés par une pause (jeu *staccato*), soit parfaitement échangés sans superposition (*legato* théorique), soit chevauchés avec plus ou moins de fusion (jeu *legato*). Les jeux piqué, *spiccato*, *portato*, louré et *sur-legato* sont des variantes conditionnant la durée du silence entre les sons ou la durée de leur recouvrement.

L'enchaînement *legato* de deux notes, de deux touches, ajoute une phase nouvelle aux cycles des touches : celle du chevauchement. Se succèdent en effet, un premier enfoncement suivi du maintien, puis un second enfoncement et le maintien avec chevauchement, un premier relâchement, le second maintien et le relâchement final. Pendant la phase de chevauchement, un transfert de maintiens en fond de touche s'opère d'un doigt à l'autre.

Pour jouer ce simple enchaînement de deux sons, le musicien alterne attentions aux sons et actions des doigts en huit phases : anticipation du premier niveau sonore,

action digitale, estimation de la décroissance du premier son et anticipation du second niveau sonore, action digitale, perception du chevauchement des sons et estimation de la dissonance, action digitale, estimation de la décroissance du deuxième son, action digitale.

L'alternance de *legato* et de *staccato* crée l'articulation et participe au premier plan à l'expression des formules rythmiques courtes. Pour les longues phrases *cantabile*, le jeu *legato* englobant dans une même liaison les notes successives donne l'illusion de mouvement continu du phrasé, interrompu seulement par la respiration. Là aussi, la gestion d'un début, d'une conduite et d'une fin est à considérer non seulement sur la totalité de la phrase mais aussi sur chacune des notes qui la constituent.

L'adjonction d'une seconde touche à l'unitouche en augmente considérablement les performances, permettant la vitesse d'exécution, la variété de l'articulation et la réalisation d'un phrasé. Une question peut encore être soulevée : comment par le jeu d'une seule touche serait-il possible de générer des sons synchrones à des niveaux sonores différents ? Cette question de la hiérarchisation et la mise en valeur des voix musicales sera développée plus loin.

2. LE MÉTAPIANO

Le métapiano s'inspire de l'instrument de M. Acklin dans ses principes d'intégration de partition et de mouvement mécanique de touches. Mais, bénéficiant des ressources numériques disponibles de nos jours, le métapiano va au delà du piano traditionnel puisqu'il contient en lui toutes les interprétations virtuelles des œuvres qu'il a en mémoire. Son interface clavier permet de les rendre tangibles.



Figure 3. Le métapiano.

Le métapiano est un clavier réduit à neuf touches, émettant tout ce qui est exécuté sur ses touches. La distance tolérée entre clavier émetteur et le récepteur dépasse les vingt mètres. Le musicien peut interpréter tout en se déplaçant ou au contraire s'asseoir dans un fauteuil d'orchestre pour s'écouter jouer sur scène.

Vu de face, le clavier présente ses neuf touches réparties en six blanches et trois noires. La section de l'octave mi, fa, fa#, sol, sol#, la, la#, si, a été choisie car

elle a l'avantage de la symétrie et répond indifféremment au jeu du droitier comme du gaucher [7].

F. Chopin dans une ébauche de méthode préconisait « la position de la main en plaçant les doigts sur les touches mi, fa#, sol#, la#, si : les doigts longs occuperont les touches hautes (les noires) et les doigts courts les touches basses (les blanches). Il faut placer les doigts qui occupent les touches hautes sur une même ligne et ceux qui occupent les blanches de même, pour rendre les leviers relativement égaux, ce qui donnera à la main une courbe qui donne une souplesse nécessaire qu'elle ne pourrait avoir avec les doigts étendus. La main souple, le poignet, l'avant-bras, le bras, tout suivra la main *selon l'ordre* » [4].

Le métapiano est portatif et léger (800g). On peut donc en jouer debout et en déambulant, mais une main est alors occupée à le porter. Pour disposer de ses deux mains, on peut en jouer assis, le clavier étant fixé sur un pupitre. L'utilisation des pédales étant indispensable au jeu de piano, la position assise libérant les pieds est favorable. En effet, parallèlement au clavier, un pédalier classique à trois pédales, forte, piano et tonale est utilisé de façon usuelle. Le métapiano, sans connections filaires, est émetteur H. F. des informations temporelles et dynamiques générées par les mouvements de ses touches vers un dispositif informatique. Le pédalier, connecté également au dispositif, envoie la position de ses pédales. Un piano échantillonné de qualité (Ivory, Synthogy) répond aux commandes des touches et des pédales et est diffusé par un système d'amplification Bose L1.

Sans partition, le métapiano ne joue pas. C'est un instrument de musique qui intègre les partitions que l'on va interpréter. Les partitions doivent être au préalable traduites en tablatures de hauteurs, en numéros de touches dans des matrices organisées en lignes mélodiques et en colonnes harmoniques. Une interface de saisie a été mise au point pour le « notage » des œuvres (le codage des notes). D'autres interfaces d'exécution, d'interprétation, d'enregistrement et de reproduction ont été également créées. L'ensemble informatique a été développé sur l'environnement graphique de programmation musicale Max/MSP Cycling'74.

3. LA PIANOTECHNIE

Le terme de Pianotechnie s'inspire de l'ouvrage du Père Engramelle paru en 1775 : *La Tonotechnie ou l'art de noter les cylindres et tout ce qui est susceptible de notage dans les instruments de concerts mécaniques* [5]. Cet ouvrage didactique s'adresse aux noteurs de musique mécanique pour serinettes, orgues à cylindre, pendules à carillon, orgues et clavecins automatiques. Ces instruments d'enregistrement et de reproduction de l'époque sont tous conçus autour de deux principes : un cylindre à pointes comme mémoire et un clavier comme dispositif de lecture [9]. Engramelle enseigne aux noteurs les techniques pour reporter une musique sur un support, les caractères pour en fixer l'exécution, les effets de la

musique à noter et les observations qu'il a pu faire sur le jeu des musiciens. Le noteur de cylindre, étant obligé de tout exprimer en détails, doit pouvoir : « rendre avec agrément une infinité de choses que les papiers notés n'indiquent qu'imparfaitement ou même point du tout, desquelles cependant dépendent les effets qui donnent le caractère et l'expression » [5]. La pianotechnie, de même, propose un protocole et ses tâches pour « numériser » une partition de musique sur une mémoire informatique et l'interpréter *ex tempore* sur le métapiano.

3.1. Le notage

Le « notage » pianotechnique consiste à intégrer les hauteurs de la partition à jouer dans une matrice à deux entrées, un repère de cases disposées en rangées et colonnes. Cette matrice mémorise l'organisation relative des hauteurs de l'œuvre, c'est-à-dire l'ordre d'apparition et de disparition des notes, leur synchronisme et leur répartition en voix polyphoniques. Une rangée de la matrice réunit les hauteurs appartenant à une voix musicale. Une colonne de la matrice superpose les hauteurs synchrones d'un accord produit par différentes voix musicales. Les hauteurs sont donc mémorisées mélodiquement et harmoniquement. La première tâche de la pianotechnie est d'analyser une œuvre musicale selon les rapports mélodiques, harmoniques et contrapunctiques qui unissent les notes. Pour des œuvres écrites pour trio à cordes, chœur, quatuor, octuor, etc. le repérage des voix est évident. Pour une partition de piano, polyphonique par nature, il faut individualiser les voix qui s'étagent et se mélangent sur les deux portées. L'analyse de l'œuvre nécessaire à la mise en voix peut alors s'avérer plus délicate. Mais la composition des œuvres classiques étant fondée sur des principes harmoniques et contrapunctiques de voix, les solutions de séparation sont toujours envisageables.

Ainsi dans une œuvre à quatre parties le numéro 1 sera le soprano, le n° 2 l'alto, le n° 3 le ténor et le n° 4 la basse; de même pour un quintette à cordes, 1^{er} violon, 2^{ème} violon, alto, 1^{er} violoncelle et 2^{ème} violoncelle recevront respectivement les numéros 1, 2, 3, 4, et 5. Une sonate de piano sera mise en voix comme s'il s'agissait d'une œuvre de musique de chambre, la voix du dessus étant la partie 1 et, selon le nombre de voix, la basse sera la partie 4 ou 5.

Les numéros des touches des claviers numériques usuels servent à définir toute hauteur sans ambiguïté : 60 signifie le do médian du clavier, le do-3. Pour nommer une note et la voix à laquelle elle appartient deux nombres sont obligatoires. Ainsi pour ce même do médian, 1 60 appartient au soprano, au premier violon d'un quatuor, ou à la partie du dessus d'une sonate pour piano ; 4 60 appartiendrait au violoncelle du quatuor.

Un statut précède ces deux chiffres pour former un triplet. Le statut désigne le comportement d'une note avec le mouvement des touches. Quatre statuts suffisent pour couvrir toutes les possibilités de comportement d'une note :

- [] pour une note d'un cycle de touche,
- [<> pour une note échappant au cycle,
- [< pour une note maintenue sur plusieurs cycles,
- [> ou]> pour une note arrêtée après plusieurs cycles.

3.2. Le comportement des notes

Voici quelques exemples : [] 1 72 est le triplet spécifique d'un do-4 appartenant au premier violon d'un quatuor. Suivant exactement le mouvement de la touche, il débute à l'enfoncement et cesse au relâchement.

[<> 4 48 est un do-2 appartenant au violoncelle. Il débute avec un enfoncement mais, cessant de lui-même en *staccato* obligé, il échappe au relevé de la touche. La superposition de ces deux types de comportement permet d'interpréter la première voix *legato*, tandis que la seconde voix exécute un *staccato*

[< 3 60 est un do-3 appartenant à l'alto du quatuor à cordes. Il débute avec un enfoncement, mais ne répondant pas au relâché, il se maintient de lui même sur les cycles de touches suivants. Ce type de comportement est nécessaire au jeu de la polyphonie, une voix tenant une note pendant qu'une autre partie en fait plusieurs. Il faut évidemment arrêter cette tenue à un cycle ultérieur de la touche.

[> 3 60 est l'arrêt de ce do-3 de l'alto programmé pour arrêter la note tenue lors d'un enfoncement de touche.

]> 3 60 est l'arrêt de ce même do-3 de l'alto programmé pour arrêter la note tenue lors d'un relâchement de touche.

Le choix de tel ou tel statut détermine le début et l'arrêt de chaque hauteur. Ce choix résulte de l'analyse approfondie des relations qui existent entre les notes de la partition imprimée, et du rendu de ces relations que l'on veut proposer en interprétant sur le métapiano.

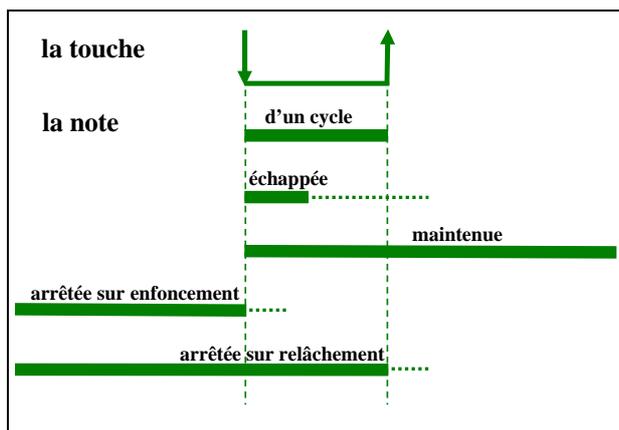


Figure 4. Mouvement de touche et différents comportements de notes.

3.3. La durée et intensité des notes

La matrice de hauteurs se constitue pas à pas en rangées superposées et colonnes successives. Ne sont mémorisés dans ses cases que les triplets de hauteurs réunis en lignes mélodiques horizontales et en accords

harmoniques verticaux. Le notage de la partition ne fait apparaître des notes que leur hauteur et les interactions qu'elles peuvent avoir avec les autres. Les durées réelles ou relatives des notes ne sont pas prises en compte. Seule une durée virtuelle de note pourrait être évoquée en considérant le nombre de cycles de touche nécessaire à sa production. Pendant l'interprétation, le jeu des touches pourvoira en temps réel le notage en durées, rythmes et tempo.

Le notage de la partition ne prend pas en compte l'intensité des notes. Pendant le jeu, l'énergie d'attaque des doigts sur les touches se transmet en temps réel, via le notage, aux notes et aux sons. Toutes les nuances d'intensité voulues par le musicien dépendent de son jeu dynamique des touches et du couple geste/intensité qu'il a développé et mémorisé. Chaque enfoncement de touche reçoit une énergie choisie, une intensité unique qui s'applique sur la matrice soit à une note isolée, soit aux différentes hauteurs d'un accord. Une intensité unique pour plusieurs voix ne peut donner à la polyphonie sa transparence et son intelligence. Il est nécessaire de mettre en valeur certaines voix en certains moments pour apporter au discours des voix épaisseur, profondeur ou perspective. On intervient sur les rapports d'intensité que l'on souhaite établir entre les voix en intégrant au fichier des données supplémentaires de balance, d'équilibre ou d'offset relatif à telle ou telle voix. L'unique intensité d'attaque de la touche qui s'appliquait précédemment de façon uniforme à toutes les hauteurs d'un accord peut alors être distribuée en produisant des intensités différentes pour chacune des voix de l'harmonie. La mise en plans sonores est constituée selon l'équilibre esthétique que l'on souhaite avoir ponctuellement ou par phrase entre les voix. L'équilibre, une fois établi, suit en proportion le jeu nuancé sur les touches. Dans une nuance jouée *pianissimo* la voix mise en valeur par l'offset sonnera *piano*. Dans une nuance *mezzo forte* la même voix sonnera *forte*. Quelle que soit la nuance d'intensité globale jouée, l'équilibre relatif entre les voix est conservé.

3.4. Le notage de partition



Figure 5. Scherzo, Allegro molto, (mesures 1-16), sonate pour piano Op. 26. Beethoven.

Ce début du scherzo de la sonate pour piano Op. 26 est clairement écrit à trois voix qui seront codées 1 (voix supérieure) 2 (voix intermédiaire) et 4 (voix basse). Les

notes dans leur grande majorité sont soulignées par une expression particulière : des liaisons de *legato*, des points de *staccato*, des nuances *piano* (*p*), et des *sforzandi* (*sf*) qui ponctuent la carrure régulière de quatre mesures.

La première colonne de la matrice, le premier pas, contient le triplet [] 1 68 de la première note à interpréter (le *la* de la levée). C'est une note d'un cycle, elle débute à l'enfoncement et cesse au relâchement. La note du pas suivant a le même statut. Ces deux notes seront, selon le jeu de l'interprète, liées ou détachées. Ici la liaison indiquée par Beethoven précise son intention. Le musicien devra enchaîner ces notes sur deux touches pour réaliser un *legato*.



Figure 6. Scherzo, Allegro molto, (mesures 1-3), sonate pour piano Op. 26. Beethoven.

Le pas suivant (1^{ère} mesure, 1^{er} temps) contient trois notes synchrones notées : [$<$ 4 65, [$<$ 2 68, [] 1 72. La note supérieure seule suit le cycle de touche, les deux autres notes sont tenues attendant chacune son triplet à venir pour cesser. La note suivante de la voix supérieure sera notée [] indiquant la liberté de l'enchaîner *legato* ou *staccato*. Durant ces deux notes liées de la voix 1, les deux autres voix sont des tenues obligées attendant un code qui les fera cesser. On a choisi d'arrêter la voix 2 et la voix 4 différemment. L'écriture de Beethoven montre un *distinguo* entre les voix 2 et 4, seule la voix 4 a sa figure de liaison, de *legato*. Pour permettre de rendre éventuellement cette subtilité lors de l'interprétation, on fait cesser la voix 2 au relâché du pas en cours avec un triplet [$>$ 2 68, tandis que l'on impose la liaison de la voix 4 jusqu'au début du pas suivant avec un triplet [$>$ 4 65. Ainsi l'interprète pourra, selon son jeu de doigts, générer ou non un infime silence à la deuxième voix, la basse étant liée par le notage.

Dans le pas qui suit, (2^{ème} mesure, 3^{ème} temps) le statut [$<$] de la voix 4 impose un *staccato* quel que soit le jeu sur touche. La durée réelle du *staccato* peut être allongée ponctuellement ou globalement par une donnée supplémentaire.

On poursuit de même la construction de la matrice de hauteurs, pas à pas, colonne après colonne, statut à statut suivant l'analyse des relations mélodiques, harmoniques et contrapunctiques.

La représentation de ce même scherzo de l'Op. 26 de Beethoven (Figure 7.) élimine toutes les figures de notes pour ne laisser que les signes d'expression, c'est-à-dire l'articulation *legato* ou *staccato* et les nuances d'intensité *p* et *sf*. C'est en quelque sorte la partition gestuelle à

réaliser pour celui qui, connaissant la rythmique de l'œuvre, l'interprète sur quelques touches du métapiano.

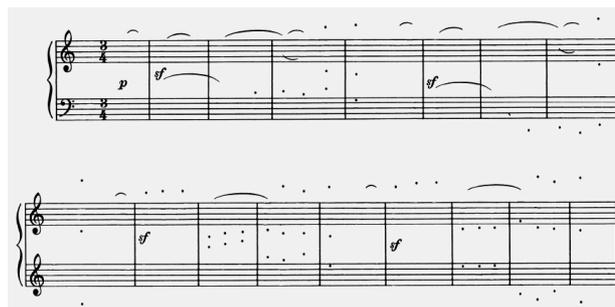


Figure 7. Signes d'articulation et d'intensité. Scherzo, Allegro molto, (mesures 1-16) Op. 26. Beethoven.

3.5. Le répertoire pour métapiano

Nous avons constitué un répertoire de pièces notées selon la pianotechnie et prêtes à être interprétées *ex tempore* sur le métapiano. Œuvres pour piano de : J.-K. Fischer, 10 Fugues pour clavier ; J.-S. Bach, Partita n° 5, Préludes et Fugues, Contrapunctus VIII, Art de la fugue ; C.-P.-E. Bach, Variations Les folies d'Espagne, Rondo Woq 61 ; J.-B. Cramer, 84 Études pour piano ; I. Moscheles, 24 Études pour piano Op.70 ; R. Schumann, Fantasiestücke Op. 12, Beethoven Etüden ; S. Prokofieff, Vingt visions fugitives Op. 22 ; G. Puccini, Quatuor à cordes Crisantemi.

Mais l'essentiel des pièces notées pour le métapiano concerne l'œuvre de L. van Beethoven, des sonates, des Klavierstücke, des variations, et l'intégrale des 17 quatuors à cordes.

4. L'INTERPRÉTATION EX TEMPORE

La pianotechnie et son notage matriciel ont été mis au point à partir d'études qui ont porté simultanément sur une commande physique (la touche), un instrument de musique (le jeu et le son du piano) et l'œuvre musicale (la partition et ses parties séparées).

Une commande sensible unique, une touche, permet de mettre en action dispositifs excitateur et amortisseur de sons par son seul mouvement de bascule en deux temps. Cette simple commande suffit à conduire et exprimer un discours musical. Mais l'adjonction d'une deuxième touche à la commande lui donne les capacités de doubler la vitesse du jeu, de nuancer un phrasé dans un bon *legato*, et d'apporter par le chevauchement ou le non chevauchement des sons l'articulation au discours. On a ici stipulé le rôle essentiel du relâché de la touche.

Sur un piano, le principal mode de jeu est instantané en deux temps. Ce jeu s'apparente à un système discret mettant en œuvre des débuts et des fins de notes prises en compte à des moments précis. Dualité et instantanéité de jeu, mais aussi modulation en intensité du son à l'attaque et décroissance inexorable de ce son durant la tenue sont partie prenante du jeu. En effet, deux stratégies d'écoute peuvent alterner : une écoute intérieure active, d'anticipation pour l'attaque du son et

une écoute externe, passive, d'évaluation de la dégradation du son pour l'arrêter. Pour citer à nouveau Edouard Bernard : « appliquons aux sons englobés dans une ligne musicale les règles de la perspective sonore... dont le point de fuite est dans le silence » [3]. Il faut donc jouer, interpréter dans la perspective de la décroissance. Là encore, la place du relâché est d'importance.

L'analyse structurelle de la partition permet de spécifier et de coder les interactions entre les notes, pour les organiser en séquences de hauteurs émises les unes à la suite des autres avec ou sans chevauchement, ou en ensembles de hauteurs synchrones émises en accords. La répartition en voix polyphoniques de toute partition permet la mise en niveaux des parties musicales, pour en rapprocher une, en éloigner une autre dans une perspective sonore indispensable à l'intelligence de l'œuvre que l'on interprète.



Figure 8. Neuf touches du métapiano pour dix doigts.

Sur le métapiano, jouer sur une ou quelques touches un quatuor est inaccoutumé! Il faut apprendre un mode de jeu original, ne concordant plus avec la pratique et les références habituelles que l'on peut avoir du clavier. Dans la situation usuelle l'instrumentiste exprime concrètement sa pensée musicale par le canal gestuel de ses deux mains et de ses dix doigts. Sa conception musicale doit se soumettre pour s'en affranchir aux impératifs d'indépendance, de coordination, d'égalité et d'équilibre des deux mains comme des dix doigts. La pensée musicale, unique, se distribue aux dix doigts qui prennent contact et manient les touches du clavier. Sur le métapiano, où une seule touche pourrait suffire, la conception musicale passe par l'unique canal d'un doigt sur une touche, une touche qui contient en potentiel un clavier tout entier. La maîtrise de l'indépendance des mains, des doigts ou encore des voix doit donc s'inverser en une faculté de superposer mentalement mains, doigts ou voix pour les concentrer en un seul mouvement. Ce mode de jeu, condensé dans sa pratique digitale mais dilaté par ses effets musicaux, s'acquiert relativement facilement pour les pièces simples aux rythmes élémentaires. Pour interpréter les partitions complexes de musique de chambre qui relèvent de la virtuosité, par

leur rapidité ou leur lenteur, leur complexité rythmique, leur ornementation, leur nombre de voix, leur écriture polyphonique, leur expression enfin, il faut travailler!

Dans le métapiano, les touches ont perdu leur fonction de recherche de hauteur pour ne conserver que leur fonction d'expression du rythme, de l'intensité et de l'articulation. Chaque touche offre les mêmes possibilités d'expression sur la séquence des hauteurs programmées. Puisque nous avons plus d'un doigt et puisque depuis des siècles les instrumentistes ont développé et acquis sur les claviers une dextérité quasi génétique, ne faudrait-il pas jouer avec plusieurs doigts sur plusieurs touches pour bénéficier de la technique digitale? En effet, la rapidité d'enchaînement des doigts, l'entraînement à la répétition, la vitesse d'un trille ou des ornements, les articulations « deux en deux » des coulés, le contrôle de l'égalité dynamique ou de ses variations, l'exécution de l'accentuation ainsi que la gestion du tempo, du rythme et des variations agogiques, tous ces éléments du jeu acquis chez les pianistes par le travail technique sont au service de l'interprétation. Le potentiel expressif qu'ils contiennent est immédiatement exploitable. Sur le métapiano le jeu ne réclame que le versant expressif de l'exécution laissant aux machines le versant pratique de la mémorisation et de l'exécution des hauteurs. La technique digitale acquise est mise au service de la seule expression. On gagne donc à utiliser la panoplie des formules digitales qui ont été expérimentées sur un clavier depuis qu'il existe. Il n'en reste pas moins que ce jeu sur quelques touches demande une adaptation et un réapprentissage digital d'une part et une révision du concept d'exécution comme d'interprétation d'autre part. Si le geste musical se réduit à un enfoncement, un maintien et un relâchement d'une touche à la fois, le contrôle expressif, en revanche, se propage au nombre de parties de l'œuvre. Tel un contrôleur de processus musicaux à entrée simple et sortie multiple, le métapiano donne au musicien un accès à l'interprétation musicale comme seul le chef d'orchestre en a le privilège. L'interprète dirige plutôt qu'il ne joue, mais contrairement au chef d'orchestre il conserve par son toucher le contrôle instrumental.

Le long travail technique de mise en doigt et en mémoire d'une pièce, la lente élaboration d'une interprétation idéale, habituels au pianiste, se concentrent ici en une analyse et un codage de l'œuvre, faisant la part du structurel de la partition et de l'événementiel du jeu sur les touches. Le notage devient pédagogie de l'interprétation. En effet, le musicien pendant le notage d'une pièce la découvre, l'analyse, la structure, la mémorise, la met en sons, l'exécute, l'exprime, l'enregistre et peut en entendre, dans un laps de temps inhabituellement court, son interprétation ou plutôt ses multiples interprétations. Le métapiano et sa pianotechnie opèrent un raccourci entre œuvre imprimée d'une part et reproductions artistiques d'autre part. Envisager d'emblée « des » interprétations est inusité. Mettre en œuvre et en sons, sur-le-champ, ce que l'on

entend intérieurement, l'exprimer sans contrainte technique, choisir parmi les possibles que suggèrent l'écriture, le savoir et le goût, revient à improviser en quelque sorte l'interprétation. Une telle liberté d'interprétations immédiates, *ex tempore*, sur-le-champ, s'inspirant du moment, n'est-elle pas celle que tout musicien ambitionne d'avoir ?

RÉFÉRENCES

- [1] Acklin J.-B., *Mécanisme propre à toucher l'orgue ou le piano avec une seule touche, et susceptible d'autres applications*. Brevet français du 3/12/1846 n° 4652, INPI, Paris.
- [2] Acklin, J.-B., *Description de l'Unitouche ou monoclave, ses accessoires et ses diverses applications*, in « Le Technologiste » Tome XVI 13^{ème} année, Paris 1852.
- [3] Bernard, E., *Essai pour la méthode rationnelle du jeu du piano*, Durdilly, Hayet, Paris 1918.
- [4] Chopin, F. *Esquisses pour une méthode de piano*. Flammarion, Paris, 1993.
- [5] Engramelle, J. *La tonotechnie ou l'art de noter les cylindres*, Delaguette, Paris, 1775 (réédition en fac-similé, Minkoff, Genève, 1971).
- [6] Haury, J. "La grammaire de l'exécution musicale au clavier et le mouvement des touches", *Analyse Musicale*, n°7, Paris, 1987.
- [7] Haury, Schmutz, J. *Développement d'un instrument d'interprétation de la musique pour personnes en situation de déficience motrice*, Rapport APF, Dactylion, Paris, 2006.
- [8] Haury, J. *Le clavier, le mouvement de ses touches*, Thèse de doctorat, Université Paris VIII, Saint-Denis, 1993.
- [9] Haury, J. "Clavier à écrire, clavier à lire la musique", *Le clavier, Cahiers de la société de musique ancienne*. Nice, 1992.
- [10] Lussy, M. *Traité de l'expression musicale*, Heugel, Paris, 1882.
- [11] Ortmann, O. *The physiological mechanics of piano technique*. London, 1929. Reprint Da Capo Press, New York, 1981.
- [12] Pontécoulant Ad. Comte de *Monoclave ou unitouche Exposition des produits de l'industrie*, La France Musicale n° 39 Paris, 1849
- [13] Pontécoulant Ad. Comte de, *Organographie, essai sur la facture instrumentale*, Castel, Paris 1861

UTILISATION MUSICALE DE DISPOSITIFS DE CAPTATION DU MOUVEMENT DE L'ARCHET DANS QUELQUES OEUVRES RÉCENTES

(*Bogenlied*, *StreicherKreis* de Florence Baschet, *Partita 1* de Philippe Manoury)

Serge Lemouton

IRCAM-CGP

lemouton@ircam.fr

RÉSUMÉ

Dans cet article, on considérera trois expériences récentes d'oeuvres auxquelles l'auteur a participé en tant que réalisateur en informatique musicale. Celles-ci ont en commun l'utilisation de dispositifs de captation du geste des instrumentistes à archets. Le développement de tels dispositifs de captation est un sujet qui mobilise actuellement, mais de façon relativement récente, de nombreux chercheurs un peu partout dans le monde. Les pièces étudiées ici ont été créées soit à l'Ircam soit au Grame. On évoquera l'état et l'évolution des interfaces logicielles et matérielles utilisées pour l'exécution de ces trois pièces; et comment elles sont utilisées par le compositeur en vue de renouveler la notion de musique interactive. Et finalement, on verra en quoi la notion d'interprétation musicale revient au centre des préoccupations de certains compositeurs et de leurs interprètes par le biais de ces nouveaux dispositifs de captation.

1. INTRODUCTION

Ce n'est que relativement récemment que la prise en compte du geste musical des instrumentistes est devenue un sujet de toute première importance en informatique musicale. Dans l'histoire de cette discipline, on a expérimenté des dispositifs tels que les instruments MIDI, le "Radio Baton" de Max Mathews, ou d'autres dispositifs de captation. Mais la captation de l'action des musiciens était alors destinée surtout à déclencher des notes ou des événements, mais ce n'était que très rarement que l'interprétation musicale au sens fort et en particulier sa dimension gestuelle était prise en compte.

Ce domaine s'est développé récemment en grande partie grâce à l'évolution des technologies (en particulier celle des composants micro-électro-mécaniques) de captation du mouvement qui se sont développées et largement disséminées dans d'autres contextes que celui de l'informatique musicale (jeux, interfaces homme-machine, et autres téléphones portables).

On a coutume d'appeler désormais "instruments augmentés" les instruments de musiques auxquels on a adjoint ces types de capteurs afin d'étendre leurs possibilités musicales, tout en respectant leurs sonorités et leur mode de jeu. De même que la réalité augmentée vise à ajouter une ou plusieurs dimensions sensorielles à notre perception, on verra que le but des instruments augmentés va au delà de l'enrichissement de la palette sonore des instruments pour aller vers l'ajout de nouvelles possibilités expressives et d'interprétation, en plus de celles que maîtrise déjà l'interprète virtuose. Les instruments augmentés sont aussi une façon de répondre aux problèmes posés par l'immatérialité des instruments virtuels par une relation directe avec la corporéité par l'intermédiaire de ces interfaces homme-machines très particulières que sont les instruments de musique. Les contraintes techniques inhérentes à la conception d'un dispositif d'augmentation sont assez nombreuses; en effet, il ne doit ni gêner ni modifier le jeu ordinaire du musicien, ne doit pas endommager l'instrument (parfois très coûteux) sur lequel il est appliqué, doit être suffisamment robuste et autonome pour résister aux situations de jeu pendant des concerts, etc.

A l'Ircam, depuis les recherches de Marcelo Wanderley[1], plusieurs équipes ont concentré leurs activités sur la question du geste et de l'intégration des technologies de sa captation dans le domaine du spectacle vivant ("Pôle spectacle", équipe "Geste" dirigée par Frédéric Bevilacqua depuis 2004).

La notion de geste est extrêmement polyvalente. Ici on s'intéressera uniquement au geste instrumental et plus spécifiquement à celui des instrumentistes à cordes.

L'interprétation musicale est à la base de la musique classique occidentale. Le rôle de l'interprète est fortement valorisé depuis le 19ème siècle, et jusqu'à aujourd'hui, puisque le marché du concert et du disque classique repose toujours largement sur le vedettariat des interprètes. Les compositeurs du 20ème siècle ont souvent pris position relativement à l'interprétation de leur musique. L'interprétation musicale est essentielle, elle est médiation entre la construction de l'oeuvre et le

phénomène sonore perçu par l'auditeur. Celle-ci se caractérise par sa variabilité, opposée à la permanence, à l'identité du texte musical. Variabilité d'une version à l'autre d'une même œuvre par le même instrumentiste, variabilités des conceptions d'un artiste à l'autre, variabilité des écoles ...

L'étude de ces variabilités était l'apanage des critiques musicaux ou de quelques très rares musicologues. Mais ces études sont caractérisées par une forte subjectivité. Ce n'est que depuis très récemment que l'on peut considérer l'analyse subjective de ces variabilités qui font l'interprétation musicale. Cette prise en compte moderne de l'interprétation est à son tour considérée par certains compositeurs contemporains. Ceux qui s'y intéressent y voient un enrichissement des possibilités de leur langage, un enrichissement du vocabulaire, ainsi qu'une source d'inspiration très féconde. L'idée d'intégrer le geste de l'interprète à la composition musicale est très riche en potentialités. En raison, d'une part, de la richesse de la notion de geste musical et, d'autre part, par toutes les possibilités de niveau d'insertion de ce geste dans la composition.

Fonctions du geste musical:

- production sonore
- gestes expressifs
- gestes ancillaires
- gestes paramusicaux
- gestes parasites

Dimensions physiques du geste musical :

- mouvement
- pression
- position
- énergie
- fréquence
- vitesse
- accélération

Typologies de l'utilisation des capteurs:

- mapping direct
- mapping complexe
- reconnaissance (des modes de jeu)
- reconnaissance (d'un modèle gestuel)
- suivi
- application à la synthèse
- (auto)-transformation
- transformation du son
- ...

Les caractères importants du geste des musiciens virtuoses sont les suivants: nécessité, expressivité, précision, reproductibilité et individualité. Les compositeurs vont essayer de tirer partie de toutes ces caractéristiques dans leur ensemble, ou bien se focaliseront plus sur un aspect du geste instrumental.

Ces différentes caractéristiques, ainsi que les différents types de mouvement et leurs dimensions physiques pourront être intégrés à l'exécution de l'œuvre grâce à la mise en œuvre de techniques temps réel de captation du geste selon différentes modalités (reconnaissance, suivi, mapping, ...) pour contrôler soit des sons synthétisés par l'ordinateur, soit des transformations du son même des instruments. La prise en compte du geste des interprètes peut aussi avoir lieu dans le temps de la composition, les informations extraites de la captation du jeu instrumental servant à nourrir l'écriture de l'œuvre. On voit que toute une typologie du rôle du geste dans les œuvres musicales récentes reste à établir.

Dans cet article, on va étudier plus en détail et selon cet axe trois œuvres récentes. Ces œuvres ont été choisies non seulement parce que l'auteur y a collaboré, et peut ainsi en parler aisément, mais aussi parce qu'elles abordent de façon originale différentes possibilités de ces dispositifs.

2. BOGENLIED

Dans *Bogenlied* de Florence Baschet, composé en 2005, un archet spécialement dédié aux recherches sur les reconnaissances des modes de jeu avait été utilisé. L'objectif de cette pièce était d'utiliser ces trois différents types d'articulation basiques : le détaché, le martelé et le staccato. L'enjeu de la recherche était donc celui de la reconnaissance et de l'extraction automatique de paramètres musicaux, en l'occurrence l'articulation de la main droite du violoniste. Le travail de thèse de Nicolas Rasamimanana [2] a été très précieux pour cette tâche de reconnaissance.

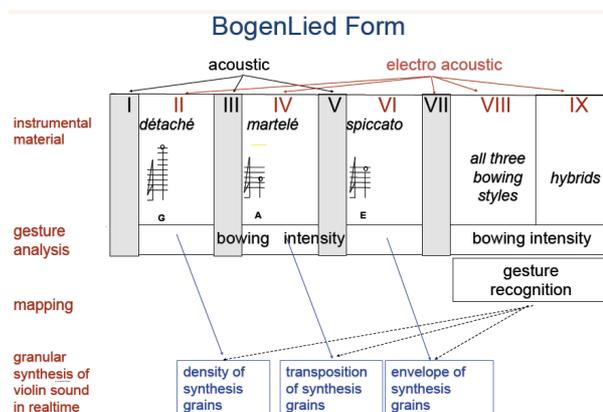


Figure 1. *Bogenlied* : forme.

Après trois sections où ces trois modes de jeu sont exploités successivement, dans la section finale, ils sont utilisés tous ensemble. A chaque mode de jeu est associé un traitement spécifique (principalement le contrôle des paramètres d'une synthèse granulaire utilisant le son du violon) ainsi qu'une hauteur (au détaché correspond la note sol5, au martelé, la3, et au spiccato, mi4). Il est à noter que dans cette section la nature statistique de la reconnaissance est utilisée. Si un coup d'archet est

détecté comme 60% martelé et 40% détaché, il sera alors accompagné d'un intervalle LA-SOL où domine le La). Un des principaux paramètres de contrôle utilisé est l'"énergie" du geste de la violoniste, mesurée en traitant uniquement l'accélération de l'archet le long de l'axe X. Dans certains passages, la compositrice laisse l'instrumentiste libre d'interpréter le texte avec des dynamiques non notées dans la partition. Ce qui permet à la violoniste d'explorer différentes amplitudes gestuelles entraînant différentes réponses électroacoustiques, laissant ainsi une place importante à la qualité de l'interprétation.

La violoniste Anne Mercier, créatrice de l'oeuvre, a réussi à suffisamment "prendre en main" le dispositif pour pouvoir avoir une certaine maîtrise sur le résultat sonore en faisant varier sa façon de réaliser les coups d'archets coutumiers pratiqués par les violonistes. Elle nous a avoué que cette pièce l'avait obligée à modifier certains desdits coups d'archets de façon à influencer sur la partie électronique.

3. PARTITA 1

Partita 1 de Philippe Manoury inaugure un cycle à venir de pièces solistes pour instruments à cordes frottées (d'autres pièces sont déjà en préparation, dont une pour contrebasse, ainsi qu'un quatuor à cordes). Après avoir parcouru le cycle "sonus ex machina", cycle qui a fait date dans l'histoire de la musique mixte (première utilisation du logiciel Max, suivi de partition, instruments MIDI, invention des "partitions virtuelles" ([3]), Philippe Manoury souhaite, dans un esprit prospectif et innovant, explorer de nouvelles possibilités, ouvrir de nouvelles voies. Ces recherches poursuivent néanmoins les réflexions du compositeur sur le suivi de partition et les partitions virtuelles. En 2004, il imaginait les possibilités des cas de figures de contrôle de la synthèse par un "violon étendu"¹.

Partita 1, composée entre juillet et décembre 2006, est une commande du GRAME. Au cours de leur collaboration Philippe Manoury et Christophe Lebreton ont exploré ensemble la synthèse par modèles physiques de cordes frottées ainsi que la réalisation d'un dispositif de captation gestuelle permettant de contrôler cette synthèse. Après de nombreux essais, le modèle physique pour la synthèse a été abandonné, principalement pour des raisons de coût de calcul, au profit du synthétiseur *Synful*² d'Eric Lindeman.

La réalisation du dispositif de captation du geste devait répondre aux contraintes préalables suivantes : un système peu coûteux et facile à reproduire, pouvant s'installer facilement sur l'instrument (ne nécessitant pas un dispositif instrumental particulier, comme c'était le cas pour la flûte MIDI, les vibraphones de *Neptune* ou le piano Midi pour *Pluton*, etc.). La réalisation de ce dispositif a été faite en étroite interaction avec l'altiste Christophe Desjardins de façon à aboutir à quelque

chose qui décrive précisément son geste sans être toutefois une entrave ou une contrainte.

L'oeuvre est construite à partir d'une phrase initiale composée de sept « expressions sonores » (note aiguë, phrase régulière, trille, ricochet, trémolo, crescendo et polyphonie).



Figure 2. extrait de la section 2 de *Partita 1* : exposé des "modes de jeu".

Dans *Partita 1*, neuf parties s'enchaînent, chacune centrée sur une idée musicale ou geste instrumental particulier, les autres modes de jeu restant présentes en arrière-plan, de façon à créer une sorte de "perspective sonore".

- 1.rythme staccato, notes répétées (p.1-18)
- 2.prélude = exposition, énoncé des 7 "expressions sonores" (p. 19-23), notes aiguës.
- 3.phrases en triple croches régulières (p. 23-31)
- 4.trilles sur balancements d'accords (p. 32-40)
- 5.ricochet (p. 41-47)
- 6.section trémolos (p. 48-69)
- 7.section "toupies" (geste crescendo) (p. 69-84)
- 8.cadenza (à 2 voix) (p. 85-92)
- 9.coda (p. 93-97)

Dans la sixième section, focalisée sur le mode de jeu "trémolo", les capteurs servent à synchroniser la vitesse des trémolos de synthèse avec ceux de l'instrument.

Dans la septième section, dans laquelle des "toupies" sonores répondent à des gestes en crescendo, l'accélération dans l'axe longitudinal de l'archet est utilisée pour contrôler la transposition des harmonizers. Dans cette section en forme de forme ouverte, l'altiste peut enchaîner librement les intervalles indiqués en faisant varier les durées et les dynamiques des crescendos. Il lance ainsi quatre voix d'objets musicaux en forme de "toupies sonores" (sons animés d'une rotation interne par effet leslie) dont il va pouvoir contrôler l'évolution de façon réellement interactive.

Dans un passage de la section 6 (p.64), le mouvement de l'archet est comme prolongé par une trajectoire spatiale influencée également par l'accélération longitudinale qui contrôle des paramètres du traitement de spatialisation appliqués aux sons de synthèse.

La pression appliquée par l'index droit de l'altiste, captée par une bague passée au doigt, sert à contrôler

¹ document interne 19 mars 2004 : "projet modes de jeu/suivi de partition"

² cf. <http://www.synful.com/>

une fréquence de modulation. Le mode de jeu “écrasé” (que l’on retrouve à plusieurs reprises, par exemple p.42 ou p.73) correspond à un son plus “distordu” par une modulation en anneau.

Dans *Partita 1*, les dispositifs de captation du geste sont utilisés de façon individuelle (i.e. un à la fois) et dans certains contextes musicaux spécifiques bien définis, de façon à ce que le geste du musicien soit mis en correspondance avec un traitement qui prolonge celui-ci.

4. STREICHERKREIS

StreicherKreis, composé par Florence Baschet en 2007/2008, après une période de recherche d’un an (2006/2007), est en quelque sorte la continuation de l’expérience *Bogenlied*. L’objectif initial étant d’étendre les modes de jeu reconnus à un vocabulaire de gestes plus spécifique à la musique contemporaine. Il fallait également équiper l’ensemble des instruments du quatuor, c’est à dire réaliser des dispositifs amovibles adaptables facilement à tous les archets. La difficulté principale était la détection de la pression de l’archet sur la corde. Grâce aux efforts conjugués de Mathias Demoucron [4], Alain Terrier et Emmanuel Flety, nous sommes arrivés à un dispositif mesurant de façon très fiable la pression du crin de l’archet tout en étant très peu intrusif sur l’instrument (quelques millimètres au talon). Ce dispositif a été fait “sur mesure” pour les instrumentistes du quatuor Danel mais est adaptable facilement sur n’importe quel archet.

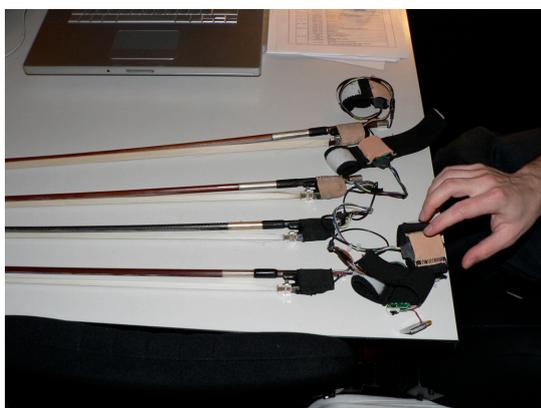


Figure 3a. Archets augmentés pour *StreicherKreis*.

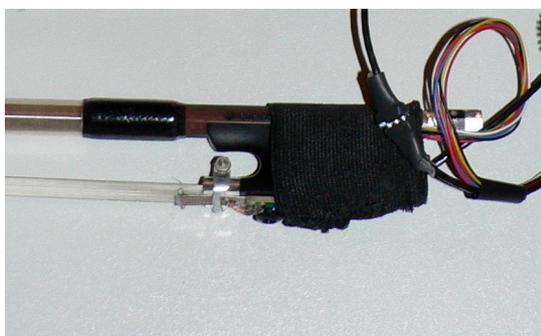


Figure 3b. capteurs pour *StreicherKreis*.

Les capteurs fixés à l’archet émettent six signaux:
 -accélération longitudinale (axe Z)
 -accélération dans l’axe des cordes (axe Y)
 -accélération perpendiculaire à l’archet (axe X)
 -vitesse de rotation dans l’axe de la baguette (gyroscope)
 -vitesse de rotation autour du poignet
 -pression

Dans *StreicherKreis*, tous les signaux de tous les capteurs sont utilisés en permanence (soit 24 signaux échantillonnés à 200 Hz).

Ces capteurs contrôlent les traitements transformant le son du quatuor. Le mapping des capteurs vers les effets est composé de telle façon que les instrumentistes ou les gestes appliqués aux traitements électroacoustiques soient constamment variés en correspondance avec le discours musical.

Le rôle dévolu à ce dispositif évolue au cours de l’oeuvre dans une progression quasi-dramatique. Dans la première partie (ou cycle), chaque instrumentiste contrôle successivement et individuellement sa propre transformation. Dans le second cycle, chaque instrumentiste contrôle successivement et individuellement la transformation du son des trois autres (voir par exemple les gestes du violoncelle à la mes. 212-213). Dans le troisième cycle, ils contrôlent tous ensemble et simultanément la transformation globale en agissant chacun par des paramètres du geste différents sur des paramètres de traitements différents (cf. mes. 279-287).

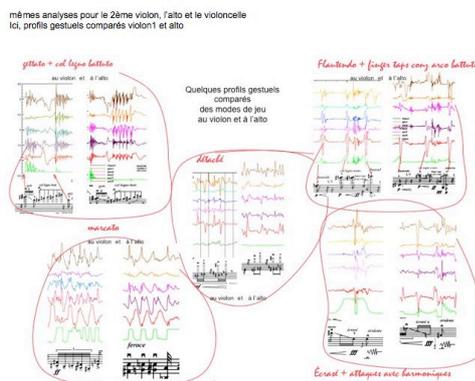


Figure 4. *StreicherKreis* : Comparaison de modèles gestuels.

La période de recherche précédant la composition de *StreicherKreis* a été l’occasion de développer des outils logiciels d’alignement en temps réel permettant d’accéder à la notion d’interprétation musicale par la comparaison de “modèles gestuels” (en fait des réalisations particulières de fragments musicaux exploitant les différents modes de jeu envisagés).

Le fait que *StreicherKreis* soit du genre quatuor à cordes (à la différence d’une pièce du type “instrument solo et électronique”) nous a obligé à aborder la question de la collectivité d’une interprétation dans le cadre de la musique de chambre. Problématique d’un grand intérêt, encore renouvelé par les possibilités ouvertes par l’analyse permise par les instruments

augmentés; il est possible, par exemple, de comparer en temps réel les différentes “stratégies gestuelles” des membres du quatuor dans l'exécution de gestes semblables ou de gestes collectifs. On pourrait également, non seulement comparer l'interprétation de cette oeuvre par différents quatuors, mais aussi comparer leurs différences interindividuelles, en d'autres termes accéder aux relations internes d'imitation ou de différenciation au sein même de cet individu collectif qu'est le “quatuor à corde”.

La réalisation de *Streicherkreis*, qui faisait suite à une longue période de recherche sur la captation du geste des instrumentistes du quatuor, a été l'occasion de développer un dispositif suffisamment robuste et fiable en particulier en ce qui concerne la captation de la pression des archets. Ces systèmes sont désormais adaptables facilement sur tous les archets de la famille du violon, et il y a fort à parier qu'ils seront utilisés dans d'autres pièces à venir.

5. CONCLUSIONS

Il est difficile de prévoir la pérennité de tels systèmes de captation. On peut noter que se développent aujourd'hui d'autres dispositifs de captation du geste des instrumentistes à cordes que ceux évoqués ici¹. Tous ces systèmes ont beaucoup de points communs, en particulier dans les technologies utilisées (MEMS, OSC, ...). Même si les prototypes utilisés dans le cadre des pièces étudiées venaient à disparaître ou n'étaient pas disponibles, il est probable qu'il sera de plus en plus facile de les reconstruire sans trop de difficultés, voire même utiliser directement des instruments augmentés existant sur le marché.

En confrontant trois pièces différentes (parmi d'autres) écrites pour des dispositifs techniques très proches, on peut mettre en évidence des points communs dans les approches compositionnelles, mais on peut surtout mesurer, même dans ce corpus concentré, de nombreuses différences dans l'utilisation des possibilités offertes par la technologie. Ces différences d'approche illustrent bien la grande richesse des possibilités offertes par l'augmentation des instruments de musique. Tout un vocabulaire reste à établir et à explorer, ce qui est stimulant pour la création.

Pour répondre au manque de “naturel”, voire à la froideur des sons des virtuels synthétiseurs, le compositeur va “placer son écoute dans ce **lieu réservé** de l'instrumentiste“ (Baschet) en utilisant des instruments augmentés qui lui permettent de retrouver le “rapport **intime** entre les infimes variations des modes de jeu instrumentaux et le contrôle des sons de synthèse“ (Manoury).

Dans l'ensemble des pièces étudiées, l'implication des instrumentistes a été très grande et cruciale tout au long des périodes de réalisations. Cet investissement

personnel est beaucoup plus essentiel dans le cadre des oeuvres pour “instruments augmentés” que dans celui des oeuvres mixtes. Pendant la période de recherche préliminaire, puisque les instruments augmentés sont encore à construire, l'implication des futurs interprètes est nécessaire pour définir le “design” aussi bien des capteurs que des logiciels exploitant les données provenant de ceux-ci. Ce design ne peut se faire sans leur participation. Dans la phase de composition de l'oeuvre, ils doivent être présents également pour commencer à explorer les possibilités ouvertes au compositeur par l'augmentation de leurs instruments. Enfin, une fois l'oeuvre écrite, les dispositifs de captation du geste et de transformation du son réalisés, ils devront apprendre à “jouer” de ces nouveaux instruments. C'est là qu'est l'étape sans doute la plus importante puisque ce qui est en jeu dans ces oeuvres c'est non seulement l'augmentation des possibilités sonores des instruments de musique mais surtout l'exploitation de nouveaux gestes interprétatifs. Toutes les pièces étudiées ici ne sont que les premiers jalons posés dans des territoires musicaux encore inexploités mais riches en potentialités, dont l'exploration ne se fera pas sans la participation des virtuoses du futur.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Wanderley, Marcelo and Marc Battier, editors. 2000. *Trends in Gestural Control of Music*. (DVD-ROM) Paris, IRCAM - Centre Georges Pompidou.
- [2] Poepel C., Overholt D. *Recent developments in violin-related digital musical instruments: where are we and where are we going?* Proceedings of the 2006 conference on New interfaces for musical expression, p.390-395. Paris, 2006.
- [3] Rasamimanana, Nicolas. *Geste instrumental du violoniste en situation de jeu : analyse et modélisation*. Thèse soutenue en mars 2008. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2008.
- [4] Manoury, Philippe. *Considérations (toujours actuelles) sur l'état de la musique en temps réel* (<http://www.philippemanoury.com/?p=319>)
- [5] Demoucron, Mathias. *On the control of virtual violins: Physical modelling and control of bowed string instruments*. Thèse soutenue en novembre 2008. KTH, Stockholm, 2008.

7. APPENDICE A : FICHES DESCRIPTIVES DES OEUVRES ÉTUDIÉES

Partita I (2006) de Philippe Manoury
pour alto et électronique

Date de composition : 2006

Durée : 45 minutes

Éditeur : Durand

Commande : Grame / Ministère de la culture

Dédicace : à Christophe Desjardins

¹ tel que le K-Bow de Keith McMillen. voir <http://www.keithmcmillen.com/kbow/index.html>

Création : 1er Mars 2007, Grame, Villeurbanne, par
Christophe Desjardins, alto

Information sur le studio : Grame / Ircam
Réalisateur en Informatique Musicale : Christophe
Lebreton (GRAME), Serge Lemouton

Effectif détaillé : 1 alto, 1 traitement temps réel

BogenLied (2005) de Florence Baschet
pour violon augmenté et dispositif électroacoustique
temps réel

Date de composition : 2005
Durée : 12 minutes
Editeur : Jobert
Commande : association Cumulus, festival Why Note

Création : 26 novembre 2005, Parvis Saint Jean, Dijon,
par Anne Mercier, violon soliste de l'ensemble
L'itinéraire

Réalisateur en Informatique Musicale : Serge Lemouton

Effectif détaillé : 1 violon [augmenté], 1 traitement
temps réel

StreicherKreis (2007-2008) de Florence Baschet
pour quatuor à cordes « augmenté » et dispositif
électroacoustique live

Date de composition : 2007 - 2008
Durée : 25 minutes
Editeur : Jobert
Dédicace : à mes amis musiciens, Serge Lemouton,
Frédéric Bevilacqua, le Quatuor Danel et Nicolas
Donin. À Nicole, ma mère

Création : 13 novembre 2008, Espace de Projection,
Ircam.

Information sur le studio : Ircam
Réalisateur en Informatique Musicale : Serge Lemouton

Effectif détaillé : 1 violon, 1 violon 2, 1 alto, 1
violoncelle [tous augmentés], 1 traitement temps réel

LA POLYSÉMIE DU TEMPS RÉEL ET DU TEMPS DIFFÉRÉ

Karim Barkati

CICM – Université Paris VIII

karim.barkati@free.fr

RÉSUMÉ

Au cours de l'interaction vivante avec les systèmes d'informatique musicale, on ressent avec évidence qu'il y a quelque chose qui relève du « tout de suite » et autre chose qui relève du « plus tard », et, dans ce sens-là, temps réel et temps différé constituent des catégories pertinentes, issues de l'expérience interactive, et délimitées par notre sensation d'immédiateté. La force de cette approche intuitive – la congruence entre notre expérience humaine des sensations d'immédiateté et de délai avec la dichotomie usuelle temps réel/temps différé – semble entériner ce modèle historique, et, ce faisant, dissimule ses faiblesses. De fait, un examen plus approfondi révèle des failles susceptibles de faire vaciller ce modèle robuste en apparence, dont l'évidence intuitive finit par s'évanouir. Plusieurs observations y contribuent : le caractère flou de la frontière entre temps réel et temps différé, la rapidité de l'évolution de l'informatique en général et de l'informatique musicale en particulier, et des contradictions conceptuelles majeures entre les niveaux technologique, pratique et musical des deux catégories.

1. UN SEUIL DISCUTABLE

1.1. Une frontière floue

La clé même de la définition des deux catégories du temps réel et du temps différé – le seuil de latence – repose en général sur des considérations d'ordre perceptif, c'est-à-dire nécessairement variables d'un individu à un autre, d'un contexte d'audition à un autre, ou d'un moment de l'interaction à un autre¹. Il s'agit toujours de statistiques sur une population particulière, et l'unicité d'une valeur annoncée traduit toujours une *moyenne*. Puisque ces enquêtes subissent nécessairement une variabilité non négligeable, elles deviennent contestables quand elles décrètent une valeur unique et fixe – par

¹ Henri Piéron notait déjà en 1913 que « [...] l'allongement des temps de réaction au fur et à mesure qu'on se rapproche du seuil de sensation dépend essentiellement d'une augmentation du temps nécessaire pour que la transformation de l'excitant physique en phénomène cérébral de nature sensorielle s'effectue; si l'on descend au-dessous du seuil, ce temps devient infini. [...] la loi de décroissance des temps de latence en fonction des intensités varie suivant les sensations [...] » [6, p. 17-18]

exemple $s = 24$ ms. Autrement dit, devrait-on vraiment classer un logiciel ou un système numérique du côté du temps différé lorsqu'on mesure un temps de latence de 25 ms ? De 26 ms ? Ou de 30 ms ?

Ce questionnement, malgré sa légèreté, montre une première limite majeure de l'arbitraire de la définition d'un seuil *fixe* pour départager le temps réel du temps différé. Il suggère préférentiellement une frontière épaisse, ou bien une frontière floue. Or la solution d'élargir ce seuil ponctuel à un intervalle de la forme $]s_{min}; s_{max}]$ pour formaliser une frontière « épaisse », complique et fragilise le modèle sans apporter non plus de réponse totalement satisfaisante. En effet, d'une part le problème de l'arbitraire de la définition subsiste, puisque les deux bornes s_{min} et s_{max} de l'intervalle proposé restent fixées et donc contestables en tant que telles, et, d'autre part, des valeurs mesurées dans un contexte particulier ne peuvent être considérées comme pertinentes que dans ce contexte particulier. Pour illustrer ce dernier point, on peut aisément imaginer qu'une latence relativement importante mais acceptable dans un contexte musical où les textures prédominent ne le sera sans doute plus dans un contexte musical où la pulsation et les percussions prévalent.

En substance, le flou « indissipable » de la frontière entre temps réel et temps différé relève ici de deux ordres : l'arbitraire de fixer une valeur ou un intervalle plutôt qu'un autre, et l'impossibilité de généraliser toute valeur ou tout intervalle qui semble pourtant pertinent dans un contexte particulier.

1.2. Des définitions multiples

En informatique musicale, plusieurs définitions du temps réel coexistent, tout en différant selon le point de vue adopté. Pour montrer cette multiplicité, nous allons seulement remarquer qu'un même auteur parfaitement légitime dans notre domaine, Curtis Roads dans le cas présent², peut proposer des définitions irréductibles l'une à l'autre :

Définition 1 [11, p. 109] *Le matériel rendait impossible de concevoir la synthèse du son haute-fidélité en temps réel. Par temps réel, nous voulons dire qu'on entendra le son en même temps qu'on verra les gestes du musicien.*

² D'autres auteurs auraient pu illustrer cette section.

Définition 2 [12, p. 69] *Qu'entendons-nous par temps réel ? Dans ce contexte [de la synthèse numérique], le temps réel signifie que nous pouvons achever les calculs pour un échantillon en un temps inférieur à une période d'échantillonnage.*

Précisons que cette multiplicité des définitions n'est pas du tout un phénomène isolé, mais que le temps réel a effectivement reçu de nombreuses définitions hétérogènes. Nous étudierons plus avant les aspects polysémiques des expressions « temps réel » et « temps différé » à la section 2 page suivante, néanmoins nous pouvons examiner dans cette présente section en quoi ces deux définitions précises divergent.

1.2.1. Du point de vue de la perception

La première définition sous-entend une situation de concert et se fonde sur la perception humaine d'une simultanéité (chez le public qui voit les gestes du musicien et entend les résultats sonores de ces gestes). Cette définition implique clairement deux sens – la vision et l'audition –, or la perception de la simultanéité d'événements multisensoriels reste une question controversée et un sujet de recherche toujours d'actualité³. Elle fait appel à des mécanismes complexes, comme l'anticipation, la comparaison, la réinjection et la récursion [3], ainsi qu'à des notions récentes plus spécifiques, comme le « ventriloquisme temporel » ou la « fenêtre déplaçable » pour l'intégration multisensorielle⁴.

L'article *The perception of cross-modal simultaneity* [3] rappelle d'abord l'importance des différences interindividuelles et l'asymétrie temporelle de la perception de la désynchronisation⁵, puis revient sur plusieurs études qui lui précèdent à propos de la perception de la simultanéité audio/vidéo (cf. figure 1), et livre enfin les résultats d'une expérience nouvelle. Dans cette expérience, un « acteur » aux yeux bandés frappe une surface relativement muette avec le *Radio baton* de Max Mathews, tandis qu'il entend un impact

³ « An unsolved problem in cognitive science concerns the perception of simultaneous events, particularly when the information impinging on the sensory receptors comes from two different sensory modalities. » [3] La perception de la simultanéité d'événements multisensoriels constitue d'ailleurs une des plus anciennes questions de la psychologie expérimentale, depuis le « problème de l'observatoire de Greenwich » en 1796 (concernant la vue et l'audition).

⁴ « We are rarely aware of differences in the arrival time of inputs to each of our senses. New research suggests that this is explained by a 'moveable window' for multisensory integration and by a 'temporal ventriloquism' effect. » [14] Les auteurs notent aussi que la supériorité de la vitesse de la lumière par rapport à celle du son dans l'air (3000 000 m/s contre 340 m/s) peut être partiellement compensée par la lenteur de la transduction chimique de la lumière à partir de la rétine comparée à la transduction mécanique des ondes sonores dans l'oreille.

⁵ « Past investigation of intermodal asynchrony has focused audio/video. There are two general findings. (1) There appear to be large individual differences in perception thresholds. (2) Thresholds are asymmetric : people are more likely to perceive events as synchronous when the audio precedes the video than vice versa. » [3]

préenregistré à travers son casque audio, l'impact étant avancé ou retardé d'une valeur prise aléatoirement entre -200 ms et +200 ms. Un « observateur » regarde l'acteur depuis une pièce isolée acoustiquement (double vitrage), à une distance de 2 mètres de l'acteur, et entend l'impact préenregistré à travers son casque, avec le décalage aléatoire. Après chaque essai, les sujets déclarent si le son a eu lieu *en même temps* que le geste ou non. Selon la ligne de partage des 75%, l'article conclut que les « acteurs » ont détecté des asynchronies entre le toucher et l'audition à partir de -25 ms et +42 ms, et que les « observateurs » ont détecté des asynchronies entre la vue et l'audition à partir de -41 ms et +45 ms :

A simple and intuitive way to consider the data is to plot the percentage of the time subjects judged the stimuli to be synchronous as a function of the sound-contact asynchrony (indicated by responses of "same"). If we consider the 75% line to indicate subjects' detection threshold (i.e., the asynchrony beyond which fewer than 75% of responses incorrectly judge simultaneous), we find that actors detected asynchronies at -25 and +42 msec, and observers detected asynchrony at -41 and +45 msec.

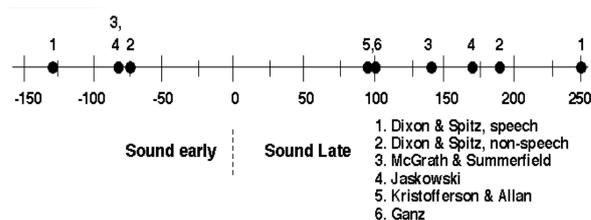


Figure 1. Estimations récentes du seuil de simultanéité audio/vidéo, d'après Levitin & al.

Dans le cas qui nous intéresse (la latence d'un système audionumérique perceptible par un public entre la vue du geste d'un musicien et l'audition du son produit par ce geste), nous pouvons retenir de ces quatre résultats uniquement celui qui concerne le seuil positif (plutôt que le seuil négatif) et perçu par l'observateur (plutôt que par l'acteur) : soit un seuil de +45 ms. Cette valeur, qui correspond à la première définition du temps réel susmentionnée, sera à comparer avec celle qui peut correspondre à la seconde définition.

1.2.2. Du point de vue de la fréquence d'échantillonnage

La seconde définition, liée à la puissance de calcul d'un ordinateur, est issue de l'analyse de Curtis Roads citée précédemment. Cette analyse démontre que pour qu'une synthèse sonore puisse avoir lieu en temps réel, elle doit réaliser les calculs nécessaires à chaque échantillon en un temps inférieur à la période

d'échantillonnage. Ainsi, pour un taux d'échantillonnage standard de 44 100 échantillons par seconde, les calculs doivent donc être achevés en moins de 23 *microsecondes*^{6 7}...

Or en comparant ces 23 μ s (pour la seconde définition) aux 45 ms (admissibles comme limite du temps réel en regard de la première définition), on peut constater une différence colossale⁸ d'un facteur 2000! D'où peut venir un tel écart entre deux définitions du temps réel – une catégorie pourtant si familière en informatique musicale? Les divergences des études sur la perception, bien qu'elles soient fréquentes, restent toujours bien en deçà d'un tel écart (cf. figure 1 page précédente). Une telle différence laisse à penser que derrière la même locution, il ne s'agit pas de la même signification : cet écart peut en effet s'expliquer par une confusion dans le langage courant entre les deux niveaux *technologique* et *perceptif* de la définition du temps réel.

Conformément à la démonstration de Curtis Roads [12, p. 69–70], un flux audionumérique doit être émis aussi rapidement que sa fréquence d'échantillonnage le requière pour pouvoir être audible en temps réel, sous peine d'artefacts audionumériques très gênants à l'audition. De fait, au bout de la chaîne de traitement numérique, si le convertisseur numérique-analogique (ou CNA) ne reçoit pas les échantillons à temps, il produira alors un signal erroné, ce qui se traduira typiquement par des saccades sonores intempestives, avec des « clics numériques » plus ou moins perceptibles selon les cas. D'un point de vue technique donc, les échantillons considérés individuellement doivent impérativement avoir été calculés et arriver au CNA à une vitesse supérieure ou égale à la fréquence d'échantillonnage.

* * *

En résumé, on peut considérer que la notion de seuil qui est traditionnellement invoquée pour définir le couple temps réel / temps différé est finalement discutable, pour deux raisons principales : le flou de la frontière sentée les séparer, et la multiplicité des définitions.

2. LA POLYSÉMIE DU TEMPS RÉEL ET DU TEMPS DIFFÉRÉ

Le télescopage de plusieurs valeurs différentes pour définir le problématique seuil de latence censé sé-

⁶ L'auteur de conclure en 1998 : « Ceci signifie qu'il est difficile à un ordinateur d'achever les calculs nécessaires pour plus de quelques oscillateurs simples en *temps réel*. » [12, p. 69]

⁷ Cette période très brève est toutefois couramment élargie par la technique de vectorisation audionumérique pour les niveaux supérieurs à celui du convertisseur ; p. ex. à 1,45 ms pour un vecteur audio de 64 échantillons.

⁸ Notons que cette période d'échantillonnage de 23 μ s, qui correspond à la « qualité CD », ne vaudrait plus que 10 μ s pour les taux professionnels actuels de 96 kHz et seulement 5 μ s pour ceux qui travaillent jusqu'à 192 kHz. . .

parer la catégorie du temps réel de celle du temps différé nous a amené à reconsidérer la définition du temps réel en informatique musicale dans le sens de la *pluralité*, pour proposer de distinguer trois champs sémantiques. Le découpage du sens reste un exercice délicat, car les sens dégagés possèdent évidemment des traits sémantiques communs, mais cette démarche qui, à notre connaissance, n'a pas encore été suivie, devrait permettre de tirer au clair certaines ambiguïtés persistantes.

2.1. Le champ technique

Le premier sens, le plus étroit, concerne le plus souvent le traitement numérique du signal (TNS) en rapport avec l'échantillonnage audionumérique, soit un seuil de latence proportionnel à la période d'échantillonnage du signal (de l'ordre de 23 μ s pour un signal stéréophonique traditionnel échantillonné à 44 100 Hz, multiplié par la longueur des vecteurs audionumériques). Ce premier sens, impliqué dans les expressions telles que « synthèse (en) temps réel » ou « traitement (en) temps différé », nous proposons de l'indiquer à travers les expressions « temps réel *technique* » et « temps différé *technique* ».

2.1.1. Le champ sémantique le plus ancien

Dans ce champ sémantique, la notion de temps différé se définit en opposition simple avec celle de temps réel, en fonction de la capacité ou de l'incapacité d'un système numérique à *garantir le respect d'une contrainte temporelle donnée*. Il s'agit du sens le plus ancien, proche des définitions généralistes de l'informatique, comme cette définition de Gillies [1, p. 18–19] :

Un système temps réel est un système dans lequel l'exactitude des applications ne dépend pas seulement de l'exactitude du résultat mais aussi du temps auquel ce résultat est produit. Si les contraintes temporelles de l'application ne sont pas respectées, on parle de défaillance du système. Il est donc essentiel de pouvoir garantir le respect des contraintes temporelles du système. Ceci nécessite que le système permette un taux d'utilisation élevé, tout en respectant les contraintes temporelles identifiées.

2.1.2. Une simple dichotomie technique

Ainsi, en tant que *locution adjectivale* (par exemple dans l'intitulé « synthèse en temps différé »), les deux expressions « temps réel » et « temps différé » caractérisent les applications et les processus selon qu'ils respectent ou non le seuil de latence fixé. Sous cette forme adjectivale, la préposition « en » peut être présente ou omise, de même qu'un trait d'union entre « temps » et « réel » ou « différé » ; ces deux remarques

sur la préposition et le trait d'union semblent s'appliquer en anglais, avec une forme supplémentaire fusionnée qu'on rencontre dans « *realtime synthesis* » par exemple.

En tant que *substantif* (avec le groupe nominal « le temps réel »), forme plus rare dans ce champ sémantique technique, les deux expressions « temps réel » et « temps différé » désignent simplement le principe technique (de respect ou de non-respect du seuil de latence).

2.1.3. La garantie technique

Les deux expressions « temps réel » et « temps différé » dénotent finalement une qualité technique relative à la *garantie* du respect d'une contrainte temporelle forte et souvent de bas niveau, c'est-à-dire à un niveau proche de la machine. En généralisant, ces expressions relèvent du champ *technique* lorsqu'elles sont situées dans les contextes du TNS (éventuellement à d'autres échelles temporelles) ou de la gestion et du traitement des flux de données (soumis à des contraintes temporelles).

2.2. Le champ pratique

Le deuxième sens, relié aux seuils perceptifs de *l'interaction* (souvent indiqués entre 20 ms et 100 ms en fonction des modalités particulières de cette interaction) relève de la psychologie expérimentale tout autant que du langage courant et se retrouve par exemple dans les expressions « installation (en) temps réel » ou « jeu (en) temps réel ». Ce temps caractéristique de l'interaction et des systèmes de contrôle événementiels correspondants, nous proposons de le nommer « temps réel *pratique* ». De l'autre côté, les autres pratiques associées à l'écriture et à la composition acquièrent un statut autonome dans l'expression « le travail en temps différé » par exemple. Ce temps caractéristique de l'écriture, nous proposons de le nommer « temps différé *pratique* ».

Remarquons que ce champ sémantique se retrouve dans la description de Risset :

Traditionnellement, la composition est une activité en temps « différé ». C'est l'interprète qui inscrira dans le temps la partition que le compositeur écrit « hors-temps », suivant l'expression d'Iannis Xenakis. La partition, code d'actions et représentation « idéale » ou « virtuelle », permet au compositeur de préparer à loisir un voyage dans le temps sans être assujéti au temps de la musique. Le « temps réel » est celui de l'interprétation – ou de l'improvisation : mais cette dernière activité repose sur une longue accumulation mémorielle de figures musicales associée à des réflexes gestuels. [10, p. 142]

Ou encore, dans la dichotomie entre « création directe » et « création indirecte » proposée par Cadoz [2,

p. 168, c'est nous qui soulignons] :

On peut donc comparer schématiquement deux échelles du processus de création :

- d'un côté, une forme directe, celle du jeu instrumental, directement impliquée *dans le temps* et dans la matérialité. Le jeu instrumental peut être l'interprétation, mais aussi l'improvisation si l'on utilise ce terme pour désigner l'activité créatrice où l'acte physique (gestuel) s'applique directement aux outils matériels pour produire le résultat final (par exemple musical) ;
- de l'autre, une forme indirecte, supposant une activité mentale, méditative, en interaction avec des outils de représentation symboliques, théoriques, abstraits, qui se déroule *en dehors du temps propre de l'expérience sensorielle*. Ce que l'on convient de nommer habituellement la « composition ».

2.2.1. Un temps réel pratique interactif

Dans ce champ sémantique, la forme *substantive* « le temps réel » prend sa valeur de modalité essentielle de l'interaction, comme temps de l'action ou de la *praxis*, où le geste humain rencontre un retour dans un délai suffisamment court pour permettre son ajustement éventuel. Il s'agit donc du temps intuitif et subjectif du « tout de suite », même si ce temps reste objectivement soumis à un temps de latence du point de vue technique pour permettre la rétroaction dans les faits.

Logiquement, la *locution adjectivale* (par exemple dans « installation temps réel ») caractérise son sujet en indiquant qu'elle exploite des modalités *interactives*. Cette locution se présente donc comme un synonyme métonymique de l'adjectif *interactif*, désignant avec une légère préciosité la cause – le temps réel technique – pour l'effet – l'interaction. En effet, on a aujourd'hui l'impression que « l'interactivité » a beaucoup perdu de son pouvoir de séduction au profit du « temps réel », dont les racines sémantiques technologiques sont sans doute plus à même de promettre quelque prouesse. . .

2.2.2. Un temps différé pratique révisable

Une *praxis* du temps différé n'est pas en reste et ne constitue pas cette fois une opposition simple, ni une définition négative (un temps de calcul trop lent). Au contraire, le temps différé, en tant que *substantif*, désigne ici positivement les logiciels et les pratiques musicales qui s'inscrivent dans la durée, typiquement les activités compositionnelles. Cela n'interdit d'ailleurs pas aux logiciels utilisés de répondre à des critères temps réel de bas niveau (temps réel technique) ni de posséder des capacités interactives (temps réel pratique), seulement l'usage qui en est fait n'est pas destiné à être écouté « tout de suite » par un auditoire. L'activité compositionnelle n'est en

effet généralement pas envisagée comme une improvisation, ni comme une interprétation, car pour laisser le temps à l'élaboration de se faire, les résultats de la composition sont réservés à être écoutés « plus tard », voire pas du tout, ou encore en creux⁹.

2.2.3. La réversibilité comme frontière

Finalement, dans le champ de la pratique, le critère distinctif majeur abandonne la notion technique du *seuil de latence* au profit de la notion pratique de *possibilité de retour* (de réversibilité, ou plus précisément de « révisabilité »). En effet, *l'impossibilité* de retour caractérise absolument le temps de la performance en tant que pratique, où ce qui est fait est fait, définitivement ; réciproquement, la *possibilité* de retour caractérise de façon toute aussi pertinente le temps de l'écriture en tant que pratique¹⁰.

Autrement dit, il s'agit d'un certain rapport à la flèche du temps et surtout à son irréversibilité : un rapport en phase pour le « temps réel », ce qui lui confère effectivement en ce sens une propriété capitale de la *réalité* avec l'attribut de l'irréversibilité, contre un rapport qui laisse une place à la réversibilité, en différant la diffusion ou l'exécution de l'œuvre, ce qui confère là aussi un sens profond à l'expression « temps différé », sous l'angle d'une *praxis* dont le résultat est effectivement différé, remis à « plus tard ». La *possibilité de retour* devient alors une des modalités qu'on s'autorise ou qu'on s'interdit pour l'activité musicale, et constitue ainsi un point de rupture valide vis-à-vis des pratiques musicales, entre la performance et la composition.

Le cas du *live-coding* pourrait apparaître comme un cas-limite puisqu'il s'agit à la fois d'une écriture (programmation) et d'une performance (en direct). Or, à la lumière du critère de la *possibilité de retour*, ce cas rejoint sans ambiguïté le temps réel (pratique), puisque toute modification validée durant la programmation en direct est irréversiblement donnée à entendre.

La métaphore du couple signal / code illustre schématiquement la distinction entre temps réel et temps différé dans le champ pratique. D'une part, le *signal* est une information éphémère, prise dans un flux – ce qui correspond au temps réel pratique, de l'interaction à la performance. D'autre part, le *code* est une information inscrite, enregistrée et susceptible d'être consultée, utilisée ou révisée ultérieurement – ce qui correspond au temps différé pratique, du paramétrage à la composition.

⁹ Par exemple, on peut considérer qu'après plusieurs étapes de traitement successives, un son de 1^{re} ou 2^e génération qui n'apparaît pas dans l'œuvre finale existe tout de même « en creux » si un autre son de génération suivante, formé à partir de ce son d'origine, y apparaît.

¹⁰ La pratique du *work in progress*, chère à Pierre Boulez entre autres, franchit d'ailleurs un pas supplémentaire vis-à-vis de cette possibilité de retour dans l'écriture, entraînant un changement d'échelle temporelle dans la notion d'œuvre.

2.2.4. Différenciation évolutive des champs technique et pratique

Historiquement, si aux débuts du temps réel (technique et pratique, dans les années 80 pour la musique) les programmes et les usages associés à ces programmes pouvaient se confondre dans une correspondance plus ou moins bijective entre le domaine *technique* et le domaine *pratique*, dès que les programmes dédiés au temps différé (pratique) ont bénéficié de fonctionnalités temps réel (technique et pratique, comme la possibilité d'écouter directement un son), cette bijection relative fut logiquement rompue de fait. Ainsi, la croissance exponentielle de la puissance des systèmes informatiques aidant, l'écart entre le temps différé pratique et le temps différé technique n'a cessé de croître, jusqu'au stade actuel où la plupart des programmes d'écriture (au sens large) sont équipés de nombreuses fonctionnalités temps réel (*Csound* en est un exemple typique¹¹). Cette évolution des logiciels traditionnellement considérés « temps différé » vers le temps réel suggère bien d'opérer une distinction entre les niveaux *pratique* et *technique*, puisque le temps réel a tendance à se généraliser au niveau technique. Réciproquement, les pratiques temps réel comportent en réalité presque toujours des phases de *préparation* directes ou indirectes, qui relèvent par définition du temps différé (pratique).

2.3. Le champ musical

Le troisième sens, le plus large, exprime le glissement sémantique vers la fonction musicale en tant que choix esthétique. Lorsqu'on lit des expressions comme « une œuvre avec temps différé » ou « improvisation et électronique en temps réel », on comprend qu'il ne s'agit pas de caractériser une technologie ni une pratique mais bien *une musique* dans ses choix esthétiques. Nous proposons de nommer cette partie de notre typologie, selon le contexte : « temps réel *esthétique* » et « temps différé *esthétique* », ou bien « temps réel *musical* » et « temps différé *musical* ».

2.3.1. Un temps réel musical non-superposable aux autres champs

Cette dimension *esthétique* ou *musicale* ne s'appuie pas sur la dimension pratique de façon simple ou univoque, de même que la dimension *pratique* identifiée précédemment comporte déjà en elle-même des niveaux d'imbrication entre temps réel et temps différé. Bien sûr, le temps réel *esthétique* ou *musical* implique à la fois les temps réels *pratique* et *technique* (l'expression « une œuvre avec temps réel » fait communément référence aux idées d'interaction, de per-

¹¹ « As fast or realtime software synthesis becomes increasingly possible, the free exchange of instrument and score files becomes worthwhile. » [15, p. 211, c'est nous qui soulignons].

formance, et aux moyens techniques logiciels et matériels nécessaires à cette interactivité), mais il implique aussi du temps différé ! Et ce à plusieurs niveaux : au niveau *pratique* dans la préparation de la performance, au niveau *technique* aussi selon les programmes utilisés dans cette préparation, voire même au niveau *esthétique*, par exemple lorsque des séquences sonores pré-enregistrées doivent être déclenchées durant la performance ou l'exécution de l'œuvre (ce qui reste très fréquent).

L'extrait suivant peut illustrer ce champ musical, au sens où les idées de temps réel et de temps différé s'affrontent ici manifestement sur un terrain esthétique :

Le temps réel n'est pas une panacée [...] Le travail d'écriture – au sens large – permet d'approfondir et de personnaliser sa démarche : les propositions du temps réel manquent de variété, et elles incitent à des réactions réflexes et donc irréflechies, donnant souvent lieu à des stéréotypes vite usés ou périmés. [...] Je tiens à défendre ici la musique sur support, trop souvent critiquée, voire même enterrée dans certains cercles, alors qu'elle permet de composer les sons avec soin et de présenter un résultat musicalement travaillé. [10, p. 145]

En effet, ce sont bien les limites *musicales* du temps réel et les possibilités tout aussi *musicales* du temps différé qui sont pointées par Risset.

2.3.2. Un temps différé musical « sur support »

Curieusement, le temps différé *esthétique* ou *musical* n'implique pas nécessairement le temps différé *pratique*. Il existe en effet quelques cas extrêmes, mais pas si rares, de diffusion d'un enregistrement où ce qui a été enregistré provient directement d'une unique improvisation interactive (par exemple avec des magnétophones). Il s'agit là d'une situation musicale apparemment temps différé et le plus souvent déclarée comme telle (diffusion d'une musique « sur support ») alors qu'aucun travail d'écriture, de réécriture ou de montage n'a été effectué, ce qui tendrait au contraire à justifier d'une pratique « purement » temps réel (ici, une improvisation)...

Au-delà de ces cas particuliers, le champ *esthétique* de l'expression « temps différé » recouvre souvent l'ensemble des musiques dites « sur support », à comprendre comme les musiques savantes utilisant les technologies numériques et analogiques sous leurs différentes dénominations (concrète, électronique, électroacoustique ou acousmatique), et rejoignant parfois l'idée d'un art des sons *fixés* telle qu'elle a été développée par Michel Chion.

L'utilisation de ce sens *esthétique* transgresse de plus en plus l'ontologie informatique¹² du temps

¹² Il ne s'agit pas ici de l'ontologie informatique « technique » telle que l'a définie Thomas Gruber en 1993 dans son article

différé, en annexant progressivement les technologies analogiques (pour désigner les concerts de musique concrète par exemple). Cette extension du champ sémantique de la notion de « temps différé musical » va parfois même jusqu'à désigner la musique instrumentale qui utilise des partitions, considérant que ces partitions sont effectivement des « supports » de la musique (mais pas directement supports du son, puisque l'interprétation ne se confond jamais avec la transduction).

* * *

La polysémie du temps réel et du temps différé est avérée, il suffit pour s'en convaincre de lire quelques définitions apparemment incompatibles de la notion de temps réel. Aussi, nous avons proposé de distinguer trois champs sémantiques : le champ technique, le champ pratique et le champ musical. Ces trois champs ne peuvent pas se superposer d'une façon simple, car les notions de temps réel et de temps différé y acquièrent un sens suffisamment différent, individuellement et en rapport, à chaque niveau.

3. DES CONTRADICTIONS CROISÉES

De plus en plus d'observateurs relèvent des contradictions dans différents discours sur le temps réel ou le temps différé, et en particulier sur les logiciels d'informatique musicale. Cette section rappelle donc en premier lieu la valeur paradigmatique qu'ont pris certains logiciels pour le temps réel ou pour le temps différé ; puis elle revient séparément sur des contradictions fréquemment évoquées à propos du temps réel et du temps différé, des idées typiquement proches des énoncés « le temps réel nécessite du temps différé » ou « le temps différé s'opère de plus en plus en temps réel » ; elle propose enfin une explication de ces contradictions à travers l'enchevêtrement des niveaux polysémiques.

3.1. La valeur paradigmatique de certains logiciels

Comme on peut le constater d'après les sections précédentes, les notions de temps réel et de temps différé restent relativement floues en général, jusqu'à ce qu'elles s'incarnent dans des logiciels particuliers, dont certains prennent alors une valeur paradigmatique. Ainsi, *Max/Msp* et ses cousins *jMax* et *Pure-Data* – ou plus simplement le paradigme « Max¹³ »

Towards Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing, comme la spécification d'une conceptualisation d'un domaine de connaissance, mais bien d'une ontologie au sens philosophique, en posant l'informatique comme condition préalable à l'existence des notions de « temps réel » et de « temps différé ».

¹³ « I have worked for many years on a computer environment for realizing works of live electronic music, which I named in honor of Max Mathews. Three currently supported computer programs – *Max/Msp*, *jmax*, and *Pd* – can be considered as extended implementations of a common paradigm I'll refer to here as "Max." [...] The Max paradigm

– viennent souvent s’opposer à *OpenMusic*, son ancêtre Patchwork ou encore la série des Music N dans le discours, précisément par rapport à la notion de temps réel :

The semantic of OpenMusic (and Patchwork) is one of demand-driven dataflow. Each object is essentially a function call, which recursively evaluates its inputs, precisely as a Lisp form is evaluated. Compared to Pd, the relationship between data and process is reversed. There is no notion of real-time events or even of real time itself; rather, the contents of a patch are static data. [8]

Notons qu’il en va de même à propos des logiciels du commerce. Ainsi, *Live* est régulièrement associé au temps réel dans le discours, à commencer par son nom qui fait évidemment référence au « *live* » tel que ce mot s’est intégré dans le vocabulaire, y compris en France, à partir des expressions « *live music* » et « *live electronic(s)* ». En opposition, les logiciels de montage (comme ProTools) ou encore d’édition de partition (comme Finale) sont volontiers associés au temps différé.

3.2. Le temps réel nécessite du temps différé

L’utilisation du logiciel *Live* mise en avant est incontestablement la situation de concert, même si ses capacités de montage sont parfois évoquées ; *Live* serait en quelque sorte « le » logiciel temps réel par excellence. Or, des observateurs de plus en plus nombreux font malicieusement remarquer que la part du temps différé dans *Live* est *primordiale*, puisque son fonctionnement repose essentiellement sur l’utilisation de fichiers audio pré-enregistrés ou de séquences MIDI... Ce cas particulier souvent repris reflète une critique bien plus large, qui dénonce en réalité un abus de langage quant au « temps réel » :

Ce qu’on appelle alors « temps réel » dans la composition musicale serait un abus de langage puisqu’une part des composants musicaux est souvent déjà fixée, et n’a pas pour vocation à varier d’une interprétation à l’autre. [4, p. 8]

Cette critique de Philippe Manoury se fonde sur son analyse du temps réel à partir de l’interprétation musicale, et pointe la *fixité* des éléments pré-enregistrés, qui entre en contradiction avec l’interprétation comme *variabilité*.

On peut ajouter à cette remarque le fait que ces logiciels dits « temps réel » demandent paradoxalement un temps de préparation souvent important. Dans le cas de *Live*, il s’agit de la préparation des configurations. Dans celui de *Max/Msp*, il ne s’agit de rien de

can be described as a way of combining pre-designed building blocks into configurations useful for real-time computer music performance. » [7]

moins que de la *programmation* d’un patch¹⁴, ce qui peut demander un temps tout à fait considérable... Or, de toute évidence, cette préparation relève du temps différé (au sens pratique), en se rapprochant de la composition : le choix de séquences et la constitution de configurations verticales potentielles dans le cas de *Live*, comme la programmation de circuits sonores réactifs et la mise en correspondance des paramètres dans le cas de *Max/Msp*, sont autant de choix compositionnels et d’écriture, c’est-à-dire de codes enregistrés. Surtout, le résultat de ces codes préparés n’est pas destiné à être entendu sur-le-champ, mais bien *ultérieurement*, ce qui les rend *révisables* et constitue une marque indubitable du temps différé.

3.3. Le temps différé s’opère de plus en plus en temps réel

Concernant la synthèse sonore, il ne fait aucun doute que la synthèse en temps différé se raréfie au profit de la synthèse en temps réel. De fait, *Csound*, l’héritier des langages *Music N* à forte valeur paradigmatique temps différé, est déjà passé à sa version temps réel en 1990. Les bénéfices de cet accès au son en temps réel ont d’ailleurs été largement plébiscités :

As performance increases, things that were impossible become possible. [...] When you can create sound in real time you can interact with it, and interaction makes possible things that never could have been achieved by typing in lists of commands. [5]

Mais le temps différé ne se limite pas à la synthèse. Par exemple, Miller Puckette a expliqué récemment comment, contrairement à la synthèse, la CMAO¹⁵ n’est pas devenue temps réel :

In general, the cost of CGM per audio sample has not remained constant, but has not grown quickly. The best CGM of the seventies, thirty years ago say, probably cost less than ten thousand arithmetic operations per sample of output. The speedup in computing in the intervening years has allowed us the luxury of running the classic CGM algorithms in real time, thus changing the nature of the pursuit fundamentally. The algorithms themselves have grown somewhat more complex as well,

¹⁴ Le préjugé selon lequel programmer en *Max* serait facile s’avère souvent faux : cela dépend du type d’application à réaliser, et surtout de la taille du patch. Miller Puckette, s’il ne reconnaît pas *Max* comme un véritable langage informatique, reconnaît néanmoins que « faire un patch » s’apparente bien à une activité de programmation ; seul le niveau d’abstraction change : « a patch is itself a program, and the job of connecting simple functions together to make larger ones can be thought of as programming. In this sense, the trend toward patch-based software can be seen as shifting the level on which the user programs the computer away from the C or Lisp code itself and into the “language” of patches. It may be that this is fundamentally a better level at which to operate a computer, than either that of code or that of the user of a large, monolithic program such as a database application. » [9]

¹⁵ Miller Puckette emploie CGM (Computer Generated Music) pour « synthèse sonore » et CAC (Computer Aided Composition) pour CMAO (Composition Musicale Assistée par Ordinateur).

but the universal preference for real-time synthesis and processing has put a lid on that growth.

CAC has not become real-time at all. Since it appeals to the composer in us (whereas CGM appeals to the performer in us), it seems reasonable to expect that CAC software will continue to absorb all the computing resources that can possibly be brought to bear on it. Anything allowed to grow will naturally do so. [9]

Si actuellement les ressources de calcul ne permettent pas à la CMAO de se faire en temps réel, comme l'indique Miller Puckette, il n'en reste pas moins qu'un degré d'interaction de plus en plus important apparaît dans les applications temps différé. Signalons par exemple les travaux de l'équipe « Représentations musicales » de l'IRCAM sur l'intercommunication entre *OpenMusic* et *Max/Msp*, dont la bibliothèque *Osc Moscou* pour *OpenMusic* [13, p.36, avec Carlos Agon] et le projet *OMax*¹⁶, qui fait collaborer *Max/Msp* et *OpenMusic* pour former un « co-improvisateur » par « réinjection stylistique ».

3.4. La confusion des niveaux polysémiques

Deux types de contradictions ont été relevées : un temps réel qui comporte en réalité une grande part de temps différé, et réciproquement un temps différé qui comporte à son tour une part importante de temps réel. Or ces contradictions peuvent être levées après un examen des niveaux sémantiques.

Les reproches avancés à l'encontre de *Live* par exemple, c'est-à-dire la fixité des séquences employées et le temps important de préparation, appartiennent au niveau du temps différé *pratique*, ce qui n'empêche pas le logiciel *Live* d'appartenir au niveau du temps réel *musical*, en accord avec son utilisation musicale de type « performance ».

De la même façon, les nouvelles fonctionnalités interactives d'*OpenMusic*, appartenant au niveau du temps réel *pratique*, n'invalident pas la catégorisation consensuelle de cet environnement dans le niveau du temps différé *musical*, en accord avec son utilisation musicale de type « composition ».

En réalité, à bien y regarder, un logiciel destiné à la performance aura d'autant plus de chances d'être opérationnel et efficace en situation de direct (temps réel technique, pratique et musical) qu'il aura bénéficié d'une préparation importante au préalable (temps différé pratique). Inversement, un logiciel destiné à la composition aura d'autant plus de chances d'être opérationnel et efficace dans une situation d'écriture (temps différé pratique et musical) qu'il offrira

¹⁶ « *OMax* is a software environment which learns in real-time typical features of a musician's style and plays along with him interactively, giving the flavor of a machine co-improvisation. *OMax* uses *OpenMusic* and *Max*. It is based on researches on stylistic modeling carried out by Gerard Assayag and Shlomo Dubnov and on researches on improvisation with the computer by G. Assayag, M. Chemillier and G. Bloch (Aka the *OMax* Brothers) in the *Ircam Music Representations group*. » <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/OMax/>

des fonctionnalités interactives (temps réel technique et pratique) . . .

* * *

On peut retenir deux points importants de cette analyse des contradictions. D'une part, les contradictions apparentes entre le temps réel et le temps différé proviennent souvent d'une confusion croisée entre les différents niveaux polysémiques de ces deux notions. D'autre part, on peut constater que c'est le niveau *musical* qui fait finalement le plus consensus dans notre domaine de l'informatique musicale, c'est-à-dire le niveau le plus abstrait.

4. REFERENCES

- [1] Christian Bonnet and Isabelle Demeure. *Introduction aux systèmes temps réel*. Hermes, Paris, 1999.
- [2] Claude Cadoz. Continuum énergétique du geste au son — simulation multisensorielle interactive d'objets physiques. In *Interfaces homme-machine et création musicale*, chapter 8, pages 165–181. Hermes, Paris, 1999.
- [3] D.J. Levitin, K. MacLean, M. Mathews, L. Chu, and E. Jensen. The perception of cross-modal simultaneity. *Proceedings of International Journal of Computing Anticipatory Systems*, 1999.
- [4] Philippe Manoury. Considérations (toujours actuelles) sur l'état de la musique en temps réel. *L'étincelle*, 3, nov 2007.
- [5] James McCartney. A few quick notes on opportunities and pitfalls of the application of computers in art and music. In Hatje Cantz, editor, *CODE – The Language of Our Time*, Linz, sep 2003. Ars Electronica.
- [6] Henri Piéron. Recherches sur les lois de variation des temps de latence sensorielle en fonction des intensités excitatrices. *L'année psychologique – Revue de psychologie cognitive*, 20, 1913.
- [7] Miller Puckette. Max at seventeen. *CMJ*, 26(4) :31–43, 2002.
- [8] Miller Puckette. A divide between 'compositional' and 'performative' aspects of Pd. *First International Pd Convention*, 2004.
- [9] Miller Puckette. Computing while composing. In Carlos Agon, Gérard Assayag, and Jean-Breson, editors, *The OM Composer's Book*, volume 1. Delatour France / IRCAM, 2006.
- [10] Jean-Claude Risset. Temps en musique numérique. In *Le temps en musique électroacoustique*, volume Actes V, pages 141–145, Bourges, 1999. Académie Bourges, Mnemosyne.

- [11] Curtis Roads. Des instruments pour un son organisé. In *Composition et environnements informatiques*, pages 107–125. IRCAM – Centre Georges-Pompidou, Paris, automne 1992. Traduit de l’anglais par Serge Grünberg.
- [12] Curtis Roads. *L’audionumérique*. Dunod, 1998. Version française : Jean de Reydellet.
- [13] Carl Seleborg. Interaction temps-réel/temps différé – Élaboration d’un modèle formel de Max et implémentation d’une bibliothèque Osc pour OpenMusic. DEA ATIAM, Université Aix-Marseille II, Paris, jun 2004.
- [14] Charles Spence and Sarah Squire. Multisensory integration : maintaining the perception of synchrony. *Current Biology*, 13(13) :R519–21, jul 2003.
- [15] B. Vercoe and D. Ellis. Real-time csound : Software synthesis with sensing and control. In *Proc. ICMC 1990*, pages 209–211, Glasgow, 1990.

REFLEXIONS PARTISANES SUR L'USAGE DU « LIVE-ELECTRONIC » DANS NOS MUSIQUES SAVANTES

Sébastien Béranger

La Muse en Circuit – Centre national de création musicale

sebastien.beranger@alamuse.com

RÉSUMÉ

Dans le cas des musiques interactives et/ou mixtes, les outils pensés pour la création diffèrent de ceux utilisés pour la diffusion. Cette simple constatation devrait affecter les processus de composition, avec une prise en compte des enjeux, du rôle de l'assistant musical, et finalement, poser la question de la légitimité des outils utilisés...

1. INTRODUCTION

Enfonçons des portes ouvertes ! L'outil est conçu au regard d'une finalité. Et il en va de même pour nos musiques...

Dans le cadre d'une création électroacoustique – ou du moins, dans sa relation à la technologie – le compositeur fait face aujourd'hui à deux distinctions quant à la finalité des outils mis à sa disposition. D'un côté, les outils pensés pour la création (composition, analyse, etc.) diffèrent de ceux utilisés pour la diffusion (notamment le concert ou le spectacle). De l'autre, ces mêmes outils ont été élaborés différemment s'ils sont destinés aux musiques savantes ou développés dans un système industriel pour le plus grand nombre. Les musiques savantes optimisent leurs outils afin de satisfaire un désir d'universalité alors que les « produits » issus du monde industriel se focalisent sur des besoins de stabilité et d'optimisation du résultat.

Cette distinction implique une problématique sous-jacente, notamment aux vues des moyens financiers et techniques alloués à la production d'un spectacle ; comment optimiser la composition en prévision de son interprétation finale : le concert ? Et par extension, les outils utilisés dans nos musiques sont-ils toujours les plus légitimes ?

2. REFLEXIONS PARTISANES

Peut-être faudrait-il commencer par quelques explications sur les termes utilisés dans le titre de cette communication. « Réflexions partisans », car la Muse en Circuit est labellisée Centre National de Création Musicale et qu'à ce titre, les problématiques soulevées par la création rejoignent souvent des problématiques de production et de diffusion des œuvres. « Partisans », toujours, puisque je suis aussi compositeur et que les

thèmes soulevés ne peuvent se dissocier totalement de préoccupations qui me sont propres.

Le terme « Live-electronic » est emprunté à Tristan Murail, faisant référence à son article « Ecrire avec le Live-electronic » et se reporte plus spécifiquement au domaine des musiques mixtes, aux diverses interactivités provoquées par la rencontre entre l'instrumentiste-interprète et la machine. Dans cet article, le compositeur décrit cette notion de la manière suivante :

« Pendant ce temps [la fin des années 70], dans un tout autre domaine, le rock et la chanson, l'électronique se développait tranquillement, sans mysticisme, sans état d'âme et très professionnellement ; toutes les combinaisons "acoustiques"-électroniques étaient expérimentées : guitare électrifiée, guitare électrique (ce n'est pas la même chose), amplification, réverbération, filtrages et mixages, multipiste, harmoniseurs et vocodeurs... » [3]

Il s'agit avant tout de techniques et d'outils pensés pour les musiques populaires, avec une forte optimisation pour l'usage sur scène, en « live ».

3. TYPOLOGIES

Entre musiques savantes et musiques populaires, deux typologies d'outil informatiques s'offrent donc aujourd'hui au compositeur. La distinction est légèrement arbitraire, mais elle peut se comprendre par l'historicité, le mode de fonctionnement et la finalité de conception de ces solutions logicielles.

Les musiques savantes, par le biais de la recherche universitaire ont développé un certain nombre d'outils informatiques, généralement pensés selon une configuration modulaire ou déduits de langages de programmation préexistants, tels que MAX/MSP et Pure Data, PWGL, SuperCollider, CSound, etc.

A l'origine de la conception de ces outils transparait le désir d'ouverture, en évitant autant que possible les limitations. Cela se traduit tout d'abord par leur architecture modulaire, par la possibilité de travailler à partir de fonctions de base, par la mutualisation des ressources, par l'ajout régulier de nouvelles « bibliothèques » et autres logiciels compatibles. Cette

ouverture se traduit encore par une volonté clairement assumée de couvrir les possibles en terme de création, avec l'ajout régulier de fonctions vidéo et multimédia, et de se positionner clairement, pour certains d'entre eux (notamment MAX/MSP et Pure Data), sur une utilisation mixte entre le studio et la scène...

En pratique, ces outils laissent néanmoins transparaître quelques limites. L'apprentissage de ces logiciels est souvent très fastidieux ; sentiment renforcé par l'absence de développement des interfaces graphiques et textuelles. La mutualisation des programmations, que ce soit à travers la distribution gratuite de patches ou par les licences « open source », propose au créateur une multitude de possibles, mais au détriment de la stabilité du résultat final. Enfin, le passage du studio à la scène peut être très périlleux sans une connaissance approfondie de tous les impératifs techniques que cela entraîne (dans le désordre, les problèmes peuvent apparaître via les machines, les systèmes d'exploitation, les versions logiciels, les interfaces audionumériques, les systèmes de diffusion, les capteurs, etc...). Le recours aux assistants musicaux est ainsi nécessaire (j'ose penser « obligatoire ») afin de soutenir la démarche du compositeur, ou du moins afin d'optimiser la conception des patches en prévision du concert.

Dans le cadre des « produits » issus du monde industriel, la problématique est différente puisque les outils ont été pensés dès leur conception pour une utilisation scénique. Ils n'ont investi les studios qu'a posteriori, avec l'amélioration des résolutions et des fréquences d'échantillonnage. De même, leur nombre semble beaucoup plus restreint et leurs caractéristiques générales sont plus spécialisées. Ainsi, seul Reaktor de Native Instruments peut réellement être comparé aux outils modulaires cités précédemment. J'y ajouterais Live d'Ableton et dans une moindre mesure les racks VST (par exemple V-Stack de chez Steinberg) ; ce type de logiciels pouvant se substituer à des langages programmables dans de nombreuses situations. J'omet volontairement les logiciels « freeware » et « shareware », ainsi que les machines (multi-effets, échantillonneurs), leur fonctionnement et les possibilités étant souvent similaires, malgré une durée de vie parfois plus restreinte.

Le point fort de ces logiciels vient de leur conception ; ils sont avant tout pensés pour la scène, avec comme principaux objectifs la stabilité et la pérennité. Ainsi, le portage des sessions d'une version à l'autre du logiciel – voire d'un système d'exploitation à un autre – se réalise généralement sans dommage. De même, les incompatibilités matérielles semblent être moins fréquentes et les mises à jour mieux gérées (notamment au niveau des cartes audionumériques, des connectiques et des temps de latence¹). Dernière remarque – qui pourrait être personnelle – les moteurs

audio et les qualités sonores sont souvent supérieurs, parce qu'optimisés pour un résultat précis...

Ces logiciels ne sont toutefois pas exempts de défaut. Si les interfaces graphiques sont relativement intuitives et permettent une utilisation immédiate sans apprentissage excessif, les développements technologiques (et marketing) de ces produits sont avant tout destinés aux musiques populaires ou au sound design. Cela entraîne quelques restrictions qu'il s'agit de contourner. Parmi les plus fréquentes, citons les échelles de hauteurs tempérées, les mesures fixes, les indications métronomiques constantes... Autre revers de la médaille, si ces logiciels sont généralement stables, ils restreignent l'utilisateur quant aux possibilités de programmation. Il en va de même avec certains protocoles (Wi-fi, infrarouge, norme Ethernet, etc.) qui nécessitent un logiciel tiers afin d'assurer la communication entre le matériel et le programme ; la stabilité de la communication étant alors tributaire du logiciel tiers, ce qui renvoie aux problèmes de compatibilité et de stabilité dus aux logiciels et autres bibliothèques annexes.

4. PARADOXE

Revenons à l'article de Tristan Murail ;

« Cette aventure justifie pleinement le choix que nous avons fait d'une structure modulaire de notre équipement. Plutôt que d'acquérir une machine se voulant universelle (Syter, Synclavier, Fairlight, etc...) mais de ce fait même limitée, aisément identifiable et peu capable d'évolution, nous avons toujours préféré nous contenter d'équipements plus modestes, mais renouvelables, adaptables, modifiables, aisément domesticables. Chaque module est ainsi chargé d'une tâche précise, on multipliera les modules pour faire face à des besoins superposés. » [3]

En filigrane de cette réflexion, nous pouvons remarquer que pour Murail – et à travers les compositeurs de l'Itinéraire – les développements techniques des musiques populaires sont considérés comme une ascendance majeure des outils développés par la suite à l'IRCAM. Mais les logiciels « modulaires » actuels ne reproduisent-ils pas cette volonté d'universalité, avec des limitations somme toute assez semblables à celles induites par leurs prédécesseurs ? Cette volonté de contrôler l'intégralité des paramètres de la composition, et par extension, de se substituer aux outils spécifiques de diffusion n'entretient-elle pas le même mythe d'universalité que souligne Tristan Murail ?

Double paradoxe ; l'outil est pensé pour la musique savante, mais est issu d'un système industriel normalisé ; et ce même outil reprend une architecture modulaire, mais se réapproprie le désir d'universalité qui caractérisait les technologies précédentes !

¹Je pense entre autre à l'intégration des normes ASIO

5. EXEMPLE TENDANCIEUX...

Loin de moi l'idée de dénigrer les apports que proposent des logiciels tels que MAX/MSP ou Pure Data sur notre musique. Je ne veux soulever que la question de la pertinence de ces outils en vue d'une représentation scénique, voire de la reprise des œuvres, avec les questions de pérennité et de coûts que cela implique. Puisque cette communication se veut partisane, je proposerais juste un exemple, forcément exagéré, afin de soulever quelques problèmes qui peuvent apparaître.

Un compositeur doit écrire une pièce « standard » de huit minutes pour instrument soliste – par exemple, un violon – avec électronique en temps réel et diffusion quadraphonique. L'essentiel du patch consiste à reprendre le violon et à lui appliquer des delays avec réinjections afin de travailler la palette sonore ; du filtre en peigne à une répétition métronomique simple, avec une spatialisation des répétitions selon la quadraphonie. Afin d'assurer la pertinence du résultat, le compositeur ajoute une légère réverbération afin de compenser l'acoustique de la salle et une « clic track » pour que l'interprète puisse se caler exactement au tempo défini par les delays. Les changements de programmes sont assurés par le violoniste à l'aide d'une pédale MIDI selon un principe d'incrémentement et la quadraphonie est testée en home studio sur quatre petits haut-parleurs autoalimentés.

Le jour du concert, cette petite pièce de huit minutes se retrouve programmée avec d'autres œuvres ayant toutes leurs propres besoins techniques, ce qui implique de regrouper l'intégralité des patches sur une seule et même machine avec une seule interface audionumérique et une seule table de mixage reliée à l'interface audio et au système de diffusion. Quand est-il de la stabilité du patch face au changement de machine, parfois de système d'exploitation, de version du logiciel et surtout de carte son ?

Vient la captation du violon où se pose la question du micro ; capteur de variation fixé sur la table ou cardioïde placé à un mètre de l'instrument ; où se pose la question du mixage entre le son acoustique, le son amplifié, le son sonorisé et la question de l'efficacité du traitement par rapport au niveau de captation. Puis le déclenchement MIDI, avec une vitesse de réaction différente entre l'interface USB testée initialement en home studio et les 30 mètres de câbles avec module amplificateur nécessaires pour la salle de concert, ce qui pourrait impliquer des déclenchements intempestifs ou une absence d'information...

Enfin apparaissent des problèmes peut-être plus importants, consécutifs à la conception même du patch. En considérant une acoustique réelle, avec des volumes de salle très différents d'une écoute de proximité en studio, est-ce que le travail en quadraphonie sera pertinent ? La réverbération utilisée sera-t-elle assez

qualitative pour une production professionnelle ? Dans le cadre d'un travail sur des delays, les fréquences utilisées par les filtres en peigne tiennent-elles en compte des accords variables de l'instrumentiste (440, 442) et ne provoquent-elles pas des modulations supplémentaires du signal dues à l'acoustique de la salle ? De même, pour un travail rythmique, les delays utilisés imposent à l'instrumentiste un tempo fixe, quels que soient le volume et la réverbération de la salle, sachant que le violoniste doit gérer son interprétation grâce à une clictrack mono dans un environnement quadraphonique, où des slapbacks pourraient s'ajouter aux delays ! Ici, le travail de l'agogique et l'adaptation de l'interprétation aux caractéristiques acoustiques de la salle sont strictement impossibles.

Dernière remarque – déjà soulevée précédemment – aucune sécurité ou possibilité de récupération n'a été prévue en cas de problème d'incrémentement pour les changements de programme.

6. ... ET MAUVAISE FOI

6.1. Penser l'architecture

J'avoue que d'essayer coûte que coûte de comparer des logiciels tels que MAX/MSP et Reaktor sur ce type d'exemple tiendrait de la mauvaise foi. Dans le cas de MAX/MSP, les caractéristiques du logiciel lui donnent l'avantage sur l'expérimentation et le concept alors que Reaktor tend à être plus efficace et sécurisé. Cependant, je me permettrai de citer Jean-François Lyotard :

« Le compositeur d'aujourd'hui a le sentiment que tout est possible et qu'il doit inventer pour chaque oeuvre non pas seulement sa forme musicale, mais les règles de la musique. » [2]

Ceci s'applique aussi – malheureusement – à l'informatique musicale, avec comme conséquence une production obnubilée par l'expérimentation et la singularité de l'œuvre. Néanmoins, l'expérimentation comporte des risques qui ne sont probablement pas, ou plus, compatibles avec impératifs du concert et de la production musicale d'aujourd'hui.

Peut-être faudrait-il envisager une conception de l'œuvre plus ouverte, malgré l'absence de recul que nous avons dans nos pratiques électroacoustiques. Dans le cas d'une musique mixte, voire d'une œuvre interactive, ne serait-il pas plus efficace pour le compositeur d'imaginer une structure globale, une architecture où les traitements sonores ne seraient qu'esquissés. Cela permettrait d'améliorer la pérennité de l'œuvre et de bénéficier des avancées technologiques et des qualités professionnelles des ingénieurs du son qui s'occupent de nos musiques.

Si l'on reprend l'exemple ci-dessus – choisi à dessein selon mon approche partisane – seul le protocole de déclenchement par l'interprète est réellement nécessaire.

Tous les effets (filtres en peigne, delays, réverbération) pourraient être extérieurs et retravaillés selon le contexte du concert. Cela permettrait en outre de bénéficier des compétences d'un ingénieur du son et d'optimiser le résultat artistique, selon une vraie problématique de diffusion : filtrage des résonances et des spectres, compensation des slapbacks, qualité de la réverbération, etc. Même la click track est ici accessoire, puisque des systèmes de pédalier permettent aujourd'hui à l'interprète de définir lui-même son tempo, et ainsi d'adapter son interprétation et l'agogique à l'acoustique du lieu.

Cela n'affecte en rien les compétences du compositeur à concevoir sa musique, mais cela ajoute en efficacité et ramène la problématique à des questions de création, de production et de pérennité de l'œuvre. De même, cela renvoie à la réflexion de Tristan Murail où « chaque module est chargé d'une tâche précise » ; cette tâche pouvant alors être largement améliorée par le recours à des modules spécialisés. C'est d'ailleurs pour cette raison que j'ai cité précédemment les logiciels Live d'Ableton et les racks VST. Au même titre que le matériel hardware, ces solutions proposent une réelle modularité des effets audionumériques et une interactivité non négligeable pour nos musiques.

6.2. Question de la pérennité

Si la question de la pérennité des œuvres est récurrente dans nos réflexions sur la création contemporaine, elle est néanmoins beaucoup plus sensible qu'il n'y paraît de prime abord. La simple reprise d'une pièce d'une saison à l'autre implique un véritable travail de RE-crédation. Les changements de personnes, de matériels, de logiciels ou de versions de programme tendent à imposer une masse de travail qui doit être prise en considération par le compositeur.

« Les oeuvres faisant appel à un dispositif temps réel nécessitent en général un travail important (plus d'un homme-année pour Répons de Pierre Boulez) pour être « portées » sur des dispositifs ultérieurs, les technologies anciennes étant vite dépassées et inutilisables » [4]

Paradoxalement, si cela semble évident pour tous lorsque l'on parle d'opéras ou de pièces symphoniques, cela l'est beaucoup moins pour les musiques mixtes... Au-delà de la simple création, et via les éventuelles reprises, l'œuvre doit être pensée selon un principe d'adaptabilité ; adaptabilité selon le contexte, le lieu, le public, l'évènement, les moyens techniques à disposition, les ressources humaines.

Il s'agit donc pour le compositeur – et pour les structures de diffusion – d'assurer la pérennité de l'œuvre en facilitant l'approche technique, mais aussi en limitant les questions économiques (temps, matériel, ressources humaines). De même, cela implique de faciliter la connaissance de l'œuvre, sa « prise en

main », afin que chacun puisse trouver des solutions de mise en œuvre efficaces à moyen, voire à long terme. A priori, un compositeur qui développe aujourd'hui une pièce pour échantillonneur et effets retrouvera des outils similaires dans trente ans... Si le même compositeur développe un patch entièrement autonome, la reprise de l'œuvre sera probablement impossible ; imaginez une pièce qui ne soit interprétable qu'avec le système SYTER, sur Atari ST ou Commodore 64... Imaginez que la partie électronique de *Répons* de Pierre Boulez n'ait jamais été reprogrammée depuis sa création en 1981 sur la 4X...

6.3. Question des enjeux

Autre point – peut-être plus accessoire, mais qui mérite d'être soulevé – le fait d'envisager les traitements électroacoustiques et l'interactivité entre l'interprète et la machine de manière plus architecturale faciliterait dans bien des cas la compréhension des enjeux de la pièce. Cela laisserait une possibilité de communiquer sur une approche compositionnelle. Cela peut sembler négligeable, mais c'est révélateur de l'implication du compositeur vers le technologique. A propos de *Répons*, dans une note de programme de 1984 du festival d'Automne², Andrew Gerzo explique :

« D'un point de vue technique, l'exécution de Répons exige un équipement garantissant trois séries d'opérations : la transformation, la distribution, le captage et l'amplification. (...) Répons fait principalement appel aux transformations suivantes : retards, déplacements de fréquence, modulation en anneau et filtre en peigne, utilisées selon diverses combinaisons sur toute la partition électronique de l'œuvre. » [1]

Ici, Andrew Gerzo n'impose pas de résultat sonore ; il décrit des opérations, des gestes compositionnels, des procédés de transformations qui peuvent être adaptés selon le contexte et les technologies à disposition (ils l'ont d'ailleurs été de nombreuses fois depuis la création de la pièce en 1981)... En décrivant des opérations, il expose les enjeux techniques, mais il permet aussi de développer un discours abordable pour le public ; une pièce qui s'appelle *Répons* se développe sur des retards transformés et multidiffusés.

7. LEGITIMITE DES OUTILS

Il est bien évident que ces quelques réflexions ne peuvent être pertinentes que dans le cas des musiques interactives. Tous les éléments électroacoustiques fixes, que ce soit les musiques acousmatiques ou les pièces

² « Création » de la troisième version de l'œuvre au Centre Georges Pompidou, le 13 octobre 1984, par l'Ensemble Intercontemporain dirigé par Pierre Boulez.

mixtes avec support audio, doivent être assumés entièrement par le compositeur, car ils définissent l'orchestration de la pièce. A mon sens, pour la composition de supports fixes, le compositeur se doit d'être totalement autonome, afin de connaître les potentialités des outils et ainsi d'envisager une réelle virtuosité de l'écriture électroacoustique. J'irais même jusqu'à affirmer que l'absence de fiabilité des outils n'est pas problématique en soit, puisque par définition, le support sera finalement fixé. Dans les quelques exemples cités précédemment, seuls des effets aisément identifiables et prévisibles peuvent se substituer à une programmation *in situ* dans le patch, sans que cela n'affecte la pertinence de la pièce. Je reprendrais ici une analogie avec les musiques instrumentales ; une pièce est généralement écrite pour un interprète, mais sa reprise par un autre instrumentiste ne modifie en rien son intelligence, malgré les changements de timbres et d'interprétation.

En définitive, la problématique initiale resurgit ; dans le cas des musiques interactives, les outils pensés pour la création diffèrent de ceux utilisés pour la diffusion, ce qui devrait affecter les processus de composition, avec une prise en compte des enjeux, du rôle de l'assistant musical, et finalement, poser la question de la légitimité des outils utilisés...

8. REFERENCES

- [1] Gerzo A. « Note de programme du festival d'Automne 1984 », *Création* de la troisième version de l'œuvre au Centre Georges Pompidou, le 13 octobre 1984, par l'Ensemble Intercontemporain dirigé par Pierre Boulez.
- [2] Lyotard J.-F. « Musique et postmodernité » *Surfaces Vol. VI. 203*, Montréal, novembre 1996
- [3] Murail T. « Ecrire avec le Live-electronic », Vingt-cinq ans de création musicale contemporaine : l'Itinéraire en temps réel, L'itinéraire/L'Harmattan, Paris, 1998 (2^{ème} édition).
- [4] Risset J.-C. *Evolution des outils numériques de création sonore*, Champs culturels n°18, disponible via : <http://enfa.mip.educagri.fr/agriculture/Ressources/articles/cc18/risset.pdf>
- [3] Chouvel J.-M. et Solomos M. *L'espace : Musique / Philosophie*, textes réunis et présentés par Jean-Marc Chouvel et Makis Solomos, L'Harmattan, Paris, 1998
- [4] Garant D. *Tristan Murail : une expression musicale modélisée*, L'Harmattan, Paris, 2001
- [5] Humbert-Claude E. *La Transcription dans Boulez et Murail, de l'oreille à l'éveil*, L'Harmattan, Paris, 1999
- [6] Risset J.-C. « Musique et Informatique », *La musique en projet*, Paris, Gallimard/IRCAM, Paris, 1975

9. BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

- [1] Barriere J.-B. « Le sensible et le connaissable » *Les Dossiers de l'IRCAM n°1, Composition et environnements informatiques*, Editions IRCAM/Centre Georges Pompidou, Paris, automne 1992
- [2] Bennett G. *Musique, langage et science*, collection cahiers Renaud-Barrault, Gallimard IRCAM, Paris, 1975

VERS UNE APPROCHE PHYSIOLOGIQUE DE L'INTERFACE CORPORELLE POUR LES ARTS INTERACTIFS.

Jean-François Baud

CICM-Centre de recherche Informatique et
Création Musicale
Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord
Université de Paris8
cicm@univ-paris8.fr

Anne Sèdes

CICM-Centre de recherche Informatique et
Création Musicale
Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord
Université de Paris8
cicm@univ-paris8.fr

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous décrivons une approche heuristique de l'interfaçage du corps humain avec un environnement interactif temps réel, utilisable sur le terrain de la création artistique. Cette approche s'appuie dans un premier temps sur des développements technologiques accessibles et sur du test en situation de production artistique. Elle est un premier pas au sein d'une démarche interdisciplinaire visant à aborder la question des informations/signaux physiologiques utilisables pour interfacier la corporéité humaine avec un dispositif *live* électronique. Notre conclusion porte sur des questions de validation artistique, scientifique, technologique et interdisciplinaire.

1. INTRODUCTION

Ce texte est en quelque sorte un rapport d'expérience, au service d'une démarche artistique en interaction avec les sciences et les technologies.

Cette approche heuristique de l'interfaçage du corps humain avec un environnement interactif temps réel, vise essentiellement la création artistique. Cette approche s'appuie de façon pragmatique sur des développements technologiques accessibles et sur du test en situation de production artistique. Elle est un premier pas dans une démarche pluridisciplinaire visant à approcher le potentiel des informations et signaux physiologiques utilisables pour interfacier la corporéité humaine avec un dispositif *live* électronique. L'ensemble de l'expérience relatée s'appuie sur un partenariat au sein de la plateforme ANR "Virage", au sein duquel les pratiques métiers sont étudiées à l'occasion de plateaux d'expérimentation artistique¹.

Après avoir relaté le cheminement expérimental et heuristique, on s'intéressera aux possibilités technologiques et méthodologiques de l'exploitation de signaux physiologiques significatifs sur le terrain de la création artistique.

On insistera sur l'originalité de la démarche. Celle-ci prend place dans un cadre de formation et de recherche

en sciences humaines, sciences de l'art, spécialité musique, alliant la création artistique, les sciences et les technologies². Elle se développe dans la pratique de la création artistique en interaction avec le développement de ses moyens technologiques et dans la réflexion poétique sur cette pratique. Le résultat produit est validé s'il est intégré au sein de la démarche artistique, autrement dit s'il est artistiquement consistant.

Le développement de maquettes d'interfaces visant à capter les signaux corporels afin de les traiter comme des contrôleurs dans un environnement interactif en temps réel en création chorégraphique, nous a amenés à nous rapprocher des travaux d'une équipe spécialisée en physiologie du sport d'une part, et d'une compagnie chorégraphique d'autre part.

L'article ci-dessous présente les prototypes de captation, les tests sur un plateau d'expérimentation en amont d'une production chorégraphique circassienne, et le potentiel des informations physiologiques pour interfacier la corporéité, que nous abordons dans la pluridisciplinarité. Il conclut sur des questions de validation des divers aspects des projets alliant arts, sciences et technologies.

2. UN PREMIER PROTOTYPE DE CAPTATION

2.1. Pulsation cardiaque

De nombreuses installations artistiques tentent de tirer parti de la captation de la pulsation cardiaque, en s'appuyant sur du matériel développé en milieu médical, souvent cher et peu fonctionnel, notamment du fait de l'utilisation d'électrodes à usage unique, ou encore de la présence de parasites lors des mouvements de la personne équipée.

Au sein de l'équipe du CICM à la MSH Paris Nord³, nous avons participé en 2002-2003 au développement d'une solution prototypique alternative et pragmatique,

¹ <http://www.virage-plateforme.org/>

² Licence, Master et Doctorat au département de musique de l'université de Paris 8, Ecole Doctorale "esthétique, sciences et technologies des arts." <http://artweb.univ-paris8.fr> et www.edesta.fr,

³ <http://cicm.mshparisnord.org>

pour l'installation Plexus, collaboration entre Benoît Courribet et le plasticien Thierry Guibert, basée sur l'implémentation d'un microphone miniature dans un stéthoscope⁴.

Cette expérimentation nous a intimé la suite de notre recherche et développement d'interface pour des environnements temps réel en milieu artistique.

Nous nous sommes alors rapprochés de l'entreprise InterfaceZ⁵, spécialisée dans le développement de modules capteurs et interfaces midi pour la sphère artistique. En effet, cette entreprise ne présentait dans son catalogue aucune offre de capteur de pulsation cardiaque alors même qu'un tel capteur faisait l'objet d'une demande assez importante de la clientèle de spécialistes des arts interactifs.

En 2008, la création d'une première maquette de ceinture captant la pulsation cardiaque a consisté à créer une interface cardiofréquence-mètre qui soit plus fonctionnelle, ergonomique et abordable que les prototypes utilisés jusqu'alors dans le domaine artistique. Pour cela, nous avons détourné un matériel du commerce accessible au rayon de sport des supermarchés, déjà pensé et conçu pour une utilisation optimale en présence de mouvements: les cardiofréquence-mètres autonomes utilisés par les sportifs cyclistes et coureurs. Nous avons ensuite récupéré le signal émis par ce type de ceinture pour le traduire en données utilisables dans Max/Msp, via le protocole MIDI.

2.2. Capteur respiratoire

Une deuxième maquette a consisté à combiner cette ceinture cardiofréquence-mètre avec d'autres capteurs, dans le but d'obtenir un ensemble d'informations corporelles physiologiques intéressantes à exploiter artistiquement, tout en gardant une interface fonctionnelle et ergonomique. Le premier capteur choisi fut celui de la température corporelle, déjà disponible chez Interface Z et adaptable facilement à la ceinture.

Le second capteur, le capteur "respiratoire", a été choisi pour l'intérêt indéniable, du point de vue artistique et physiologique, des informations qu'il pourrait fournir. Entre autres, la respiration, peut être dans une certaine mesure, et selon le contexte, contrôlée par le sujet. Techniquement il fut réalisé en implémentant un capteur d'étirement (présenté comme un "fil élastique") et en l'adaptant à la ceinture cardiofréquence-mètre; celle-ci étant placée sur le thorax, le capteur d'étirement était en mesure de capter les différences de taille de la cage thoracique, signifiante de la respiration.

Notons que ce type de procédé est déjà bien connu dans les applications artistiques expérimentales.

Déjà en 2001, Teresa Marrin Nakra présentait une ceinture captant la respiration au sein d'un dispositif pour la captation des mouvements d'un chef d'orchestre [4].

⁴ http://www.thierryguibert.fr/?page_id=102

⁵ <http://www.interface-z.com>

Plus près de nous, en 2008, une équipe belge a développé un contrôleur respiratoire pour l'opéra [2].

Précisons bien que notre objectif n'est pas de proposer une énième interface instrumentale innovante, mais plutôt de construire et consolider un environnement interactif de type modulaire qui permette de tirer au mieux parti des informations corporelles exploitables dans le temps réel du plateau artistique interactif; et de tirer au mieux parti de la dynamique corporelle, de la corporéité.

A la suite de cette maquette, quant à la captation de la respiration, on a observé certains dysfonctionnements et imprécisions du capteur d'étirement; en effet ce dernier réagit très rapidement à l'élongation mais plus lentement au relâchement: sa réactivité n'est pas symétrique. Cette courbe de valeur était donc difficilement exploitable ou, tout du moins, d'un caractère peu précis et versatile.

De plus, il nous est apparu intéressant de disposer d'un capteur de respiration mobile sur le tronc, autrement dit permettant de capter la respiration ventrale autant que thoracique. La décision fut alors prise de développer un second prototype dans le but unique de capter la respiration de manière plus fine et précise.

3. TEST SUR UN PLATEAU D'EXPERIMENTATION CHOREGRAPHIQUE CIRCASSIENNE

Dans le cadre du projet Virage et en partenariat avec l'Institut des Sciences et Techniques de la Seine à Avignon⁶, nous avons entamé une collaboration avec Ki productions, la compagnie de la chorégraphe Kitsou Dubois.

3.1. Contexte expérimental

Le travail de Kitsou Dubois porte sur la corporéité, le mouvement, l'apesanteur.

Son prochain spectacle se nomme "incarnation / corporification". Ce spectacle requiert des danseurs issus du cirque, de par leur maîtrise du corps dans des conditions extrêmes. L'objectif des "labos de recherche" qu'elle organise au fil de ses productions consiste à mettre en place des plateaux dédiés à l'appropriation de technologies numériques au fil de l'écriture et de la mise en place d'un spectacle. Ce labo est le troisième en collaboration avec le CICM dans le cadre du projet Virage. Le premier avait donné lieu à une enquête d'usage sur l'appropriation des techniques de captation cynétique du corps (capteurs de flexions utilisés par la compagnie, organisation technologique du plateau, examen des relations de correspondance avec des contenus musicaux). Le deuxième concernait l'appropriation par des danseurs circassiens d'une plaque de pression sfr, en relation avec l'écriture du projet et son traitement sonore. Le dernier portait sur l'appropriation et l'opportunité d'utiliser la ceinture respiratoire, et en second lieu les battements cardiaques pour une mise en

⁶ <http://www.ists-avignon.com/>

correspondance avec des paramètres variables sensibles de propositions sonores interactives audionumériques sur Max/MSP. Il s'est tenu en janvier 2009 dans le cadre d'un "labo" à La Brèche de Cherbourg s'inscrivant dans la dynamique d'écriture d'un spectacle chorégraphique interactif dirigé par Kitsou Dubois⁷.

3.2. Aspects matériels, nature et traitement des données, *mapping*

Là encore la solution fut le détournement de matériel déjà pensé et conçu pour la captation précise de la respiration. Le matériel médical comprenait déjà une telle interface corporelle, basée également sur la captation des différences de taille de la cage thoracique. Pour cela, le capteur utilisé est un capteur de pression à jauge de contrainte. Il est développé par l'entreprise Biopac. A la différence de notre capteur d'étirement, il s'est révélé beaucoup plus précis et linéaire. Il nous a alors suffi de récupérer le signal de cette "ceinture respiratoire" et de le traduire suivant le protocole MIDI en mode 11 bits, soit une résolution de 2048 pas. Il nous a ensuite semblé indispensable de l'utiliser en mode sans-fil, pour cela nous avons utilisé l'émetteur-récepteur "module 16 capteurs sans fil Mini-HF" développé par Interface Z⁸.

Le traitement des données de cette interface est relativement aisé à mettre en place, la courbe de valeurs n'étant pas parasitée. Le logiciel choisi pour le traitement de cette courbe et sa mise en relation avec un moteur sonore a été fait dans Max/Msp, étant donné le caractère modulaire et complet de ce logiciel autant dans le traitement de données de contrôles, dans le traitement de signal, ainsi que sa place toujours plus importante sur le terrain des arts interactifs et du spectacle vivant.

Le moteur sonore comportait un simple oscillateur en dents de scie à basse fréquence, pouvant varier entre 0.05 Hertz et 25 Hertz, éventuellement filtré par un résonateur et envoyé vers un spatialisateur ambipan~ à quatre canaux de sortie⁹. Les coordonnées polaires du spatialisateur, la fréquence de l'oscillateur et celle du filtre étaient mises en correspondance avec la valeur issue de la ceinture, via une fonction de transfert ajustable pour chacune des variables. L'objectif visait à produire un rendu sonore sensible et cohérent en fonction des mouvements respiratoires et corporels du porteur de la ceinture.

3.3. Test avec une trapéziste sous la direction chorégraphique de Kitsou Dubois

Les deux derniers prototypes de capteurs étant opérationnels, leur utilisation en situation réelle de production artistique a pu se faire correctement.

Les contraintes du test étaient les suivantes :

- pouvoir inscrire le test dans un temps de production normal : lors d'un échauffement ou d'une séance d'écriture chorégraphique faisant intervenir un interprète, une chorégraphe, un régisseur et un compositeur et sans qu'un temps particulier soit dédié aux aspects techniques de la manipulation, (branchement, reconnaissance et qualibrage des capteurs, mapping, etc...)

- pouvoir inscrire le test dans le contexte poétique développé par la compagnie.

- pouvoir valider l'adoption du dispositif dans la création chorégraphique prévue par la compagnie.

Ces trois contraintes ont été respectées.

Lors de cette session de test, une trapéziste fut équipée de deux prototypes.

Elle interpréta plusieurs chorégraphies comprenant des mouvements exécutés sur deux agrès spéciaux, conçus pour le spectacle à venir: 0,4une barre de plus de deux mètres attachée à un seul endroit excentré (a à peu près 80 cm d'un bout) et suspendue à la structure plafond, et un ensemble d'élastiques permettant d'être tenu à une main, attachés, là encore, à la structure plafond.

Ces deux agrès permirent de tester le capteur de respiration dans la dynamique du travail corporel (différence de taille de la cage thoracique) à travers une très large palette de mouvements et d'intensités (intéressante pour le capteur cardio également).



Figure 1: ceinture respiratoire en position ventrale

⁷ <http://www.labreche.fr/residents/incarnation.html>

⁸ "Module 16 capteurs sans fil Mini-HF" : <http://www.interface-z.com/produits/cap14-minihf-433.htm>

⁹ Ambipan~ est téléchargeable sur le site du CICM <http://ciem.mshparisnord.org>

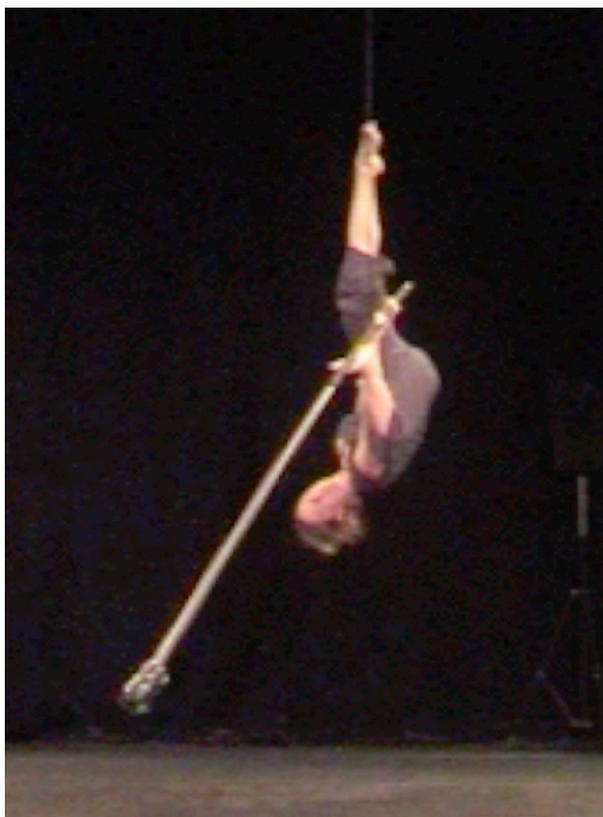


Figure 2: travail chorégraphique sur le premier agrès.



Figure 3: travail chorégraphique sur le deuxième agrès.

La courbe de valeur de respiration, ou différence de taille de la cage thoracique, et le capteur de pulsation cardiaque furent mis en relation via une fonction de transfert ajustable avec le moteur sonore, dans un but didactique pour la trapéziste, et dans le but de souligner l'interactivité sensible, pour au fond favoriser l'interdépendance entre la production chorégraphique et la production sonore, autrement dit, la cohérence entre l'interaction chorégraphique et sonore, en vue de produire une consistance dans la dynamique de l'écriture du spectacle.

3.4. Résultats artistiques

Les résultats furent concluants sur les aspects suivants:

La ceinture respiratoire (placée en position ventrale) permit une certaine retranscription, ou plutôt une émulation sonore –et musicale– de la dynamique chorégraphique que Kitsou Dubois semblait trouver intéressante car suggérant un lien avec la dynamique corporelle tout en n'étant pas en lien trop visible et direct avec celle-ci, évitant tout rapport causal gratuit. Cette particularité, portée par la cohérence de la construction sonore et de sa variabilité contrôlée par l'action de trapeziste, est peut-être due également à la double captation qu'opérait la ceinture: la captation de la respiration et la captation des différences de taille de la ceinture abdominale lors des contractions induites par les mouvements. Nous pressentions cette éventualité mais n'étions pas sûrs du rendu, c'est pourquoi ce test en conditions réelles de production artistique fut de ce point de vue très intéressant.

La ceinture cardiofréquence-mètre fut également utilisée avec un module sonore minimal produisant une pulsation sonore. Cette utilisation anecdotique fut jugée intéressante artistiquement par la portée symbolique forte de la pulsation cardiaque créant alors une atmosphère intime entre la danseuse et le public, basée sans doute sur la signification presque « cinématographique » de l'amplification d'un rythme cardiaque associé à une situation de tension (l'effort, l'humain en tension). Cette proposition n'avait cependant pas été prévue dans le test.

Quant à l'intérêt de ces interfaces corporelles et compte tenu de toutes les observations évoquées précédemment, cette journée de test en conditions réelles de production artistique fut un succès pour tout le monde.

4. LE POTENTIEL DES INFORMATIONS PHYSIOLOGIQUES POUR INTERFACER LA CORPOREITE

4.1. Une approche de l'enaction

On l'a dit, le travail de Kitsou Dubois s'appuie sur la corporéité dans un milieu donné (micro pesanteur, milieu aérien, milieu aquatique).

La corporéité (*embodiement*) nous renvoie aux travaux de Francisco Varela s'appuyant sur l'héritage de Maurice Merleau-Ponty¹⁰. En arts interactifs et notamment en musique et technologies, certains se sont inspirés de la pensée de F. Varela; on pense par exemple à Marc Leman et à ses travaux sur *l'embodiement* et les technologies de la médiation [3] ou encore au projet européen *enactive interfaces*¹¹.

Rappelons l'approche de l'enaction de Francisco Varela:

"Le point de référence nécessaire pour comprendre la perception n'est plus un monde prédonné, indépendant du sujet de la perception, mais la structure sensori-motrice du sujet (la manière dont le système nerveux relie les surfaces sensorielles et motrices). C'est cette structure, la façon dont le sujet percevant est inscrit dans un corps, plutôt qu'un monde préétabli, qui détermine comment le sujet peut agir et être modulé par les événements de l'environnement" [8].

Varela cite d'ailleurs Merleau Ponty : "Mais c'est lui [l'humain, le sujet], selon la nature propre de ses récepteurs, selon les seuils de ses centres nerveux, selon les mouvements des organes, qui choisit dans le monde physique, les stimuli auxquels il sera sensible" [5].

On soulignera donc l'importance majeure du système nerveux dans ses diverses fonctions pour construire la corporéité. On pourrait d'ailleurs relier ces travaux à l'approche d'Alain Berthoz et de son hypothèse du corps virtuel, schéma corporel que nous construisons et qui nous donne accès à l'empathie [1].

D'une certaine façon le système nerveux dans sa fonction sensori-motrice est au centre du processus d'enaction, tel que décrit par Varela. Notre intérêt pour l'enaction nous engage donc sur le terrain de la physiologie. L'étude de la physiologie en relation avec la perception paraît en effet ouvrir de nouvelles perspectives.

4.2. Approche pluri-disciplinaire

Afin d'approfondir ces questions sur le terrain scientifique, nous nous sommes tournés vers l'équipe de chercheurs de la plate-forme de recherche en Sciences et Techniques des activités Sportive (Staps) de l' UFR 'Santé, Médecine, Biologie Humaine' de l'université de Paris 13, laboratoire 'Réponses cellulaires et fonctionnelles à l'hypoxie'. Cette équipe, animée par Aurilien Pichon, pratique la physiologie appliquée aux études sportives.

A. Pichon, étudie la variabilité cardiaque et son interprétation à travers le prisme de la physiologie et de

¹⁰ C'est à Varela que l'on doit la conception de l'enaction, impliquant une remise en question du paradigme de la représentation au bénéfice d'une approche dynamique de la perception, de la cognition et de l'action (Enaction = cognition dans l'action).

¹¹ <https://www.enactivenetwork.org/>

la psychologie. En effet, certains états physiologiques, déduits de l'étude de la variabilité cardiaque, sont en lien direct avec l'état psychologique du sujet, en particulier le fonctionnement sympathique et parasympathique du système nerveux autonome [6] [7].

Dans les limites de cet article, nous proposons une approche sommaire du système nerveux autonome ou végétatif. Le système nerveux autonome ou végétatif est un système qui permet de réguler différentes fonctions automatiques de l'organisme (digestion, respiration, circulation artérielle et veineuse, pression artérielle). Les centres régulateurs du système nerveux végétatif sont situés dans la moelle épinière, le cerveau et le tronc cérébral (zone localisée entre le cerveau et la moelle épinière).

Le système nerveux autonome est composé par le système nerveux parasympathique (ralentissement général des organes, stimulation du système digestif), le système nerveux sympathique, ou orthosympathique, correspondant à la mise en état d'alerte de l'organisme et à la préparation à l'activité physique et intellectuelle. Il est associé à l'activité de deux neurotransmetteurs : la noradrénaline et l'adrénaline (dilatation des bronches, accélération de l'activité cardiaque et respiratoire, dilatation des pupilles).

Le matériel de captation utilisé pour l'étude de cette variabilité cardiaque est schématiquement composé d'un ECG (électrocardiographe) pour mesurer l'activité cardiaque et/ou, d'un dispositif d'enregistrement de captation de la pression artérielle; mais également d'une plate forme logicielle permettant de filtrer, d'enregistrer puis de traiter ces informations grâce à des outils statistiques mesurant la variabilité des signaux dans le domaine temporel et fréquentiel, permettant l'interprétation.

Les outils statistiques utilisés sont la détermination, les minimum, maximum, étendue, moyenne; l'écart type; la variance; le coefficient de variation; la transformée de Fourier Rapide etc.

Les objectifs majeurs de ce laboratoire, et plus largement de cette partie de la recherche en STAPS, sont la détection et l'étude du lien entre les systèmes sympathique-parasympathique et l'état physiologique, psychologique de l'athlète. Mettre en évidence ce lien pourrait permettre une optimisation de l'entraînement et de sa planification ainsi que la prévention de phénomène tel que le surentraînement.

Ces objectifs scientifiques induisent un développement technologique dans le sens de l'optimisation de leurs dispositifs de captations vers une moindre présence de parasites, un matériel plus fonctionnel et une meilleure ergonomie. Cela permettant évidemment des mesures plus précises et effectuées sur une durée plus longue. Un développement logiciel semble être également indispensable, pour l'automatisation des enregistrements et des interprétations statistiques, ce qui paraît être difficile à mettre en oeuvre actuellement.

Dans le cadre d'une collaboration pluridisciplinaire, nous allons développer une librairie d'objets permettant une autonomisation et un enregistrement des résultats des analyses statistiques. Nous allons également poursuivre le développement de prototypes de capteurs utilisables par l'équipe de Pichon, tout en tirant partie de l'expertise de celle-ci en analyse de la variabilité cardiaque, relation avec la physiologie et la psychologie expérimentale.

4.3. Les objectifs technologiques en sciences de l'art

Dans une démarche artistique, le développement d'outils de captations et d'interprétation de la variabilité cardiaque pourrait être intéressant dans la perspective nouvelle qu'ils proposent, en relation avec des états physiologiques tels que l'activation du système sympathique ou parasympathique. États non contrôlables directement et pouvant être en lien avec la psychologie ou du moins la façon dont l'artiste sujet de la captation habite son corps lors d'une production. L'échelle temporelle calquée sur une dynamique physiologique serait alors de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes à plusieurs minutes.

Pour atteindre des échelles temporelles d'une granularité plus fine, parmi les outils d'analyse mathématique disponibles et exploitables en temps réel, on trouve le RMSSD s'appuyant sur le Poincaré plot RMSSD (root mean square successive differences)¹². Il correspond à la racine carrée de la moyenne des sommes des carrés de la différence entre deux intervalles successifs (intervalles temporelles entre les pics de deux pulsations). On obtient un indice qui illustre la variabilité instantanée considérée comme un reflet de la composante parasympathique.

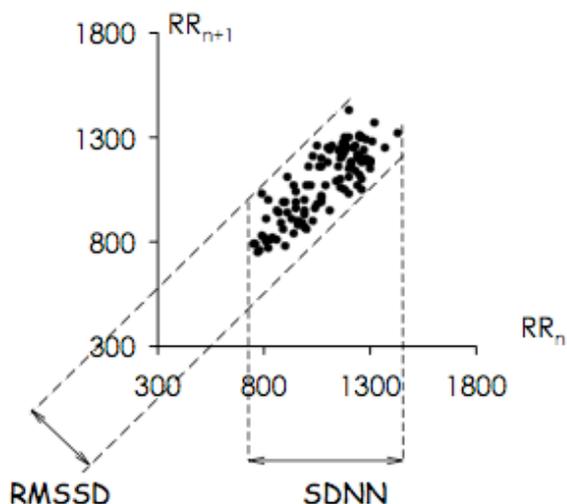


Figure 3: Illustration de la RMSSD à travers un Diagramme de Poincaré (chaque point à pour coordonnées l'intervalle temporel entre deux pulsations (RR)_n en abscisse et l'intervalle RR

¹² http://www.all-acronyms.com/RMSSD/root_mean_square_successive_differences/952388

suivant soit $n+1$). Ce diagramme nous donne une représentation visuelle de la variabilité, l'indice SDNN correspond d'ailleurs à la déviation standard. Le nuage de point représente un enregistrement de 5min.

En temps réel, la situation générale des arts de la scène, un tel calcul semble plus exploitable qu'une analyse statistique complexe basée sur la FFT, méthode actuellement utilisée en général dans les études physiologiques appliquées à l'étude de la variabilité cardiaque et en particulier par Pichon. C'est donc dans cette voie que nous comptons approfondir nos recherches.

5. CONCLUSION

Dans la suite de notre recherche, nous allons développer sous Max/Msp, une librairie d'analyse temps réel de la variabilité cardiaque, ainsi que des tests en condition avec des danseurs en vue d'un prochain "labo" avec la compagnie de Kitsou Dubois. Il convient encore d'approfondir l'étude des signaux corporels porteurs de mouvement, de dynamique de variabilité, au potentiel artistique peut-être plus subtil que celui des interfaces basée sur la catégorie du geste.

Un prototype de capteur ECG à double électrodes, fonctionnel et à cout réduit est par ailleurs à l'étude.

Dans cet article, nous avons fait l'éloge d'une approche heuristique qui s'appuie sur la pratique et l'examen des savoirs-faire en création artistique et qui trouve sa dynamique dans les interactions interdisciplinaires entre arts, sciences et technologies, en vue de produire des consistances artistiques autant que des contributions scientifiques ou technologiques nouvelles.

Dans ce genre de démarche, difficilement classable, la question de l'évaluation évidemment se pose. La réponse est complexe mais ne doit pas être évacuée.

On a montré plus haut comment nos propositions étaient validables, par l'appropriation par les praticiens dans le contexte d'un plateau expérimental, dans les temps d'une production, et en cohérence avec une poétique.

Il est académiquement assez simple d'évaluer l'apport d'une démarche en sciences et/ou en technologie. Les protocoles y paraissent stables.

Évaluer une démarche artistique expérimentale avec des méthodes héritées de la culture de l'évaluation issue des domaines scientifiques et technologiques serait inadaptée.

Évaluer séparément un rendu artistique, sa consistance, en fonction d'un contexte, et d'un état de l'art, en s'appuyant sur une approche qualitative est difficile, mais loin d'être inaccessible. Cela pourrait constituer une perspective de travail.

C'est selon- nous dans la manière dont des domaines tels qu'arts, sciences et technologies interagissent ensemble pour produire de la connaissance, de la compréhension, des ré-interprétations, des constructions nouvelles, de la transdisciplinarité, que l'on peut estimer l'intérêt du type de démarches que nous entreprenons. Le cadre académique qui nous entoure (esthétique, sciences et technologies des arts) nous invite à développer ces dynamiques de recherche, en tant que méthodes de créativité.

L'ensemble de cette démarche heuristique nous permet ainsi de cheminer dans le réseau des relations fructueuses entre arts, sciences et technologies, dans un contexte interdisciplinaire. La marche pour chemin, écrivait Varela ,Hai que caminar...

6. REFERENCES

- [1] Alain Berthoz : *La décision*, Odile Jacob, 2003, Paris.
- [2] Jean-Julien Filatriau, Thomas Dubuisson, Loïc Reboursière, Todor Todoroff : *Breathing for Opera 2QPSR of the numediart research program*, Vol. 1, No. 2, June 2008.
- [3] Marc Leman, *Embodied music cognition and mediation technologies*, MIT Press, Cambridge MA, 2008.
- [4] Teresa Marrin Nakra : *synthesizing expressive musi through the language of Conducting*, Journal of new music research, Vol 31, N°1, pp 11-26, 2002.
- [5] Merleau Ponty : *La structure du comportement*. PUF, 8ème édition 1977, Paris.
- [6] Aurélien Pichon / Chapelot Didier / Nuissier Frédéric: "*Heart rate variability is an indicator of changes in psychological states aver a year in university students*", psychophysiology, 2008.
- [7] Aurélien Pichon / Claire de Bisschop/ Véronique Diaz/ André Denjean : "*Parasympathetic airway response and heart rate variability before and at the end of methacholine challenge*", Chest ,2005.
- [8] Francisco Varela, Evan Thompson, Eleanor Rosch. *L'inscription corporelle de l'esprit*, sciences cognitives et expérience humaine, p 235 Seuil , Paris, 1993.

AMÉLIORATION DES MÉTHODES D'ESTIMATION D'ACCORDS ET DE TONALITÉ DEPUIS UNE REPRÉSENTATION MUSICALE SYMBOLIQUE

Thomas Rocher
LaBRI
rocher@labri.fr

Matthias Robine
LaBRI
robine@labri.fr

Pierre Hanna
LaBRI
hanna@labri.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente de nouvelles méthodes d'estimation des accords et de la tonalité d'un morceau de musique représenté de manière symbolique. Elles reposent sur la comparaison d'un profil caractérisant la fréquence d'apparition des notes sur une période donnée avec un profil de référence. Les profils utilisés sont ici obtenus à partir d'informations tonales moins bruitées que les notes de musique. Pour construire le profil destiné à l'estimation de la tonalité, la suite des accords est utilisée. Pour le profil destiné à l'obtention des accords, les notes utilisées sont non seulement pondérées selon leur durée, mais également selon leur contribution à l'harmonie. Le nombre de notes jouées simultanément sera ainsi utilisé. Pour chacune des méthodes, une description ainsi qu'une évaluation seront présentées. Nous montrons ainsi que l'efficacité des méthodes proposées est supérieure aux méthodes existantes qui reposent sur la comparaison entre un profil d'observation et des profils de référence.

1. INTRODUCTION

L'estimation automatique d'accords et de tonalité est une problématique importante, notamment en musique occidentale où les paramètres issus de l'harmonie jouent un rôle prépondérant. Ainsi, les différentes modulations d'une pièce de musique et la suite des accords la composant sont des paramètres musicaux essentiels. Les applications de l'analyse de ces paramètres sont multiples, et s'étendent de la génération d'accompagnement automatique à l'assistance à la composition.

Nous choisissons ici de nous pencher sur les méthodes d'estimation de la tonalité d'un morceau de musique, ainsi qu'à l'analyse des accords. Nous commençons par présenter les méthodes existantes dans la section 2, avant d'exposer de nouvelles méthodes dans la section 3. Pour l'estimation de la tonalité comme pour celle des accords, une évaluation de l'efficacité est proposée, et nous comparons les résultats de nos méthodes avec ceux des méthodes existantes.

Enfin, nous présentons les perspectives ouvertes par ces travaux dans la section 4.

2. MÉTHODES EXISTANTES

Dans cette section, nous présentons les méthodes existantes d'estimation de tonalité, puis d'estimation d'accords.

2.1. Tonalité

Les travaux de Chew reposent sur un modèle de l'harmonie dans lequel les notes de musique s'enroulent le long d'une spirale en trois dimensions, et dans le même ordre que dans le cercle des quintes. Dans ce modèle, la tonalité du morceau est estimée par calcul du barycentre des notes de la pièce [2]. D'autres travaux dans l'analyse de la tonalité d'un morceau de musique utilisent un vecteur caractérisant la fréquence d'apparition des notes dans la pièce étudiée. Pour le signal audio, ces vecteurs sont généralement des chromas, qui représentent l'intensité des fréquences correspondant aux 12 demis tons ramenés sur une octave [15, 5]. Dans les études se focalisant sur la représentation symbolique de la musique, ce sont des profils de tonalités (ou *pitch profiles*) qui sont utilisés [19]. Dans ces méthodes, le vecteur utilisé est comparé à des profils de référence qui représentent l'importance de chaque note dans une tonalité donnée. Cette importance peut être considérée comme une consonance [10] ou comme une probabilité d'apparition caractéristique [20] de chaque note dans une tonalité donnée.

2.1.1. Profils vectoriels

Un des premiers algorithmes d'estimation de tonalité fut utilisé en 1990 par Krumhansl et Schmuckler [9], à la suite d'expériences psychoacoustiques [10]. Deux profils de référence (l'un majeur et l'autre mineur) ont été construits en faisant écouter à des musiciens une gamme majeure ou mineure, suivie d'une note quelconque. Il a alors été possible d'évaluer la consonance de cette dernière note selon l'harmonie de la gamme. Pour les deux modes, il a été

donc possible de créer un profil de tonalité : chacun des 12 demis tons s'est vu associer une valeur représentant la consonance par rapport au mode. Une fois le profil majeur (resp. mineur) obtenu, toutes les tonalités majeures (resp. mineures) pouvaient alors trouver un profil de référence en effectuant une rotation d'indice : sol possède la même consonance en Do Majeur que mi en La Majeur par exemple.

Une fois tous les profils de référence obtenus, ils sont comparés un à un au profil de la pièce étudiée. Le profil de la pièce fait correspondre à chacun des 12 demis tons une valeur caractérisant la fréquence d'apparition dans la pièce. Il est construit en comptant le nombre de do, de do#, de ré, etc... de la pièce, en pondérant chaque note par sa durée (une blanche se voit par exemple attribuer un coefficient 2 quand une noire a un coefficient 1). 24 corrélations sont ensuite calculées pour estimer le degré de ressemblance entre le profil de la pièce et les 24 profils de référence. Plus la corrélation entre le profil de la pièce et un profil de référence est élevée, plus ces deux profils sont similaires. Il suffit alors de considérer le profil de référence offrant la plus grande corrélation avec le profil de la pièce pour pouvoir estimer sa tonalité.

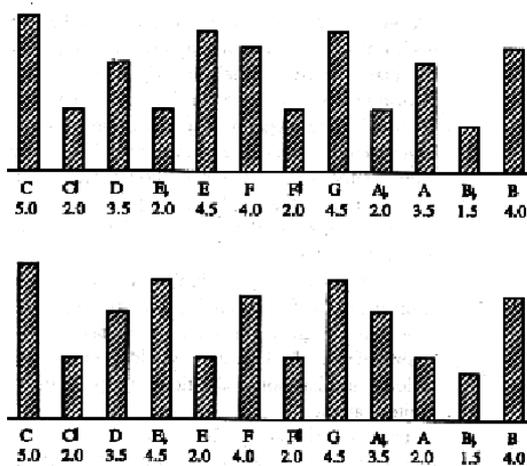


Figure 1. Les profils de référence de Temperley [19]. En haut, le profil de Do majeur et en bas, celui de Do mineur.

Temperley [19] a repris cet algorithme de référence pour y ajouter quelques modifications. Il a par exemple rehaussé l'importance de la sensible (la septième note d'une gamme) pour les profils de référence représentés sur la figure 1. Il propose le calcul de corrélation suivant, pour une tonalité donnée :

$$C_{pitch} = \sum_{i=1}^{12} V_{ref}[i].V_{piece}[i] \quad (1)$$

où V_{piece} le profil de notes de la pièce, V_{ref} le profil de référence de la tonalité, et C_{pitch} la corrélation entre

les deux profils (ici obtenue par produit scalaire).

Sur le même principe, Gomez a utilisé des chromas pour estimer la tonalité depuis un signal audio [7]. Chai s'est également inspiré de ces travaux en utilisant des profils de mode pour discerner les tonalités majeures/mineures [1].

2.1.2. Profils matriciels

En 2007, Madsen et Widmer [14] ont adopté une approche différente. En utilisant les observations de Li et Huron [13], ils ont pris en compte l'ordre des notes, en plus de leurs fréquences d'apparition. Deux distributions de notes identiques peuvent en effet correspondre à deux séquences de notes différentes, qui peuvent donc potentiellement induire deux tonalités différentes. La figure 2 montre ainsi un exemple où deux extraits musicaux constitués des mêmes notes (mais dans un ordre différent) semblent appartenir à deux tonalités différentes.

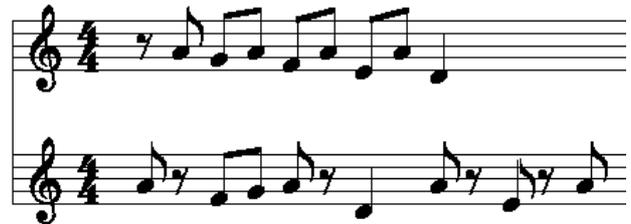


Figure 2. Deux extraits donnant le même profil de notes : un extrait de la célèbre fugue de Bach, en haut. En bas, un extrait composé des mêmes notes, mais dans un ordre différent. Ce dernier semble plutôt être en La mineur, alors que les mêmes notes que l'extrait en Ré mineur sont jouées.

Madsen et Wildmer ont donc adopté une représentation matricielle, qui prend en compte non plus le nombre d'occurrences de chaque note, mais le nombre d'occurrences d'intervalles entre les notes. On compte ainsi le nombre d'intervalle (do,ré), (do, do#), (do, ré), etc... Chacun des 144 (12x12) intervalles possibles se voit donc attribuer une probabilité d'apparition, représentée dans une matrice 12x12 (nommée *interval profile*, voir figure 3). Comme pour les profils de Krumhansl et Temperley, la matrice d'intervalles d'une pièce de musique est comparée aux matrices de référence, et un calcul de corrélation est mené pour estimer la tonalité :

$$C_{interval} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} M_{ref}[i, j].M_{piece}[i, j] \quad (2)$$

où M_{piece} est le profil (matriciel) d'intervalles de la pièce, M_{ref} le profil de référence et $C_{interval}$ la corrélation entre les deux profils.

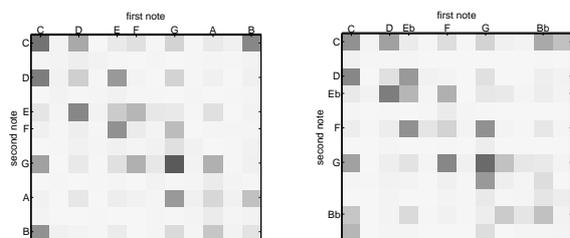


Figure 3. Les profils d’intervalles de Madsen (majeur à gauche, mineur à droite), construits à partir des chorals de Bach (communication personnelle).

2.1.3. Complémentarité des deux profils

Les résultats de l’évaluation de la méthode matricielle se sont avérés comparables aux résultats des méthodes utilisant des profils vectoriels [14]. Sur la base de données utilisée par Madsen [4], les deux méthodes obtiennent des scores avoisinant les 75 % de tonalités correctement détectées. En revanche, elles donnent des résultats différents sur différentes pièces de musique, la méthode matricielle pouvant échouer là où la méthode vectorielle donne le bon résultat et vice versa. Madsen a ainsi constaté que dans quasiment 85 % des cas, au moins une des deux méthodes donne le bon résultat. Puisque les informations issues de ces deux analyses semblent être différentes, il apparaît judicieux de tenter les combiner pour améliorer les résultats.

2.1.4. Méthode hybride

Nous avons proposé une nouvelle méthode d’évaluation de la tonalité [17]. Elle repose sur la combinaison des profils vectoriels et matriciels. Une telle combinaison peut être effectuée de plusieurs manières. Il a dans un premier temps été choisi de sommer les corrélations normalisées entre les profils de notes et d’intervalles de la pièce de musique et les profils de notes et d’intervalles de référence, afin que chaque méthode fournisse le même apport en information.

$$C_{hybrid} = f(C_{pitch}, C_{interval}) \quad (3)$$

où C_{hybrid} est la corrélation finale, C_{pitch} la corrélation entre les profils de notes, $C_{interval}$ la corrélation entre les profils d’intervalles et f une fonction de combinaison (par exemple, une somme).

2.2. Accords

Dans le domaine de la reconnaissance d’accords depuis le signal audio, de nombreux travaux utilisent des modèles de Markov cachés [8, 11]. Dans ces travaux, une phase d’apprentissage est nécessaire, afin d’entraîner le système sur une base de données annotée.

Différents paramètres comme la probabilité de transition d’un accord à un autre, ou la probabilité d’un accord suivant un descripteur (tel le chroma) sont définis lors cette phase. Ils sont ensuite utilisés lors de la phase de reconnaissance, qui utilise la programmation dynamique pour trouver le meilleur chemin dans le graphe des accords candidats. Les chromas peuvent également être utilisés à la manière d’un profil de notes, en cherchant ensuite à maximiser une corrélation avec un vecteur de référence, comme dans les travaux de Gomez [6].

Dans le domaine de la musique symbolique, on citera le modèle en spirale de Chew [2], qui en plus de la tonalité, peut estimer la suite d’accords d’un morceau en utilisant une fenêtre d’analyse. D’autres travaux utilisent un système de règles pour déterminer les accords d’après les notes de musique, comme Melisma Music Analyzer, le logiciel proposé par Temperley [19], et l’approche récemment proposée par Illescas et al. [16].

Pour l’analyse d’accord comme pour l’analyse de de tonalité, les méthodes existantes utilisent les notes de musique pour construire un profil qui sert ensuite à l’analyse. Or, les notes de musique fournissent une information tonale qui est très bruitée, en raison du nombre important de notes de passages ou d’ornement, qui sont des notes n’appartenant pas nécessairement aux accords ou à la tonalité recherchés.

3. MÉTHODES PROPOSÉES

Nous proposons ici de nouvelles méthodes d’analyse. Au lieu de prendre les notes en considération, nous utilisons d’autres informations tonales moins bruitées. Ainsi, pour l’estimation de la tonalité, les profils servant à l’analyse sont obtenus à partir des accords.

3.1. Analyse de la tonalité

Afin de débruiter l’information tonale utilisée pour construire le profil nécessaire à l’estimation de la tonalité, nous avons choisi d’utiliser les accords d’une pièce de musique plutôt que les notes la composant. Ainsi, pour chaque accord, les notes de la triade correspondante sont ajoutées au profil de la tonalité. Nous avons choisi d’attribuer à la fondamentale un poids deux fois plus important que pour la tierce et la quinte.

```

initialiser le profil de tonalite
pour toute fondamentale x des accords
    ajouter x (deux fois), tierce(x)
    et quinte(x) au profil de tonalite
fin pour tout
retourner la tonalite maximisant
la correlation avec le profil de reference

```

Le calcul du maximum de corrélation est identique à celui proposé par Temperley [19], avec les mêmes profils de référence (voir figure 1). L'intérêt de cette méthode est donc de filtrer les notes non harmoniques (ornements, notes de passages). Chaque accord ayant un rôle harmonique plus important qu'une seule note de musique, l'apport tonal peut sembler plus grand si seulement les notes issues des accords sont ajoutées au profil de tonalité.

Exemple

La figure 4 représente les premières mesures de *Little Wing*, de Jimi Hendrix. Ces mesures peuvent faire l'objet d'un profil de tonalité dit "classique", où chaque note de la partition sera comptabilisée dans le profil avec un poids dépendant de sa durée (profil du haut sur la figure 5).



Figure 4. Les quatre premières mesures de *Little Wing*, de Jimi Hendrix. Les accords sont notés au dessus de chaque mesure. Le morceau est en Mi mineur.

La méthode que nous proposons utilise un profil ne correspondant non plus à la répartition de toutes les notes de l'extrait, mais des notes des accords de l'extrait. Ainsi, cet extrait comportant 4 accords (Em, Gmaj, Amin, Em), les notes ajoutées aux profils seront les suivantes. Le poids de chaque note est mentionné entre parenthèses :

- mi(2) sol(1) si(1) (pour Emin),
- sol(2) si(1) re(1) (pour Gmaj),
- la(2) do(1) mi(1) (pour Amin),
- mi(2) sol(1) si(1) (pour Emin).

Les profils de tonalités issus de cette méthode et celui issu de la méthode classique sont différents, comme le montre la figure 5. On remarque par exemple que le mi se voit conférer une plus grande importance avec le profil issu de la méthode proposée, tout comme le sol et le si, qui sont les autres notes de la triade correspondant à Mi mineur. Le profil issu de la méthode classique marque moins cette différence entre les notes de la triade et les autres notes, et apparaît donc comme plus bruité, notamment en raison du poids important conféré au la, qui se retrouve quasiment aussi important que le sol et bien plus que le si. La figure 6 présente le résultat des corrélations entre les profils de tonalité obtenus avec les deux méthodes différentes et les profils de référence de Temperley [19].

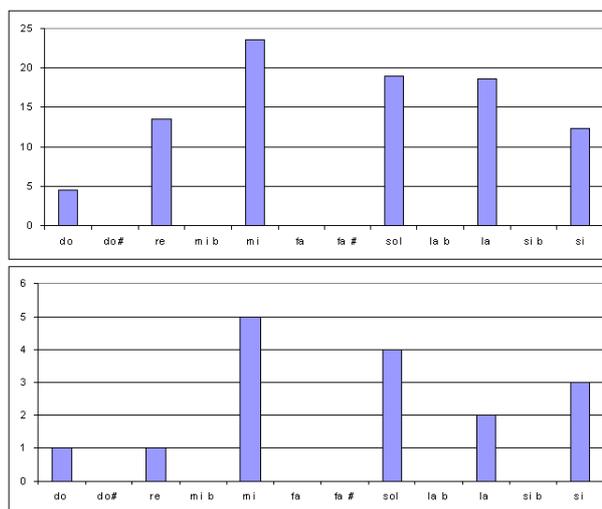


Figure 5. Profils de tonalité des premières mesures de *Little Wing* (en Mi mineur), en utilisant la méthode classique (en haut) et avec la méthode proposée (en bas). Les poids utilisés pour la méthode classique sont les suivants : 1 pour une double croche, 2 pour une croche, 4 pour une noire, ...

On remarque que le profil calculé d'après la méthode proposée présente une corrélation maximale avec le profil de référence correspondant à une tonalité de Mi mineur, qui est la tonalité exacte de l'extrait musical. En revanche, le profil classique maximise la corrélation pour un vecteur de référence correspondant à une tonalité de Sol Majeur (qui est le ton relatif de Mi mineur). On remarque également que Do Majeur présente également une corrélation supérieure à Mi mineur, et donc que la tonalité correcte ne se retrouve qu'en troisième position en utilisant le profil classique. Dans cet exemple, la prise en compte des accords pour construire le profil de tonalité d'un morceau a pour effet de filtrer le bruit harmonique causé par la prise en compte de chacune des notes de la pièce étudiée.

Cet exemple permet d'avoir un premier aperçu du fonctionnement de la méthode proposée, ainsi que de sa supposée efficacité. Dans la section suivante, une évaluation plus complète de cette méthode est présentée, ainsi que sa comparaison avec la méthode classique.

3.1.1. Évaluation

Cette section présente les morceaux utilisés pour l'évaluation, ainsi que la méthode utilisée pour calculer l'efficacité de l'estimation de tonalité. Les scores de la méthode proposée sont ensuite comparés aux scores de la méthode classique.

Bases de données

Pour estimer une tonalité à partir des accords, nous avons besoin de disposer d'une vérité terrain des accords sur un nombre suffisamment important

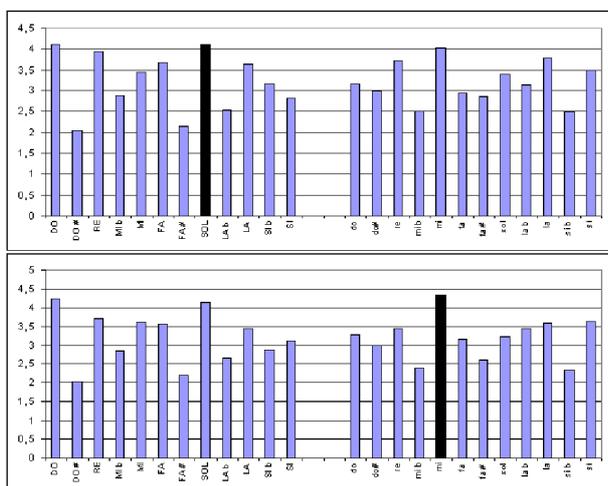


Figure 6. Résultats des corrélations (par produit scalaire) entre les profils de référence et les profils du début de la pièce *Little Wing* obtenus par la méthode classique (en haut) et la méthode proposée (en bas). Les tonalités majeures apparaissent en majuscule (à gauche) et les tonalités mineures en minuscule (à droite). La tonalité de l'extrait (Mi mineur) obtient le score maximal de corrélation avec la méthode proposée, et est donc correctement estimée. Ce n'est pas le cas pour la méthode classique, qui indique une tonalité de Sol Majeur.

de morceaux de musique. Les 12 morceaux ayant servi à la précédente évaluation n'étaient donc pas en assez grand nombre pour l'évaluation de la tonalité, puisque chaque morceau donne lieu à une seule évaluation (au lieu de l'évaluation de l'ensemble de ses accords). C'est donc pour cela que nous avons eu recours aux transcriptions de Christopher Harte¹ de l'université Queen Mary (Londres), qui propose une vérité terrain des accords de 180 titres des Beatles. Néanmoins, la vérité quant à la tonalité de chacun des morceaux n'est pas indiquée. Nous avons donc eu recours aux travaux d'Allan Pollack². Ce dernier a réalisé une étude de la structure des morceaux des Beatles, en mentionnant en particulier pour chacun la tonalité. Les morceaux sélectionnés pour l'évaluation ont donc les morceaux des Beatles dont :

- nous disposons de la transcription accord par accord par Christopher Harte,
- nous disposons d'une tonalité unique grâce aux travaux d'Allan Pollack (dans ses notes, Allan Pollack cite notamment des morceaux dont la tonalité apparaît comme ambiguë, comme par exemple *Birthday*, où deux tonalités différentes sont mentionnées),
- nous disposons d'une représentation symbolique (fichier MIDI).

Ainsi, **86 morceaux** ont finalement été retenus pour l'évaluation.

¹ contact personnel avec le chercheur

² <http://www.icce.rug.nl/soundscapes/DATABASES/AWP/awp-alphabet.shtml>

Protocole d'évaluation

Pour chaque titre de la base de données, deux tonalités sont calculées :

- la première, selon la méthode d'analyse classique : toutes les notes de la pièce de musique sont ajoutées au profil qui est ensuite comparé aux profils de référence (section 2.1.1),
- la seconde, selon la méthode d'analyse proposée : pour chaque accord de la vérité terrain, les notes de la triade correspondante sont ajoutées au profil du morceau, qui est ensuite comparé aux profils de référence. Comme pour la méthode classique, la plus grande corrélation avec le profil du morceau donne la tonalité (section 3.1).

Les deux tonalités sont ensuite comparées à la vérité terrain, en distinguant plusieurs cas correspondant à l'attribution des différents scores pour le concours MIREX [3] :

- la tonalité à évaluer est exactement la tonalité de la vérité terrain. Dans ce cas, la tonalité est déclarée *correcte*, et se voit attribuer un score de 1,
- la tonalité à évaluer est voisine de la vérité terrain (exemple, on détecte Do Majeur alors que la vérité terrain stipule Fa Majeur). Dans ce cas, la tonalité est déclarée *voisine* et se voit attribuer un score de 0.5
- la tonalité à évaluer est relative de la vérité terrain (exemple, on détecte Do Majeur alors que la vérité terrain stipule La mineur). Dans ce cas, la tonalité est déclarée *relative* et se voit attribuer un score de 0.3,
- la tonalité à évaluer présente la même tonique que la vérité terrain, mais un mode différent (exemple, on détecte Do Majeur alors que la vérité terrain stipule Do mineur). Dans ce cas, la tonalité est déclarée *parallèle* et se voit attribuer un score de 0.2,
- sinon, la tonalité est déclarée *autre*, et se voit attribuer un score de 0.

3.1.2. Résultats

Les résultats de l'évaluation de la tonalité sont présentés dans le tableau 1. Les scores sont exprimés en pourcentage du nombre de morceaux total (86). Le score MIREX, qui prend en compte les types d'erreurs rencontrés, est également mentionné.

On remarque une amélioration de plus de 10 % concernant la détection de tonalités correctes. Cette amélioration s'accompagne d'une forte diminution du nombre de détection de tonalité *autre* (plus de 8 % de moins pour notre méthode), qui implique que près de 90 % des tonalités détectées sont soit correctes, soit voisines de la tonalité correcte, ce qui peut ouvrir des perspectives quant à la correction

Méthode	Tonalité correcte	Erreurs				Score Mirex
		relatif	voisin	parallèle	autre	
depuis notes	66,28	1,16	12,79	1,16	18,6	73,26
depuis accords	77,91	0	11,62	0	10,47	83,72

Table 1. Résultats de l'analyse des tonalités. "depuis notes" désigne la méthode classique, en remplissant le profil du morceau avec les notes, alors que "depuis accords" désigne notre méthode (avec laquelle le profil est construit à partir des accords).

de ces erreurs. Enfin, le score MIREX, qui mesure l'efficacité globale, est amélioré de plus de 10 points.

3.2. Analyse des accords

Nous présentons dans cette section deux méthodes d'estimation d'accords. Plutôt que d'avoir recours aux modèles de Markov cachés, nous avons privilégié une approche similaire aux méthodes d'analyse de tonalité, avec, pour chaque accord à estimer, la comparaison entre un profil d'accord et un profil de référence. L'utilisation d'un modèle de Markov caché suppose en effet l'entraînement de ce modèle sur une base de données annotées, qui n'existe pas pour l'heure.

3.2.1. Une première méthode directe

En cherchant à adapter directement les méthodes d'estimation de tonalité à l'estimation des accords, nous avons adopté une première approche. Nous construisons pour chaque fenêtre d'analyse un profil de notes de la même manière que pour la méthode classique pour la tonalité, mais seules les notes étant jouées pendant la fenêtre d'analyse sont prises en compte (voir figure 7).

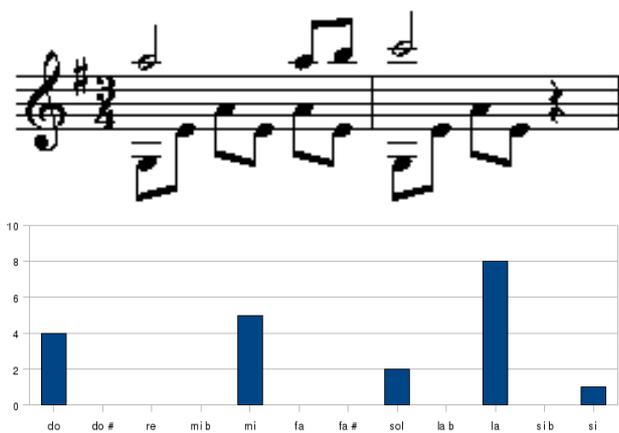


Figure 7. Sur une fenêtre d'analyse comportant les notes de la figure du haut, le profil obtenu est représenté sur la figure du bas. Le poids de chacune des notes est ici pondéré selon la longueur de ces dernières : poids 1 pour une croche, 2 pour une noire,...

Le profil de la fenêtre d'analyse est ensuite comparé aux profils de référence (voir figure 8). Pour ces

derniers, nous avons choisi d'utiliser des profils de type triade : ils contiennent une fondamentale (de poids 2), et les notes à la tierce (majeure ou mineure selon le mode) et à la quinte. Le fait qu'un petit nombre de notes est attendu dans chaque fenêtre d'analyse (en comparaison avec le nombre de notes dans toute la pièce de musique), peut justifier pourquoi seulement trois notes sont présentes dans le profil en triade. Le profil de référence ayant la plus grande corrélation avec le profil de la fenêtre d'analyse donne l'accord estimé.

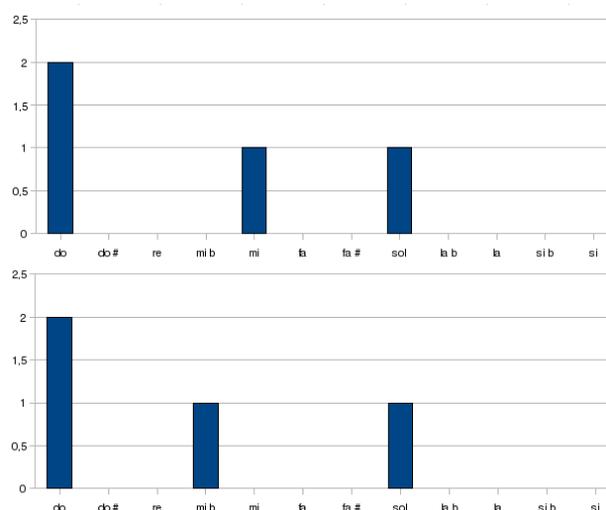


Figure 8. Profils de référence en triade de Do Majeur (en haut) et Do mineur (en bas).

3.2.2. Méthode proposée

Dans la méthode directe, le profil de chaque fenêtre d'analyse est rempli à partir des notes présentes dans la fenêtre, sans faire de distinction quant à leurs importances respectives dans l'harmonie. D'un point de vue musical, il semble néanmoins intéressant de conférer un plus grand rôle aux notes sonnantes simultanément, car elles constituent le fondement de l'aspect vertical de la musique, c'est à dire de l'harmonie. Nous considérons ainsi comme un *groupe de notes* l'ensemble des notes jouées simultanément dans une pièce de musique. Les groupes de notes sont construits grâce à une transformation des notes, appelée *transformation homorythmique*. Le principe est de mod-

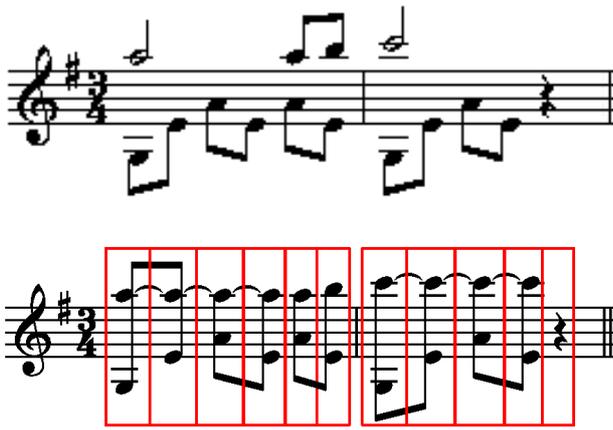


Figure 9. La figure du haut représente un extrait musical. La figure du bas représente le même extrait ayant subi une transformation homorythmique. Les groupes de notes apparaissent encadrés.

ifier la longueur de certaines notes de sorte que toutes les notes qui sont jouées en même temps débutent et terminent toutes aux même instants. On trouvera un exemple sur la figure 9.

Notons que la transformation homorythmique ne modifie pas la manière dont sonne une pièce de musique, mais seulement la manière de représenter les notes de musique la composant. De plus, nous avons, pour chaque groupe de notes, défini une fondamentale selon la définition suivante : la fondamentale d'un groupe de note A est la note x qui minimise l'empilement de tierces nécessaires (depuis x) pour rencontrer toutes notes de A .

Il a ainsi été choisi d'utiliser une approche qui tenait davantage compte de l'harmonie, en considérant les propriétés des groupes de notes de chaque fenêtre pour remplir le profil caractéristique de cette fenêtre. Voici les deux principales modifications que cette prise en compte induit :

- plus un groupe de notes est riche (plus il comporte de notes différentes), plus les notes qui le composent se trouvent renforcées harmoniquement parlant. Le poids de chacune des notes dépend donc du nombre de notes différentes appartenant au même groupe qu'elle,
- pour chaque groupe de notes, la fondamentale joue un rôle plus important sur l'harmonie que les autres notes. Le poids de cette dernière est donc augmenté lorsque le groupe de notes comporte plus d'une note.

Les autres réglages de la méthode directe sont conservés, comme le fait de donner plus de poids aux notes plus longues. Pour chaque profil, on cherche ensuite le maximum de corrélation avec des profils de référence en triade, comme dans la méthode exposée en 3.2.3.

Exemple

Considérons l'extrait musical représenté sur la figure 10, et supposons que la fenêtre d'analyse ait pour taille une mesure (soit la longueur de l'extrait).



Figure 10. Une mesure en Do Majeur.

La figure 11 représente deux profils correspondant à cet extrait :

- le premier, en haut, obtenu avec la méthode directe : chaque note de la fenêtre est ajoutée au profil de la fenêtre, avec un poids dépendant de sa longueur (1 pour une croche, 2 pour une noire et 4 pour une blanche par exemple),
- le second, en bas, obtenu avec la méthode proposée : chaque note de la fenêtre est ajoutée au profil de la fenêtre, avec un poids dépendant non seulement de sa longueur, mais également du nombre de notes jouées en même temps que cette note, et éventuellement du fait qu'elle soit ou non la fondamentale d'un groupe de notes.

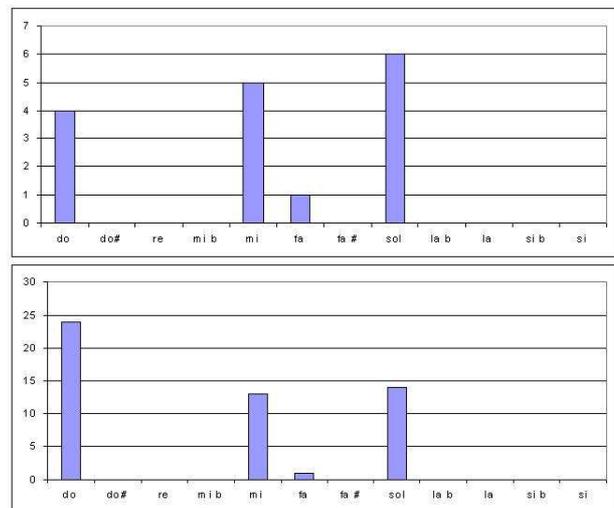


Figure 11. En haut se trouve le profil de la fenêtre obtenu avec la méthode directe, pour lequel chaque note a un poids pondéré seulement par sa durée. En bas se trouve le profil obtenu avec la prise en compte de l'harmonie, chaque note ayant un poids dépendant non seulement de la durée, mais également des notes jouées même temps. On remarque que ce deuxième profil présente une forme plus proche du profil en triade de Do Majeur (do,mi,sol) que le profil obtenu avec la méthode directe.

Ainsi, avec la méthode proposée, le do grave figurant dans l'accord de blanches au début de la mesure n'a plus un poids de 4, comme dans la méthode directe, mais un poids de $4 \times 3 \times 2 = 24$ (4 pour la durée, 3

pour le nombre de notes dans le groupe de notes, et 2 pour le fait que do est fondamentale de ce groupe de notes). Le fa entre le troisième et le quatrième temps voit son poids inchangé entre les deux méthodes (1 dans les deux cas). La méthode proposée renforce considérablement l'importance harmonique du do dans cette mesure. Sur le profil correspondant à la méthode proposée, le do a un poids plus élevé que le sol, alors qu'il apparaît moins longtemps dans la mesure (2 temps pour le do, contre 2 temps et demi pour le sol). On remarque que ce deuxième profil présente une forme plus proche du profil en triade de Do Majeur que le profil obtenu avec la méthode directe.

La figure 12 présente les résultats du calcul des corrélations pour les 12 accords majeurs et les 12 accords mineurs. Les deux profils de la mesure présentés précédemment ont été normalisés pour ce calcul, afin que chacun présente une somme de ses composantes égale à 1.

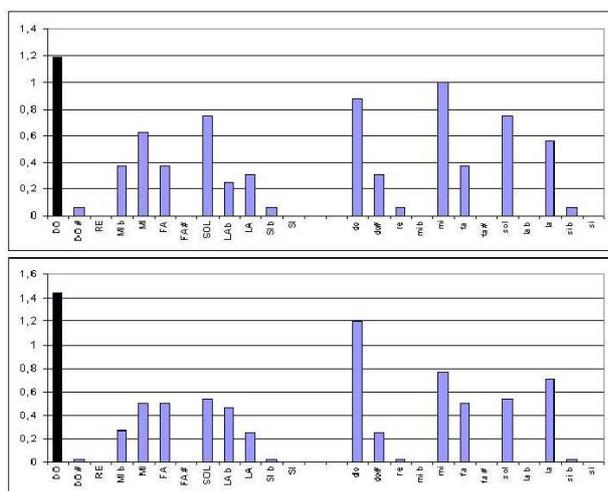


Figure 12. En haut se trouvent les scores de corrélation du profil issu de la méthode directe avec les 12 accords majeurs (en majuscule, à gauche) et les 12 accords mineurs (en minuscule, à droite). En bas sont représentées les mêmes scores pour le profil issu de la méthode proposée. Ce dernier a tendance non seulement à renforcer la corrélation correspondant à l'accord à déterminer (ici, Do Majeur), mais également à augmenter la différence le séparant des autres profils de référence, en diminuant leurs scores respectifs.

On remarque ainsi que le score de corrélation correspondant au Do Majeur est meilleur pour le profil issu de la méthode proposée (1,44 contre 1,19 pour le profil issu de la méthode directe). De plus, la méthode proposée permet d'augmenter l'écart entre le score de Do Majeur et le deuxième meilleur score : la différence avec le deuxième meilleur score (Mi mineur) est de 0.25 pour la méthode proposée, alors qu'elle est de 0.19 entre Do Majeur et Lab mineur pour la méthode directe. Enfin, on remarque que la méthode proposée permet de faire baisser les valeurs des

corrélations pour les accords éloignés de l'accord à déterminer : 6 accords ont des scores au dessus de 0.6 (dont 3 au dessus de 0.8) avec la méthode directe, alors que seulement 4 sont au dessus de 0.6 (dont 2 au dessus de 0.8) avec la méthode proposée.

Si l'étude de l'exemple précédent montre l'intérêt de la prise en compte des informations tonales issues des groupe de notes pour déterminer les accords, une évaluation de la détection d'accords doit être envisagée sur une plus grande quantité d'information. Une telle évaluation est présentée dans la section suivante.

3.2.3. Évaluation

Cette section présente les morceaux utilisés pour l'évaluation, ainsi que la méthode utilisée pour calculer l'efficacité de l'estimation d'accord. Les scores de la méthode proposée sont ensuite comparés aux scores de la méthode directe.

Bases de données

Les morceaux employés pour cette évaluation ont été choisis tels qu'ils :

- comportent un changement d'accord *au plus* toutes les mesures, ceci pour pouvoir choisir la mesure comme fenêtre d'analyse. Il est en effet nécessaire qu'un seul accord soit joué dans chaque fenêtre d'analyse : les résultats seraient en effet erronés si plus d'un accord était joué dans la même fenêtre d'analyse,
- comportent des accords dont le type est identifiable non seulement par notre méthode d'analyse, mais également par la méthode à laquelle nous souhaitons nous comparer, à savoir la méthode directe construits à partir des notes. Il a donc été choisi de restreindre les accords analysés aux accords *majeurs* et *mineurs*.

Ainsi, **12 morceaux** ont été retenus selon ces trois critères. Ces 12 morceaux représentent au total **1195 accords**.

Protocole d'évaluation

Pour chaque morceau, deux listes d'accords sont générées :

- la première, selon la méthode d'analyse directe : pour chaque fenêtre d'analyse, un profil est créé en tenant uniquement compte des notes présentes dans la fenêtre, ce profil étant ensuite comparé aux mêmes profils de référence,
- la seconde, selon la méthode d'analyse proposée : pour chaque fenêtre d'analyse, un profil est créé en tenant compte des informations des groupes de notes de la fenêtre (voir 3.2), ce profil étant

Méthode	Moyenne pondérée par titre	Moyenne pondérée par accord
depuis notes	91,04	90,28
depuis groupes	96,06	96,44

Artiste	Radiohead	The Animals	Otis Redding	The Eagles
Titre	Creep	House Of The Rising Sun	Dock Of The Bay	Hotel California
depuis notes	93,33	94,19	80,88	93,27
depuis groupes	95,56	98,26	100	99,33
Artiste	Pink Floyd	Pink Floyd	Pink Floyd	The Beatles
Titre	The Wall	Wish You Were Here	Comfortably Numb	Can't Buy Me Love
depuis notes	88,61	91,14	80	100
depuis groupes	89,87	89,87	98,5	98,75
Artiste	Barbara	The Beatles	The Beatles	The Beatles
Titre	L'Aigle Noir	Magical Mystery Tour	Come Together	Ticket To Ride
depuis notes	92	94,74	86,47	97,83
depuis groupes	100	94,74	91,26	96,52

Table 2. Résultats de l'analyse des accords. "Depuis note" désigne la méthode directe, alors que "depuis groupes" désigne la méthode proposée (avec laquelle les profils construits tiennent compte des groupes de notes). On observe une amélioration des scores avec la méthode proposée.

ensuite comparé aux profils de référence proposés par Temperley (voir 2.1.1).

L'évaluation se fait ensuite en comparant les deux suites d'accords générées à la vérité terrain. Chaque accord est considéré comme correct s'il présente la même fondamentale et le même mode que la vérité terrain.

3.2.4. Résultats

Les résultats de l'évaluation des accords sont présentés dans le tableau 2. Les scores présentés sont en pourcentage d'accords corrects par morceau. On trouvera également deux moyennes des scores, la première étant une moyenne sur les morceaux, la seconde sur les accords.

On remarque que la méthode proposée améliore significativement les résultats, en permettant une augmentation d'au moins 5 % des résultats, que ce soit en considérant la moyenne par morceau ou par accord. Il est à noter que les résultats de la méthode directe réalisant déjà un score élevé (plus de 90 %), un écart de 5 % n'est pas négligeable. On notera également que, sur une minorité de morceaux, notre méthode fait moins bien que la méthode directe (comme pour *Can't Buy Me Love* ou *Ticket To Ride* des Beatles), mais la différence est dans ce cas relativement faible (jamais plus de 2 %). En revanche, sur les titres où notre méthode fait mieux que la méthode directe, les résultats sont améliorés de manière plus significative : 18,5 % d'amélioration sur *Comfortably Numb* de Pink Floyd, et presque 20 % pour *Dock Of The Bay* d'Otis Redding, par exemple.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté dans cet article de nouvelles méthodes d'estimation de la tonalité et des accords d'un morceau de musique. Les méthodes existantes reposent pour la plupart sur le calcul d'une corrélation entre un profil représentant la fréquence d'apparition des notes sur une durée d'observation donnée, et un profil de référence. Suivant l'hypothèse que les notes de musiques seules apportent une information tonale relativement bruitée, nous avons proposé une nouvelle manière d'établir les profils d'observation.

Pour l'établissement des profils de tonalité, nous avons utilisé les notes issues des triades des accords de la pièce de musique, au lieu de l'ensemble des notes la composant. Pour la construction du profil servant à l'estimation des accords, nous avons pondéré la contribution des notes de musique non seulement selon leurs durées, mais également selon le nombre d'autres notes de musique sonnantes en même temps qu'elles. Pour l'estimation de la tonalité, les évaluations réalisées pour ces méthodes ainsi que pour les méthodes existantes montrent une amélioration de la précision pour les méthodes proposées. Concernant l'estimation des accords, nous avons montré que la méthode proposée se révélait plus efficace qu'une méthode directe adaptant le principe de certaines méthodes existantes pour l'estimation de tonalité au domaine des accords.

A la lumière de ces résultats, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. D'autres paramètres pourraient être pris en compte dans l'obtention des pro-

files d'accord ou de tonalité, comme le rôle de la basse de chaque groupe de notes. Des techniques comme la suppression des notes de passages pourraient également être intégrées aux méthodes proposées pour diminuer le bruit harmonique [12, 18]. Il est également souhaitable d'adopter une segmentation non-uniforme et sans apprentissage pour la détection d'accord : au lieu d'estimer un accord pour chaque période d'analyse (la mesure par exemple), le début et la fin de chaque accord pourraient être détectés automatiquement. Enfin, il reste à adapter ces méthodes d'estimation à l'étude du signal audio. Une détection de fondamentale pour chaque chroma pourrait par exemple être envisagée pour donner plus de poids à cette dernière, les chromas pouvant être apparentés à des groupes de notes, car donnant une description des notes sonnant simultanément.

5. SUPPORT

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans le cadre du projet Simbals JC07-188930, financé par l'Agence Nationale pour la Recherche. Ces recherches sont également soutenues par le Conseil Régional d'Aquitaine.

6. REFERENCES

- [1] W. Chai and B. Vercoe, "Detection of Key Change in Classical Piano Music", *Proceedings of the 6th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Londres, Royaume-Uni, 2007.
- [2] E. Chew, "Towards a Mathematical Model of Tonality", *PhD. Thesis, Operations Research Center, MIT, Cambridge, États-Unis*, 2000.
- [3] J. Downie, K. West, A. Ehmann and E. Vincent, "The 2005 Music Information retrieval Evaluation Exchange (MIREX'05) : Preliminary Overview", *Proceedings of the 6th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Londres, Royaume-Uni, 2005.
- [4] T. Eerola and P. Toivainen, "Suomen Kansan esävelmät. Finnish Folk Song Database", disponible à : <http://www.jyu.fi/musica/sks/>, 2004.
- [5] T. Fujishima, "Realtime chord recognition of musical sound : A system using Common Lisp Music", *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Pékin, Chine, 1999.
- [6] E. Gómez, "Tonal Description of Music Audio Signals", *Thèse doctorale, Université de Pompeu Fabra, Barcelone, Espagne*, 2006.
- [7] E. Gómez and P. Herrera, "Estimating The Tonality Of Polyphonic Audio Files : Cognitive Versus Machine Learning Modelling Strategies" *Proceedings of the 5th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Barcelone, Espagne, 2004.
- [8] C. Harte, and M. Sandler, "Automatic Chord Identification Using a Quantised Chromagram", *Proceedings of the Audio Engineering Society*, Madrid, Espagne, 2005.
- [9] C. Krumhansl, "Cognitive Foundations of Musical Pitch", *Oxford University Press, New York*, 1990.
- [10] C. Krumhansl and E. Kessler, "Tracing the Dynamic Changes in Perceived Tonal Organisation in a Spatial Representation of Musical Keys", *Psychological Review*, volume 89, pages 334–368, 1982.
- [11] K. Lee and M. Stanley, "A Unified System for Chord Transcription and Key Extraction Using Hidden Markov Models", *Proceedings of the 8th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Vienne, Autriche, 2007.
- [12] F. Lerdahl and R. Jackendoff, "A Generative Theory of Tonal Music", *MIT Press, Cambridge*, 1985.
- [13] Y. Li and D. Huron, "Melodic Modeling : A Comparison of Scale Degree and Interval", *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, New Orleans, États-Unis, 2006.
- [14] S. Madsen and G. Widmer, "Key-Finding with Interval Profiles", *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Copenhagen, Danemark, 2007.
- [15] K. Noland and M. Sandler, "Key Estimation Using a Hidden Markov Model", *Proceedings of the 7th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Victoria, Canada, 2006.
- [16] P. Illescas, D. Rizo and J. M. Iñesta, "Harmonic, Melodic, and Functional Automatic Analysis", *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, pages 165–168, Copenhagen, Danemark, 2007.
- [17] M. Robine, T. Rocher, and P. Hanna, "Improvements of Key-Finding Methods", *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Belfast, Irlande du Nord, 2008.
- [18] H. Schenker, "Der Frei Satz", Vienna : Universal Edition, 1935. Note : publié en anglais sous le titre *Free Composition*, traduit par E. Oster, Longman, 1979
- [19] D. Temperley, "The Cognition of Basic Musical Structures", *MIT Press*, 1999.
- [20] D. Temperley, "A Bayesian Approach to Key-Finding", *Music and Artificial Intelligence*, pages 195–206, Berlin : Springer-Verlag, 2002.

LA LIBRAIRIE GUIDO

UNE BOITE À OUTILS POUR LE RENDU DE PARTITIONS MUSICALES.

C. Daudin, D. Fober, S. Letz, Y. Orlarey
Grame
Centre national de création musicale
Lyon, France
{ daudin, fober, letz, orlarey }@grame.fr

RÉSUMÉ

Le format GUIDO *Music Notation* (GMN) est un langage textuel et lisible de représentation de partitions musicales. Basée sur ce format, la GUIDOLib est une librairie multi-plateformes offrant une API de rendu graphique de partitions musicales. Cet article présente le format GMN et le moteur de rendu GUIDO. Un exemple d'application, le GUIDO *Scene Composer*, est ensuite décrit.

1. INTRODUCTION

Les logiciels d'édition de partitions musicales existent dans le commerce depuis plus d'une décennie, et fournissent des solutions de gravure sophistiquées, mais complexes. À côté de ces systèmes *fermés*, l'approche "boîte à outils" a très tôt été explorée [1]. Cependant, peu d'entre eux sont arrivés à maturité : *Common Music Notation* [2] peut être considéré comme le plus abouti ; plus récemment, l'*Expressive Notation Package* (ENP) [3] a proposé une approche prometteuse ; ces deux systèmes sont basés sur Lisp.

Une autre solution est le design de compilateurs capables de produire des partitions depuis une description textuelle. MusiX \TeX en est un : c'est un ensemble de macros \TeX de notation musicale. MusiX \TeX étant puissant mais complexe, des préprocesseurs comme PMX ou M-Tx ont été développés pour en faciliter l'utilisation. Plus récemment, Lilypond [4] est un compilateur open-source, et partiellement implémenté par le langage Scheme ; il possède des fonctions de mise en page automatique, et son format de représentation musicale est simple et intuitif. Ces deux systèmes peuvent générer des fichiers PostScript, EPS ou PDF.

Basé sur le format GUIDO *Music Notation* le projet GUIDOLib est une librairie C/C++ open source et cross-plateforme qui fournit des services de mise en page et de rendu graphique de partitions aux applications clientes. Le moteur de rendu est issu d'un travail réalisé par Kai Renz dans le cadre de sa thèse de doctorat [?]. Le format de description de la musique est très proche du format Lilypond. À la différence de l'approche *compilateurs*, la librairie GUIDO permet d'embarquer des capacités de rendu de partition dans une application indépendante et de créer

dynamiquement des partitions.

Cet article présente d'abord le format GUIDO *Music Notation* (GMN), puis le moteur de rendu GUIDO et l'API de la GUIDOLib. Un exemple concret d'application combinant la GUIDOLib avec Qt est ensuite décrit.

2. LE FORMAT GUIDO MUSIC NOTATION

Le format GMN [5] [6] a été créé par H. Hoos et K. Hamel il y a plus de dix ans. C'est un langage textuel et lisible de représentation de partitions musicales. Il est basé sur un formalisme simple mais puissant, se concentrant sur les grands concepts musicaux (en opposition aux caractéristiques graphiques). Une caractéristique clé de la GMN est l'idée que des concepts musicaux simples doivent être notés simplement, et que seulement les notions complexes doivent nécessiter des notations complexes.

2.1. Concepts de base

La notation GMN de base recouvre les notes, silences, altérations, voix indépendantes, et les concepts les plus courants de la notation musicale comme les clefs, métriques, armures, articulations, liaisons, etc. Les notes sont représentées par leur nom (a b c d e f g h), une altération optionnelle ('#' et '&' pour dièse et bémol), un numéro d'octave optionnel et une durée optionnelle. La durée est spécifiée par l'une des formes suivantes :

```
* enum / denom dotting
* enum dotting
/ denom dotting
```

où *enum* et *denom* sont des entiers positifs et *dotting* est soit vide, '.', ou '..', avec la même sémantique que dans la notation musicale. 1 est la valeur par défaut si *enum* ou *denom* sont omis. La durée est exprimée en fraction de ronde.

Si omis, les descriptions optionnelles sont celles utilisées pour la note précédente de la séquence.

Les accords sont décrits par des notes entre accolades séparées par des virgules, i.e. {c, e, g}

2.2. Les tags GUIDO

Les tags sont utilisés pour donner des informations musicales supplémentaires, comme les liaisons, clés, armures, etc. Un tag simple a l'une des formes suivantes :

```
\tagname
\tagname<param-list>
```

où `param-list` est une liste de chaînes de caractères ou de nombres, séparés par des virgules. De plus, un tag peut ne s'appliquer qu'à un ensemble de notes (comme les liaisons etc.) ; la forme correspondante est :

```
\tagname (note-series)
\tagname<param-list> (note-series)
```

Le code GMN suivant illustre la concision de la notation ; la figure 1 en représente le rendu par le moteur GUIDO.

```
[ \meter<"4/4"> \key<-2> c d e& f/8 g ]
```



Figure 1. Un exemple simple de code GMN

2.3. Séquences et segments de notes

Une séquence de notes a la forme `[tagged-notes]` où `tagged-notes` est une série de notes, tags, tags temporels séparés par des espaces. Les séquences de notes représentent une seule voix. Les segments de notes représentent plusieurs voix ; ils sont notés par `{seq-list}` où `seq-list` est une liste de séquences de notes séparées par des virgules, comme dans l'exemple suivant :

```
{
[\staff<1> \stemsUp \meter<"2/4">
 \beam(g2/32 e/16 c*3/32) c/8
 \beam(a1/16 c2 f)
 \beam(g/32 d/16 h1*3/32) d2/8
 \beam(h1/16 d2 g)],
[\staff<1>\stemsDown g1/8 e
 g/16 d f a a/8 e a/16 e g h],
[\staff<2> \stemsUp \meter<"2/4"> a0 f h c1],
[\staff<2>\stemsDown f0 d g a]
}
```

Le rendu donné par le moteur GUIDO est visible sur la figure 2.



Figure 2. Un exemple avec plusieurs voix

De plus, la spécification *avancée* de GUIDO (non présentée dans cet article) permet un formatage en détail de la partition.

3. LE MOTEUR GUIDO

Basé sur le format GUIDO *Music Notation* et créé initialement par Kai Renz, le moteur GUIDO permet le rendu

graphique de partitions musicales, avec mise en page automatique. A l'initiative du GRAME, le moteur a été remodelé en une librairie multi-plateformes et est devenu open source en 2002, sous licence GNU LGPL et hébergé sur SourceForge.

Le moteur GUIDO utilise une représentation mémoire du format GMN : la GUIDO *Abstract Representation* (GAR). Cette représentation est transformée pas à pas pour produire les pages de la partition. Deux types de traitements sont d'abord appliqués à la GAR :

- des transformations de GAR vers GAR, qui représentent une transformation du rendu logique : certaines parties du rendu (comme les barres liant les croches) peuvent aussi bien être produites d'après la GAR qu'exprimées dans la GAR,
- la GAR est convertie en GUIDO *Semantic Normal Form* (GSNF). La GSNF est une forme canonique telle que des expressions sémantiquement équivalentes ont la même GSNF.

Cette GSNF est finalement convertie en GUIDO Graphic Representation (GGR), qui contient les informations nécessaires au rendu, et est directement utilisée lors de celui-ci. Cette dernière étape inclut notamment les algorithmes d'espacement de notes et de séparation des pages [7].

Notez que bien que le format GMN permette un formatage graphique précis (grâce à la GMN *avancée*, dont la figure 3 montre les possibilités), le moteur GUIDO peut effectuer une mise en page automatique perfectionnée.

4. LA GUIDO LIB

4.1. Rendu de partition

La librairie permet de lire des fichiers GMN et de créer les GAR et GGR correspondantes. Les GAR et GGR sont référencées par des pointeurs opaques, et sont utilisées par toute fonction opérant sur la partition. Par exemple : `GuidoParse (const char * filename)` renvoie la GGR construite à partir du fichier GMN, GGR qui pourra par la suite être utilisée pour dessiner la partition avec la fonction `GuidoOnDraw`.

Un exemple de code pour dessiner une partition à partir d'un fichier GMN est donné ci-dessous (voir la section 4.6 pour des informations sur le `VGDevice`) :

```
void DrawGMNFile (char* filename, VGDevice* device)
{
// Structure pour l'initialisation du moteur
// avec les polices "guido2" et "times"
GuidoInitDesc gd = { device, 0, "guido2", "times" };
// Initialisation du moteur
GuidoInit (&gd);

// Déclaration d'une structure de données de dessin
GuidoOnDrawDesc desc;
// Obtention de la GGR du fichier GMN,
// GGR stockée dans la structure dessin
desc.handle = GuidoParse (filename);

// Parametrage du dessin
// (voir la doc pour plus de détails)
desc.hdc = device; // le device de sortie
desc.page = 1; // index de la page à dessiner
desc.updateRegion.erase = true;
desc.scrollx = desc.scrolly = 0;
desc.zoom = 1;
desc.size = desc.sizey = 0;
}
```

FUGA I

J.S.Bach BWV 846



Figure 3. Une partition complexe

```
// Dessin de la partition  
GuidoOnDraw (&desc);  
}
```

4.2. Accès aux pages

Le résultat du rendu est un ensemble de pages qui peuvent être redimensionnées dynamiquement selon le contexte de l'application ou des besoins de l'utilisateur. La librairie fournit le nécessaire pour changer la taille de la page, obtenir le nombre de pages, ou l'index de page correspondant à une date musicale donnée. Notez que la fonction `GuidoOnDraw` ne dessine qu'une page à la fois.

4.3. Paramètres du moteur

Les algorithmes de mise en page sont contrôlés par des paramètres généraux du moteur GUIDO. La librairie fournit une API pour obtenir et modifier ces paramètres ; ils comprennent la force des ressorts d'espacement, la distance inter-systèmes, la répartition des systèmes et le remplissage optimal de page.

4.4. La GUIDO Factory

Le moteur GUIDO peut aussi être alimenté avec de la musique générée par la GUIDO Factory. L'API de la GUIDO Factory fournit un ensemble de fonctions pour créer une GAR à la volée et pour la convertir en GGR. La GUIDO Factory est une machine à état qui opère sur des éléments courants implicites : par exemple, une fois une voix ouverte (`GuidoFactoryOpenVoice()`), elle devient la voix courante, et dès lors, tous les événements créés y sont implicitement ajoutés.

L'état de la GUIDO Factory inclut les partitions, voix, accords, notes (ou silences) et tags courants. Certains éléments de l'état de la factory reflète la spécification formelle de GUIDO ; sauf spécifié, les notes créées auront implicitement les durées et octaves courantes.

La construction dynamique de partition musicale est très proche de la description textuelle GUIDO : chaque GAR de la factory correspond à un unique élément de notation. Une fois la partition dynamiquement construite, un appel à `GuidoFactoryCloseMusic()` retourne un pointeur de GAR, directement utilisable avec `GuidoFactoryMakeGR()`, qui retourne elle un pointeur de GGR, lui-même directement utilisable avec le reste de l'API. Le rendu logique est effectué au moment de retourner la GAR, et le rendu graphique au moment de retourner la GGR.

4.5. Mappings graphiques

En parallèle à la GGR, le moteur GUIDO maintient un arbre d'éléments graphiques pour chaque page de la partition, comme illustré par la figure 4. Chaque élément définit un rectangle englobant et une date musicale. Les positions sont stockées en pixels ; l'origine (0,0) est en haut à gauche.

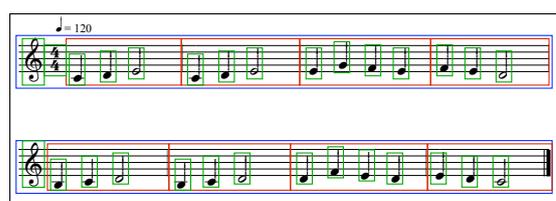


Figure 4. Bounding boxes des éléments de la partition

La librairie GUIDO fournit une API spécifique pour obtenir le mapping graphique de la partition et rechercher des éléments par type, position et date.

4.6. Le système graphique virtuel

L'objectif du *système graphique virtuel* est de fournir une couche d'abstraction pour les dépendences graphiques de chaque plateforme. Il est constitué d'un ensemble de classes abstraites recouvrant les besoins de bases d'une application : écrire du texte, dessiner sur l'écran ou en mémoire, etc. Ces classes sont :

- une classe `VGDevice` : spécialisée dans le dessin sur et hors écran ;
- une classe `VGFont` : abstraction de la police ;
- une classe `VGSystem` : pour créer les `VGDevice` et `VGFont` spécifiques à la plateforme.

Ces classes sont implémentées pour différentes plateformes : GDI (Windows), Quartz (Mac OS X), GTK (GNU Linux), OpenGL et plus récemment Qt.

5. SUPPORT DE QT

Qt est un framework de développement multi-plateformes [8], largement répandu pour le développement d'applications avec GUI ¹.

5.1. Classes GuidoQt

Un ensemble de classes permet une utilisation simple la librairie GUIDO avec Qt; elles sont organisées en 3 couches (figure 5) :

- *basse* : `GDeviceQt`, `GFontQt` & `GSystemQt` : implémentation pour Qt du Virtual Graphic System ;
- *moyenne* : `QGuidoPainter` : une classe qui utilise les `GDeviceQt`, `GFontQt` & `GSystemQt`, et offre une interface de plus haut niveau ;
- *haute* : des objets Qt "prêt à l'emploi", qui utilisent le `QGuidoPainter` pour dessiner des partitions GUIDO :
 - `QGuidoWidget`, un `QWidget` ;
 - `QGuidoSPageItem` & `QGuidoMPageItem`, deux `QGraphicsItem` qui affichent, respectivement, une page à la fois, ou toutes les pages de la partition ;
 - `Guido2Image`, pour exporter des partitions GUIDO vers différents formats d'image.

Voici un programme simple utilisant la classe `QGuidoPainter` pour exporter une partition en image :

```
#include <QApplication>
#include <QPainter>
#include <QImage>
#include "QGuidoPainter.h"
int main(int argc , char* argv[])
{
    QApplication app( argc , argv );

    //Initialisation du moteur Guido
    QGuidoPainter::startGuidoEngine();

    //Création d'un QGuidoPainter...
    QGuidoPainter* p = QGuidoPainter::create();
    //...auquel on donne du code GMN
    p->setGMNCode( "[c/8 d e g e d c]" );
```

1. see : <http://www.qtsoftware.com>

```
//Obtention de la taille de la 1ère page de la partition
int pageIndex = 1;
QSizeF s = p->pageSizeMM( pageIndex );

//Création d'une image vide, de la taille de la partition
QImage image(s.toSize()*10 , QImage::Format_ARGB32);
image.fill( QColor(Qt::white).rgb() );

//Le QGuidoPainter dessine la partition, via QPainter.
QPainter painter( &image );
p->draw( &painter , pageIndex , image.rect() );

QGuidoPainter::destroyGuidoPainter( p );

//Arrêt du moteur Guido
QGuidoPainter::stopGuidoEngine();

image.save( "myScore.png" );
return 0;
}
```

Et en voici un autre affichant une partition avec la classe `QGuidoWidget` :

```
#include <QApplication>
#include "QGuidoWidget.h"
#include "QGuidoPainter.h"
int main(int argc, char *argv[])
{
    QApplication app(argc, argv);

    //Initialisation du moteur Guido
    QGuidoPainter::startGuidoEngine();

    //Création d'un QGuidoWidget...
    QGuidoWidget w;
    //...auquel on donne du code GMN.
    w.setGMNCode( "[e d c]" );
    w.show();

    // C'est tout !
    int result = app.exec();

    //Arrêt du moteur Guido
    QGuidoPainter::stopGuidoEngine();
    return result;
}
```

5.2. Le GUIDO Scene Composer

Le *GUIDO Scene Composer* est un IDE graphique pour GUIDO, permettant de manipuler des partitions GUIDO dans une scène graphique.

5.2.1. Un outil d'apprentissage du format de notation GUIDO

Le *GUIDO Scene Composer* est un environnement effaçable pour apprendre la GMN :

- en tapant du code GMN, la partition correspondante est immédiatement mise à jour, facilitant les essais de différentes notations ;
- une palette d'aide (figure 6) liste un large panel d'expressions et de tags GUIDO, permettant de se passer de manuel externe ;
- l'éditeur de code GMN possède une coloration syntaxique, rendant la lecture du code GMN plus facile ;
- import de partitions MusicXML et MuseData (support limité) ;
- export des partitions en PDF ou image.

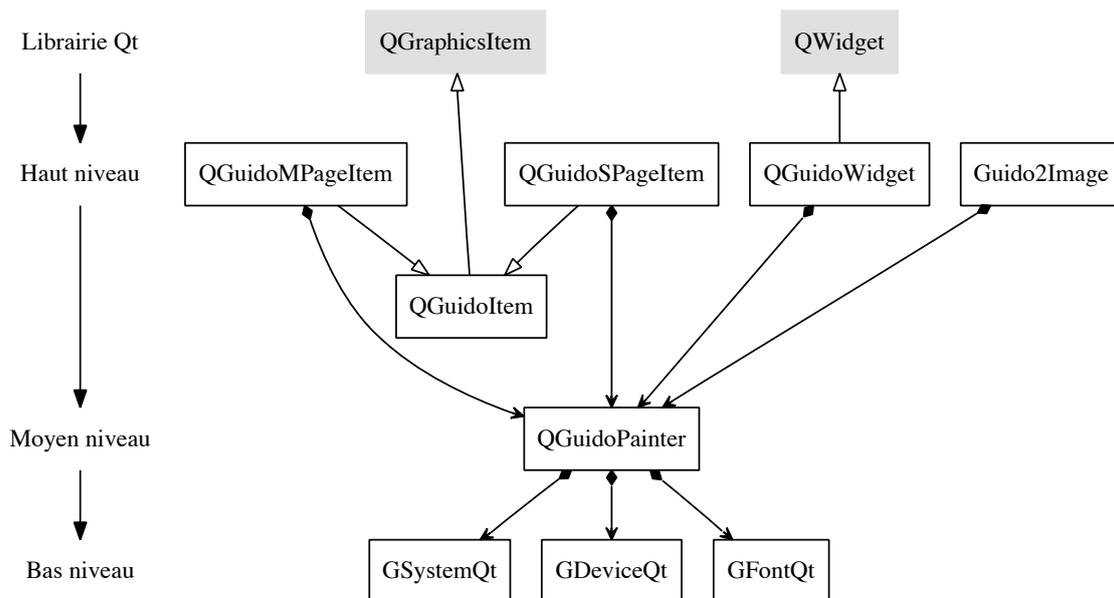


Figure 5. Diagramme des classes GuidoQt



Figure 6. La palette d'aide GUIDO

5.2.2. Un gestionnaire de scènes graphiques

Le GUIDO *Scene Composer* permet de composer des scènes graphiques comportant plusieurs partitions :

- bougez, redimensionnez, copiez/collez les partitions, pour créer une scène graphique musicale complexe,
- importez des images (de différents formats) pour enrichir la scène,
- ajoutez des annotations textuelles,
- exportez la scène en PDF ou en image.

6. CONCLUSIONS

Basée sur le format GUIDO *Music Notation*, la GUIDOLib est une bibliothèque multi-plateformes unique en son genre, permettant d'embarquer des services de rendu de partition dans une application. Son récent support de la très populaire bibliothèque Qt la rend simple d'accès à un

grand nombre de développeurs.

Dans le futur, nous souhaiterions étendre les possibilités graphiques du GUIDO *Scene Composer*, en y ajoutant d'autres outils de dessin ; il deviendrait alors un outil intéressant pour l'écriture de certains types de partitions, notamment en musique contemporaine. Le support d'autres formats de partitions en import/export fait aussi partie de nos objectifs.

Pour finir, nous pensons ajouter des outils pour assembler ou décomposer les partitions, par exemple les mettre en séquence ou en parallèle, supprimer le début ou la fin, supprimer des voix, transposer, contraindre en durée, et ce en utilisant une approche homogène, où à la fois les arguments et le résultat d'une opération sont des partitions.

Le projet GUIDOLib est disponible sur Sourceforge à l'adresse <http://guidolib.sourceforge.net>.

7. REFERENCES

- [1] Assayag G. and D. Timis. A ToolBox for Music Notation. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pages 173–178, 1986.
- [2] Bill Schottstaedt. Common Music Notation. In Selfridge-Field E., editor, *Beyond MIDI, The handbook of Musical Codes.*, pages 217–222. MIT Press, 1997.
- [3] Mika Kuuskankare and Michael Laurson. ENP - Music Notation Library based on Common Lisp and CLOS. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pages 131–134. ICMA, 2001.
- [4] Han-Wen Nienhuys and Jan Nieuwenhuizen. LilyPond, a system for automated music engraving. In

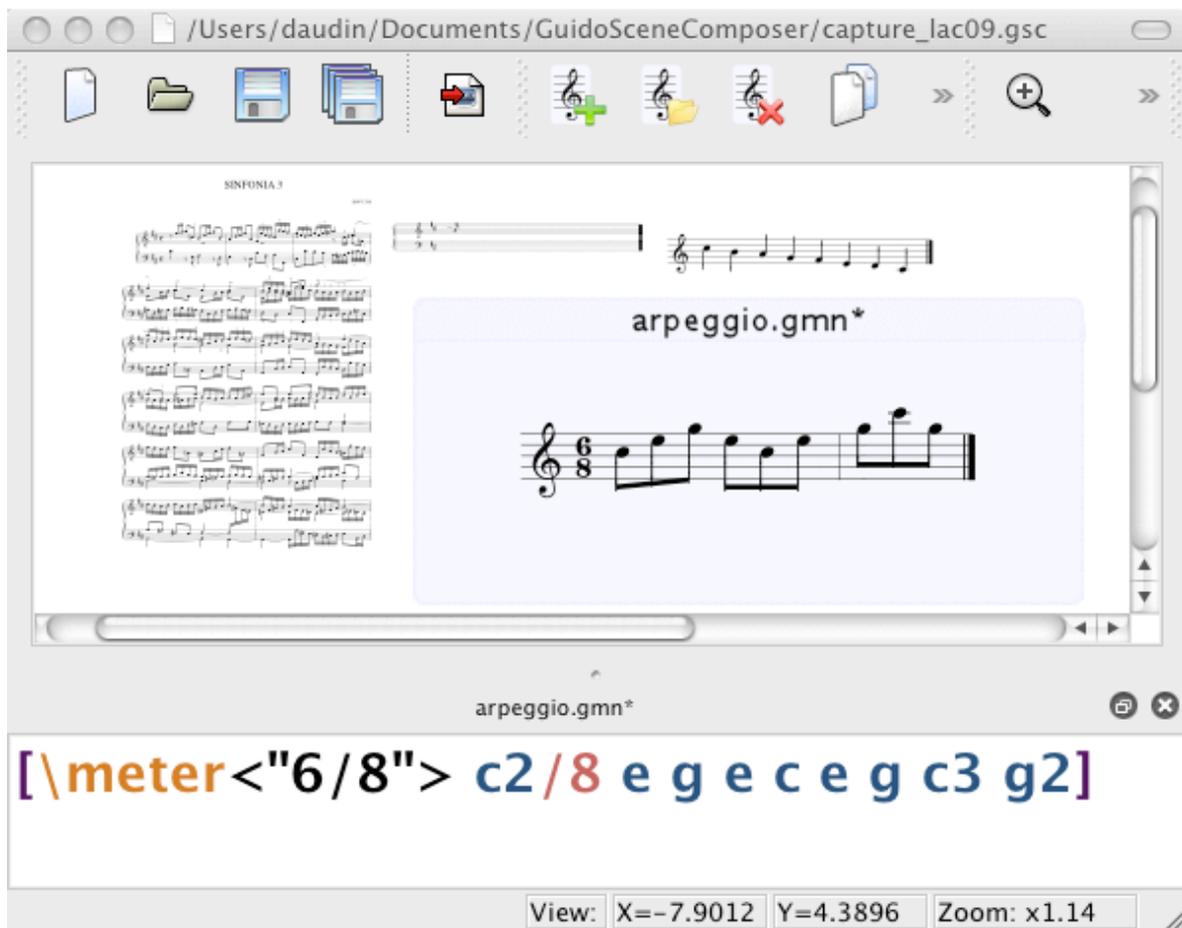


Figure 7. Le GUIDO Scene Composer

Proceedings of the XIV Colloquium on Musical Informatics (XIV CIM 2003), May 2003.

- [5] Hoos H., Hamel K. A., Renz K., and Kilian J. The GUIDO Music Notation Format - a Novel Approach for Adequately Representing Score-level Music. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pages 451–454. ICMA, 1998.
- [6] H. H. Hoos and K. A. Hamel. The GUIDO Music Notation Format Specification - version 1.0, part 1 : Basic GUIDO. Technical report TI 20/97, Technische Universität Darmstadt, 1997.
- [7] Kai Renz. *Algorithms and Data Structures for a Music Notation System based on GUIDO Music Notation*. PhD thesis, Technischen Universität Darmstadt, 2002.
- [8] Jasmin Blanchette and Mark Summerfield. *C++ GUI Programming with Qt 4 (2nd Edition)*. Prentice Hall, 2008.

CALLIMUSIC, UN SYSTEME DE SAISIE DE PARTITION PAR INTERACTION ORIENTEE STYLET

Bruno Bossis

Université Rennes 2
Université Paris-Sorbonne Paris IV
bruno.bossis@uhb.fr

Sébastien Macé

IRISA – INSA de Rennes
sebastien.mace@irisa.fr

Eric Anquetil

IRISA – INSA de Rennes
eric.anquetil@irisa.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente une saisie de partition basée sur l'interaction stylet-surface. Le principe général est d'éditer la partition en utilisant les mêmes gestes qu'avec un crayon sur une feuille de papier. Ainsi, le musicien ne modifie pas ses habitudes et peut se consacrer à la musique. Pendant l'édition, chaque tracé sur l'écran tactile ou la tablette graphique est reconnu par le système et remplacé instantanément par le symbole correspondant. De nombreux symboles sont déjà reconnus et les règles de disposition sur une portée respectées.

Le dispositif repose sur une nouvelle façon de reconnaître les symboles musicaux basée sur une connaissance *a priori* des gestes d'écriture. Des cadres sont indiqués sur l'écran de façon à limiter le nombre de symboles à différencier à un instant donné. Les musiciens participant à l'élaboration du dispositif ont permis de développer une interaction naturelle. Des applications pour les compositeurs, les pédagogues et les dépositaires de droits d'auteurs sont envisagées. Le domaine des jeux musicaux est également exploré. De plus, Callimusic est maintenant capable de produire le son correspondant à la note reconnue.

1. INTRODUCTION

De plus en plus d'écrans tactiles sont utilisés dans le monde de la communication. Leurs caractéristiques sont pleinement adaptées à des fonctions et à des gestes simples lorsqu'ils sont utilisés directement avec les doigts. Par contre, la réalisation de tracés précis et complexes exige une surface de contact plus réduite que le doigt. Le stylet demeure donc indispensable pour envisager l'écriture musicale. La surface de contact peut aussi bien être une tablette graphique qu'un écran tactile. Dans le premier cas, si la tablette ne fait pas office d'écran, la représentation de la portée et du résultat de la saisie doit être déportée sur un écran. Le *tablet PC* permet de disposer à la fois de la surface sensible, de l'écran et de l'ordinateur. Des applications sont envisagées pour les smartphones.

Les recherches développées depuis quelques années autour de l'interaction intuitive avec le doigt ou avec un stylet ont été souvent dirigées vers l'écriture de texte, le

dessin ou le contrôle de fonctions logicielles. Callimusic est l'un des premiers projets avancés concernant l'écriture de la musique. L'intérêt est multiple. La saisie de partition ne concerne en effet pas seulement les professionnels de l'édition, mais également les musiciens désirant créer un arrangement orchestral en jazz ou en musique populaire. Les pédagogues en école de musique, conservatoire ou établissement d'enseignement secondaire apprennent à leurs élèves comment écrire la musique et utilisent l'édition sur portées musicales pour de nombreux exercices. Enfin, des produits musicaux ludiques, matériels ou logiciels, abordent la représentation musicale. Tous ces domaines offrent des possibilités d'applications concrètes pour des systèmes dérivés de Callimusic.



Figure 1. Callimusic

La réelle avancée de Callimusic provient d'un développement des travaux fondamentaux de l'équipe IMADOC¹ de l'IRISA de Rennes. Les chercheurs d'IMADOC sont spécialisés dans la reconnaissance automatique de documents manuscrits et dans l'interaction basée sur les stylets. L'expertise en musique et musicologie du laboratoire MIAC² de l'université Rennes 2 [9] a permis de progresser plus rapidement vers des solutions directement exploitables par les musiciens.

La première présentation de ces recherches à l'ICMC 2005 [6] a précédé l'appellation Callimusic proposée au sein de la société Evodia, start-up fondée par des chercheurs de l'IRISA [4] de Rennes afin de valoriser les travaux de l'équipe IMADOC [3]. Un chapitre du livre *Intelligent Music Information Systems: Tools and*

¹ IMAge et DOCument.

² Musique et Image : Analyse et Création.

Methodologies [5] a été entièrement consacré au projet qui a été amélioré depuis, notamment vers une interaction plus intuitive encore en incluant une réponse sonore du système. Le formalisme de description des règles de tracés est également en cours de révision.

L'approche du dispositif d'un point de vue de l'utilisateur musicien et de celui du concepteur, permet ainsi de comprendre son fonctionnement et l'intérêt qu'il suscite. L'utilisateur dessine des traits sur la surface tactile à l'aide d'un stylet. Le logiciel traduit au fur et à mesure chaque trait par le symbole musical correspondant. Le choix s'est porté sur une réponse immédiate, symbole par symbole, de façon à ce que le musicien puisse écrire de manière naturelle et corriger éventuellement ses erreurs ou les erreurs d'interprétation du système de reconnaissance.

Après avoir décrit le fonctionnement du prototype, nous présenterons le processus de reconnaissance automatique des formes dessinées. La dernière partie de cet article sera consacrée aux applications pratiques vers différentes formes de notation musicale ainsi que dans plusieurs domaines utilisant peu ou prou l'écriture de la musique.

2. FONCTIONNEMENT DE CALLIMUSIC

2.1. Le principe général

La difficulté principale du développement de Callimusic a été la reconnaissance des traits manuscrits en temps réel. Une partition musicale contient en effet un très grand nombre de symboles dont la position précise est signifiante. Ces symboles sont aussi bien spécifiques à une tradition d'écriture de la musique que des lettres ou des chiffres. Certains sont très peu différents, mais leur confusion entraînerait des fautes manifestes dans la musique interprétée à partir de la partition. De façon à réduire les erreurs de reconnaissance, des contraintes ont été imposées à l'utilisateur, dont la principale est d'écrire dans des cadres proposés par le système en fonction du contexte. Ainsi, le nombre de symboles à différencier est réduit.

Les tentatives précédentes utilisaient un répertoire de tracés différents de ceux utilisés habituellement par les musiciens. L'avantage était une reconnaissance plus sûre, mais entraînait un apprentissage fastidieux par l'utilisateur. Souvent, pour simplifier encore le logiciel, chaque symbole était associé à un seul trait, alors que l'écriture d'un symbole musical fait souvent appel à plusieurs traits. Le système de Ng *et al.*, appelé *Presto* [8], utilise ainsi uniquement des éléments reconnus à partir d'un seul trait. Celui de Forsberg *et al.*, *The Music Notepad* [1] utilise, en complément des gestes produits par le stylet, des éléments disposés dans les menus. Seul, le système de Miyao *et al.* [7] propose une saisie plus naturelle basée notamment sur des *items* à plusieurs traits.

Dans Callimusic, un grand nombre de figures musicales sont implémentées, dont les points de

prolongation, les lignes supplémentaires, les altérations accidentelles, les barres de mesure et les indications de dynamique. Il n'est jamais nécessaire de valider, ce qui rend l'écriture beaucoup plus naturelle. Chaque fois qu'un trait est terminé et le stylet relevé, le symbole remplace l'ébauche sur l'écran.³

Il est possible de tracer grossièrement cinq lignes parallèles afin d'obtenir une portée, puis de dessiner la clé et d'écrire l'indication de mesure et les altérations présentes à la clé. Bien entendu, les fonctions d'édition comme l'annulation de la dernière action, le zoom ou le déplacement d'un symbole sont implémentées. Pour cette dernière fonction, la sélection se fait en entourant librement l'objet avec le stylet.

2.2. Quelques exemples du processus d'édition

L'utilisateur est aidé dans sa démarche d'écriture par l'apparition de petits cadres donnés par le contexte, c'est-à-dire la prise en compte des précédents symboles dessinés. Par exemple, une fois une clé dessinée et reconnue, deux cadres apparaissent à sa droite, laissant le choix entre un premier dièse à la hauteur du *Fa* ou un premier bémol à la hauteur du *Si*. Ensuite, le cadre destiné à la seconde altération surgit au bon endroit, dans l'ordre des quintes ascendantes pour les dièses et des quintes descendantes pour les bémols.



Figure 2. Processus progressif d'écriture

Par ailleurs, lorsque le musicien vient d'écrire la tête et la hampe d'une note, les cadres en pointillés correspondant à une altération accidentelle, un point de prolongation, un accent et une nuance apparaissent autour de la note. Il est également possible, dans un mode « expert », de n'afficher aucun cadre d'édition, rendant l'édition plus proche d'une situation naturelle sur une feuille de papier à musique. Bien entendu, les cadres existent, même s'ils n'apparaissent pas.

3. PROCESSUS DE RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DES FORMES DESSINEES

3.1. Compromis

La pertinence d'un tel système d'interaction naturelle homme-machine par un stylet est fonction de la qualité de la reconnaissance de chaque tracé. Plus les tracés sont similaires, et plus la reconnaissance s'avère difficile. La solution peut consister en une modification des habitudes du scripteur, mais l'intérêt du système est atténué par l'apprentissage nécessaire par l'utilisateur. Une meilleure solution est un compromis incluant une reconnaissance contextuelle décrite précédemment et une légère simplification de certains gestes habituels

³ Il est également possible de modifier le processus d'affichage dans des préférences.

aux musiciens. Par exemple, il était inutile de conserver tous les tracés correspondant à un bémol. Notre système se contente d'un tracé pour reconnaître cette altération. Il faut également remarquer que l'écriture manuscrite de la musique reste soumise à des variations individuelles parmi les musiciens. Il serait donc impossible de définir une seule sorte de tracé manuel pour chaque symbole devant être reconnu.

3.2. Relation entre contexte et reconnaissance

Une partition musicale est un document à très haut niveau de structuration. L'emplacement de chaque symbole est signifiant. L'information est donc contenue aussi bien dans la forme de la figure que dans sa localisation relative par rapport aux autres symboles. Ainsi, un élément très proche de la gauche d'une tête de note sera probablement une altération accidentelle. Le choix est donc limité au dièse, au double dièse, au bémol, au double bémol et au bémol.

L'équipe IMADOC, spécialiste de la recherche sur la reconnaissance automatique appliquée à des documents manuscrits, a défini une méthode générique pour l'interprétation de documents manuscrits respectant un certain niveau de structuration. Cette méthode se base sur le couplage d'informations de nature contextuelle (l'emplacement auquel les traits sont dessinés permet de délimiter un sous-ensemble de symboles potentiels) avec des informations de reconnaissance (on regarde parmi ce sous-ensemble lequel est le symbole valide). Elle a appliqué cette expertise au cas de la partition musicale. La première étape du processus consiste dans la formalisation de la structure connue.

3.3. Formalisation des connaissances

L'architecture du système repose sur trois types de composants : les composants génériques applicables quel que soit le domaine considéré, les composants propres à la notation musicale et un formalisme.

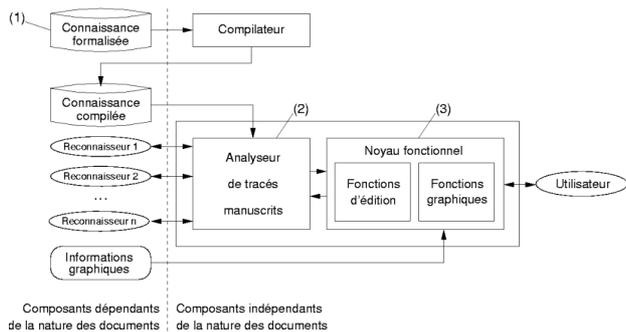


Figure 3. Architecture du système

Ce formalisme permet d'écrire les règles d'interprétation comme la structure graphique du document et de ses éléments, leurs positions relatives et l'ordre chronologique dans lequel ils sont attendus. Ce formalisme n'est pas propre au domaine de la notation musicale. Pour obtenir ce résultat, l'équipe IMADOC a défini quatre concepts de base qui sont : la modélisation de la chronologie de création des éléments dans un

document, la représentation de la structure spatiale, la connaissance de contraintes contextuelles pour chaque élément et une interaction homme-machine basée sur la manipulation d'un stylet.

Les composants génériques comprennent un analyseur de documents manuscrits structurés, un système de fonctions d'édition et son équivalent pour les fonctions graphiques. Il exploite les connaissances modélisées par le formalisme.

Enfin, les composants propres au domaine comprennent les règles d'interprétation, le système de reconnaissance d'objets spécifiques et des informations graphiques.

L'interprétation d'un document structuré à partir d'un tel formalisme est basée sur des règles qui définissent la génération d'un élément. Une règle modélise les constituants d'un symbole ainsi que la forme et l'agencement que ces constituants doivent respecter pour constituer effectivement ce symbole. Un même symbole peut être modélisé à l'aide de plusieurs règles, décrivant ainsi plusieurs façons de le dessiner. Chaque règle possède un certain nombre de paramètres qui constituent le symbole, par exemple un nouveau trait ou un élément déjà interprété. Ainsi, une noire est dessinée avec un seul trait et l'altération qui le précède est dessinée avec deux traits horizontaux et deux traits verticaux :



Figure 4. Tracé d'une noire puis d'un dièse

Les règles correspondantes peuvent alors être :

FilledNoteHead (Stroke s) ...

Sharp (horizontalSeg hs1 , horizontalSeg hs2 , verticalSeg hs1 , verticalSeg hs2) ...

La forme générique d'une règle respecte toujours la structure suivante :

SymbolName (Parameter 1 , ... , Parameter n)

Document Context Verification block (DCV).

Shape Context Verification block (SCV).

Shape Recognition block (SR).

Document Context Creation block (DCC).

Les blocs DCV et DCC offrent une vision globale du document de façon à définir le contexte dans lequel chaque élément doit être localisé.

Le bloc DCV spécifie les contextes dans lesquels le symbole créé par la règle peut être présent (par exemple, un dièse peut être dessiné à gauche d'une tête de note).

Le bloc DCC indique les contextes qui seront générés après la création du nouvel élément (par

exemple, une tête de note venant d'être créée autorise le dessin d'une altération à sa gauche, d'un point de prolongation à sa droite, et d'une hampe montante ou descendante).

Les blocs SCV et SR permettent, dans un contexte donné, une vision locale de l'élément à reconnaître.

Le bloc SCV formalise les contraintes locales (par exemple la nécessité d'avoir quatre traits se croisant pour un dièse).

Le bloc SR correspond à l'identification de forme (la famille de symboles, par exemple celle des altérations).

L'ensemble du formalisme repose sur la définition de contextes structurels qui modèlent, d'une part des lieux spécifiques dans le document, et d'autre part quels éléments sont susceptibles ou doivent obligatoirement exister dans chacun de ces emplacements.

Ainsi, une altération située est reconnue avec deux traits horizontaux et deux traits verticaux localisés à gauche d'une tête de note. Le bloc DCV s'écrira donc [5] :

DCV : $Head \rightarrow head[left,all]hs1,$
 $head[left,all]hs2,$
 $head[left,all]vs1,$
 $head[left,all]vs2.$

3.4. Les cadres d'édition

Les cadres structurels en pointillés qui apparaissent sur l'écran dépendent de l'interprétation de toutes les règles énoncées dans le formalisme.

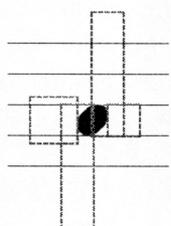


Figure 5. Cadres d'édition autour d'une tête de note

Une fois un tracé élaboré dans un cadre, le programme repère de quel cadre il s'agit puis autorise un certain nombre de symboles possibles. Le repérage du cadre dans lequel un trait est dessiné tolère un débordement de celui-ci. Cette analyse structurelle est progressive. Elle construit la partition en limitant à chaque fois le nombre de possibilités pour la reconnaissance des gestes d'écriture. La superposition de plusieurs cadres est également prévue par l'attribution d'un numéro à chaque couche.

Ainsi, chaque cadre apparaissant sur la partition est associé à un certain nombre de systèmes de reconnaissance, spécifiquement prévu pour reconnaître les symboles attendus dans ce cadre d'édition. Comme le nombre de symboles possible dans un cadre donné est

limité par l'analyse structurelle progressive, la qualité de la reconnaissance est meilleure et le dispositif est moins sensible aux variations individuelles des tracés des utilisateurs. Une fois la reconnaissance couronnée de succès, la trace manuscrite est remplacée par le symbole provenant d'une police de caractères spécialisée dans les symboles musicaux. Un grand nombre de ces polices sont disponibles gratuitement ou non.

4. APPLICATIONS PRATIQUES

4.1. Différentes formes de notation musicale

Le premier système de notation musicale qui a servi de base à notre recherche a été celui de la musique tonale mesurée classique sur portées de cinq lignes. Bien entendu, ce système de notation n'est pas le seul existant parmi les musiciens pour conserver et transmettre la musique à l'aide d'une écriture symbolique. Il est aisé d'en repérer d'autres comme les tablatures pour les instruments à cordes pincées (guitares...), les neumes du plain-chant et la notation utilisée pour les percussions. Le principe du formalisme développé pour Callimusic n'est pas seulement puissant pas sa souplesse et son efficacité dans le cadre du système de notation classique. Il permet également de s'adapter à tout système, simplement en redéfinissant un ensemble de règles appropriées. Environ 80 règles ont été définies pour la notation classique. La durée de l'analyse structurelle entre le moment où l'utilisateur termine un tracé en relevant son stylet et celui où le symbole issu de la police de caractères apparaît sur l'écran est actuellement d'environ 400 ms. Le fonctionnement est donc suffisamment rapide pour être considéré par les musiciens comme efficace. Il est de plus adaptable en modifiant les règles.

Des essais ont été menés pour saisir du plain-chant sur des portées de quatre lignes. Les règles du formalisme doivent alors permettre la reconnaissance des neumes, c'est-à-dire de courtes figures ornementales ou mélodiques exécutées sans respiration. La diversité des notations de plain-chant est remarquable. La notation de l'Ecole de Notre-Dame est basée sur un système rythmique de type modal. Au contraire, d'autres notations plus récentes adoptent une relation directe entre la figure isolée et la durée du son correspondant. Un formalisme tel que celui de Callimusic est aisément modifiable et permet donc une adaptation à chaque type précis de notation musicale. Les recherches ont abouti à la définition des règles correspondant aux figures suivantes : *punctum*, *pes*, *clivis* et *scandicus*. Une vingtaine de règles suffisent à modéliser l'ensemble de la saisie de ce type de notation.

Les tablatures utilisées pour les instruments frottés à cordes pincées comme les guitares représentent, non pas ce qui doit être entendu, mais comment la note doit être jouée. Elle indique donc la position des doigts sur les cordes. Les tablatures pour orgue induisent le même type de raisonnement en ce qui concerne la mise au point d'un système de saisie de partition. Les règles

élaborées dans ce prototype encore basique modélisent un certain nombre de principes :

- à la gauche de chaque ligne est indiquée la hauteur d'accord de la corde à vide ;

- les nombres représentés sur les cordes correspondent à la frette sur laquelle la corde doit être pressée ;

- les durées sont représentées selon le système classique ;

- quelques symboles indiquent le mode de jeu à utiliser (par exemple, « H » représente un son harmonique).

Les tablatures pour percussion sont très proches des précédentes dans leur principe. La métaphore graphique est toujours la représentation de la constitution physique de l'instrument et de la position des doigts de l'instrumentiste. Il est donc aisé de dériver les règles de description d'une notation par tablatures d'un autre système de tablatures.

4.2. Domaines d'application

Une mise en page sophistiquée au niveau des systèmes et des pages n'est pas étudiée par l'équipe de chercheurs associés à ce projet. En effet, les logiciels éditeurs professionnels comme Finale ou Sibelius accomplissent parfaitement ces tâches. L'intérêt de l'écriture naturelle de la musique réside plus dans la saisie des symboles que dans l'élaboration de l'ensemble de la mise en page. Nous envisageons l'intégration de Callimusic comme une nouvelle forme d'entrée de la musique. Par exemple, Finale propose une entrée par les outils *Simple Entry*, *Speedy Entry*, *HyperScribe*, par une entrée sonore ou par un scan d'une partition. Un plug-in Callimusic pourrait autoriser un nouveau mode d'entrée des symboles par saisie manuscrite directe. La puissance de notre système serait ainsi associée à celle de la mise en page de Finale, de Sibelius ou de tout autre logiciel sophistiqué d'édition. Les compositeurs et les arrangeurs éviteraient ainsi une recopie fastidieuse sur un logiciel professionnel d'édition musicale. Ils seraient également à même de noter à la volée leurs idées musicales et de les gérer sous la forme de fichiers ou de les classer à l'intérieur d'une base de données affichant toutes les idées, à la manière des logiciels de sauvegarde, de visualisation et de classement de photographies ou de chansons.

La pédagogie représente un second domaine d'application envisagé pour Callimusic. En effet, un professeur de musique dans l'enseignement secondaire pourrait valoriser le résultat graphique de ses élèves dans leurs tentatives de noter la musique. Le résultat visuel et l'audition directe de la note écrite dynamiseraient un apprentissage souvent difficile de la notation musicale. Un système de saisie manuscrite à reconnaissance automatique susciterait également une réflexion, par les erreurs, les tâtonnements et les succès de chacun, de découvrir de manière vivante et de s'interroger sur le principe de la notation classique. En conservatoire ou en université, les cours de formation de

l'oreille (l'enseignement du « solfège ») pourrait être prolongés par des séances individuelles d'entraînement avec un ordinateur intégrant des exercices auditifs comme des dictées mélodique, rythmique, harmonique ou « à trous ». Les exercices d'harmonisation, d'arrangement et d'orchestration sont également concernés. La saisie manuscrite par l'élève renouvellera la saisie sur clavier d'ordinateur ou de piano et semblera plus naturelle, surtout pour les non pianistes.

Le marché ludo-éducatif est également concerné. Un système comme Callimusic, très simplifié et intégré à des jouets éducatifs conçus par des spécialistes de ce domaine pourrait ouvrir de nouvelles pistes dans le premier contact avec la notation musicale dès le plus jeune âge. Les aspects visuels, sonores et gestuels sont en effet combinés dans notre système, comme dans beaucoup d'activités ludo-éducatives. La démocratisation des interfaces à écran tactile rend ces applications envisageables.

Des applications en ligne utilisant à distance la partie logicielle installée sur un serveur pourrait permettre d'enrichir les sites ludo-pédagogiques. Les smartphones serviraient alors d'interfaces tactiles et la comparaison entre les joueurs deviendrait possible. Ce type d'applications dans d'autres domaines que la notation musicale est souvent pris en charge aussi bien par des sites associatifs ou commerciaux.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce projet est de combler un manque évident d'applications établissant un lien entre la saisie manuscrite de la musique et l'édition imprimée. La combinaison des interfaces tactiles et des recherches fondamentales en direction de la reconnaissance automatique de l'écriture dans des documents structurés a permis d'envisager un système renouvelant la manipulation de la notation d'un langage hautement symbolique et structuré : la musique. Nous avons présenté les principes généraux de Callimusic, ses possibilités, l'état d'avancement des recherches menées conjointement entre musiciens et informaticiens, et les domaines d'application envisagés.

La caractéristique principale du système est d'autoriser une saisie avec une interprétation immédiate des actions en tenant compte du contexte dans lequel elles ont été menées. Chaque trait est interprété en fonction des éléments précédemment reconnus et de sa position relative. L'ensemble obéit à des règles et constitue un formalisme adaptable. Ainsi, le système est améliorable et applicable à des procédés de notation musicale aussi différents que la notation classique, les neumes du plain-chant ou les tablatures.

Les prototypes déjà développés sont encore de l'ordre de la démonstration. Les progrès qui seront réalisés dans les années qui viennent les rendront plus facilement utilisables dans le monde économique. Les symboles et les règles seront plus nombreux à être implémentés.

L'ouverture du système à différents formats de sauvegarde comme ceux issus du XML sera également étudiée. Une autre piste très différente concerne l'apprentissage dans un réseau neuronal, comme l'a montré S. George dans son article « Online pen-based recognition of music notation with artificial neural networks » [2] en 2003.

Les développements futurs devront permettre à un public très large d'avoir accès à ce type de solution. Les avancées technologiques et la baisse des coûts inciteront les acteurs de différents domaines à étudier les possibilités innovantes offertes par la reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite de la musique. Ecrire de la musique ou améliorer différentes compétences musicales de manière intuitive reste l'un des objectifs de nos recherches.

6. REFERENCES

- [1] Forsberg, M. D., Zelesnik, R. "The Musical Notepad", ACM Symposium on User Interface Software & Technology, 1998, pp. 203-210.
- [2] George, S. "Online pen-based recognition of music notation with artificial neural networks", Computer Music Journal, 27(2), 2003, pp. 70-79.
- [3] IMADOC, site web : <http://www.irisa.fr/imadoc>
- [4] IRISA, site web : <http://www.irisa.fr>
- [5] Macé, S., Anquetil, E., Bossis, B. "Pen-Based Musical Score Editors", *Intelligent Music Information Systems: Tools and Methodologies*, Jialie Shen, John Shepherd, Bin Cui, Ling Liu (ed.), Hershey-New York (USA), Information Science Reference, 2008, pp. 258-281.
- [6] Macé, S., Anquetil, E., Bossis, B., Garrivier, E. "A Pen-based Musical Score Editor using structural Information", *ICMC05 Proceedings, International Computer Music Conference*, Barcelone, 2005, p. 415-418.
- [7] Miyao, H., Maruyama, M., "An Online Handwritten Music Score Recognition System", *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, 2004, vol.1, pp. 461-464.
- [8] Ng, E., Bell, T., Cockburn, A. "Improvements to a Pen-Based Musical Input System", *Proceedings of the 8th Australian Conference on Computer Human Interaction*, 1998, pp. 178-185.
- [9] Université Rennes 2, site web : <http://www.uhb.fr>

LE LOGICIEL MUSIC V, TECHNOLOGIE D'ECRITURE MUSICALE : RAPPELS HISTORIQUES ET ELEMENTS D'ANALYSE

Anne Veitl

Observatoire Tscimuse-Grenoble

anne.veitl@wanadoo.fr

RESUME

Cet article porte sur le logiciel Music V, disponible à partir de 1967. Il analyse dans quelle mesure il ne s'agit pas seulement d'un logiciel de synthèse des sons, mais plus globalement d'une technologie de composition musicale. Plus précisément, tel qu'il a été conçu par Max V. Mathews et utilisé par le pionnier Jean-Claude Risset, ce logiciel peut être considéré comme un système d'écriture. Il réunit en effet les grandes caractéristiques d'un système de notation écrite. A la fin des années 1960, il a permis d'opérer un net élargissement des dimensions sonores et musicales pouvant relever d'une écriture, principalement grâce aux travaux scientifiques et aux compositions de Jean-Claude Risset.

1. INTRODUCTION : LE LOGICIEL MUSIC V DANS L'HISTOIRE DES OUTILS INFORMATIQUES DE COMPOSITION MUSICALE

Music V est la cinquième version, disponible à partir de 1967, d'un langage informatique dont l'élaboration a commencé en 1956, en vue de générer et d'entendre des sons et de la musique avec le seul recours à un ordinateur et des technologies électro-acoustiques, sans interprétation par des instrumentistes humains. Il a été conçu aux USA, sous la responsabilité de Max V. Mathews, dans le site de Murray Hill (Etat du New Jersey) des Bell Telephone Laboratories (dénommés lapidairement Bell Labs), un ensemble de laboratoires de recherche industriels fondé en 1925 dans le secteur des télécommunications alors en formation.

La toute première version de Music permet de produire en mai 1957 une courte mélodie de notes de musique dont il ne fut possible de contrôler que la hauteur et la durée. Mais l'objectif de Max V. Mathews fut très vite de disposer d'un outil technologique permettant d'avoir aussi une maîtrise du timbre des notes. Dès 1959, avec la troisième version de Music, qui marqua un net changement dans la conception du logiciel, un nombre beaucoup plus élevé de variables

devinrent maîtrisables ; l'ordinateur était désormais utilisable comme un moyen pour générer non seulement une grande variété de notes de musique, mais plus généralement de sons. Conçue selon les mêmes grands principes que Music III, la cinquième version du logiciel, langage informatique dit de haut niveau, constitua un aboutissement dans les recherches technologiques commencées une dizaine d'années plus tôt [5].

Parmi les différents types d'outils informatiques élaborés à partir des années 1950 dans le but de composer de la musique, la suite Music est généralement considérée comme représentative des technologies de production de sons, de « synthèse numérique des sons », selon l'expression alors apparue¹. Elle est opposée à l'ensemble des outils d'aide à l'écriture de partitions de notes de musique. Le souci de Max V. Mathews fut effectivement de tenter de transformer l'ordinateur en un instrument de musique [4]. Pour autant, de par sa conception et par les usages que des compositeurs en ont fait, les logiciels de la famille Music, et notamment Music V, constituent des outils qui ne peuvent être réduits à de nouvelles lutheries musicales ou, à tout le moins, à des technologies de synthèse sonore.

La vision dualiste des grands types d'outils d'aide à la composition a été importante et motrice pour les acteurs historiques de ces nouveaux domaines d'activité [14, 17] ; mais, plus de cinquante ans après, il s'agit désormais d'étudier et de comprendre dans quelle mesure un logiciel comme Music V constitue plus globalement une technologie de composition musicale et, plus précisément, une technologie d'écriture musicale.

Les dispositifs technologiques qui permettent d'écrire, au sens fort et strict², de la musique, ceci dans une perspective créative, doivent réunir et combiner plusieurs critères. Le rappel de ces conditions nécessaires est une première étape pour prendre la mesure des changements apportés par le logiciel Music V à la fin des années 1960, notamment tel que l'a utilisé le pionnier Jean-Claude Risset (point 2). Dans un second temps, il s'agira de présenter les nouvelles

¹ Traduction de la formule *digital sound synthesis*.

² C'est-à-dire de noter avec un « système de signes à caractère duratif ayant un support visuel et spatial » [3, p. 301].

possibilités ouvertes par ce logiciel, avec un net élargissement des dimensions pouvant relever d'une écriture musicale (point 3).

2. MUSIC V, UN SYSTEME D'ECRITURE A PART ENTIERE

2.1. Le rôle historique de Jean-Claude Risset

Chercheur scientifique français en mission et compositeur en résidence aux Bell Labs en 1964-1965, puis de 1967 à 1969, Jean-Claude Risset a contribué à la mise au point de la cinquième version du logiciel Music. Son rôle dépassa la simple collaboration avec l'équipe de Max V. Mathews. Par ses travaux scientifiques et par ses compositions musicales, il a été le premier à explorer et à utiliser les potentialités du logiciel Music V [18].

A la suite de son étude, menée en 1964-1965, sur l'analyse et la synthèse numériques de sons de trompette [6, 7, 8, 9], Jean-Claude Risset a réalisé deux œuvres, puis un document. Il a synthétisé l'ensemble des sons utilisés dans *Computer Suite from Little Boy* (1968) et dans *Mutations* (1969), pièces entièrement numériques. Il a ensuite rassemblé la documentation nécessaire à la (re)production de ces principaux sons dans un « catalogue », ainsi que leur enregistrement [10]. Par là, Jean-Claude Risset n'a pas simplement réussi à imiter des sons instrumentaux et à générer des sons inouïs, puis à communiquer les connaissances indispensables à la production de quelques secondes de ces sons ; il a aussi utilisé le logiciel Music V comme un moyen d'écriture tant de mélodies que de développements sonores et musicaux au cours desquels se produisent plusieurs transformations successives.

Autrement dit, Jean-Claude Risset a utilisé Music V pour effectuer par des notations écrites ce qui caractérise l'activité de composition musicale : structurer des événements sonores qui adviennent, durent et cessent, et plus généralement composer des transformations temporelles incessantes. Il n'a pas synthétisé, enregistré, puis assemblé, par un montage, de courts sons ; il a écrit et structuré des passages sonores et musicaux. A la fin des années 1960, la mémoire limitée des ordinateurs ne permettait cependant pas de composer l'ensemble d'une pièce de plusieurs minutes, quand bien même le logiciel Music V, de par sa conception, rendait cela aussi possible. Jean-Claude Risset a dû in fine monter et mixer, manuellement, sur une bande magnétique, les différents développements sonores et musicaux réalisés pour les pièces *Computer Suite* et *Mutations*.

Issues du travail de composition de ces deux pièces, les données rassemblées dans le « catalogue de sons numériques » confectionné en 1969 par Jean-Claude Risset sont de deux sortes. Outre un texte introductif, il s'agit d'un court programme informatique, sous forme de lignes alphanumériques, et d'un diagramme. Comme le montre l'exemple extrait du catalogue (figures 1 et 2, ci-contre), le numéro 550, sont ainsi visibles et lisibles les principales connaissances nécessaires à la production

numérique de ce passage qui consiste en la production de plusieurs notes, de leur transformation en un accord, puis de leur fusion en un timbre. Cette *visibilité* et cette *lisibilité* sont des aspects importants du logiciel Music V en tant que technologie d'écriture, mais ce sont pas les seuls.

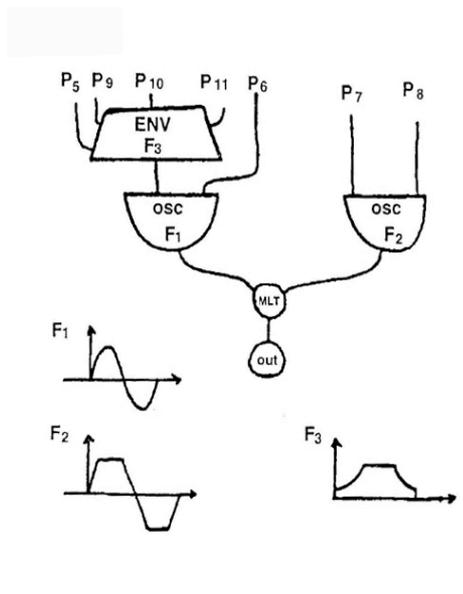


Figure 1
Exemple n° 550 : le diagramme représentant l'assemblage des modules simulés

```
COMMENT:-----JCR550-----;
COMMENT : PROLONGATION OF HARMONY INTO TIMBRE;
INS 0 1; ENV P5 F3 B3 P9 P10 P11 P30;OSC B3 P6 B3 F1 P29;
OSC P7 P8 B4 P28;MLT B3 B4 B3;OUT B3 B1;END;
INS 0 2;OSC P5 P7 B3 F4 P30;OSC B3 P6 B3 F1 P29;OUT B3
B1;END;
COMMENT:TO SET GENERAL CONVT;
SV2 0 10 3 6 8 109;
SV2 0 20 2 6 -7;
GEN 0 2 1 1 1;
GEN 0 3 2 0 10 10 10 10 0 -10 -10 -10 -10 -10 0;
GEN 0 6 3 10 .99 .99 10;
GEN 0 7 4 -9;
NOT .5 1 .6 18 424 18 1000 0.1 0 .6;
NOT .6 1 .6 18 727 18 1000 .01 0 .6;
NOT .9 1 3.6 18 424 18 1000 .01 0 .6;
NOT .9 1 .6 18 1542 18 2000 .01 0 .6;
NOT 1 1 3.5 18 727 1000 3.2 0 1 .2;
NOT 1.1 1 .6 18 1136 18 2000 .01 0 .6;
NOT 1.3 1 3.2 18 1542 18 2000 1.9 0 1.2;
NOT 1.4 1 .6 18 1342 18 2000 .01 0 .6;
NOT 1.5 1 3 18 1136 18 2000 1.9 0 1.2;
NOT 1.8 1 2.7 18 1342 18 2000 1.4 0 1.2;
COMMENT:TIMBRE ECHO TO PREVIOUS HARMONY;
NOT 4 2 10 400 273 10; NOT 4 2 7.5 200 455 7.5;
NOT 4 2 4.5 200 576 4.5;NOT 4 2 6.5 150 648 6.5;
NOT 4 2 4 150 864 4;
TER 15;
```

Figure 2
Exemple n° 550 : les données informatiques

2.2. Les cinq grandes spécificités d'un système d'écriture

A partir de la troisième version du logiciel Music, Max V. Mathews a proposé de dénommer « partition » les données informatiques sous forme de lignes de texte alphanumérique, et « instrument de musique » la représentation visuelle qui l'accompagne. A sa suite, Jean-Claude Risset a repris le terme de partition pour parler de « partitions de sons », soulignant ainsi sa manière d'utiliser ce logiciel. Plus généralement, le logiciel Music V peut être considéré et analysé comme un système de notation écrite³, selon cinq grands critères⁴.

La *matérialité* est le premier critère à rappeler. Elle caractérise depuis leurs débuts les différents systèmes d'écriture et conditionne la durabilité des moyens de notation et de ce qui est écrit. Si cette caractéristique est déjà bien connue, il faut relever comment elle reste fondamentale, même avec les technologies numériques à propos desquelles il est trop souvent — et trop vite — question « d'immatérialité ». Les logiciels ne se dissocient pas de dispositifs informatiques qui sont, plus que jamais, matériels, en tant que supports d'inscriptions. Cela constitue une condition nécessaire à leur utilisation potentielle comme technologie d'écriture. Les ordinateurs et les périphériques utilisés par Max V. Mathews et Jean-Claude Risset dans les années 1960 constituent des machines bien matérielles, encore massives et non individuelles⁵. Si ces machines permettent de générer et d'enregistrer sous de nouvelles formes symboliques les sons et la musique, la conservation et l'utilisation des données désormais numériques nécessitent l'existence de dispositifs qui seront toujours nécessairement matériels, aussi miniaturisés soient-ils.

La *visibilité* et la *lisibilité* ont déjà été évoquées. Ces critères concernent la nécessité de pouvoir voir autant que lire une partie des données en jeu, grâce à des signes graphiques, sur un support matériel spatial. Ces signes doivent se référer à des unités élémentaires univoques, ils doivent pouvoir dénoter des unités⁶.

Dans le cas du logiciel Music V, cette visibilité et lisibilité sont particulièrement en jeu dans le diagramme joint aux données informatiques qui nécessitent elles une connaissance du langage informatique. Il permet de représenter schématiquement la manière propre à ce logiciel de générer numériquement des sons. La particularité des logiciels Music, à partir de la troisième version, est de permettre une utilisation des ordinateurs

pour simuler des interconnexions d'oscillateurs virtuels. Le diagramme permet de représenter ces oscillateurs et leurs agencements et, plus généralement, les autres modules utilisés.

La grande originalité de Music V est en effet sa modularité. Les principaux modules disponibles, qui sont autant de petits programmes déjà prêts, sont donc des oscillateurs permettant de générer différents types d'ondes, ainsi que des modules pour multiplier, pour additionner et pour stocker les données obtenues. A chaque type de module correspond une représentation graphique. Chaque module-signe est bien différenciable et articulable aux autres selon des modalités en nombre fini. En connectant de telle ou telle manière ces modules, et en précisant dans le programme informatique les différents paramètres d'entrée et leurs évolutions dans le temps, il est possible de produire a priori tous les sons existants et imaginables.

Dans l'exemple numéro 550 déjà mentionné, une onde de type sinusoïdale (F1), dont l'intensité (ENV) varie crescendo puis decrescendo (F3) est multipliée (MLT) avec une onde de type carré (F2). Le résultat (out) évolue selon les paramètres d'entrées (P6, P7, P8, etc.) qui précisent d'autres caractéristiques des ondes virtuellement produites par la connexion de deux oscillateurs.

La puissance de génération d'ondes sonores les plus variées, grâce à l'agencement et l'activation d'oscillateurs simulés, relève d'une quatrième grande caractéristique d'un système d'écriture : sa *performativité*. Le caractère performatif concerne, d'une manière générale, le potentiel d'action et de création des langages. Il s'agit d'un terme franglais proposé au départ par des linguistes américains pour souligner et étudier combien certaines paroles sont parfois aussi des actes, du seul fait d'avoir été énoncées [1].

Dans le cas des technologies musicales, l'aspect performatif est fondamental, car il détermine leur dimension créative. Alors que de nombreux modes de représentation visuelle des sons et de la musique permettent seulement de noter ce qui est entendu, l'enjeu est ici de pouvoir générer des événements sonores et musicaux à partir de signes écrits. Parmi les logiciels de synthèse sonore mis au point à partir des années 1960, Music V se singularise par la maîtrise précise qu'il donne des processus de production de sons évolutifs et de développements musicaux. Jean-Claude Risset, dans ses compositions autant que dans ses travaux scientifiques, a particulièrement exploré la performativité de ce logiciel.

Le *caractère systématique* a déjà été partiellement abordé à propos de la lisibilité. Il concerne les types de signes graphiques utilisés. L'enjeu est de pouvoir disposer d'un ensemble de signes qui fassent système. Pour cela, il faut à tout le moins qu'ils soient à la fois articulables et différenciables. Les modalités de relation entre les signes, plus que leurs singularités propres, sont ici déterminantes. L'aspect relationnel et différentiel conditionne tout à la fois l'identité de chaque signe utilisé et, surtout, du tout singulier que les différents signes disponibles doivent pouvoir former.

³ Pour précision, sont utilisées dans cet article comme formulations plus ou moins équivalentes : système d'écriture, système de notation écrite, technologie d'écriture.

⁴ Plusieurs définitions de ces critères sont possibles. Celle qui est proposée ici se fonde sur des études de terrain et un travail théorique [16].

⁵ Le premier ordinateur dit dédié a été utilisé, dans le domaine de la musique, par Max V. Mathews et Richard Moore pour GROOVE, dispositif de synthèse hybride (numérique et analogique), en 1968.

⁶ Cela constitue la différence par rapport aux autres systèmes de notation graphique qui ne sont pas des systèmes d'écriture, à strictement parler [3].

Le logiciel Music V, considéré sous l'angle des diagrammes qui représentent les interconnexions d'oscillateurs simulés, a bien un caractère systémique. Il permet de mettre en relation un petit nombre de signes-modules sous la forme d'organisations originales où le tout va déterminer le résultat, en l'occurrence le développement sonore et musical souhaité.

D'une manière générale, le caractère systémique propre à une technologie d'écriture a un lien fort avec la théorisation des pratiques en jeu. Dans le domaine musical, ce fut le cas avec l'écriture conventionnelle sur des portées de notes. Son élaboration, à partir du XI^{ème} siècle, est indissociable de l'évolution de l'état des connaissances théoriques [2]. Dans le cas de Music V, l'exploration de ses potentialités comme système d'écriture est fortement liée aux travaux scientifiques menés notamment par Jean-Claude Risset. Ils ont permis de mieux connaître ce qui détermine l'identité toujours changeante d'un son et, à partir de là, de maîtriser cela par un système d'écriture.

3. UN NET ELARGISSEMENT DES POSSIBILITES D'ECRITURE MUSICALE

La recherche sur les sons cuivrés de la trompette, menée en 1964-1965 par Jean-Claude Risset aux Bell Labs, a marqué le franchissement d'un seuil important dans la science acoustique. Ces travaux ont permis de répondre à une question encore sans réponse scientifique au début des années 1960 : qu'est-ce qui fonde l'identité singulière d'un son ?

Jean-Claude Risset a mis en évidence l'importance, tout à la fois, des évolutions dans le temps des composants internes des sons — les partiels — et de leur perception subjective qui sélectionne une partie seulement de ces composants. En prenant en compte cette double identité objective et subjective d'un son, ainsi que les transformations temporelles en jeu à la micro-échelle des partiels, il disposait désormais des connaissances théoriques pour générer tout type de son grâce à un logiciel, Music V, qui permettait justement d'agir au niveau des composants d'un son et de leurs évolutions. Ondes élémentaires d'un son obtenues analytiquement, les partiels constituent en effet des dimensions sonores que Music V, technologie de simulation d'oscillateurs, permet de produire avec précision, et donc aussi d'écrire, élargissant les possibilités et les modalités de notation écrite de la musique.

3.1. Des partiels du son à la structuration globale d'une pièce

Les nouvelles connaissances théoriques sur les sons apportées par Jean-Claude Risset et les spécificités du logiciel Music V lui ont permis d'intervenir désormais à la micro-échelle des sons et d'avoir ainsi la maîtrise de dimensions supplémentaires, tout en conservant la possibilité de produire des notes de musique

conventionnelles et de procéder à un travail de structuration globale de la pièce musicale composée. Si le logiciel Music V apporte en effet de nouvelles possibilités de notation écrite, il englobe celles qui existaient déjà avec le système d'écriture sur portées.

La composition musicale à l'échelle des composants internes d'un son constitue la transformation la plus importante et conséquente. En produisant par l'écriture, grâce à Music V, ces petites ondes que sont les partiels d'un son, et leurs évolutions temporelles, Jean-Claude Risset a ouvert et commencé à explorer le domaine a priori sans limites du sonore, de ses singularités autant que de ses changements dans le temps. Il a dans un premier temps cherché à imiter et reproduire des sons d'instruments, comme ceux de la trompette, de la flûte traversière ou de percussions. Puis il a réalisé des sons jamais entendus et impossible à générer avec des instruments de musique ou tout autre dispositif de production sonore.

Par exemple, dans la *Computer Suite from Little Boy*, il a pour la première fois synthétisé un long et a priori infini processus sonore qu'il utilisera par la suite dans plusieurs de ses compositions musicales : une « chute », une descente sans fin dans le grave. Pour cela, il a écrit une partition Music V qui lui a permis de maîtriser ce qui rendait possible ce type de séquence sonore : une pondération très précise de l'évolution de l'intensité des quelques partiels à intervalle d'octave des sons qui s'enchaînent sans discontinuité.

D'une manière plus générale, Jean-Claude Risset a trouvé dans Music V le moyen d'écrire trois grands types de phénomènes sonores audibles : la diffraction (une sorte d'arc en ciel sonore), la fission (pour faire entendre des accords) et la fusion des différents partiels d'un son (pour composer des timbres et des textures). Ces trois modes de transformation sont devenus caractéristiques de son style musical, de sa manière de composer des sons en continuel devenir, en jouant à la fois sur leur identité objective et sur les seuils de perception humains.

Une partie de la musique de Jean-Claude Risset, dès ses deux premières pièces entièrement produites par ordinateur, relève aussi d'une écriture plus conventionnelle, sous la forme non plus de processus sonores, mais de notes de musique. C'est le cas, par exemple, de la première moitié de *Mutations*. Cette pièce comporte notamment des passages de musique sérielle qui eux-aussi ont été réalisés avec Music V.

Ce logiciel permet ainsi d'opérer divers types de structuration de la musique, selon le projet du compositeur ; il rend possible une maîtrise précise des différentes échelles de composition des sons et de la musique. En élargissant de la sorte les possibilités d'écriture musicale, il a contribué à un changement majeur dans le domaine de la musique contemporaine : une partie des musiques électroacoustiques jusqu'ici composées seulement de manière aurale, par le faire et l'entendre (selon l'expression de Pierre Schaeffer) [13,12] pouvaient désormais être créées grâce à un système d'écriture. Comme Jean-Claude Risset le rendait audible dans ses deux premières œuvres entièrement

numériques, Music V se révélait être un outil adéquat pour réaliser les architectures de sons en mutation et en mouvement caractéristiques de certains des courants des musiques électroacoustiques.

3.2. Le décadage vers une écriture des causes

L'élargissement des domaines sonores et musicaux relevant d'une écriture, grâce à un logiciel comme Music V, amène à s'intéresser aux grandes singularités de ce système de notation écrite, notamment par comparaison avec d'autres modes d'écriture. Dans le domaine de la composition musicale contemporaine, le choix du type d'écriture est devenu depuis 1945 un problème et un enjeu.

Centré sur les *moyens et manières* de produire et de composer les sons et la musique, un système comme Music V relève de la notation de type tablature qui, historiquement, constitua un des grands modes de notation de la musique [11]. Il se différencie en cela principalement de la notation conventionnelle sur portée, fondée sur une représentation des sons et de la musique elle-même ou, plus exactement, sur une notation de certains des *aspects théoriques des phénomènes perçus*, en l'occurrence la hauteur et la durée.

Le décadage vers une écriture des causes des sons et de la musique [15] constitue une transformation importante. L'élaboration de tablatures numériques grâce à un logiciel comme Music V se fonde sur de nouvelles formes de connaissance et de théorisation des sons et de la musique. Grâce à Jean-Claude Risset, les savoirs en science acoustique et en psycho-acoustique ont apporté une partie de ces nouvelles connaissances théoriques, mais il reste à mieux comprendre celles qui relèvent des sciences du langage.

4. REFERENCES

[1] Austin J. L., *Quand dire, c'est faire*, Paris : Seuil, Collection Points Essais, 1991.

[2] Duchez Marie-Elisabeth, « Des neumes à la portée. Elaboration et organisation rationnelles de la discontinuité musicale et de sa représentation graphique, de la formule mélodique à l'échelle monocordale », *Revue de musique des universités canadiennes*, n° 4, 1983, p. 22-65.

[3] Ducrot Oswald et Schaeffer Jean-Marie, *Nouveau dictionnaire encyclopédique des sciences du langage*, Paris, Seuil, 1995.

[4] Mathews Max V., « The digital computer as a musical instrument », *Science*, Vol. 142, n° 3591, novembre 1, 1963, p. 553-557.

[5] Mathews Max V., avec la collaboration de J.E. Miller, F.R. Moore, J.R. Pierce et J.C. Risset, *The Technology of Computer Music*, MIT Press, 1969.

[6] Risset Jean-Claude, « Spectre des sons de trompette », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, note présentée par M. Louis de Broglie (séance du 18 avril 1966), Paris, t. 262, série B, 1966, p. 1245-1248.

[7] Risset Jean-Claude, « Analyse des sons de trompette à l'aide d'un calculateur électronique », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, note présentée par M. Louis de Broglie (séance du 13 juin 1966), Paris, t. 262, série B, 1966, p. 1650-1653.

[8] Risset Jean-Claude, « Synthèse des sons à l'aide de calculateurs électroniques appliquée à l'étude des sons de trompette », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, note présentée par M. Louis de Broglie (séance du 13 juin 1966), Paris, t. 263, série B, 1966, p. 111-114.

[9] Risset Jean-Claude, *Sur l'analyse, la synthèse et la perception des sons, étudiées à l'aide de calculateurs électroniques*, thèse de doctorat ès-sciences physiques, faculté des sciences d'Orsay, soutenue le 29 mai 1967.

[10] Risset Jean-Claude, *An introductory catalogue of computer synthesized sounds*, Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey, 1969. (texte et exemples sonores édités en 1995 dans *The Historical CD of digital sound synthesis*, WERGO 2033-2 : p. 109-254 du livret du disque pour le texte, pages 18-45 du disque pour les sons)

[11] Sadie Stanley (Ed.), *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*, second edition, Londres, Mac Millan, 2001 (article « Notation », volume 18, p. 73-189, et article « Tablature », volume 24, p. 905-914).

[12] Schaeffer Pierre, *Traité des Objets Musicaux. Essai Interdisciplines*, Paris : Seuil, 1966.

[13] Veitl Anne, « De nouvelles formes de musiques orales ? Les technologies de la création musicale et le problème de l'écriture », texte pour une communication au colloque *Ecrire, décrire le son*, organisé les 23-24 mai 2003 au Domaine de Kerguéhennec. (en ligne : <http://www.tscimuse.org/biblios/veitl/ecritureoralite.pdf>)

[14] Veitl Anne, « Le compositeur à l'ordinateur (1955-1985). Des moyens de rationalisation aux outils de réécriture », Barbanti, Lynch, Pardo et Solomos (Ed.), *Musiques, arts et technologies : pour une approche critique*, Paris, L'Harmattan, Collection Musique /Philosophie, 2004, p. 185-201. (<http://www.tscimuse.org/biblios/veitl/compositeurordinateur.pdf>)

[15] Veitl Anne, « Musique, causalité et écriture : Mathews, Risset, Cadoz et les recherches en synthèse numérique des sons », dans Bruno Bossis, Anne Veitl et Marc Battier (Ed.), *Musique, Instruments, Machine*, Paris, OMF-Paris IV Sorbonne, 2006, p. 235-251. (<http://www.tscimuse.org/biblios/veitl/ecriturecausalite.pdf>)

[16] Veitl Anne, « Notation écrite et musique contemporaine : quelles grandes caractéristiques des technologies numériques d'écriture musicale ? », dans actes des JIM07 (Journées d'Informatique Musicale), 12-14 avril 2007, organisées à Lyon par l'AFIM, l'Université Lyon 2, le CNSMD et GRAME.
(www.grame.fr/jim07/download/17-Veitl.pdf)

[17] Veitl Anne, « Musique "sérieuse" et informatique : la formation du domaine de "l'informatique musicale" en France. Repères chronologiques : XIX^e siècle -> 1983 », Grenoble, Observatoire Tscimuse, 2008, 24 pages.
(<http://www.tscimuse.org/biblios/veitl/chronologie19siec1e-1983.pdf>)

[18] Veitl Anne, *La chute des notes. Quand Jean-Claude Risset métamorphosait l'acoustique et la musique (1961-1971)*, livre électronique, Internet, www.tscimuse.org, 2008.
(<http://www.tscimuse.org/biblios/veitl/ebookjeanclauderisset.pdf>)

LA FAKTURA, « OUTIL CONCEPTUEL D'ANALYSE » – ILLUSTRATION AVEC STRIA, DE JOHN CHOWNING

Olivier Baudouin
MINT-OMF, Paris Sorbonne
olivierbaudouin@gmail.com

La notion de *faktura* renvoie, dans le cadre de l'analyse des musiques électroacoustiques, à des investigations qui ne reposent pas sur la seule perception auditive mais intègrent le contexte technique et scientifique de l'élaboration des œuvres, nécessitant l'acquisition de compétences extérieures au système musical conventionnel. L'analyse s'enrichit alors des éléments esthétiques et stylistiques inhérents à ce contexte. Poussé à l'extrême, elle peut aboutir à une reconstruction intégrale aux vertus régénératrices, pédagogiques et patrimoniales. En voici une illustration avec *Stria*.

1. INTRODUCTION

Traditionnellement, l'éducation musicale établit un rapport direct entre la *lingua franca* constituée par la notation occidentale, son image sonore et le geste qui produit concrètement le son, un contexte d'étude que partagent la plupart des méthodes analytiques. Or, ce lien s'amenuise lorsque le compositeur emploie d'autres formes de notation, et disparaît *a fortiori* lorsqu'elles ne décrivent plus les paramètres élémentaires du son, mais les processus qui permettent à un dispositif de générer le son lui-même, libéré des contraintes des instruments conventionnels. Grande alors est la tentation de vouloir ressusciter un « solfège » cohérent, universel et rassurant en valorisant l'aspect esthétique des œuvres – la manière dont elles sont perçues à l'audition, leur morphologie sonore – au détriment de leur poïétique – les moyens qui président à leur élaboration.

En réduisant son champ d'étude aux phénomènes audibles et à leur agencement, l'analyse perd de sa rigueur scientifique par défaut d'adaptation. Elle affaiblit ses perspectives théoriques et pratiques en négligeant des données essentielles mais inaudibles, parce qu'elles ne sont pas disponibles facilement, et qu'elles nécessitent des apprentissages supplémentaires sans rapport « naturel » à la musique. Enfin, elle ne tient pas compte du rôle majeur de la technologie dans la formation du style d'un compositeur.

En proposant il y a quelques années « la *faktura* comme outil conceptuel d'analyse »¹, Marc Battier a offert à la communauté un moyen de répondre au défi analytique posé par l'irruption des techniques de reproduction et de synthèse du son – qu'elles soient numériques ou analogiques – au sein de la création musicale. C'est ce que nous

¹ [2], p. 254.

allons démontrer, à travers l'exemple de *Stria*, pièce emblématique de John Chowning créée en 1977, que nous avons reconstruite intégralement à partir des données techniques du compositeur, et recréée en décembre 2008 à l'occasion d'un concert organisé par Jean-Claude Risset et Nicolas Darbon au Centre de Documentation de la Musique Contemporaine (Cité de la Musique, Paris).

2. DESCRIPTION DU CONCEPT DE FAKTURA

2.1. Principes

À travers la notion de *faktura* se manifeste l'idée que « les artistes recréent la technologie selon leur vision artistique »², en imaginant pour les techniques de leur époque des applications que leurs inventeurs n'ont pas prévues. Le terme, emprunté aux constructivistes russes dans le contexte de la révolution bolchevique, s'emploie en relation avec le concept de tectonique – l'ensemble des forces sociales qui jaillissent du monde industrialisé et qui président au processus de construction. En adaptant cette théorie à ce qu'il appelle « l'art audio », Marc Battier cherche à opposer aux analyses de type esthétique (reposant sur la sensibilité, la perception) une approche de type poïétique (établie à partir du processus d'élaboration de l'œuvre) ayant la *faktura* pour fer de lance :

Comme catégorie esthétique, la *faktura* est un levier. Elle souligne un des aspects les plus saillants de l'art moderne, l'indépendance des composants d'une œuvre. Plus précisément, la *faktura* est une catégorie avec laquelle un artiste – sculpteur, peintre, poète, musicien ou artiste audio – transforme le matériau. La *faktura*, cependant, n'est pas séparée de son environnement. Elle est liée à la *tectonique*, qui détermine l'aspect stylistique de l'œuvre, et à la *construction*, la troisième catégorie retenue par les constructivistes. C'est la construction qui permet la réalisation présente, comme dirigée par les plans de la *faktura*.³ [Nous traduisons]

² « Thus, artists recreate technology according their artistic vision. » [2], p. 250.

³ « As an aesthetical category, *faktura* is a lever. It highlights one of the most prominent aspects of modern art, the independance of the components of a work. More to the point, *faktura* is the category with which an artist – sculptor, painter, poet, musician or audio artist – transforms material. *Faktura*, however, is not detached from its environment. It is related to *tectonic*, which determines the stylistic aspect of the work, and

L'analyse des œuvres nées de la rencontre féconde entre art et technologie devrait donc tirer avantage de la prise en compte de ces facteurs dans la détermination des styles et des autres catégories esthétiques. En effet, les forces engendrées par la confrontation de la tradition avec l'innovation technologique, de l'artisanat avec l'industrie – la tectonique – entraînent dans leur sillage des évolutions radicales dans la manière de créer, comme le souligne Timothée Horodyski à propos d'Edgard Varèse :

L'originalité de Varèse ne réside pas dans le fait qu'il ait lu Helmholtz, mais bien qu'il ait entériné très tôt que la connaissance physique du son était intimement liée à l'émergence d'un nouvel imaginaire et qu'elle allait conditionner l'organisation de structures nouvelles.⁴

Au contexte d'apparition des œuvres – qui comprend déjà l'environnement esthétique et technique – doit alors s'ajouter la substance de ce nouveau « paysage imaginaire »⁵ qui embrasse non seulement le détournement de la technologie à des fins artistiques, comme nous venons de l'évoquer, mais aussi le rapport des artistes au paradigme technologique, c'est-à-dire l'état de leurs connaissances, leurs éventuelles contributions dans les domaines de l'invention ou de la recherche, et l'émergence du nouvel idéal de « l'artiste-ingénieur »⁶.

Il n'est sans doute pas indifférent de savoir dans quelle mesure science et technologie interviennent dans la production d'une œuvre. Sans les moyens offerts par l'ordinateur, John Chowning aurait eu plus de difficulté à concrétiser sa vocation de compositeur⁷, et ce en dépit d'une formation poussée en contrepoint et en harmonie⁸. L'*electronic music*, qui consistait dans les années 1960 à manipuler des générateurs et des bandes magnétiques, ne le satisfaisait pas. Seules les techniques numériques pouvaient répondre à son idéal de précision, hérité d'une curiosité scientifique qui l'amena à acquérir en autodidacte des compétences en mathématiques, en acoustique et en programmation. Précision, expérimentation, contrôle, autant d'inclinations capables d'infléchir l'imaginaire créatif et devant être prises en considération lors de l'analyse des procédés retenus par le compositeur.

2.2. Méthode de déconstruction-reconstruction

Comme nous venons de l'exposer, la tectonique, sous le double aspect du détournement et de la contribution, influe directement sur la *faktura*, c'est-à-dire sur le choix et le traitement des matériaux destinés à la construction

to the third category retained by the Constructivists, *construction*. » [2], p. 251.

⁴ [14], p. 5.

⁵ En 1939, John Cage compose *Imaginary Landscape N° 1*, généralement considérée comme étant la « première pièce écrite spécifiquement pour un support d'enregistrement ». [13], p. 44.

⁶ [17], p. xviii.

⁷ J. Chowning, communication personnelle du 4 juil. 2008.

⁸ Chowning passe trois ans auprès de Nadia Boulanger de 1959 à 1962 dans le cadre de son DMA, le « Doctor of Musical Arts », et enseigne le contrepoint et l'harmonie à l'Université de Stanford de 1965 à 1967.

– ou concrétisation – de l'œuvre. Or, l'analyse de la musique électroacoustique a pour objet un produit fini, généralement enregistré sur un support et dont les sources présentent la particularité de ne pas suivre les codes de la musique conventionnelle tout en s'insérant dans un dispositif lié à la technologie. Par conséquent, la compréhension du résultat obtenu à l'issue de la construction de l'œuvre passe – à l'instar d'une analyse menée avec une partition conventionnelle mais selon d'autres modalités – par sa déconstruction, ainsi que l'exprime Battier :

Inclure la *faktura* comme outil conceptuel pour l'analyse peut conduire à utiliser les méthodes de l'ingénierie inverse. Avec cette technique, l'analyste parcourt le chemin inverse du compositeur, chemin qui va de l'œuvre finale aux idées et matériaux initiaux. C'est un paradigme qui, avec un peu de chance, conduit à la description des processus impliqués dans la fabrication de la pièce et la production du matériau sonore.⁹ [Nous traduisons]

Cette expérience de déconstruction (puis de reconstruction) que nous avons menée en 2006-2008 sur *Stria*¹⁰ nous permet aujourd'hui de préciser le type de méthode avec laquelle certaines pièces du répertoire peuvent être analysées. La plupart des musiques électroacoustiques composées sans l'aide d'un ordinateur comportent une part d'artisanat inhérente à leur nature analogique, difficile à codifier et à conserver. Or, la synthèse numérique permet non seulement de produire des sons sans manipulation excessive¹¹, mais aussi de garantir la pérennité de ses sources *via* un programme écrit constituant une **notation adaptée**. Dans ce contexte, « il est fondamental de collaborer avec les artistes qui sont, de fait, les premiers conservateurs de leurs œuvres, afin de réunir une documentation la plus détaillée possible »¹². La pertinence de l'analyse dépend alors de l'habileté de son auteur à résoudre les problèmes liés aux trois phases de son déroulement : la transcription, la concordance et l'exploitation.

2.2.1. Transcription

La transcription consiste à rassembler les codes informatiques ayant servi dans le passé à produire la version « authentique » de la pièce concernée. En effet, il arrive que plusieurs moutures coexistent et que leur identification requière une étude philologique, comme en témoigne le travail remarquable mené par Laura Zattra sur les différentes versions de *Stria* [20]. Ces codes définitifs, souvent obsolètes, doivent ensuite être transcrits dans un langage moderne afin de pouvoir être lus et exécutés facilement.

⁹ « To include *faktura* as a conceptual tool for analysis may lead to using the method of reverse engineering. In this technique, the analyst turns back and follows the composer's inverse path, the path from the final work to the initial ideas and materials, a paradigm which hopefully leads one to a description of the processes involved in making the piece and the production of the sound material. » [2], p. 254

¹⁰ Pour les détails de ces travaux, se reporter aux références suivantes : [4, 5, 3, 22].

¹¹ À l'inverse, p. ex., d'*Artikulation* (1958), où Ligeti dut assembler d'innombrables morceaux de bande magnétique. Dans ces conditions, certaines phases de la composition demeurent obscures. [4], p. 68.

¹² [1], p. 32.

L'analyste est alors obligé de développer des compétences non seulement dans le champ de la synthèse numérique, mais aussi dans celui de la programmation, afin de résoudre certains algorithmes et de s'assurer de la conformité des mécanismes du langage choisi pour la transcription avec ceux du langage d'origine.

2.2.2. Concordance

La phase de concordance vise à établir la plus grande ressemblance possible entre l'original et la nouvelle version, selon trois méthodes : la comparaison entre les résultats chiffrés obtenus et les résultats d'origine lorsqu'on en dispose, la confrontation visuelle des sonogrammes produits avec ceux de la source, et l'écoute attentive des différentes versions. À l'issue de cette phase, certains ajustements doivent être pratiqués, comme la prise en compte des manipulations extérieures au programme destinées à redessiner la forme ou à modifier les niveaux d'intensité, ou la correction des changements induits par l'élévation du taux d'échantillonnage. Certaines contraintes vécues par les pionniers de la musique de synthèse, telles que la lenteur des appareils numériques ou les restrictions horaires dues au trop grand nombre d'utilisateurs, déterminent ainsi de manière importante le résultat final.

2.2.3. Exploitation

Reconstruite et de nouveau lisible, l'œuvre peut être non seulement re-générée / régénérée dans des conditions idéales d'enregistrement ou de concert, mais aussi exploitée à des fins didactiques et livrer potentiellement ses secrets de fabrication. Par exemple, les codes reconstruits se prêtent aisément à toutes sortes de traitements, comme l'ajout d'interfaces destinées à modifier les données (fig. 1), à visualiser les processus ou à présenter les résultats de certains calculs à travers des graphiques. En outre, disposer du code revient pour l'analyste à pouvoir entrer lui-même dans les procédés de composition, les expérimenter, leur faire subir des variations, comme s'il se trouvait à improviser sur un thème devant son piano. Le travail de Michael Clarke sur la pièce *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey [12], bien qu'il soit le fruit d'une approche légèrement différente, illustre parfaitement l'intérêt de ce genre d'analyse dans le cadre de l'enseignement.

Examinons à présent ce qu'une analyse « facturale » – si le lecteur nous pardonne ce néologisme – peut révéler de *Stria* et plus généralement des œuvres issues de l'hybridation entre art, science et technologie.

3. ILLUSTRATION AVEC STRIA

Chez John Chowning, le recours à des techniques exogènes à la musique ou inhérentes à la synthèse et à la diffusion du son détermine profondément l'acte créatif :

(...) la première étape est toujours une pensée musicale. Mais en cours de réalisation, je suis

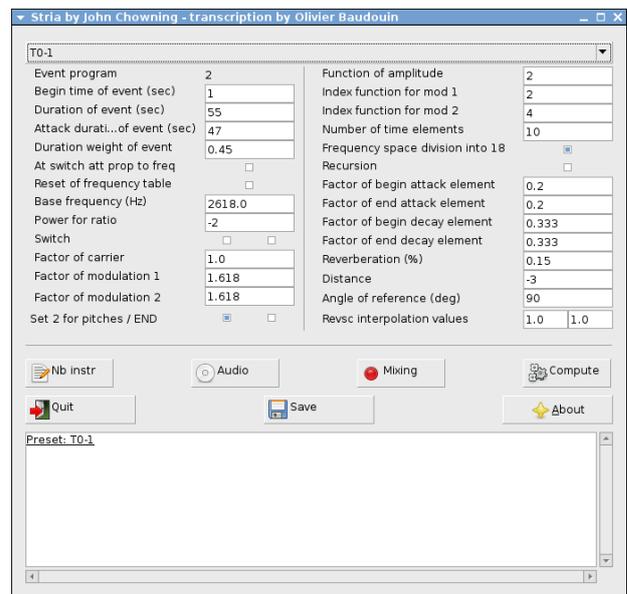


Figure 1. Interface du logiciel conçu par l'auteur pour la reconstruction et l'analyse de *Stria*.

souvent amené à découvrir des choses nouvelles concernant l'acoustique ou la programmation. Et dans ce procès, l'extérieur, le système, apportent toujours des choses que je n'ai pas recherchées. En plus des idées musicales, le monde technique apporte, lui aussi, sa contribution qui modifie le projet, et alors c'est une sorte d'échange : je donne quelque chose et je gagne autre chose. En fin de compte, c'est une démarche qui me stimule, j'adore cette confrontation intellectuelle, artistique et technique à la fois.¹³

L'intensité du rapport de l'artiste avec son environnement scientifique et technique rend d'autant plus judicieux le type d'analyse que nous défendons. Après avoir décrit les innovations apportées par Chowning, nous nous intéresserons à leur concrétisation dans *Stria*, puis à l'importation de techniques de programmation dans le champ musical.

3.1. Chowning inventeur

John Chowning découvre la musique électronique lors de son séjour à Paris (1959-62) en assistant aux concerts du Domaine musical¹⁴. Certaines œuvres le marquent, en particulier *Gesang der Jünglinge* (1955-56) et *Kontakte* (1958) de Karlheinz Stockhausen. Le dispositif de diffusion du *Gesang der Jünglinge* comprend cinq haut-parleurs entourant le public afin que l'auditeur perçoive le mouvement du son dans l'espace, ce que Stockhausen développe dans *Kontakte*, en enregistrant en studio le son diffusé par un haut-parleur rotatif au moyen de quatre microphones¹⁵. Ces démonstrations constituent une expé-

¹³ [9], p. 14-15.

¹⁴ Société de concert établie par Pierre Boulez en 1956 et active jusqu'en 1973.

¹⁵ [13], p. 67.

rience fondatrice pour Chowning :

Cette utilisation de la technologie [récente] au service de la musique m'avait énormément frappé. (...) Peut-être aurait-on pu rapprocher [le] travail [de ces compositeurs] sur l'espace de ce que faisait Giovanni Gabrieli à Venise à la Renaissance, avec ses jeux à plusieurs chœurs. Mais avec Stockhausen (...), il y avait en plus l'idée d'un son dynamique dans l'espace.¹⁶

De retour aux États-Unis, le jeune compositeur gagne l'Université de Stanford et commence à explorer dès 1964, avec une adaptation du logiciel Music IV¹⁷, la simulation du mouvement des sources sonores. Ses investigations le conduisent alors à expérimenter la synthèse des sons par modulation de fréquence :

Mon intérêt pour les timbres dynamiques est venu progressivement pendant mes recherches sur la spatialisation. Celle-ci dépend d'une source d'entrée, et comme je ne possédais pas de convertisseur analogique-numérique pour numériser des sons naturels, la synthèse était la seule option qui se présentait à moi. L'effet de spatialisation est beaucoup plus évident avec une source dynamique dans le temps, sans quoi le signal direct et la réverbération ne peuvent être distingués. Par conséquent, j'ai utilisé pour source des sons avec des transitoires marqués ou des sons dont le spectre changeait au cours du temps, comme des oscillateurs en couple, avec des formes d'onde complexes. Mon oreille était donc désireuse de trouver des sons ayant un dynamisme interne.¹⁸ [Nous traduisons]

Ses recherches détermineront toutes ses pièces¹⁹ et l'amèneront à déposer deux brevets : celui d'un appareil pour la démonstration pratique, sans ordinateur, de l'intérêt de la simulation du mouvement des sons en quadriphonie (fig. 2) et celui qui transpose du logiciel à l'électronique (fig. 3) les principes de la synthèse par modulation de fréquence, déjà formulés par Chowning en 1973 [11]. Les droits de ce dernier brevet seront rachetés par la firme Yamaha pour produire dans les années 1980 le premier synthétiseur numérique à la fois performant et bon marché, le DX7, procurant aux travaux de Chowning une dimension considérable, en particulier dans l'univers de la musique populaire.

¹⁶ [9], p. 9.

¹⁷ Logiciel de synthèse numérique du son conçu par Max Mathews en 1963 aux Bell Telephone Laboratories.

¹⁸ « My interest in dynamic timbre was ongoing throughout the spatialization research. Spatialization depended upon an input source, for which there were few options as we did not have an ADC to provide a digitized natural sound. Synthesis, then, was the only option. The effect of spatialization is much more (only) apparent when the source is dynamic through time, otherwise the direct signal is indistinguishable from the reverberation. I used therefore sounds with sharp transients as sources or sounds whose spectrum changed through time, such as coupled oscillators with complex waveforms. My "ear" was eager to find sounds that had internal dynamism, therefore. » J. Chowning, communication personnelle du 11 mars 2009.

¹⁹ *Sabelithe* (1971), *Turenas* (1972), *Stria* (1977), *Phoné* (1981), *Voices* (2005).

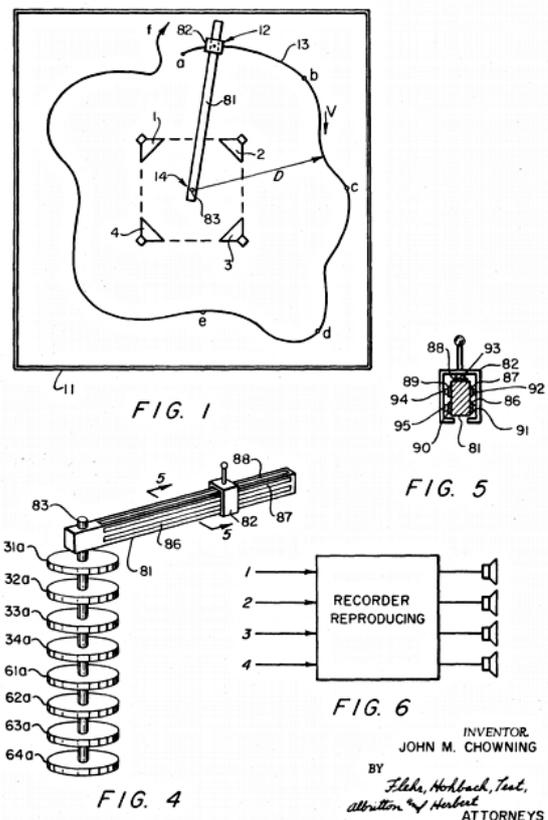


Figure 2. J. Chowning, *Méthode et appareil pour simuler la localisation et le mouvement du son*, extrait de brevet, 1972²¹.

3.2. Chowning expérimentateur

3.2.1. Spatialisation

Les paramètres de spatialisation de *Stria* comprennent, à l'instar de l'appareil schématisé fig. 2, une mesure angulaire pour la localisation du son par rapport à l'auditeur et un rapport intensité / réverbération plus ou moins élevé selon la distance à simuler. En revanche, ils n'intègrent pas l'effet Doppler, qui donne l'illusion du mouvement d'un son par la modification de sa fréquence fondamentale, conformément aux principes développés par Chowning dans un article de 1971 [10].

De plus, le compositeur a prévu dans *Stria* un effet d'éloignement au fur et à mesure du déroulement des sous-sections, ou évènements. Or, l'analyse des résultats obtenus lors de la reconstruction montre que Chowning n'a

²¹ www.google.com/patents?id=-Z4yAAAAEBAJ

²³ www.google.com/patents?id=GNEzAAAAEBAJ

[54] METHOD OF SYNTHESIZING A MUSICAL SOUND

[75] Inventor: John M. Chowning, Palo Alto, Calif.
[73] Assignee: The Board of Trustees of Leland Stanford Junior University, Stanford, Calif.

[22] Filed: May 2, 1975
[21] Appl. No.: 573,933

Related U.S. Application Data

[63] Continuation-in-part of Ser. No. 454,790, March 26, 1974, abandoned.

[52] U.S. Cl. 84/1.01; 84/1.01
[51] Int. Cl.² G10H 1/00; G10H 5/00
[58] Field of Search 84/1.01, 1.24, 1.25

References Cited

UNITED STATES PATENTS

3,794,748 2/1974 Deutsch 84/1.24

OTHER PUBLICATIONS

Alan Douglas, "Electrical Synthesis of Musical Tones", *Electronic Engineering*, July 1953, p. 278.
Alley & Atwood, *Electronic Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., copyright 1966, pp. 564-572.

Primary Examiner—Stanley J. Witkowski
Attorney, Agent, or Firm—Flehr, Hobbach, Test, Albritton & Herbert

ABSTRACT

Musical sounds are synthesized by means of frequency modulation with the carrier and modulating frequencies being in the audio range and the modulating index being related to a function to control the bandwidth and evolution in time of the partial frequencies of synthesized sound.

14 Claims, 18 Drawing Figures

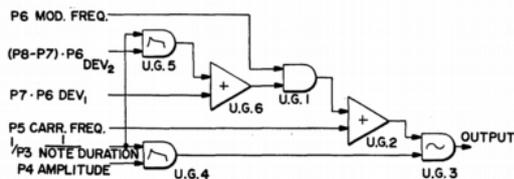


Figure 3. J. Chowning, *Méthode pour la synthèse de sons musicaux*, extrait de brevet, 1977²³.

utilisé cet effet que sur deux périodes²⁴ : de 48" à 178" et de 558" à 812" (juste après le climax central), soit environ 2 minutes (où l'intensité est très faible) et 4.5 minutes sur les 16 que comporte la pièce. L'illusion du mouvement repose alors essentiellement sur l'azimut, se manifestant par la rotation continue mais assez lente²⁵ du son à travers les quatre haut-parleurs²⁶. Par conséquent, l'écriture de l'espace donne à l'auditeur une impression beaucoup plus statique que dans *Turenas*, la sœur aînée de *Stria*, comme en témoigne le compositeur :

Contrairement à *Turenas*, où j'ai créé des sons en mouvement à travers l'espace (ayant donc une vitesse radiale), je voulais, avec *Stria*, localiser – et non mouvoir – chaque élément dans l'espace des 360°. Ce fut une décision esthétique que de faire une pièce en lente évolution, amorphe, de telle façon que les éléments soient par moments perdus dans la réverbération et, à d'autres moments, localisés en distance et azimut.²⁷ [Nous traduisons]

En plus de fournir clairement les données de base de la pièce, qui montrent par exemple que l'effet de distanciation ne doit pas être surévalué, le programme de reconstruction expose la pièce aux libres expérimentations de

²⁴ Et non, comme le suggère Bruno Bossis, sur l'ensemble de la pièce. Cf. [7], p. 107.

²⁵ Excepté pour les éléments « enfants », plus courts et plus rapides que leur élément « parent ».

²⁶ Pour davantage de détails, v. [7], p. 108.

²⁷ « Unlike *Turenas* in which I created sounds that moved through the space (having, therefore, radial velocity) in *Stria*, I wanted to locate, but not move, each element in the 360 space. It was an aesthetic decision – having to do with the piece slowly evolving in an amorphous manner where the elements were at times lost in the reverberation and at other times localized on distance and azimuth. » J. Chowning, communication personnelle du 11 mars 2009.

l'analyste. Nous avons alors raisonné par l'absurde en implémentant un effet Doppler dans *Stria*, afin de comprendre pourquoi le compositeur n'a pas souhaité développer un dispositif de spatialisation plus prégnant. Le résultat de ce détournement, plutôt étrange lorsque l'on connaît la pièce, a révélé un élément qui aurait dû nous sembler évident. L'effet Doppler change les hauteurs fondamentales, il n'est donc pas logique de l'utiliser lorsque ces hauteurs occupent une fonction essentielle dans l'écriture rigoureuse de la pièce, comme le confirme le dispositif spectral pensé par John Chowning.

3.2.2. Synthèse d'un spectre sonore complexe par modulation de fréquence

Dans son article fondamental de 1973 sur la modulation de fréquence [11], Chowning décrit notamment les propriétés des spectres harmoniques et inharmoniques, caractérisés pour les premiers par un rapport porteur / modulante de nombres entiers ($\frac{p}{m} = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{3}{2} \dots$) et de nombres irrationnels ($\frac{p}{m} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{\pi}{3} \dots$) pour les seconds. Il cherche alors, ainsi que le rapporte Matteo Meneghini, à « redéfinir le concept de l'octave » [16] afin d'obtenir des spectres inharmoniques ayant la même cohérence que les spectres harmoniques, quel que soit le registre.

En effet, le rapport d'octave, défini par la formule $\frac{p}{m} = 2^n$ (où l'entier relatif n correspond au registre voulu), génère un spectre harmonique dont la fréquence porteur se retrouve toujours parmi les bandes latérales des spectres de registre supérieur ou inférieur, lorsque leur fréquence modulante est respectivement supérieure ou égale à sa valeur, ou inférieure. Les spectres inharmoniques ne semblent pas offrir, au premier abord, une telle caractéristique.

Cependant, Chowning découvre que pour le rapport $\frac{p}{m} = \Phi^n$ – où $\Phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \simeq 1.618$ est le Nombre d'or – les registres ou pseudo-octaves définis par les puissances de Φ présentent une forme altérée de cette propriété, garantissant ainsi la cohérence du timbre quel que soit le registre. Cette configuration revêt un caractère agréable pour l'auditeur, puisque les hauteurs de la pseudo-gamme construite à partir de Φ s'inscrivent à l'intérieur d'un intervalle légèrement plus haut que la sixte mineure, qui compte huit demi-tons²⁸. De plus, la division de cette pseudo-gamme en neuf pseudo-demi-tons renforce son aspect « naturel » grâce à la proximité des pseudo-demi-tons avec les demi-tons pythagoriciens.

L'étude des spectres inharmoniques complexes a donc été l'occasion, pour le compositeur de *Stria*, de relier de manière intime le domaine du timbre à celui des échelles de hauteur. À l'instar de Jean-Claude Risset qui, dans le dernier et célèbre exemple²⁹ de son *Catalogue* (1969) [19] établit un « continuum mélodie - harmonie - timbre »³⁰, John Chowning convoque tous les moyens dont il dispose pour imaginer une forme **hybride** de musique. Parmi ces moyens figure la programmation informatique.

²⁸ [7], p. 95.

²⁹ Il s'agit également du début de *Mutations* (1969).

³⁰ [8], p. 28.

3.3. Chowning programmeur

Chowning a appris à programmer pour expérimenter ses idées musicales, ce qui l'a conduit non seulement à des découvertes scientifiques de premier plan, mais aussi à renouveler sa propre pratique en intégrant dans le processus de composition des techniques étrangères, *a priori*, au domaine de l'art. La génération automatique des paramètres de sortie de *Stria* est ainsi organisée autour de deux procédés de programmation, la boucle et la récursion fonctionnelle.

La fonction centrale du programme de génération consiste à boucler sur le nombre d'éléments à créer, segment par segment, et cette fonction présente également une caractéristique récursive, c'est-à-dire la possibilité de s'appeler elle-même. Cette caractéristique offerte en 1977 par le langage informatique Sail³¹, utilisé par John Chowning à Stanford, est absente – à cette époque – du Fortran, le langage choisi par Max Mathews pour porter Music IV vers Music V (1968). Dans *Stria*, elle se manifeste à des moments déterminés par le compositeur, et génère, à partir des paramètres d'un élément en cours, ses éléments « enfants ».

L'examen attentif du code montre que Chowning pensait atteindre avec la récursivité fonctionnelle plusieurs niveaux d'emboîtement, à la manière fractale. Or, en pratique, elle n'atteint jamais le deuxième niveau de profondeur. Nous avons alors reprogrammé *Stria* afin d'observer les effets d'une récursion sur deux et trois niveaux, ce qui a entraîné deux problèmes : des éléments enfants qui sortent des limites temporelles imposées par leur parent – ce que l'expérience confirme chaque jour – et un enrichissement trop important du spectre.

Par conséquent, la récursivité peut dans ce dispositif être considérée tout au plus comme un embryon fractal destiné à enrichir et varier le spectre, et non comme le moteur d'une réelle prolifération, ainsi que le confirme Chowning :

Je n'avais pas entendu parler de Mandelbrot³². J'ai appris le Sail avec *Stria* et n'avais jamais rencontré le terme « récursion » avec les précédents langages (Fortran, Algol³³) qui me servaient à programmer. [En apprenant] que les procédures en Sail étaient récursives, j'ai demandé des explications. Aussitôt, j'ai vu l'application musicale que j'allais en faire pour *Stria*. Le concept qui me vint alors à l'esprit fut alors, peut-être, « gigogne »³⁴ ou « emboîtement ».³⁵ [Nous traduisons]

³¹ Le Stanford Artificial Intelligence Language.

³² Benoît Mandelbrot, inventeur des objets fractals en 1973.

³³ En réalité, l'Algol présente cette caractéristique dès 1960. Chowning ne l'a alors peut-être pas remarquée.

³⁴ *Nesting*. Le programme de *Stria* comporte effectivement une variable appelée « nest ».

³⁵ « I had not heard of Mandelbrot. I learned Sail as I began *Stria*. In the previous languages in which I had programmed (Fortran, Algol), I had not encountered the term "recursion" so when the Sail procedures were described as being recursive I asked someone for an explanation. I immediately saw the musical application that I used in *Stria*. Perhaps the conceptual "hook" that came to mind was "nesting" or "embedding" » J. Chowning, communication personnelle du 12 mars 2009.

Bien que la théorie fractale n'y soit pour rien, l'engendrement quasi-cellulaire d'éléments structurels cohérents dû aux techniques de programmation – et notamment à leur aspect automatique, reproductible et illimité – induit un renouvellement profond dans la manière de composer, et d'analyser. L'œuvre ne consiste plus en une succession d'éléments aux fonctions distinctes avec des thèmes, des développements et des harmonies, ou des assemblages d'objets sonores. Elle devient un **organisme** intégré et complexe, un objet en soi, dont on ne peut séparer les composants sans nuire à la compréhension de son fonctionnement global, à l'image d'une sorte de contrepoint inextricable.

4. CONCLUSION

En choisissant d'analyser *Stria* à partir de l'environnement scientifique et technologique de son compositeur, nous nous sommes situé délibérément dans la pratique d'un outil conceptuel, la *faktura*. Lors de cet exercice, qui ne se prétend pas exhaustif ni même achevé, nous avons mis en valeur le caractère bilatéral et fructueux du rapport création / technologie dans l'évolution de John Chowning, un trait partagé à des degrés divers avec de nombreux autres artistes parmi lesquels Edgard Varèse, Jean-Claude Risset et Iannis Xenakis.

La *faktura* révèle ainsi, à travers l'exemple concret de *Stria*, des particularités stylistiques communes à la plupart des œuvres musicales élaborées au moyen de techniques de synthèse du son, telles que l'esthétisation des modèles issus de l'observation scientifique, l'écriture micrographique et organiciste du son, et l'hybridation de ces techniques avec des systèmes plus conventionnels. Elle montre également que la cohérence de ces œuvres provient du métissage des paradigmes artistiques, technologiques et scientifiques.

Enfin, la *faktura* offre un cadre conceptuel non seulement pour la recherche, mais aussi pour la pédagogie, et relie l'analyse à la conservation du patrimoine artistique contemporain, une fonction déjà assumée pour les périodes plus anciennes. En effet, la reconstruction d'une pièce en vue de son analyse conduit à une appropriation de plus en plus profonde de ses principes, jusqu'à sa pleine restitution.

L'importance historique de ce type de travaux doit être soulignée. Leur apparition marque un nouveau degré d'intimité avec les œuvres électroacoustiques, et d'adaptation de la musicologie à ce corpus (comblant ainsi une lacune constatée par Jean-Claude Risset dans son rapport de 1998³⁶). Elle manifeste également une prise de conscience des investissements à pratiquer pour la sauvegarde et la conservation des « arts médiatiques », comme le développement de formations universitaires et de projets spécialisés [15].

³⁶ [18], p. 14.

Remerciements

À John Chowning pour ses éclaircissements de dernière minute et son obligeance à notre égard.

5. REFERENCES

- [1] Bardiot, C., « Noter, annoter. Comment documenter les arts de la scène à composante technologique », *Artpress 2 – Arts technologiques, conservation et restauration*, n° 12, Paris, 2009, p. 30-37.
- [2] Battier, M., « A Constructivist Approach to the Analysis of Electronic Music and Audio Art – Between Instruments and *Faktura* », *Organised Sound*, vol. 8, n° 3, Cambridge University Press, 2003, p. 249-255.
- [3] Baudouin, O., « *Stria* : Last Improvements », *Proceedings of the Electronic Music Studies Network 2008*, INA / Paris-Sorbonne, 2009, à paraître (La Muse en Circuit).
- [4] Baudouin, O., *Problème de l'analyse des musiques conçues pour supports. Comparaison de deux œuvres électroacoustiques : Artikulation de György Ligeti et Stria de John Chowning*, Mémoire de musicologie (Master II), Université de Rouen, dir. P.-A. Castanet, 2006.
- [5] Baudouin, O., « A Reconstruction of *Stria* », *Computer Music Journal*, MIT Press, vol. 31, n° 3, 2007, p. 75-81.
- [6] Baudouin, O., « *Stria* de John Chowning : la complexité programmée ? », *La complexité musicale – Autour d'Edgar Morin et de Jean-Claude Risset*, IDEAT / CNRS / CDMC, déc. 2008, à paraître.
- [7] Bossis, B., « *Stria* ou l'oxymoron musical », dans : *John Chowning*, coll. « Portraits polychromes », n° 7, dir. P.-A. Castanet, Paris, Michel de Maule, 2005, p. 87-119.
- [8] Chowning, J., « Composer le son lui-même », dans : *John Chowning*, coll. « Portraits polychromes », n° 7, dir. P.-A. Castanet, Paris, Michel de Maule, 2005, p. 25-30.
- [9] Chowning, J. et E. Gayou, « Entretien avec John Chowning », dans : *John Chowning*, coll. « Portraits polychromes », n° 7, dir. P.-A. Castanet, Paris, Michel de Maule, 2005, 2005, p. 7-24.
- [10] Chowning, J., « The Simulation of Moving Sound Sources », *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 19, n° 1, 1971, p. 2-6.
- [11] Chowning, J., « The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation », *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 21, n° 7, 1973, p. 526-534.
- [12] Clarke, M., « Jonathan Harvey's *Mortuos Plango, Vivos Voco* », dans : *Analytical Methods of Electroacoustic Music*, dir. M. Simoni, New York, Routledge, 2006, p. 111-143.
- [13] Holmes, T., *Electronic and Experimental Music – Technology, Music, and Culture*, 3^e éd., New York, Routledge, 2008.
- [14] Horodyski, T., *Varèse : héritage et confluence*, dir. E. Andréani, thèse de musicologie, Université Paris 8, 1998.
- [15] Lacerte, S., « Les enjeux pédagogiques », *Artpress 2 – Arts technologiques, conservation et restauration*, n° 12, Paris, 2009, p. 102-107.
- [16] Meneghini, M., « *Stria*, by John Chowning : Analysis of the Compositional Process », *Proceedings of the XIV Colloquium on Musical Informatics*, Florence, 2003, p. 1-6.
- [17] Passuth, K., *Suprématisme et constructivisme : naissance de l'avant-garde russe 1910-1925*, coll. « Actualité des arts plastiques », n° 47, Paris, Centre National de la Documentation Pédagogique, 1979.
- [18] Risset, J.-C., *Art-Science-Technologie*, rapport de mission, Paris, 1998, <http://media.education.gouv.fr/file/95/6/5956.pdf>
- [19] Risset, J.-C., *An Introductory Catalogue of Computer Synthesized Sounds*, Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey, 1969 [réimpr. *Computer Music Currents 13 – The Historical CD of Digital Sound Synthesis*, Mainz, Wergo, réf. 2033-2, 1995, p. 109-254].
- [20] Zattra, L., « The Assembling of *Stria* by John Chowning : A Philological Investigation », *Computer Music Journal*, MIT Press, vol. 31, n° 3, 2007, p. 38-64.
- [21] Documentation et Conservation des Arts Média-tiques (DOCAM), <http://www.docam.ca/>
- [22] Données de reconstruction de *Stria*, <http://ccrma.stanford.edu/pieces/chowning/stria/>

LA PENSÉE GESTUELLE DANS LA PEINTURE, LA POÉSIE, LA MUSIQUE ...ET LA SCIENCE

Jacques Mandelbrojt

Peintre et physicien théoricien,

Professeur Emérite à l'Université de Provence,

Membre du MIM et du comité de rédaction de la revue LEONARDO

jmandelbrojt@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

Le rôle essentiel du temps, du mouvement, de la pensée gestuelle ou musculaire dans la création et la réception des œuvres d'art visuelles, poétiques, musicales est souligné et analysé.

Les USTs (Unités Sémiotiques Temporelles), plus courts éléments de musique susceptibles de transmettre une signification, sont définis et classés suivant les quatre éléments de Bachelard, terre, eau, air, feu. Ils peuvent aider divers arts à communiquer entre eux.

Une peinture peut être considérée comme constituée de signes assemblés selon un certain ordre. La création de signes par identification de l'artiste à l'objet, ainsi que les divers types d'ordres auxquels il peut se référer sont décrits.

Divers caractères de l'art technologique et de la peinture sont mis en contraste : Le temps est réel dans l'art technologique et virtuel dans la peinture ; inversement l'image de l'ordinateur est virtuelle alors que la peinture est réelle. Le rôle du spectateur dans l'un comme dans l'autre est examiné.

Enfin l'aspect dynamique, musculaire, non plus de la création artistique mais de la pensée scientifique telle qu'elle est vécue par les scientifiques eux-mêmes, est évoqué.

1. LA PEINTURE

« La peinture, c'est du temps devenu espace », affirmait le peintre Olivier Debré [5], fasciné par les relations entre le temps et l'espace, introduit par la Relativité.

Le temps qui devient espace, c'est le temps du geste du peintre, mais c'est aussi le temps de l'image mentale du peintre qui est à l'origine de cette peinture. Rappelons que Sartre écrit au sujet des images mentales « Ces déterminations de l'espace psychologique ne sont rien d'autre...que des impressions de mouvement appréhendées sous forme imagée » [20].

Inversement dans la perception d'un tableau, l'espace du tableau devient le temps du spectateur : le temps du mouvement de ses yeux qui parcourent le tableau, ou le temps de l'image mentale qu'il crée en lui. C'est par une identification analogue du spectateur au tableau ou au peintre que le spectateur ressent cet aspect musculaire et

kinesthésique, ce que Berenson appelait également les *valeurs tactiles* : « Je vois deux hommes lutter l'un contre l'autre : si mes images visuelles ne deviennent pas immédiatement des images musculaires, ne pèsent sur ma chair, ne se répercutent dans tout mon corps, je n'en serai guère plus affecté que si j'entendais dire voilà deux hommes qui se battent [voir illustration 1].



Illustration 1 : « Lutteurs », lithographie, 38 par 28cm, Jacques Mandelbrojt 1964

À vrai dire, Botticelli attache si peu d'importance au sujet même ou à sa représentation en général qu'il semble avoir été hanté par le désir d'exprimer les valeurs pures, les valeurs désincarnées du toucher et du mouvement. Or il existe un moyen de rendre les valeurs

tactiles avec un minimum de matière, c'est de les transformer en valeurs de mouvement... Valeur tactiles et mouvement, voilà l'essentiel dans les arts du dessin, et une peinture n'est vraie, elle ne vaut (en dehors de l'idée et du sujet) qu'à condition de déterminer en nous des idées sensorielles de toucher et de mouvement » [3].

On pense alors à ce qu'écrit Bachelard à propos des images mentales créées par la lecture de Lautréamont :

« Nous nous imaginons répéter ces mouvements, y mettre la vigueur qu'ils exigent, et sous le pouvoir de cet enchantement il nous semble que l'épais fluide de nos veines s'est mué en un merveilleux élixir vital » [2].

Le temps du spectateur d'une peinture est idéalement celui du temps du peintre comme le décrit Dubuffet « Le tableau ne sera pas regardé passivement, embrassé simultanément d'un regard instantané, mais bien revécu dans son élaboration, refait par la pensée et, si j'ose dire re-agi. La truelle qui a tracé quelque ornière, il en revivra et ressentira tout au long le mouvement, il se sentira labouré par le sillon de cette truelle, écrasé ici par le poids d'un paquet de pâte, égratigné dans sa chair par un trait de grattoir acéré. Toute une mécanique interne doit se mettre en marche chez le regardeur, il gratte où le peintre a gratté, frotte, creuse, mastique où le peintre l'a fait. Tous les gestes faits par le peintre il les sent se reproduire en lui. Où les coulures ont eu lieu, il éprouve le mouvement de chute visqueuse de la pâte entraînée par la pesanteur ; où les éclatements se sont produits, il éclate avec eux. Où la surface s'est plissée en séchant, le voilà qui sèche aussi, se contracte et se plisse, et si une cloque s'est formée ou quelque apostume, il se sent aussitôt pousser au plus intime du ventre la boursoufflure » [6].

Je parle évidemment de peintures pour lesquelles le geste du peintre a une importance ou encore d'une peinture qui traduit une sensation ou une image mentale du peintre. Il ne s'agit pas seulement de peinture gestuelle mais tout aussi bien de peintures comme celles de Rubens, de Tintoret, du Gréco... peintures que René Huyghe dans son livre *Formes et Forces* [8] classe parmi les peintures dues aux forces. René Huyghe distingue en effet l'art Classique basé sur les formes de la géométrie euclidienne, et l'art Baroque qui de façon générale n'est pas basé sur la géométrie mais sur l'effet du temps, des forces, par exemple les flammes, les tourbillons. On pourrait maintenant dire que cet art est également géométrique mais qu'il relève d'une autre géométrie, de la géométrie fractale [13] (encore qu'une géométrie ne peut rendre compte de l'élan de l'image musculaire qui constitue l'essentiel de l'art Baroque).

2. LA POESIE

Venons-en à ce que Bachelard écrit au sujet des images poétiques : « Ainsi le caractère sacrifié par une psychologie de l'imagination qui ne s'occupe que de la constitution des images est un caractère essentiel, évident, connu de tous : c'est la mobilité des images. Il y a opposition-dans le règne de l'imagination comme

dans tant d'autres domaines-entre la constitution et la mobilité. Et comme la description des formes est plus facile que la description des mouvements, on s'explique que la psychologie s'occupe d'abord de la première tâche.. C'est pourtant la seconde qui est la plus importante. L'imagination, pour une psychologie complète, est, avant tout, un type de mobilité spirituelle, le type de la mobilité spirituelle la plus grande, la plus vive, la plus vivante. Il faut donc ajouter systématiquement à l'étude d'une image particulière l'étude de sa mobilité, de sa fécondité, de sa vie. Cette étude est possible parce que la mobilité d'une image n'est pas indéterminée. Souvent la mobilité d'une image particulière est une mobilité spécifique. Une psychologie de l'imagination en mouvement devrait alors déterminer directement la mobilité des images. Elle devrait conduire à tracer, pour chaque image, un véritable holographe qui résumerait son cinétisme. C'est une ébauche d'une telle étude que nous présentons dans cet ouvrage » [1]. Ceci a amené Bachelard à classer les images poétiques d'après les quatre éléments, air, feu, eau, terre, chacun des éléments ayant son dynamisme propre.

3. LA MUSIQUE

En ce qui concerne la musique cette opposition entre constitution et mobilité me semble être la même que l'opposition que l'on pourrait faire entre les objets sonores de Schaeffer [21] et les USTs. définies par le MIM (Laboratoire Musique et Informatique de Marseille) [18].

Le MIM a en effet étudié et décrit les diverses façons pour les plus courts éléments possibles musique de se déployer dans le temps de façon à transmettre une signification, il s'agit, pour prendre une métaphore physique, d'atomes (c'est à dire insécables) de signification. Il a ainsi défini 19 USTs (unités sémiotiques temporelles). Là encore, la sensation musculaire joue un rôle essentiel dans la plupart de ces UST. Je n'en citerai que quatre qui ont pour particularité que la correspondance avec les quatre éléments de Bachelard est évidente : l'UST « avec lourdeur » peut être mise en parallèle avec l'élément terre, et la peinture de Dubuffet correspond à « avec lourdeur » et à cet élément terre. De même l'UST « élan » correspond à l'élément feu de Bachelard et correspond bien à la touche du Gréco ou aux peintures de Hartung. L'UST « qui tourne » correspond à l'élément eau et est bien adaptée à la peinture de Rubens. Enfin l'UST « en suspension » correspond à l'élément air et fournit une bonne description des peintures de Turner ou encore de Rothko.

Il faut remarquer que dans une peinture il n'y a en générale qu'une seule UST et pas une suite d'UST comme dans une composition musicale. Ceci est lié au fait que l'ensemble de la peinture est visible à chaque instant et donc cela nécessite une certaine homogénéité dans la peinture...Il y a exception par exemple chez Twombly ou souvent chez Klee.

Les UST fournissent ainsi l'ébauche d'un langage commun entre la musique, pour lesquelles elles ont été conçues, et la peinture, et aussi d'ailleurs la poésie.

J'ai décrit les USTs comme correspondant au dynamisme défini par Bachelard pour la poésie. En fait on peut tenter un regroupement des USTs suivant les quatre éléments qui servent à Bachelard dans son classement des images poétiques, les USTs seraient alors en quelque sorte une « structure fine » pour utiliser une expression scientifique de ces quatre éléments, c'est à dire que l'on pourrait les considérer comme des sous catégories de ces quatre éléments

La classification que je propose se clarifie sensiblement si l'on insiste comme le fait Marcel Frémont sur la notion d'énergie dans les UST.

En effet, ce qui caractérise l'intuition que l'on a du feu parmi les autres éléments, c'est la prédominance de l'énergie cinétique par rapport à l'énergie potentielle. Ainsi on classera dans le feu les UST dont au moins une des phases a cette propriété.

Dans l'air on mettra les UST qui correspondent à une énergie cinétique avec une faible masse dans mv^2

L'eau correspond à un assez bon équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

Enfin dans la terre on mettra les UST à forte énergie potentielle. S'il y a une énergie cinétique elle correspond à une prédominance de m dans mv^2

Plutôt que de parler de dynamique on pourrait également parler d'entropie, qui, si l'on se réfère aux travaux de Shannon [22], clarifie certains aspects de la linguistique.

Dans cet esprit il est clair qu'à la terre, à l'eau à l'air et au feu devront correspondre des UST ayant de moins en moins d'ordre (entropie)

FEU : Elan, contracté étendu, sans direction par divergence d'information

Ces trois UST ont pour caractéristique une certaine violence : Elan évoque une flamme vive, les deux autres chacune une explosion... On pense à l'expression « explosante fixe » de la formule d'André Breton « *La beauté convulsive sera explosante fixe, magique circonstancielle, érotique voilée, ou ne sera pas* » [4], formule reprise par Boulez.

AIR : En suspension, suspension-interrogation.

EAU : Qui tourne, par vague, en flottement, sur l'erre, chute.

TERRE : Stationnaire, Qui veut démarrer, qui avance, obsessionnel, Freinage, lourdeur, trajectoire inexorable, sans direction par excès d'information, étirement.

Chacun pourra juger d'après sa propre intuition de l'évidence de la validité de ce regroupement.

Peut-on appliquer utilement le concept USTs aux arts plastiques ?

Une peinture est dépositaire d'un temps, ce temps qui est devenu espace selon Olivier Debré. C'est un temps qui n'est pas explicite, qui est offert à sa concrétisation par le spectateur, comme on l'a vu plus haut, c'est idéalement le *temps retrouvé* du peintre.

Mais chaque spectateur retrouve-t-il le temps du peintre ? Il y faut sans doute une grande familiarité avec l'acte de peindre, c'est un peintre qui peut reconnaître chez un autre peintre le mouvement de la main, de l'image mentale

Une description morphologique précise des UST en peinture est impossible du fait que le déroulement du temps de lecture de la peinture dépend du spectateur, certain, comme moi la regardent d'un coup d'œil, d'autres, au contraire, s'attardent, s'arrêtent. En fait c'est le nom de l'UST qui est essentiel en peinture. C'est une métaphore, c'est à ce que ce nom évoque que l'on reconnaît de quelle UST relève une peinture; alors qu'en musique le nom de l'UST est selon certains, un simple étiquetage, seule compte véritablement la description morphologique de l'UST.

4. L'ART TECHNOLOGIQUE

La peinture diffère de façon fondamentale des œuvres multimédia dans lesquelles le temps est explicite.

Il s'agit là d'ailleurs notons-le d'un des aspects des différences qui existent entre les arts technologiques et les arts, si j'ose dire, manuels, entre la *souris* et le *crayon* [17] : ce qui est explicite chez l'un est implicite chez l'autre, et inversement. Par exemple dans l'interactivité des arts technologiques, le spectateur agit *réellement* sur une image virtuelle alors que dans la lecture d'une peinture le spectateur agit *virtuellement*, comme décrit dans la citation de Dubuffet, sur une image réelle, il *re-agit* en pensée la peinture mais ne la modifie pas.

Un autre aspect de la démarche artistique où les moyens traditionnels et l'ordinateur (le crayon et la souris) se comportent différemment et de façon, me semble-t-il, complémentaire, c'est dans ce que l'on pourrait appeler le langage de l'art (qui n'a évidemment pas une signification codifiée).

La peinture peut, dans une certaine mesure, être tenue pour constituée de signes assemblés selon un certain ordre, une certaine structure, comme le langage est constitué de mots organisés suivant une grammaire [10]. Certains artistes comme Tal-Coat s'intéressent surtout à la création de signes, d'autres au contraire, tels Mondrian, Sonia Delaunay ou Vasarely, s'attachent surtout à l'ordre entre les signes, ils utilisent des formes préfabriquées, droite, cercle, pour qu'apparaissent mieux l'ordre qu'ils établissent entre ces formes. D'autres enfin, comme Miro à l'époque de *La Ferme*, réalisent un équilibre entre ces deux aspects.

Le crayon, ou le pinceau, me semble être l'instrument qui traduira le mieux la création de signes. Comment en effet un artiste crée-t-il des signes ? Par une identification musculaire intériorisée à l'objet qu'il représente : « *Après m'être identifié à lui, il me faut créer un objet qui ressemble à l'arbre, le signe de l'arbre* » [14], écrit Matisse, et de façon encore plus significative peut-être : « *J'ai exécuté ma sculpture Jaguar dévorant un lièvre, d'après Barye, m'identifiant à la passion du fauve exprimée par le rythme des masses* ». Cet aspect musculaire nous mène directement au geste et au mouvement, pour lequel le crayon me semble beaucoup plus efficace et vivant que l'ordinateur : le mouvement réel des images mouvantes de l'ordinateur est moins éloquent que le trait, trace du mouvement de la main de l'artiste qui guide le crayon ou le pinceau, exprime l'amplitude, la rapidité, l'intensité du geste du peintre, et les transmet également au spectateur.

L'ordre entre les signes, ou la structure, me semble être au contraire un domaine privilégié de l'ordinateur (ordonner, par exemple, un ensemble de signes de mille façons différentes, à la manière des *Cent mille milliards de poèmes* de Raymond Queneau).

Il est utile pour analyser ceci plus en détail de voir quels sont les divers types d'ordre qu'un artiste peut introduire dans son travail. J'en distinguerai trois, deux qui sont ce que j'appellerai des ordres a priori, et le troisième que l'on peut appeler un ordre a posteriori, ou mieux, un ordre à découvrir.

- premier type d'ordre : l'artiste suit un ordre tout fait, des règles (règle d'or, règles de la perspective), un ordre tel que l'accepte la société ou une collectivité d'artistes. C'est le cas de l'art dans sa période classique. Il peut aussi suivre un ordre inspiré de la science, par exemple, l'ordre des cristaux.

- deuxième type d'ordre, l'artiste crée la règle : « *Créez la règle, puis suivez-la, maître mot de toute entreprise artistique* », écrivait Wagner dans *Les Maîtres Chanteurs*. Il y a dans cette démarche à la fois la liberté, qui est dans la nature de l'art, qui permet à l'individu de créer une règle arbitraire, et le désir d'ordre, qui consiste à suivre cette règle. Morellet est représentatif de ce type d'ordre.

- troisième type d'ordre : c'est l'ordre que suit l'artiste sans essayer de le définir a priori, et comme à son insu. C'est la syntaxe personnelle de l'artiste telle qu'elle peut apparaître dans une rétrospective. « *C'est ainsi que le véritable poète crée, et puis comprend... parfois* » [15], écrit Henri Michaux. De même, Kandinsky écrivait : « *Rien de plus domageable et de plus coupable que de chercher sa forme en se faisant violence. L'instinct intime, l'esprit créateur, créera irrésistiblement, à l'heure convenable, la forme dont il aura besoin* » [9].

Remarquons en passant qu'une différence importante entre les arts plastiques et la musique réside dans le fait que si le troisième ordre est fréquent dans les arts plastiques, il est au contraire très rare dans la musique. C'est ainsi que lorsque certains compositeurs se sont écartés du système tonal, ils l'ont remplacé par le

dodécaphonisme, fondé sur des règles au moins aussi contraignantes, alors que les peintres cubistes, quelques années auparavant, rejetaient les règles de la perspective sans les remplacer par un système codifié. Ces différences entraînent évidemment des relations différentes avec les sciences, et plus particulièrement les mathématiques, réservoir de structures que l'on peut créer ou découvrir.

Dans l'utilisation ou l'expression de ces ordres ou de ces règles, il est clair que les possibilités du crayon ou de la souris sont différentes. Les règles a priori sont manifestement bien adaptées à l'ordinateur, à la souris, un ordinateur peut réaliser des peintures « à la Vasarely ». En revanche, les règles sous-jacentes que suit l'artiste sans les connaître sont celles que l'artiste réalise spontanément avec son crayon.

5. LA SCIENCE

La pensée musculaire ou gestuelle, voilà qui est, pourrait-on croire propre à l'art. En fait il n'en est rien. Voici, par exemple, ce qu'écrivait Jacques Monod dans *Le hasard et la nécessité* :

« *Tous les hommes de science ont dû, je pense, prendre conscience de ce que leur réflexion au niveau profond, n'est pas verbale : c'est une expérience imaginaire, simulée à l'aide de formes, de forces, d'interactions qui ne composent qu'à peine une image au sens visuel du terme. Je me suis moi-même surpris, n'ayant à force d'attention centrée sur l'expérience imaginaire plus rien d'autre dans le champ de la conscience, à m'identifier à une molécule de protéine* » [16].

La pensée scientifique, à l'état naissant, n'est pour nombre de scientifiques, pas plus une pensée verbale que ne l'est celle des artistes. Le mathématicien Jacques Hadamard, dans une enquête auprès des autres mathématiciens de son époque [7], a mis en évidence le fait que si certains mathématiciens pensent en mots et en formules, d'autres pensent sous forme d'images et de sensations dynamiques. Einstein en particulier se plaignait dans une lettre à Hadamard de la difficulté extrême qu'il avait à traduire en mots et en formules sa pensée, qui jusqu'à un stade avancé du raisonnement se présentait à lui sous forme imagée et plus encore d'impulsions musculaires.

Les mathématiques provoquent chez certains mathématiciens des sensations dynamiques et « matérielles » semblables à la description que donne Dubuffet de la perception d'une peinture, aussi semblables que le permet la différence entre la perception d'un tableau et l'image mentale que l'on a d'un théorème : « *Le mathématicien vit dans un monde d'idées intuitives, d'autant plus intuitives, excusez le paradoxe apparent, qu'elle gravite autour d'une matière, matière abstraite mais matière quand même. (...) J'aime à sentir la matière en mathématiques. Pour moi une fonction analytique, par exemple, est un être que je puis toucher avec mon esprit, que je sens et que j'aime à disséquer. Ses singularités sont ses défauts que*

j'aime autant que ses qualités. Il y a en elles tellement de chaleur » [12]. « (...) J'ai l'impression que l'œuvre mathématique comporte un élément dynamique... En lisant un mémoire mathématique — intéressant —, je sens des mouvements dans mon esprit : des faits mathématiques que je connais depuis longtemps, ceux que je suis en train de contempler — et ce mot correspond à la réalité —, des faits vagues, même pas encore en vraie formation, s'entrechoquent, demandent à être comparés » [11].

« Vraiment la théorie des fonctions m'a beaucoup plu. J'ai aimé dès le début, des êtres que je pouvais toucher, sinon avec ma main, du moins avec mon esprit. L'esprit a aussi des mains, n'est-ce pas ? Avec l'esprit, il y a des êtres que l'on peut toucher, d'autres qu'on ne peut pas toucher » [12].

On ne s'étonnera pas de l'aspect musculaire ou dynamique de la pensée si l'on a présent à l'esprit le fait que pour Piaget, créateur de l'épistémologie génétique, il y a continuité entre la pensée la plus abstraite et nos tout premiers réflexes [19]. Quoi qu'il en soit, ces considérations donnent me semble-t-il une nouvelle justification à un art gestuel, ou à un art où l'aspect musculaire est important comme, par exemple, dans les esquisses de Rubens ou les peintures de Pollock. Un tel art me semble être l'expression privilégiée de la pensée naissante dans son jaillissement.



Illustration 2 : « Intuition mathématique » encre, 21 par 18cm, Jacques Mandelbrojt 1951

Voici pour conclure l'image de l'intuition mathématique que j'avais en 1951 lors de la résolution en d'un problème mathématique [voir illustration 2]. Je

ne sais pas si le fait de m'interrompre pour la représenter ne m'a pas empêché de résoudre le problème... Quoiqu'il en soit, cette image m'a donné l'impression de comprendre la composition de *L'adoration des Mages* de Léonard de Vinci [Voir illustration 3] dans l'analogie des deux compositions la droite et la gauche sont inversées... parce que Léonard de Vinci était gaucher (?)] : Les Mages évoquant l'ultime effort pour résoudre un problème, se précipitent aux pieds de la Vierge et de l'Enfant, lumineux comme le problème résolu, tandis que dans les lointains, tels les solutions rejetées, caracolent au milieu de ruines les chevaux du souvenir.



Illustration 3 : « L'Adoration des Mages » peinture, 243 par 246cm Léonard de Vinci 1482

6. REFERENCES

- [1] Bachelard G., *L'Air et les songes*, Librairie José Corti, Paris 1943
- [2] Bachelard *Lautréamont*, Lib. José Corti, Paris 1941
- [3] Berenson B. *Les Peintres Italiens de la Renaissance*, NRF, Paris 1953
- [4] Breton A. *l'Amour fou*, Ed. Gallimard, Paris 1937
- [5] Debré O. *Le corps du peintre*, in *La création vagabonde*, ouvrage collectif dirigé par Jacques-Louis Binet, Jean Bernard, Marcel Bessis Collection savoir, Editions Hermann, Paris 1986
- [6] Dubuffet J. *L'Homme du commun à l'ouvrage*, Gallimard, Paris 1973
- [7] Hadamard J. *The Psychology of invention in the mathematical field*, Dover, New-York, 1954
- [8] Huyghe R. *Formes et Forces*, Flammarion, Paris 1971
- [9] Kandinsky W. *Du Spirituel dans l'art*, Gallimard Paris 1989

- [10] Mandelbrojt J. *Les cheveux de la réalité*, Editions Alliage, Nice 1991
- [11] Mandelbrojt S. *Pourquoi je fais des mathématiques*, Proceedings of the seminar on the history of mathematics 6 (Inst. Henri Poincaré, Paris, 1985), 47-54.
- [12] Mandelbrojt S. *Souvenirs à bâtons rompus de Szolem Mandelbrojt*, recueillis en 1970 et préparés par Benoît Mandelbrot Proceedings of the seminar on the history of mathematics 6 (Inst. Henri Poincaré, Paris, 1985), 1-46.
- [13] Mandelbrot B *Les objets fractals*, Flammarion, Paris 1975
- [14] Matisse H., *Ecrits et propos sur l'art*, Hermann, PParis1974
- [15] Michaux H. *Poteaux d'Angle*, Gallimard, Paris 1981
- [16] Monod J., *Le Hasard et la nécessité*, Le Seuil, Paris 1970, p.170
- [17] Ouvrage collectif *L'Esthétique de l'art teTechnologique* Numéro spécial de la revue Alliage Nice 1998
- [18] Ouvrage collectif *Vers une sémiotique générale du temps dans les arts*, Editions Delatour, IRCAM Centre Pompidou Paris 2008
- [19] Piaget J, *Biologie et connaissance*, NRF, Paris 1967
- [20] Sartre J.P., *L'Imaginaire*, Gallimard, Paris 1940
- [21] Schaeffer C. *Traité des objets Musicaux*, Ed. du Seuil, Paris 1966
- [22] Shannon C. *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Chicago,1949.

RENDU EXPRESSIF

Joëlle Thollot

Maitre de Conférences à l'INPG

Chercheur à ARTIS, équipe du laboratoire Jean Kuntzmann et projet INRIA

Joelle.Thollot@imag.fr

<http://artis.imag.fr/Membres/Joelle.Thollot/>

Le rendu expressif, aussi appelé non-photoréaliste (NPR en anglais) concerne l'ensemble des techniques de rendu qui ne s'intéressent pas à reproduire fidèlement les lois de la physique (i.e. matériaux réalistes et illumination globale). Cette définition reste vague et en pratique, la grande majorité des approches en rendu expressif imitent ou s'inspirent des média traditionnels : peinture à l'huile, dessin au trait, aquarelle, etc. Il serait cependant réducteur de considérer que le rendu expressif ne se limite qu'à simuler de tels média; tout comme en peinture et dessin, il faut d'abord se poser la question de ce que l'image est sensée représenter. Pas seulement la nature du sujet, mais surtout les aspects qui doivent être mis en avant et ceux que l'on va préférer ignorer. Car après tout, c'est l'avantage des média traditionnels sur la photographie : pouvoir mettre en avant ou abstraire certains aspects.

Afin d'illustrer cela, on peut comparer deux types de représentations nettement différents : l'illustration scientifique et la peinture impressionniste. Avec le premier, c'est la forme de l'objet qui prime sur tout le reste. Souvent, l'artiste doit même supprimer certains défauts de l'objet pour représenter non pas le spécimen qui est sous ses yeux, mais un prototype qui représente une catégorie d'objets. Tandis qu'avec le second, c'est l'image rétinienne qui est mise en avant, la distribution des couleurs en particulier. Ici, l'artiste se concentre plus sur la retranscription de l'impression suscitée par la scène représentée que sur la forme précise des objets qui la composent (d'où le terme "impressionnisme").

Le médium utilisé n'intervient qu'ensuite, mais il a toutefois un intérêt crucial : il impose des contraintes de par ses limitations, et peut aussi être choisi pour certaines propriétés qui permettent de mieux atteindre le but de la représentation. Par exemple, le dessin au trait ne peut représenter qu'une gamme de tons limitée (grâce à des groupes de hachures par exemple) mais illustre clairement la forme des objets par une économie de moyens (quelques contours), et de ce fait convient parfaitement à de nombreuses illustrations scientifiques où la forme doit être mise en avant au détriment du matériau. Parfois, le choix du médium est aussi lié à des problèmes de reproduction; pour reprendre l'exemple précédent, le dessin au trait a cet avantage qu'il est bien adapté à l'impression noir et blanc.

Le rendu expressif en informatique graphique a de nombreux points communs avec les techniques traditionnelles ; il partage les mêmes problématiques de représentation, indépendantes du médium utilisé : quels sont les aspects importants de la scène à mettre en avant, et quels sont ceux que l'on va préférer abstraire, voire même omettre. Il a aussi intérêt, tout du moins dans un premier temps, à imiter ses prédécesseurs : quel type de "medium" est employé (qu'il reproduise ou seulement s'inspire d'un médium traditionnel), quel type d'outil est utilisé (qu'il soit simulé ou simplement suggéré), et comment introduire le style personnel de l'artiste ?

D'un autre côté, l'ordinateur apporte de nombreuses nouvelles possibilités : le rendu expressif peut assister l'artiste pour produire plus facilement et plus rapidement une image ou une animation par le biais de méthodes automatiques ou semi-automatiques (dessin par analogie); il permet de mieux contrôler l'évolution d'une représentation au cours d'une animation (on parle de cohérence temporelle); il facilite la reproduction d'une oeuvre en enregistrant la composition d'une image sous forme numérique; il apporte la notion d'interactivité, quasi-absente des média traditionnels; etc. Ces nombreux avantages font du rendu expressif un outil utile à de nombreux domaines d'applications tels que l'animation, l'illustration scientifique, l'archéologie, l'architecture, le dessin technique ou les jeux vidéos.

Nous présenterons la démarche et les travaux engagés dans l'équipe ARTIS autour du rendu expressif. Ces travaux se déclinent en trois grands axes : le dessin vectoriel 2D (figure 1 page suivante), la stylisation d'animations (figure 2), et le contrôle du détail visuel (figure 3).

NOTE

Avec l'aimable autorisation des éditions Lavoisier, ce texte reprend des extraits de l'ouvrage :

Informatique graphique et rendu
(traité IC2, série "Traitement du signal et de l'image")
par Bernard PÉROCHE et Dominique BECHMANN

© Lavoisier, 2007

et plus précisément de l'introduction du chapitre 11 :

Rendu expressif

Pascal BARLA, Joëlle THOLLOT, Gwenola THOMAS.



Figure 1 : un exemple de dessin vectoriel 2D – extrait de [1]

REFERENCES

- [1] Alexandrina Orzan, Adrien Bousseau, Holger Winnemöller, Pascal Barla, Joëlle Thollot, David Salesin : *Diffusion Curves: A Vector Representation for Smooth-Shaded Images* - in ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2008), Volume 27 – 2008
- [2] Adrien Bousseau, Fabrice Neyret, Joëlle Thollot, David Salesin : *Video Watercolorization using Bidirectional Texture Advection* – in ACM Transaction on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2007), Volume 26, Number 3 – 2007.
- [3] Alexandrina Orzan, Adrien Bousseau, Pascal Barla, Joëlle Thollot : *Structure-preserving manipulation of photographs* – in International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR) - aug 2007



Figure 2 : un exemple de stylisation d'animations – extrait de [2]



Figure 3 : un exemple de contrôle du détail visuel – extrait de [3]

EXPÉRIMENTATIONS VIRTUELLES: VIE ARTIFICIELLE POUR LA GÉNÉRATION DE FORMES ET DE COMPORTEMENT

Hervé Luga

Equipe VORTEX -IRIT UMR 5505

Université de Toulouse

UT1, 2 rue du doyen Gabriel Marty 31042 Toulouse, France

herve.luga@univ-tlse1.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente une sélection de travaux réalisés par l'équipe VORTEX de l'IRIT depuis 1993 dans les domaines de la génération automatique de formes et de comportements. Nous montrons ici la spécificité de ces travaux utilisant des techniques originales issues de la vie artificielle afin de proposer un nouveau type d'interaction entre l'utilisateur et l'environnement de simulation.

1. INTRODUCTION

L'équipe VORTEX de l'IRIT réalise des recherches depuis une vingtaine d'années dans les domaines de la modélisation et dans celui de la création de comportements pour acteurs autonomes en espace virtuel. Les premiers travaux de cette équipe utilisaient des approches traditionnelles de conception de systèmes de type procédurales ou déclaratives. L'approche déclarative propose ainsi de créer des objets ou des scènes tridimensionnelles par description des propriétés de l'objet et de ses liens avec le reste de l'environnement. La génération de comportements autonomes pour les acteurs virtuels¹ proposait une approche de type intelligence artificielle basée sur un système de règles PROLOG.

L'ensemble de ces travaux fournissent des résultats utilisables mais obligent le créateur du système à un travail important de spécification et d'analyse du système généré et de ses interactions possibles avec son environnement. Ce travail, particulier à chaque système généré ne nous semblait pas opportun car il s'est vite révélé peu robuste à des changements environnementaux et donc incapable d'adaptation. Nous avons donc décidé de nous tourner vers des algorithmes issus d'un champ de recherche (alors) émergent appelé « vie artificielle ». Cet article présente une sélection de travaux basé sur ce type d'approche et montre comment cette dernière nous a permis d'ouvrir de nouvelles perspectives dans l'interaction entre interacteurs réels, acteurs virtuels,

¹Nous nous plaçons alors dans un type d'animation nommé « simulation comportementale » où des acteurs virtuels autonomes agissent par interaction située dans leur environnement.

avatars et environnement dans le domaine de l'animation comportementale et de la modélisation.

Dans une première partie nous présenterons les principaux algorithmes de vie artificielle en proposant une catégorisation de ces derniers. Nous montrerons ensuite des exemples de travaux dans le domaine de la modélisation et dans le domaine de la génération de comportements autonomes. Avant de conclure nous montrerons comment ces travaux nous ont mené vers la production automatique d'entités virtuelles complètes.

2. LA VIE ARTIFICIELLE

Nous pouvons identifier plusieurs types de systèmes aptes à améliorer les systèmes de production en environnement virtuel. Certains vont se focaliser sur l'aspect interface en essayant de proposer un système le plus efficace possible pour l'interaction entre le créateur et le système. D'autres vont utiliser des systèmes issus de l'intelligence artificielle classique² afin d'aider le créateur à produire, selon un ensemble de contraintes, les objets ou les comportements qu'il souhaite assigner aux acteurs virtuels. Une autre approche consiste à placer le système en situation en le dotant de mécanismes à réaliser son adaptation à son milieu. Ce type de mécanismes est regroupé sous le champ de recherche identifié comme « la vie artificielle ».

Le terme « vie artificielle » a été proposé par Chris Langton (24) qui a identifié cette thématique de recherche comme celle de l'étude des systèmes émergents. On identifie l'émergence lorsque le comportement global d'un système n'est pas « simplement » déductible du comportement local de ses constituants. On va trouver dans cette approche un ensemble de techniques ayant en commun une inspiration « naturelle ». Nous entendons par ce terme que la plupart de ces techniques sont des simplifications ou des imitations de fonctionnement de systèmes réels, le plus souvent biologiques, avec en filigrane l'idée que la vie a fourni aux êtres vivants des solutions pour leur permettre de s'adapter à notre environnement terrestre et

²Par exemple des systèmes experts ou des réseaux d'automates comme dans le système de simulation comportementale HPTS (25).

que nous allons pouvoir transposer ces caractéristiques à des systèmes artificiels.

2.1. Dichotomie des systèmes de vie artificielle

La vie artificielle est matérialisée par un ensemble de paradigmes qui se traduisent sous la forme de techniques informatiques. Ces dernières sont souvent obtenues par une analogie réalisée entre des systèmes existants et une adaptation de ces systèmes sous forme d'algorithmes. L'inspiration vient souvent de processus biologiques comme nous le verrons par exemple dans le cas des réseaux de neurones mais peut aussi être trouvée dans des systèmes chimiques ou bien encore dans des systèmes techniques mis au point par des êtres humains.

Il est important de noter que de simplifications en optimisations diverses, les méthodes réellement utilisées n'ont fréquemment plus de rapport avec les systèmes qui les ont inspirés. Dès lors comment classer ces paradigmes de vie artificielle ? En étudiant l'origine pour les rapprocher n'est pas opportun car un même système réel peut avoir donné lieu à des techniques très différentes. Nous proposons donc ici d'utiliser une approche fonctionnelle en discriminant les systèmes en fonction de leur fonctionnement vis à vis des structures sur lesquels ils portent.

2.1.1. Des systèmes générateurs

Un système générateur est un système qui va agir de manière incrémentale sur une structure de données.

L'initialisation de l'algorithme est réalisée par la création d'un état initial qui est souvent désigné sous le terme d'axiome. L'évolution du système est obtenue par application successive de règles. A un état courant de la simulation est ensuite associé un élément de l'espace des états. Le produit d'un système générateur après n pas de simulation est donc la composition de l'action des règles sur cet axiome. Cette définition implique une fermeture de l'espace E par la fonction induite par l'application récursive de l'algorithme.

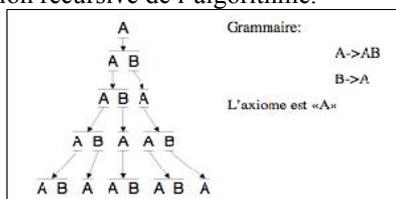


Figure 1. Exemple d'application itérative d'un système générateur.

En rapprochant cette définition des systèmes vivants on peut clairement classer les systèmes générateurs comme des systèmes agissant au niveau endogénétique. Il n'existe en effet pas de modification endogène des règles ni de l'axiome, seul l'état courant est modifié. De plus, si le système n'est pas dépendant du hasard ou d'actions extérieures il est parfaitement déterministe. Les systèmes générateurs les plus anciens sont les

modèles de réaction diffusion (39) et les automates cellulaires de Ulam et Von Neumann. Ils sont une simplification de l'évolution des concentrations de composés chimiques en solution. Intégrés par la définition généralisée des IFS¹ qui permet de les lier aux fractales, ces modèles sont aujourd'hui encore les supports de nombreuses études sur la complexité. Nous pouvons classer dans ces modèles les systèmes de masse ressort ou encore les systèmes à base de grammaires tels que les L-Systèmes dont nous allons développer une application dans l'exemple suivant.

2.1.2. Des systèmes d'évolution

Un système d'évolution va porter sur une population d'individus codés par une structure de données dont l'expression est la solution potentielle à un problème. L'évolution va modifier cette population en manipulant cette structure de manière à rendre son expression globalement plus adaptée à son environnement.

Ce faisant, les meilleurs individus de cette population convergeront peu à peu vers un maximum d'adaptation qui sera une solution, parfaite ou approchée, au problème posé. Pour cela les systèmes d'évolution utilisent en général une simplification du processus d'évolution naturelle proposé par Charles Darwin.

Un système d'évolution type comporte au moins trois opérations itérées jusqu'à convergence de l'algorithme:

- Une opération de notation de la population: Cette opération consiste à attribuer à chacun des individus de la population une note représentant son adaptation face au problème considéré. Cette note d'adéquation est souvent référencée sous le terme de «fitness» des individus de la population. C'est l'attribution de cette note qui permet de poser le problème vers la solution duquel l'algorithme doit converger.

- Une opération de sélection: Cette opération va permettre de sélectionner les individus dont les caractéristiques vont pouvoir se propager dans la population. Elle va permettre de régler la pression de sélection et ainsi de définir la vitesse de convergence.

- Des opérateurs de modification permettant de modifier les individus de la population de manière à créer une nouvelle population à évaluer. Les opérateurs classiquement utilisés peuvent être classés en deux groupes: des opérateurs dits de croisement permettant de générer de nouveaux individus à partir d'au moins deux parents et des opérateurs de mutation agissant par modification de l'individu sélectionné. Ces opérateurs ne sont pas forcément utilisés dans tous les systèmes d'évolution, certains, comme les stratégies d'évolution, se contentant d'un processus itératif de mutations.

¹Iterated Function Systems: systèmes incrémentaux basés sur la répétition d'une même fonction sur un environnement.

- A ces opérateurs itératifs il convient d'ajouter un opérateur de création de la population initiale permettant de générer de nouveaux individus. Cet opérateur peut fournir un individu de manière aléatoire parmi l'espace d'états que permet de représenter le code du génotype des individus ou ne permettre de ne générer qu'un sous ensemble de cet espace.

Ces opérateurs portent sur deux niveaux complémentaires de représentation des individus. Un individu est ainsi défini par son génotype sur lequel vont porter les opérateurs de modification. Une fonction de représentation transforme ce génotype en un phénotype qui va être testé face au problème considéré et donc fournir la note d'adaptation. La fonction d'évaluation qui va définir le chemin de convergence de l'algorithme peut donc être vue comme la composée entre la fonction transformant le génotype en phénotype par la fonction associant une note d'adaptation à ce phénotype. Cette définition explique l'importance du codage sur la facilité de convergence de l'algorithme. Ce codage devra donc faire l'objet d'un choix particulier lors de son choix afin de favoriser l'apparition de blocs constitutifs à fort potentiel qui seront les briques de base assemblées pour produire les individus solution au problème. De même, les opérateurs de modification sont en général adaptés au problème considéré afin d'accélérer le processus de convergence.

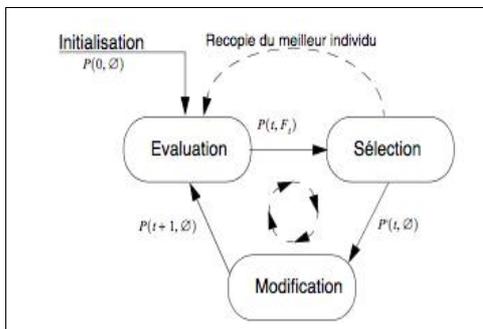


Figure 2. Schéma synoptique de fonctionnement d'un système évolutionniste.

L'itération a lieu jusqu'à «convergence» de l'algorithme. P_t est la population à l'itération t , F la note d'adaptation des individus.

Un des problèmes majeurs des systèmes d'évolution est le choix de la fonction permettant définir la fin de l'algorithme. En effet, si le problème considéré ne comporte pas de solution connue, l'algorithme se contentera souvent d'une solution approchée dont l'exactitude est laissée au créateur de l'algorithme. Il existe ainsi de multiples stratégies d'arrêt de ces algorithmes parmi lesquelles nous pouvons citer:

- L'arrêt de la convergence au bout d'un nombre fixé de générations.

- L'arrêt lorsque l'évaluation d'un individu atteint une note fixée.

- L'arrêt lorsque la note du meilleur individu ne progresse plus au delà d'un certain nombre d'évaluations.

- L'arrêt lorsqu'un temps ou un nombre fixé d'évaluations a été atteint.

Le plus souvent il sera obligatoire de lancer plusieurs simulations permettant d'explorer différentes voies d'évolution afin d'approcher une convergence de l'algorithme vers un maximum global. Un seul lancement de l'algorithme ne permettant en général pas de valider que la solution proposée correspond à un tel critère.

Les systèmes évolutionnistes les plus connus sont sans contexte les algorithmes génétiques dont la paternité revient à John Holland (16) mais dont la redécouverte en 1989 par David Golberg (14) a ouvert la voie à un large champ applicatif. Il existe néanmoins de multiples variantes de ces algorithmes qui diffèrent au niveau de la taille de population mais aussi au niveau du type de structure de données utilisée comme support de l'information portée par les individus. Parmi ces variantes nous pouvons discerner « Genetic Programming » proposée en 1993 par John Koza (21,22) qui permet de manipuler de manière directe des structures arborescentes permettant de représenter par exemple des fonctions ou des programmes informatiques. Cette dernière technique et ses nombreuses variantes fournit un champ d'utilisation très vaste allant de la création automatique de circuits électroniques à la génération de comportements. Elle excelle aussi dans le domaine de la recherche de solutions compétitives face à celles produites par des êtres humains¹.

2.1.3. Des systèmes d'apprentissage

Un système d'apprentissage va agir sur une structure de données définissant le comportement d'un système en modifiant cette structure de manière à adapter le comportement à un environnement. L'adaptation se fait généralement en fonction d'un «feedback» de la part de cet environnement vers le système d'apprentissage pour moduler la modification de la structure de données.

Si la phase d'apprentissage est réalisée de manière explicite par utilisation de couples entrées/sorties connues l'apprentissage sera dit supervisé. Dans le cas où l'apprentissage se fait de manière autonome par auto adaptation du système à son environnement au cours de son utilisation on parlera d'apprentissage non supervisé.

Le «feedback» peut être exogène au système apprenant et on aura alors un type d'apprentissage par interaction

¹Voir les sessions Human Competitive Results de la conférence GECCO.

directe entre l'environnement et le système. Il peut aussi être endogène et donc interne au système apprenant.

L'exemple le plus connu de système d'apprentissage est sans conteste la famille des réseaux de neurones artificiels. Introduits dans les années 1950 par (15), ces derniers prennent leur inspiration dans une idéalisation du fonctionnement du cerveau. Nous utilisons aussi dans notre équipe un autre type de systèmes d'apprentissage nommé « systèmes de classeurs » qui, proposés par John Holland en 1975 ont réellement été utilisés depuis les travaux de Wilson en 1994 (43). Ces systèmes permettent de faire évoluer automatiquement une base de règles en fonction de contraintes matérialisées par le « feedback » de l'environnement.

2.2.L'émergence dans les systèmes de vie artificielle

Une des caractéristiques principales des systèmes de vie artificielle est l'interaction qu'ils impliquent entre le système, l'interacteur et les entités simulées. Cette interaction ne sera pas de manière générale de type impératif mais sera plutôt une collaboration entre ces trois parties pour former la solution à un problème.

Ainsi le créateur du système créera le problème à résoudre en spécifiant l'environnement d'évolution et parfois des fonctions d'évaluation. Le système évoluera alors de manière indépendante en fonction de ses propres perceptions et donc en interaction avec les autres entités virtuelles présentes dans l'environnement. On peut remarquer ici une grande intrication entre tous ces éléments. C'est ce couplage fort système évoluant/environnement qui permet aux techniques de vie artificielle de produire des solutions robustes et adaptables en environnement dynamique car elles ne placent pas l'objet évoluant dans un environnement idéalisé et donc forcément biaisé. Le revers de ces remarques est qu'il est parfois difficile d'obtenir un objet correspondant parfaitement à un souhait précis car le créateur aurait alors à imaginer tous les types d'interactions que cet objet pourrait rencontrer lors de sa génération.

3.EXPÉRIMENTATIONS EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

3.1.Elevage de sculptures virtuelles

Ce projet réalise le lien entre les systèmes évolutionnistes et le processus de création artistique. L'objectif est de créer un nouveau type d'outil de création mettant en oeuvre des processus imités des systèmes d'évolution permettant à l'artiste de développer une nouvelle relation avec l'objet créé. Cette problématique se pose pour de nombreux types de créations (scénarii, textures, Musique, Effets vidéo,...) et a déjà été proposée par William Latham et Karl Sims puis explorée par de nombreux créateurs (9,19).

Nous avons décidé dans notre travail de nous focaliser sur la génération de sculptures virtuelles et nous limiterons dans la suite à l'étude des solutions mettant en jeu la modélisation ou les opérateurs que nous avons choisis: les surfaces implicites et les systèmes d'évolution.

3.1.1.Travaux précurseurs afférents à cette application.

Nous pouvons discerner plusieurs types de travaux faisant le lien entre formes tridimensionnelles et opérateurs évolutionnistes. Peter Bentley (4) distingue ainsi quatre catégories d'applications mêlant génération d'objets et vie artificielle:

- Les travaux mettant en oeuvre les systèmes évolutionnistes à des fins d'optimisation de formes. Même si nous avons déjà mené des études dans cette optique (30), l'application que nous développons ici ne s'y inscrit pas.
- Les travaux portant sur la génération de créatures artificielles.
- Les travaux utilisant les techniques de vie artificielle pour l'aide au design.
- Les travaux utilisant ces systèmes dans un processus de création artistique. Le système sert alors à l'artiste à exprimer son art. Cette catégorie est très proche de la précédente si ce n'est qu'elle a une finalité pratique, les créations n'étant pas nécessairement des objets réels.

C'est dans cette dernière, optique, en liaison entre arts et science que nous nous situons. Le bref état de l'art que nous présentons prendra néanmoins en compte les autres aspects car notre travail s'est inspiré de projets appartenant à l'ensemble de ces catégories.

William Latham a proposé dès 1989 (38) un système d'évolution de formes tridimensionnelles basé sur des opérateurs issus de la vie artificielle. Son projet, nommé MUTATOR, permet de générer des formes définies par L-Systèmes sous la direction d'évaluations effectuées par l'utilisateur.

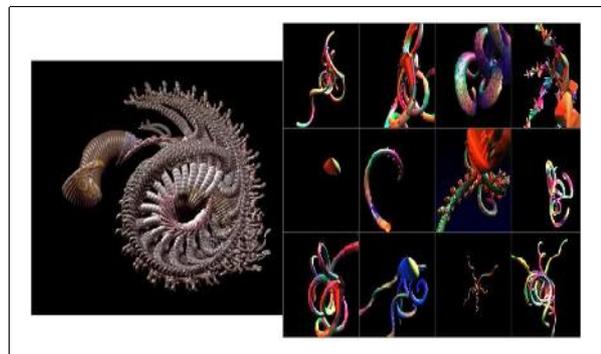


Figure 3. Formes « organic art » de Latham.

Les résultats obtenus sont des formes variées à l'aspect organique accentué par un rendu aux couleurs naturelles dans la plupart de ses créations. Ce projet a permis de montrer la variété des formes que peuvent générer de tels outils.

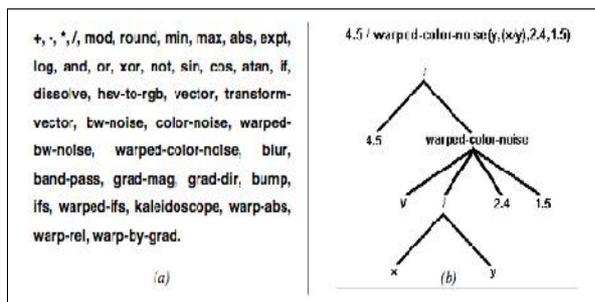


Figure 4. Le vocabulaire (a) et un arbre représentant une texture (b) selon Karl Sims.

En 1991, Karl Sims (33) a proposé l'utilisation d'opérateurs de croisement et de mutation issus de l'évolution artificielle pour la création de textures, structures et animations. L'objectif poursuivi ici était d'offrir un nouveau type d'interaction pour les créateurs en leur permettant de manipuler non plus une seule composition mais d'interagir avec un groupe de compositions.

Suivant les travaux précédents de nombreux auteurs se sont penchés sur une dualité génotype/phénotype pour la génération d'objets, leur objectif étant plus souvent l'optimisation que l'art. Ils ont pour cela proposé d'utiliser des structures de données variées comme support génotypique. Bentley (4) propose ainsi dans son modèleur GADES de représenter une forme comme une agglomération de polyèdres. Le génotype est alors la position et la taille de ces blocs. D'autres auteurs (3) ne codent que les paramètres de surfaces. L'évolution est alors contrainte par la famille de courbes mises en jeu. Parmi ces dernières une catégorie de surfaces nous a particulièrement intéressés car elle permet de générer une grande variété de formes avec une formule compacte: Les surfaces implicites.

3.1.2. Les surfaces implicites

Une surface implicite est une surface définie comme l'iso-potentielle d'une fonction mathématique. Ainsi, si nous considérons une fonction f appelée fonction potentiel et un scalaire V fixé, une forme tridimensionnelle sera définie par le lieu des points de \mathcal{R}^3 tels que $f(x,y,z)=V$. Comme nous pouvons le remarquer la fonction de potentiel définit une valeur en tout point de l'espace ce qui entraînera des effets induits lors du rapprochement de plusieurs potentiels (effets de fusion notamment).

Cette définition mathématique des fonctions implicites est très puissante car elle permet de générer virtuellement n'importe quelle forme d'objet. Elle pose cependant des problèmes pour la création car leur utilisation n'est pas très intuitive et pourrait mener à une création « aléatoire ».

Une autre méthode d'interaction avec ce type de surfaces a été proposée par Brian Wyvill (2). Dans son modèle on compose des surfaces implicites définies à

l'aide de squelettes à l'aide d'opérateurs de CSG classiques¹.

3.1.3. Notre modèle d'interaction

En s'inspirant des travaux précédents nous proposons un modèle permettant de tirer parti des possibilités offertes par les deux méthodes de définition des surfaces implicites que nous venons d'évoquer.

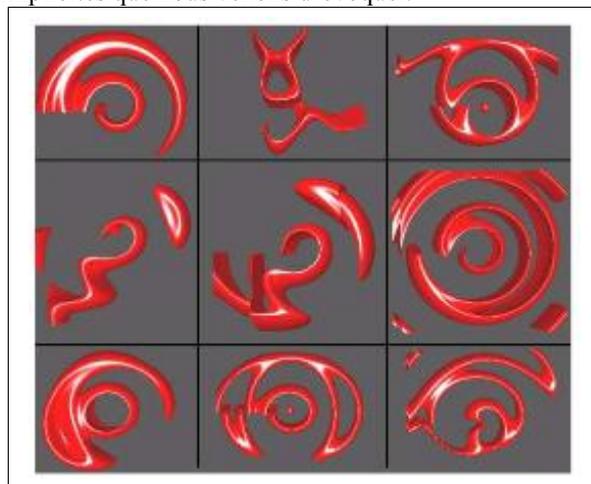


Figure 5. Mutations au niveau mathématique.

Nous proposons donc d'utiliser un système d'interaction à deux niveaux:

- Au niveau algébrique: Des formes de base sont définies à l'aide d'équations mathématiques qui constituent le génotype des formes. Les variables utilisées sont les coordonnées cartésiennes et polaires des points ainsi que des constantes aléatoirement fixées lors de leur création. Les opérateurs utilisés sont des fonctions unaires ($-, \sin, \cos, ^2, ^3, ^{0.5}, \dots$) ou binaires ($+, -, *, /, \dots$) auxquelles nous avons ajouté des opérateurs inspirés des travaux de Karl Sims précédemment cités. Ce dernier choix se justifie par l'adéquation entre ce type d'opérateurs et le processus de création. Nous avons ainsi crée des opérateurs de répétition, de déformation et de récursion. Le support de définition de ces fonctions mathématiques est un arbre. La création des éléments se trouvant à ce niveau peut être réalisée de manière directe par l'entrée d'une équation mais aussi par composition à l'aide d'opérateurs de croisement et de mutation portant sur la population des surfaces mathématiques. Dans notre modèle ce niveau mathématique constituera un ensemble de primitives.
- Au niveau CSG: Les surfaces définies précédemment vont être composées à l'aide d'opérateurs de type CSG. Ici encore c'est une structure d'arbre qui servira de support à ce codage. Ces arbres pourront être directement créés à l'aide de l'interface ou encore être produits par croisements et mutations.

¹Opérateurs de type union, intersection, mélange, extrusion, ...

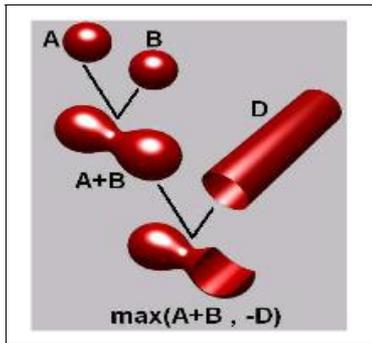


Figure 6. La légende de la figure devra être placée sous la figure.

Afin de permettre un processus de création itératif plus efficace notre système propose une interface basée sur la notion de populations. On trouvera ainsi quatre populations différentes:

- Une population des formes algébriques de base.
- Une population de travail au niveau algébrique.
- Une population au niveau CSG.
- Une population de travail au niveau CSG.

Les populations de travail servent à proposer à l'utilisateur différentes applications des opérateurs lorsque ceux ci peuvent proposer plusieurs résultats. Ils seront notamment utilisés pour les opérateurs de croisement et de mutation. Si une forme est jugée satisfaisante elle sera alors recopiée dans la population principale.

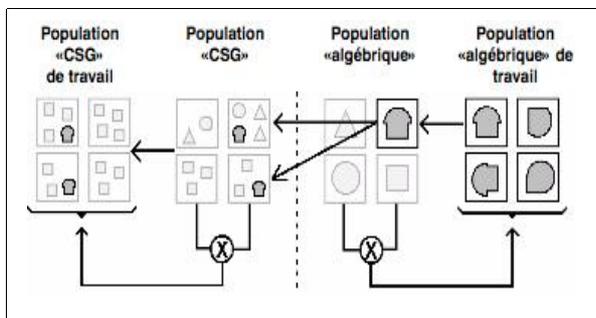


Figure 7. Relation entre les différents niveaux de populations.

Le système maintient de plus le lien entre les différents éléments des populations. Ainsi, toute modification d'une forme au niveau algébrique sera propagée de manière automatique à toute forme du niveau CSG la mettant en jeu.

3.1.4. Critique de cette expérimentation

La définition des surfaces au niveau algébrique apporte une grande richesse dans le processus de création des formes de base mais se révèle vite fastidieux à utiliser si on cherche à réaliser un objectif fixé. Au contraire le niveau CSG est relativement simple à appréhender mais pose des problèmes de richesse des formes générées lorsqu'on utilise un nombre restreint de primitives. Notre système, en mixant ces deux niveaux, permet à

l'artiste d'exploiter les apports de ces deux modèles. Il permet ainsi de générer des formes variées soit à but d'exploration de formes soit avec un objectif guidé. Il permet de plus la création de formes persistantes et évolutives car le génotype est explicite et peut donc être à tout moment retravaillé.

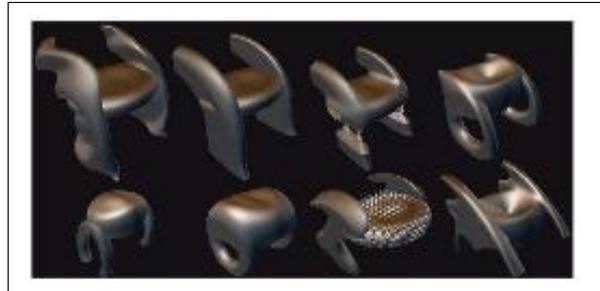


Figure 8. Exemple de génération guidée: population de « chaises ».

Notre travail a donc permis de dégager une nouvelle voie dans les domaines de la création artistique et du design assisté en proposant de nouveaux outils de création. Ces outils, si ils sont compréhensibles n'en sont pas pour autant utilisables par une personne ne connaissant rien aux concepts sous tendant les différents opérateurs et leurs liaisons. Ainsi si l'auteur (Iver Bailly Salins) arrive à exploiter totalement son outil de création il n'en est pas de même de personnes tierces auxquelles nous avons soumis cet outil. Cette remarque pose le problème de la liaison entre un artiste, ses outils et son oeuvre qui sont la plupart du temps totalement intriqués et indissociables.

3.2. Génération de comportements d'acteurs virtuels

Nous allons dans cette partie présenter l'utilisation d'un système d'apprentissage pour l'aide à la génération de comportement d'acteurs virtuels.

3.2.1. Définition du système de simulation

Cette application s'inscrit dans le cadre d'un projet de développement d'un système « classique » de simulation comportementale (37) appliqué aux humains virtuels.

Les caractéristiques d'un tel système sont les suivantes:

- Chaque entité virtuelle possède ses propres capteurs, effecteurs et son propre système comportemental.
- Une entité virtuelle est autonome et n'agit qu'en fonction de ses perceptions.
- Il n'y a pas de différence entre une entité simulée et un avatar.

Le système comportemental est basé sur un ensemble de modules comportementaux. Ces derniers sont organisés de manière hiérarchique et leur enchaînement peut être représenté sous la forme d'un automate. Ces modules fournissent l'ensemble des actions que l'entité virtuelle aura à réaliser et les place dans une liste priorisée qui sera ensuite exécutée en séquence sauf si une exception oblige à réarranger la liste.

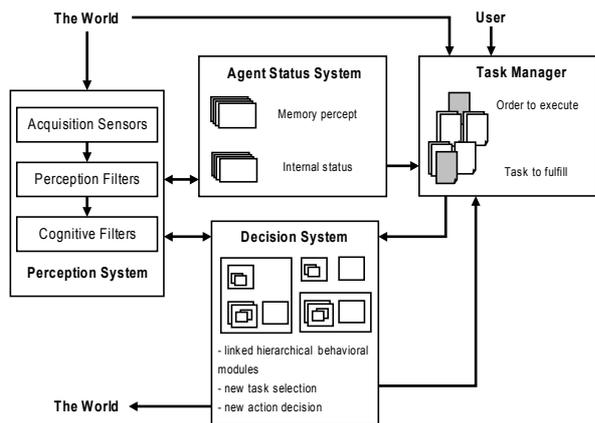


Figure 9. Aperçu de l'architecture du système comportemental.

3.2.2. Un système de classeurs pour la génération de comportements

Notre objectif est donc d'automatiser la génération des modules comportementaux. Nous proposons pour cela d'utiliser des systèmes de classeurs apprenant par renforcement les enchaînements de déclenchement de modules.

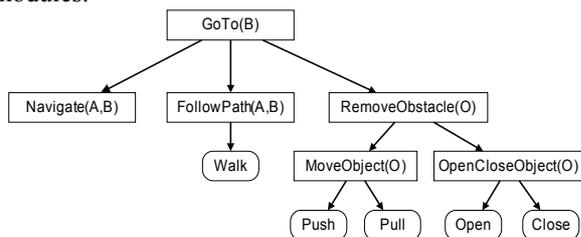


Figure 10. Le module de mouvement: GOTO

Dans une approche ascendante ce système sera utilisé pour créer les liens entre des modules comportementaux pré-existants afin d'en créer un nouveau. Ce module pourra ensuite être utilisé dans une création ultérieure et ainsi accroître la base des modules disponibles. Les règles du système de classeur décrivent les transitions entre les modules en accord avec l'état de l'entité et des entrées issues de l'environnement.

Nous avons dans une première approche appliqué notre système à la génération « offline » de modules. L'apprentissage est réalisé par renforcement. Cela signifie que nous évaluons le comportement du personnage apprenant en situation dans un environnement simulé. L'environnement fournissant à l'apprenant une récompense associée à chaque action réalisée dans l'environnement. Après quelques pas de simulation le système a convergé vers un ensemble de paires condition/action qui peuvent être visualisées comme un automate. Cet automate offre donc une vue synthétique du nouveau comportement produit.

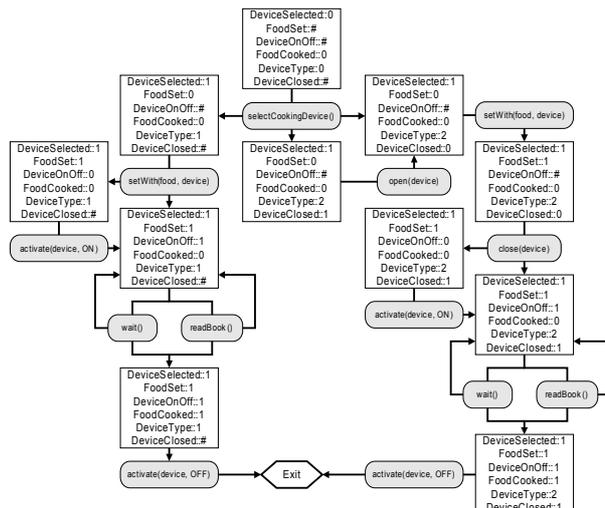


Figure 11. Un automate généré automatiquement: « Cuisiner ».

Après avoir appliqué cette approche à la génération d'un ensemble de modules comportementaux nous avons tenté de produire un automate plus complet en fournissant au système d'apprentissage un ensemble de comportements de base plus conséquent afin de complexifier la phase d'apprentissage. Nous avons aussi testé l'extensibilité de la méthode en ajoutant après apprentissage de nouveaux comportements pouvant être intégrés dans la séquence d'action. C'est par exemple le cas de l'action « readbook » qui a été placée par le système en parallèle de l'action « attendre ». Ces deux expérimentations ont mis en exergue les possibilités de notre méthode à s'appliquer à des environnements évolutifs.

4. MORPHOGENÈSE DE CRÉATURES ARTIFICIELLES

Les travaux que nous avons développés dans les domaines de la création d'images et de comportements nous ont poussés à étudier la possibilité de génération conjointe de morphologie et de contrôleurs. Nous sommes ainsi intéressés à la génération de créatures artificielles sous contraintes fonctionnelles.

Ces travaux se font dans la lignée de ceux de Karl Sims (34) qui a montré en 1994 que l'évolution artificielle était apte à créer de manière complète des créatures virtuelles¹. De nombreux auteurs dont Maciej Komosinski ou Hod Lipson (20,29) ont depuis prolongé ces travaux.

Dans ces expérimentations les créatures sont plongées dans un environnement 3D simulé comportant non seulement les interactions géométriques mais aussi les interactions physiques² entre les objets de la scène. Le comportement d'une entité est défini en créant des liens entre ses capteurs et ses effecteurs. Ces derniers contrôlent les jointures entre les différentes parties de la

¹Karl Sims travaillait alors pour « Connexion Machines » qui lui fournissait des moyens de calcul parallèle performants.

²Au sens de la mécanique newtonnienne.

créature et permettent ainsi de la faire bouger en modifiant les angles, vitesses ou couples appliqués à ces jointures..

Un système évolutionniste de type algorithme génétique est utilisé pour réaliser l'évolution conjointe de la morphologie et du système de contrôle.

L'originalité de notre travail consiste en une recherche d'interactions plus importantes entre les créatures générées et leur environnement par l'introduction de complexité dans ce dernier.

4.1.1. Définition des créatures artificielles

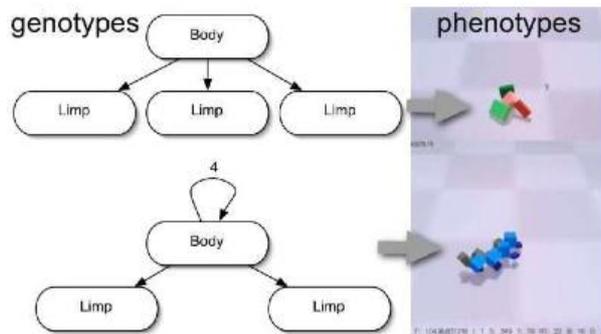


Figure 12. Définition des morphologies sous forme de graphes

La morphologie de nos créatures utilise le modèle original de Karl Sims qui proposait l'utilisation de graphes orientés récursifs qui permettent, à partir d'une forme compacte, de produire une grande variété de morphologies de grande complexité. Nous proposons d'utiliser un nouveau type de contrôleur comportemental basé sur l'utilisation d'un système de classeurs permettant la composition de modèles de signaux servant à contrôler les jointures.

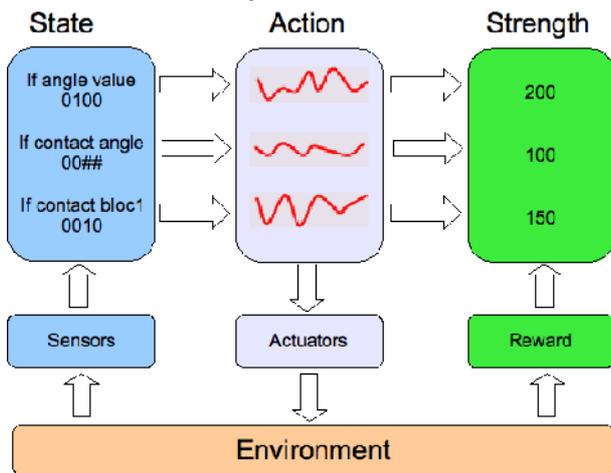


Figure 13. Lien entre capteurs et signaux activés

Chaque expérimentation dure 40 secondes de simulation durant lesquelles une créature est confrontée au problème à résoudre qui constitue sa fonction d'évaluation.

4.1.2. Expérimentations

Nous avons débuté par un problème classique: trouver une créature se déplaçant sur un sol plan. Des résultats encourageants nous ont permis de montrer la validité du modèle proposé.



Figure 14. Exemple de créatures obtenues sur le problème du déplacement.

Nous avons de plus étudié sur cette problématique simple l'effet de la fourniture d'un axe privilégié de déplacement sur la création de morphologies symétriques.

Nous avons ensuite confronté nos créatures à des expérimentations mettant en jeu des objets statiques.

La première expérience menée consistait à faire monter un escalier à nos créatures. Ici encore, la sélection se fait en mesurant la distance parcourue sur l'escalier.

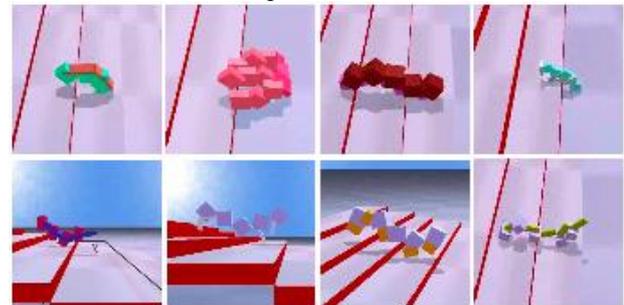


Figure 15. La problématique de la montée d'escaliers.

Nous avons trouvé plusieurs stratégies: certaines créatures développent ainsi des morphologies de taille importante tandis que d'autres privilégient des corps de type « vers » avec beaucoup d'éléments mobiles. Cette application nous a permis de mettre en évidence une autre capacité des algorithmes évolutionnistes: la possibilité de trouver des erreurs dans le programme de simulation. Nous avons en effet mis en évidence une stratégie de déplacement de créature utilisant des erreurs de notre système de gestion de la mécanique newtonienne. Ainsi une lignée de créatures provoquait une division par zéro qui se traduisait par leur éjection par dessus l'escalier et donc leur assurait une note maximale !

Nous avons ensuite étudié l'interaction entre nos créatures et un objet mobile. L'objectif est ici de réaliser le déplacement de la créature à l'aide d'un objet de type « planche à roulettes ».

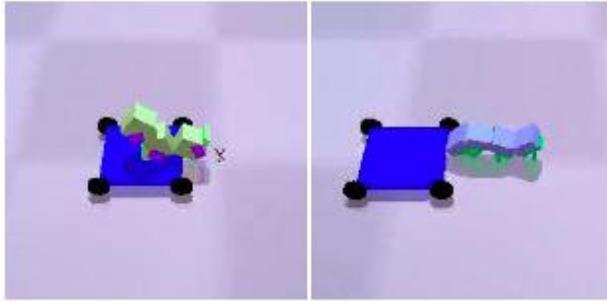


Figure 16. Créatures se déplaçant avec une planche à roulettes.

Cette planche possède 4 roues et l'objectif des créatures est de parcourir la plus grande distance possible en compagnie de la planche. Au démarrage de la simulation la créature est placée sur la planche qui est fixe. Ici encore les lancements successifs de l'algorithme nous ont permis de mettre en évidence une grande diversité de stratégies: certaines créatures lancent la planche et la rattrapent tandis que d'autres montent dessus et la poussent en utilisant une partie de leur morphologie comme propulseur.

4.1.3. Conclusion

Nous avons montré avec ces expérimentations la puissance des systèmes d'évolution et leur capacité à fournir des solutions face à des problèmes de plus en plus complexes. La similarité entre nos créatures qui ont majoritairement une forme de type « vers » est un effet de bord de notre modèle de définition des morphologies et des opérateurs génétiques qui leur sont associés. Nous avons aussi validé le nouveau type de contrôleur basé sur les systèmes de classeurs que nous avons utilisé. Nous travaillons maintenant à la création d'un environnement de type « écosystème » où les créatures en interaction évolueront sous l'effet d'une fonction endogène et non plus d'un but exogène.

5. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article un ensemble de travaux réalisés dans l'équipe VORTEX de l'IRIT portant sur la génération de formes et de comportements en utilisant des techniques issues de la vie artificielle. En tirant un bilan global de ces expériences nous pouvons dire que le problème majeur soulevé par ces systèmes est l'expérience que nécessite leur mise en oeuvre de manière efficace. La complexité qui existait dans l'étude et la décomposition du système proposée par les systèmes classiques ne disparaît donc pas mais est en partie remplacée par une compétence certaine dans la mise en oeuvre des différents systèmes. On ne parle pas ici simplement de la définition de fonctions d'évaluation mais aussi dans le réglage des algorithmes et dans la définition d'opérateurs cohérents et efficaces dans l'application développée. Il existe néanmoins des cas où ces méthodes sont les seules disponibles et

permettent alors d'obtenir des résultats là où les systèmes classiques sont inopérants ou inefficaces. D'un point de vue de la relation entre le système et ses créateurs ces systèmes sont néanmoins très intéressants car ils proposent réellement de nouveaux types de solutions qui n'ont pas été créés directement par un esprit humain. Reste alors à créer le système de contrôle permettant que la création reste conforme aux besoins réels du créateur.

Nous continuons actuellement les travaux portant sur la génération de créatures en nous plaçant au niveau de la croissance cellulaire. Notre objectif est ici d'ouvrir un nouveau champ de création de systèmes autonomes aptes à s'auto-configurer, s'auto-assembler et s'auto-réparer¹ dans des environnements toujours plus complexes.

6. RÉFÉRENCES

- [1] I. BAILLY SALINS, H. LUGA, Artistic 3D Object Creation Using Artificial Life Paradigms, SmartGraphics International Symposium (SG 2007), Kyoto, Andreas Butz, Brian Fisher, Antonio Krüger, Patrick Olivier (Eds.), Springer, LNCS 4569, p. 135-145, june 2007.
- [2] J. BAJA, J. BLINN, J. BLOOMENTHAL, M.P. CANI, A. ROCKWOOD, A., B. WYVILL, B., G. WYVILL, Introduction to Implicit Surfaces. Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Francisco, CA, USA 1997.
- [3] E.J. BEDWELL, D.S. EBERT Artificial evolution of implicit surfaces, ACM SIGGRAPH 98 Conference abstracts and applications, Orlando, Florida, United States, 1998.
- [4] P.J. BENTLEY, Evolutionary Design by Computers, Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Francisco, CA, USA (1999)
- [5] B. BLUMBERG, M. DOWNIE, Y. IVANOV, M. BERLIN, P. JOHNSON B. TOMLINSON, Integrated Learning for Interactive Synthetic Characters, SIGGRAPH 02, San Antonio, TX, July 21-26, 2002.
- [6] J. BONGARD, C. PAUL, Investigating morphological symmetry and locomotive efficiency using virtual embodied evolution. In J. - A. M. ET AL. Ed., From Animals to Animats: The Sixth International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour (pp. 16, 93), 2000
- [7] J. BONGARD AND R. PFEIFER, How the Body Shapes the Way We Think: A New View

¹Axe de recherche self*

- of Intelligence. Bradford Books, ISBN-10:0-262-16239-3, 2007.
- [8]J. BONGARD AND H. LIPSON Integrated design, deployment and inference for robot ecologies. In Proceedings of Robosphere, (pp. 19, 20), 2004.
- [9]M. BRET, Virtual living beings, Heudin, J.-C. (ed.) VW 2000. LNCS (LNAI), vol. 1834, pp. 119–134. Springer, Heidelberg, 2000.
- [10]R. BROOKS, Intelligence without representation, Artificial Intelligence 47, 1-3, 139–159. (p. 4), 1991.
- [11]S. CUSSAT-BLANC, H. LUGA, Y. DUTHEN, Using a single cell to create an entire organ, International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2007), Esbjerg (Danemark), T. Brooks, Y. Ikei, E. Peterson, M. Haller (Eds.), IEEE Computer Society, p. 300-301, november 2007.
- [12]C. DARWIN, On the origins of species by means of natural selection, 1859.
- [13]J. FUNGE, X. TU and D. TERZOPOULOS, Cognitive Modeling: Knowledge, Reasoning and Planning for Intelligent Characters, SIGGRAPH 99, Los Angeles, CA, August 11-13, 1999.
- [14]D.E. GOLDBERG, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. (pp. 11, 14, 27), 1989.
- [15]D. HEBB, The Organization of Behavior, 1949.
- [16]J.H. HOLLAND., Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975. Republished by the MIT Press, 1992.
- [17]C. JACOB, H. KWONG, B. WYVILL, Toward the creation of an evolutionary design system for implicit surfaces, Western Computer Graphics Symposium, Skigraph'01, Sun Peaks Resort, British Columbia, 2001.
- [18]M.W. JONES, Direct surface rendering of general and genetically bred implicit surfaces, 17th ann. conf. of eurographics (uk chapter) cambridge, pp. 37–46, 1999.
- [19]Y. KAWAGUCHI, Electronic Art and Animation Catalog, pp. 90–91. ACM Press, New York, NY, USA SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH, 2005.
- [20]M. KOMOSINSKI, The world of framsticks: Simulation, evolution, interaction. In VW '00: Proceedings of the Second International Conference on Virtual Worlds, (London, UK, 2000), pp. 214–224. Springer-Verlag. (pp. 15, 16, 17, 42, 45, 64, 87), 2000.
- [21]J.R. KOZA, Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. MIT Press (a Bradford book) Cambridge, MA, USA 1992.
- [22]J.R. KOZA, The genetic programming paradigm: Genetically breeding populations of computer programs to solve problems, Soucek, B., Group, I.R.I.S. (eds.) Dynamic, Genetic, and Chaotic Programming, pp. 203–321. John Wiley, New York, 1992.
- [23]C.G. LANGTON, Artificial Life: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, Boston, MA, USA, 1989.
- [24]C.G. LANGTON, Proceedings of the Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems (ALIFE '87), Los Alamos, NM, USA, September 1987, Volume 6 of Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Addison- Wesley. (pp. 15, 18), 1989.
- [25]F. LAMARCHE, S. DONIKIAN, Automatic Orchestration of Behaviours through the management of Resources and Priority Levels, in Autonomous Agents and Multi Agent Systems, Bologna, Italy, July 2002.
- [26]N. LASSABE, H. LUGA, Y. DUTHEN, Evolving creatures in virtual ecosystems., Pan, Z., Cheok, A.D., Haller, M., Lau, R.W.H., Saito, H., Liang, R. (eds.) ICAT 2006. LNCS, vol. 4282, pp. 11–20. Springer, Heidelberg, 2006.
- [27]N. LASSABE, H. LUGA, Y. DUTHEN, A New Step for Evolving Creatures, IEEE Symposium on Artificial Life (IEEE-ALife 2007), Honolulu, Hawaii, IEEE, p. 243-251, april 2007.
- [28]O. LE ROUX, Modélisation déclarative d'environnements virtuels : contribution à l'étude des techniques de génération par contraintes. PhD thesis, Université Paul Sabatier, 2003.
- [29]H. LIPSON, Curious and creative machines., "50 Years of AI", pp. 316– 320. (p. 2), 2007.
- [30]H. LUGA, Y. DUTHEN, R. PELLE, A. BERRO, Extended algebraic surfaces generation for volume modeling: an approach through genetic algorithms, Proceedings of Visualization and Modeling, Leeds, British Computer Society, 1995.

- [31]D. PANZOLI, H. LUGA, Y. DUTHEN, Introducing an Associative Memory in a Neural Controller for Advanced Situated Agents, International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence (3IA 2007), Athens. Greece, Dimitri Plemenos (Eds.), Laboratoire XLIM - Université de Limoges, p. 137-149, may 2007.
- [32]T.S. RAY, Aesthetically evolved virtual pets. In Artificial Life 7 workshop proceedings, pp. p158–161. (pp. 27, 33, 36), 2000.
- [33]K. SIMS, Artificial evolution for computer graphics, SIGGRAPH '91, Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 319–328. ACM Press, New York, NY, USA 1991.
- [34]K. SIMS, Evolving 3d morphology and behavior by competition, Artificial Life IV Proceedings, pp. 28–39. MIT Press, Cambridge, 1994.
- [35]S. SANCHEZ, H. LUGA, Y. DUTHEN, Learning classifier systems and behavioural animation of virtual characters., Gratch, J., Young, M., Aylett, R., Ballin, D., Olivier, P. (eds.) IVA 2006. LNCS (LNAI), vol. 4133, p. 467. Springer, Heidelberg, 2006.
- [36]S. SANCHEZ, O. ROUX, H. LUGA, H., V. GAILDRAT, Constraint-Based 3D Object Layout using a Genetic Algorithm, 3IA'2003, The Sixth International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence, Limoges, 14/05/03-15/05/03, 2003.
- [37]D. TERZOPOULOS, X. TU, Artificial fishes : Autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world. Artificial Life 1, 4, 327–351. (p. 19), 1994.
- [38]S. TODD, W. LATHAM Evolutionary Art and Computers, Academic Press, Inc, Orlando, FL, USA, 1994.
- [39]A. TURING, The chemical basis of morphogenesis, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, No.641, Vol. 237, 14 August 1952.
- [40]J. VENTRELLA, Explorations in the emergence of morphology and locomotion behavior in animated characters. In Proceedings of the 4th International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems Artificial Life IV (Cambridge, MA, USA), pp. 436–441. MIT Press. (p. 47), 1994.
- [41]J. VENTRELLA, Designing emergence in animated artificial life worlds, VW '98: Proceedings of the first International Conference on Virtual Worlds, London, UK, pp. 143–155. Springer-Verlag. (pp. 17, 47), 1998.
- [42]M. WHITE LAW, Metacreation: Art and Artificial Life. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2004.
- [43]S.W. WILSON, ZCS: a zeroth level classifier system. Evolutionary Computation, 2(1), 1-18 (1994). Untel, A. *Titre du livre*. L'Armada, Paris, 2005.

FORME, IMAGE, MOUVEMENT : VERS UN ART DU MOUVEMENT VISUEL

Annie Luciani

Laboratoire ICA, INPG, 46 av. Félix Viallet, 38 000 Grenoble

Annie.Luciani@imag.fr

RÉSUMÉ

Nous montrons tout d'abord en quoi le paradigme de la modélisation physique particulaire masses / interactions présente deux propriétés essentielles nécessaires à un outil de création informatique pour le mouvement visuel : la généralité et la modularité. Puis, nous abordons trois questions fondamentales liées aux conditions technologiques et théoriques pour l'émergence d'un art du mouvement visuel. La première est la faible utilisation des propriétés de généralité et de modularité du modèle physique dans l'animation par ordinateur qui, mettant l'accent sur le réalisme, favorise des modèles au cas par cas d'objets réels. La deuxième est que la mise en forme visuelle du modèle physique particulaire n'est pas non plus traitée de manière modulaire et générique, ce qui limite ainsi considérablement son usage pour les arts visuels. Au centre de cette difficulté se trouve la question d'un outil de modélisation libre de la topologie spatiale, adaptée au modèle particulaire. Ces deux conditions sont nécessaires à l'émergence d'un art du mouvement visuel. La troisième difficulté est d'ordre artistique. La relation image / mouvement a été maintes fois traitée dans les arts visuels, mais les spécificités d'un art du mouvement visuel n'ont jamais été élaborées pour elles-mêmes. Sont en cause ici les réminiscences de « *l'ut pictura poesis* », ramenant un art à l'autre et la prise de position moderniste oeuvrant à les séparer clairement. Ainsi, ni un art du mouvement visuel ne peut naître, malgré toutes ses prémisses séculaires, ni des bases solides d'un art multisensoriel ne peuvent être élaborées. Nous commençons ici une analyse dans l'objectif de rompre ces digues pour poser les bases de nouvelles formes artistiques fondées sur le temps comme donnée première.

1. MODELE PHYSIQUE PARTICULAIRE ET SYNTHESE D'IMAGES

La modélisation physique particulaire a été l'une des premières méthodes de simulation physique à avoir été introduite en synthèse d'images avec les premières simulations de corps déformables [Luc84][Mil88] et de fluides [MP89][Ton91]. L'essentiel des activités de recherche s'est cependant très vite focalisé sur la modélisation de corps solides rigides ou déformables. En conséquence, les principaux moteurs de simulation physique utilisés en synthèse d'images et dans les jeux

[Havok, Open Dynamics Engine, Tokamak] sont basés sur la physique du solide pour modéliser ce type de d'objets et non sur la modélisation physique particulaire.

En parallèle, les grands logiciels d'animation 3D (Maya, 3DStudio Max, Blender, Lightwave) ont introduit la modélisation physique en commençant par les techniques physiques proches de leur philosophie de base : l'objet 3D. Les procédés invoqués ont alors été tout d'abord la physique du solide, puis des structures masses - ressorts qui viennent se plaquer sur un maillage géométrique classique pour la simulation d'objets géométriques déformables comme des tissus. La modélisation physique particulaire y fait son apparition sous le vocable restreint de « systèmes de particules », pour représenter des effets comme des explosions [Ree83] ou des injections de simulacre de fumées. La raison en est évidente : bien qu'en grand nombre, les collisions entre particules sont très simples à calculer. Cependant, la modélisation de phénomènes naturels s'est très vite tournée vers des modèles développés au cas par cas (« *one shot model* ») : effets de fumées [FSJ01], de flammes [NFJ02], ou de liquides [EMF02], pour ne citer que les plus réputés.

Or, les travaux des pionniers Luciani, Miller et Tonnesen, mais surtout de leur prédécesseur et inspirateur, D. Greenspan [Gre97] ont montré que le modèle physique particulaire avait un atout qu'aucun autre modèle physique n'avait : sa généralité, c'est-à-dire sa capacité à créer une vaste panoplie d'effets avec un seul formalisme et un seul type de savoir-faire. Poursuivant les travaux de Greenspan, A. Luciani et les chercheurs du groupe de recherche ICA / ACROE ont ainsi modélisé une très grande variété de comportements par des modèles particuliers masses / interactions (Figure 1): muscles [DLC93], corps rigides articulés [CL95], déformables [CLH96], turbulences [LHD95], fractures [LG97], cellules biologiques [BL03], avalanches [LHM95][Luc00], pâtes [GLN03], foules [HLTC03], corps humains [HL05]... Plusieurs modèles de phénomènes naturels basés sur cette technique ont également été développés sous le vocable plus codé de « simulation lagrangienne » [MCG03] [MSKG05] [DCG08]. Cette propriété de généralité est d'ailleurs redécouverte avec enthousiasme par certains membres de la communauté d'informatique graphique, par exemple les chercheurs de la société ILM [KNB03].

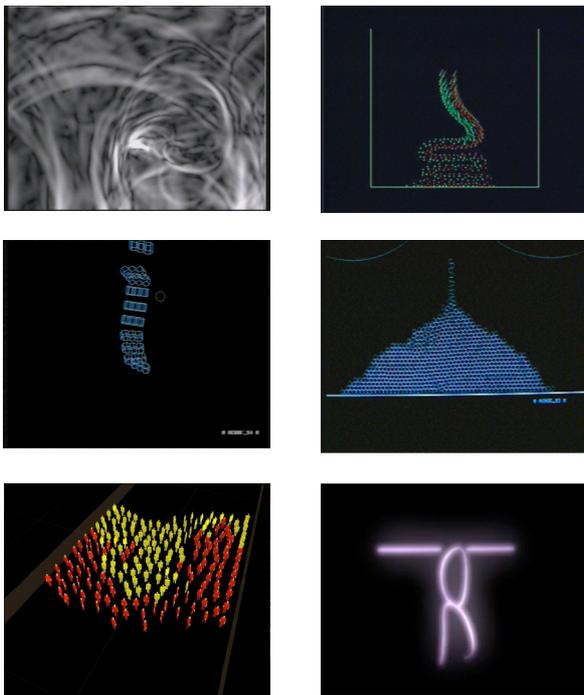


Figure 1. Modèles masses-interactions (ACROE): liquides, pâtes, fractures, sables, foules, mouvements dansés.

Cependant, le passage de modèles de type « systèmes de particules » ou de modèles de type « masses / ressorts », à des modèles particuliers de type réseaux « masses / interactions » pose un ensemble de questions nouvelles, précisément celles de la *généricité* et de la *modularité*. Or, ces deux propriétés, négligées dans les modèles spécifiques développés par la synthèse d'images, sont essentielles pour tout outil de création. Ainsi, au-delà de l'usage habituel du modèle physique pour atteindre un plus grand degré de réalisme des images de synthèse, le paradigme de la modélisation physique masses / interactions est d'abord et avant tout un puissant formalisme pour modéliser des mouvements quelconques, réels ou imaginés, par l'artiste lui-même.

2. DUALITE FORME – MOUVEMENT DANS LES MODELES PHYSIQUES PARTICULAIRES

Le problème de l'habillage est un problème intrinsèque des modèles particuliers et plus particulièrement des modèles physiques particuliers.

Dans la synthèse de formes visuelles, il s'est posé lors de l'usage de points en lieu et place de facettes ou d'éléments de volume, et ce dès l'origine de la modélisation particulière non physique [Ree83] dont le propos était d'avoir accès à des phénomènes très peu structurés comme des explosions, des feux d'artifices. L'obtention de ces effets a conduit à descendre vers des éléments de discrétisation spatiale de plus en plus petits et de plus en plus élémentaires : du volume, à la facette puis finalement au point. Le passage au *point* comme

élément de discrétisation d'une forme est cependant un passage critique, puisque le point est un élément topologique de dimension zéro, duquel toute notion de forme et de spatialité sont exclues. C'est à ce prix qu'il offre, à contrario, l'avantage de pouvoir recréer toute forme, de quelque nature ou structure qu'elle soit.

Dans la synthèse de mouvement par modèle physique, à l'inverse, tant que l'on utilise des modèles physiques procédant de la physique des solides rigides ou déformables, la question de l'habillage ne se pose structurellement pas, ou peu. En effet, la forme est incluse dans le procédé de calcul physique. Ainsi, dans la physique du solide rigide, elle est portée par les équations des moments. Dans les solides déformables, les méthodes de types décomposition en éléments finis procèdent à un maillage de la forme, pour assurer les conditions de contiguïté de la matière dans les calculs physiques. Cela n'est pas du tout le cas dans un modèle physique particulière masses / interactions. En effet, il existe deux différences fondamentales entre la représentation physique particulière masses – interactions d'un objet ou d'un phénomène et sa représentation visuelle, différences qui sont critiques pour l'utilisation de ce type de modèle en synthèse d'image. Elles portent sur le nombre de points nécessaires dans chacune des représentations et sur les relations entre ces points.

En ce qui concerne le nombre de points, la discrétisation de la matière en masses ponctuelles pour représenter le mouvement réclame en général un nombre de points inférieur à celui nécessaire à la visualisation de l'objet. Ainsi, il suffit d'une masse ponctuelle placée au centre de gravité d'un pendule sphérique pour représenter son mouvement alors que le rendu visuel de sa forme nécessite de nombreux points surfaciques. La géométrie, et au-delà le rendu visuel, travaillent donc à une résolution spatiale supérieure à celle du comportement dynamique. La stratégie de modélisation dans le modèle physique consiste à ne définir que le nombre de points nécessaires et suffisants pour obtenir le mouvement désiré. Les raisons sont tout d'abord des raisons conceptuelles d'économie de représentation. Mais à celles-ci sont associées des raisons pragmatiques de temps de calcul d'une part et de stabilité des simulations d'autre part. Les temps de calcul sont en effet plus lourds pour les points physiques que pour les points géométriques. De plus, si l'on augmente le nombre de points matériels pour les faire se rapprocher au mieux des points nécessaires à la visualisation, les conditions de convergence des équations différentielles discrètes sont plus exigeantes. On appelle souvent « *modèle minimal* » le modèle physique composé du nombre optimal de points matériel et d'interactions, pour un phénomène donné.

En conséquence, il faut procéder à un habillage du modèle physique particulière, habillage qui consiste à créer des points supplémentaires et à donner une forme

spatiale à tous. De nombreuses méthodes ont été développées pour résoudre ce problème. Elles consistent à appliquer plus ou moins directement une forme aux points physiques : fonctions d'interpolation entre points physiques, sommets d'un maillage [DSB99], courbes et surfaces paramétriques [RNN00], treillis support de déformation de formes libres [Coq90], squelettes [BL99], fonctions globales de déformation [BD93], expansions des points par ajout de primitives géométriques volumiques [BBB98] ou par surfaces implicites statiques [Can98] ou dynamiques [Hab97]. Pour chacun de ces procédés, des méthodes spécifiques de rendu visuel de tel ou tel objet ou phénomène ont été proposées, en particulier en lien avec la représentation de phénomènes naturels.

En ce qui concerne les relations entre les points physiques, partant d'un objet matériel ou d'un phénomène à modéliser, la modélisation des comportements dynamiques consiste en une condensation en points matériels reliés par des interactions physiques. Les interactions reliant les points matériels ne représentent pas (ou pas seulement) des contiguïtés matérielles ni même nécessairement des relations spatiales. Certaines interactions peuvent représenter des couplages fonctionnels, qui ne traduisent pas la présence de matière, C'est le cas par exemple des attractions à distance ou des interactions visqueuses. De même, [Hel92] et [HLTC03] ont modélisé des comportements de foule par des masses ponctuelles en interactions visco-élastiques à distance.

Strictement parlant, le modèle physique particulière produit donc un nuage de points en mouvement, entre lesquels il est nécessaire de reconstruire les relations spatiales perdues ou noyées dans le processus de réduction à des points physiques. Les modèles physiques particulières sont donc des modèles dits «*meshless*» (i.e. sans maillage a priori) qui nécessitent, pour être visualisés, de générer une topologie [MHTG05]. D'une manière plus générale, avant de construire une géométrie, un passage obligé préliminaire consiste à (re) structurer ce nuage de points.

L'hypothèse que nous défendons ici est que, si ces méthodes d'habillage, au demeurant très nombreuses, sont particulières, c'est que chacune d'elles se fonde sur une topologie à la fois plus ou moins implicite et spécifique au cas traité. Le cas exemplaire est celui des graphes de mélanges dans les surfaces implicites [GW95]. Ainsi, le chaînon manquant permettant de faire le chemin inverse du point vers la forme spatiale, d'une manière conceptuellement aussi générique que la condensation ponctuelle, est celui qui permettra explicitement une modélisation de la topologie, et ce avant même la modélisation de la géométrie, donc de la forme spatiale. On pourra ainsi espérer unir la modélisation d'objets non structurés (fumées, eau, ...) et d'objets structurés (personnages, véhicules, objets manufacturés, ...), en passant par ceux qui se fracturent,

se recombinent ou se recollent ou se solidifient. La modélisation par l'utilisateur d'un modèle topologique à partir du modèle physique particulière est donc une étape nécessaire pour fournir un modèle géométrique à des fins de visualisation. Ceci est d'autant plus nécessaire que la topologie est le premier caractère prégnant dans l'identification visuelle d'une scène ou d'un objet, puisque l'on identifie d'abord s'il y a une ou deux choses, si ces choses se recombinent ensuite en une seule ou au contraire se fracturent en plusieurs, si elles sont co-extensibles à l'infini (plan) ou se replient sur elles-mêmes (sphères), si elles sont des embranchements (arbres) ou si elles sont monolithiques. Nous avons d'ailleurs pu constater dans les ateliers de création Art-Enact organisés par l'ACROE, l'enthousiasme d'artistes, élèves ou confirmés, lorsque nous avons évoqué cette question sur des cas simples autorisés par le logiciel MIMESIS [ELC06] développé par le laboratoire.

Du côté des modèles topologiques, deux types de démarches coexistent :

- l'une en provenance de la topologie et de la géométrie différentielle et qui se fonde sur des critères de structures continues (points de rebroussement, points selles, plis, etc...) comme chez [Bru85] [Tho88]. Ces auteurs mettent d'ailleurs l'accent sur la pertinence entre topologie et perception.

- L'autre en provenance de représentations de type graphes et cartes qui définissent les structures topologiques par des schémas logiques ou combinatoires comme des adjacences ou des fusions. Il existe de nombreux modèles topologiques discrets, que nous ne détaillerons pas ici, capables de décrire les relations de voisinages entre points, comme les relations d'incidence et d'adjacence entre les cellules topologiques (sommets, arêtes, faces, volumes).

On peut remarquer ici que la première est d'inspiration plus analytique et la seconde de tendance plus constructiviste. C'est pour cette raison que cette dernière est *a priori* plus adaptée que la première pour la créativité graphique et perceptuelle en images de synthèse. Elle s'avère plus à même de représenter des métamorphoses et des transformations : croissance de plantes, transformations d'un objet en un autre [Lie89].

Les premiers usages des modèles topologiques à des fins de visualisation l'ont été pour simuler l'évolution de structures topologiques, les plus connus étant probablement les L-Systèmes pour modéliser des plantes [PL90]. Il s'agit de représenter des évolutions topologiques et non des variations topologiques subséquentes à un phénomène dynamique. Hormis [LSM08] et [JCD08], à notre connaissance, peu de travaux se sont intéressés à l'évolution de la topologie intrinsèque à des dynamiques de processus génériques. Deux démarches sont ici possibles :

- Celles partant de l'idée d'un *mapping* «*amont*», où un modèle topologique est défini en amont d'un modèle

physique masses/interactions (projet ANR VORTISS, travaux encore non publiés). Le modèle physique est alors chargé de suivre les changements topologiques définis dans le modèle topologique amont.

- Celles partant de l'idée d'un *mapping* « aval », où un modèle physique masses/interactions contrôle un modèle topologique aval. A notre connaissance, aucune mise en œuvre opérationnelle n'a jamais été réalisée. Ce problème fondamental a été posé dès la thèse de A. Luciani [Luc85] et est repris de manière très simple dans le logiciel MIMESIS. En effet, le logiciel MIMESIS intègre des possibilités d'affectation libre de topologies fixes en aval d'un réseau masses/interactions. Les recherches portent sur l'effet du changement de topologie sur la perception du mouvement. En changeant uniquement la topologie dans la représentation visuelle, nous avons ainsi montré, dans l'expérience du « boulier / drap » (1999) (Figure 2 haut) qu'un modèle physique recréant le mouvement de billes qui s'entrechoquent représentait aussi certains mouvements de tissus déformables ; Ou encore, dans l'expérience de la « surface / poursuite » (1985) (Figure 2 bas) qu'un modèle physique de surface déformable représentait également le mouvement de deux objets en interaction. Cela signifie que la représentation visuelle influe notablement sur la conception du modèle physique et qu'elle est donc un élément de créativité important pour l'élaboration même du modèle physique. Cela va à contresens de la méthodologie de modélisation physique usitée en synthèse d'images, très orientée par la quête d'un réalisme objectif d'un objet à représenter.

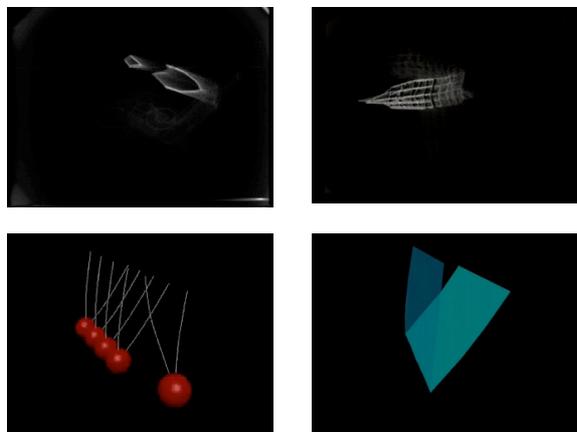


Figure 2. Expériences MIMESIS Topologie et modèles physiques : En haut « Poursuite / Surface » ; en bas « Boulier / drap ».

Ces expériences simples (non publiées) nous ont enseigné deux choses :

- L'une est que le changement morphologique et en particulier topologique affecte totalement l'identification du modèle physique, jusque parfois à le changer radicalement.
- L'autre est que le changement de représentation visuelle permet de concevoir des modèles physiques souvent plus simples, auxquels on ne pense pas lorsque l'activité de modélisation consiste à obtenir une sorte de

copie de l'objet. Par conséquent changer *ad libitum* la représentation visuelle (séparément topologique, géométrique et optique) aide à voir le mouvement pour lui-même, indépendamment de la forme, et donc à lui trouver un modèle adapté. Elle aide à *abstraire le mouvement de la forme*.

3. VERS UN ART DU MOUVEMENT VISUEL

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons soulevé la question de la relation forme – mouvement selon les points de vue scientifiques et techniques, et avons montré qu'il s'agit bien d'une question non résolue. Dans ce paragraphe, nous allons examiner ces incidences dans le domaine artistique.

La nécessité d'une telle question est justifiée par le fait qu'à notre sens, un véritable art du mouvement visuel serait encore à fonder, malgré des prémisses séculaires, et que les technologies actuelles en seraient une occasion exceptionnelle. Un art du mouvement est un art dans lequel le mouvement lui-même serait l'objet artistique. Il faut pour cela accepter de faire des distinctions entre « image en mouvement » ou « mouvement visuel », et un ensemble d'autres considérations liant image et mouvement : mouvement dans l'image, mouvement producteur de formes ... , plus fréquemment adressées et discutées.

En effet, l'art du mouvement visuel est rarement considéré pour lui-même. La plupart du temps, il est considéré soit comme une composante d'un effet sensible composite : le mouvement d'un objet (un objet ayant une forme spatiale), soit comme une modalité de production d'autres choses que lui. Il en est ainsi du mouvement comme processus de production de la ligne, puis de la forme, que P. Klee développe tout au long de son ouvrage « la pensée créatrice » [Klee73]. C'est bien la même idée qui s'exprime dans toute la démarche picturale de Jacques Mandelbrojt [Mandelbrojt], citant Olivier Debré « la peinture, c'est du temps devenu espace ». Or, si la pertinence de la référence au mouvement, qu'il soit producteur de la forme ou évoqué dans la forme, ne fait aucun doute, il est remarquable de constater, chez P. Klee par exemple, que le processus de mémoire inhérent à la trace n'est jamais explicitement cité, alors qu'il est une condition nécessaire pour que la forme existe. Ainsi, je cite, « Dès que le crayon touche la feuille de papier, la ligne apparaît ... Nos enfants eux-mêmes commencent par là. Un jour, ils découvrent le phénomène du point animé par un mouvement et cette découverte provoque un enthousiasme qu'il est difficile d'imaginer ». Cet enthousiasme vient sans aucun doute de l'image du mouvement *inscrit dans la trace*. Car, le même mouvement ponctuel sans trace ne provoquerait sans doute pas le même type d'émotion, ni même un quelconque enthousiasme, tant il s'agit tout simplement de la majorité de nos gestes les plus quotidiens, .. *des gestes sans traces...* Or tel serait la première lettre d'un

art du mouvement ... *des points invisibles en mouvement visible*.

Autrement dit, si la trace est une condition nécessaire à la forme, le mouvement visible n'en est pas même une condition suffisante. Avec la trace, il y a forme, avec ou sans mouvements. Sans mouvement, qu'il soit réel, producteur ou évoqué, ces formes n'en sont pas moins pourvues de sens. Inversement, ni la trace ni la forme ne sont des conditions nécessaires au mouvement visuel. L'éphémère, et l'art du fugitif, dans lequel l'espace ne joue qu'un rôle de composante support, existent, dans la musique bien sûr et dans la danse, mais également dans les arts visuels. L'exemple immédiat est celui de l'art cinématique, avec des œuvres emblématiques comme « les métronomes » de Rebecca Horn, œuvre dans laquelle les effets constitutifs sont des effets purement temporels de synchronisation / désynchronisation sur des échelles de temps très larges : synchronisations d'une extrême brièveté, désynchronisations d'une extrême longueur...

Les deux composantes, « forme » et « mouvement » sont donc dissociables, car l'une n'est ni nécessaire, ni suffisante pour l'autre. Nous ne pouvons donc pas être totalement d'accord avec P. Klee lorsqu'il dit, *je cite* : « Dans son Laocoon, sur lequel nous avons jadis gaspillé notre temps et notre énergie en réflexions superflues, Lessing insiste beaucoup sur la distinction entre art spatial et art temporel. Mais en y regardant de plus près, ce n'est qu'illusion et vaine érudition. Car l'espace est aussi une notion temporelle ».

La confusion vient, nous semble-t-il, de l'association trop rapide entre *forme et espace* d'une part et *mouvement et temps* d'autre part. Si cette identité est admise, si de plus nous devons admettre l'existence d'un concept de forme et d'un concept de mouvement distincts, puisqu'au moins la première peut se passer du second, alors, nous devons admettre, avec Lessing [Lessing, 1802], que l'on puisse distinguer entre un art spatial et un art temporel. La naissance et le développement d'un art visuel du mouvement se trouvent limités par ces confusions. Ainsi étrié, son espace vital n'a guère pu se développer au-delà de quelques œuvres maîtresses mais particulières de l'art cinématique, du cinéma d'animation ou de la vidéo expérimentale. En ce sens, l'entreprise de Lessing dans son Laocoon, est salutaire, puisque visant à insister sur les différences entre les arts plutôt que sur leurs similitudes, elle leur permet ainsi de respirer, d'exister pour eux-mêmes, et de maintenir une égalité entre les arts.

La comparaison entre les arts, et en particulier les arts de la vue et les arts de l'ouïe, est un exercice qui s'est développé à partir de la renaissance, avec en particulier la doctrine de « *ut pictura poesis* » - ou la peinture comme poésie [Wri91]. Cette doctrine est une reprise d'une phrase d'Horace « *ut pictura poesis erit* » - il en est de la poésie comme de la peinture. Mais, comme le

fait remarquer Jacqueline Lichtenstein [Lich03], il s'agit d'une reprise inversée, puisque Horace rapportait les arts du langage à ceux de l'image : « L'esprit est moins frappé par de ce que l'auteur confie à l'oreille que de ce qu'il nous met sous les yeux, ces témoins irrécusables » (Horace, Épître aux Pisons). Cependant, cette inversion, soumettant donc la peinture aux catégories du discours, a joué un rôle essentiel pour la peinture, puisqu'elle a permis l'accession de la peinture à la dignité des arts libéraux, en lui permettant de s'extraire de la mimesis, ou du non-art, à laquelle l'avait contrainte l'antiquité.

Mais un effet collatéral contemporain de cette confusion espace / temps, ou plutôt selon nous, forme / mouvement, est qu'elle occupe de manière biaisée et sous de multiples formes, le terrain des arts visuels temporels, retardant d'autant l'avènement d'un art visuel dynamique. C'est pourquoi, l'entreprise de Lessing, farouchement défendue depuis Baudelaire par les défenseurs de la « modernité », afin de libérer la peinture de l'emprise de la poésie et réciproquement la poésie, de l'emprise de la peinture, a ici encore tout son sens et toute sa nécessité.

Car un art proprement dynamique existe, bien qu'il ait cependant du mal à s'étendre sur toute son ampleur expressive et créative et sur tout son champ social et humain. Il existe déjà dans les faits depuis fort longtemps. Mais il existe surtout dans la mesure où nous y sommes sensibles, où les effets qu'il provoquent, sensoriels, cognitifs, symboliques, esthétiques, possèdent presque déjà leur vocabulaire, indépendamment de toute forme ou de tout autre attribut visuel, auditif, ou tactile. Il s'exprime par des verbes comme frémir, palpiter, ... qui ne sont pas (que) des verbes d'action, tels que sauter ou danser. Ce sont plutôt des verbes de mouvement, qui traduisent non pas (pas seulement) un résultat actif (je saute, j'ai sauté) mais également un « comment ». Le verbe de mouvement se distingue du verbe de l'action en ce sens que ce dernier n'exprime pas nécessaire un comment, mais seulement un acte, alors que le premier exprime ou laisse entendre un qualificatif, un « comment ». D'ailleurs, le mouvement s'exprime parfois mieux par des substantifs : les *palpiter*, les *sautiller*, les *balancer*, les *frémir*... Il peut s'exprimer également via des adjectifs, adverbes ou groupes nominaux qualificatifs : accéléré, doux (un amorçage doux), vif (un décollement vif), lentement, se poser avec légèreté ... Le mouvement, c'est-à-dire la dynamique, ou mieux encore l'expression de la dynamique, de la manière de changer, d'une manière d'être qui est le changement dans ses qualités, existe donc bien, pour lui-même, sans appel à d'autres phénomènes support, forme visuelle ou manifestation acoustique. Il y a donc bien une certaine distance, une certaine autonomie, du mouvement par rapport aux autres effets sensibles auxquels il peut être associé. On peut donc parler de mouvement pour lui-même, de « mouvement *per se* ».

Le cinéma n'a guère apporté de solutions à ces désirs. Il a très vite bifurqué vers un rapprochement intime avec l'art de la narration, c'est-à-dire à nouveau l'art du discours. L'animation, héritant de la lourdeur technique du cinéma en même temps que de son acte fondateur d'un mouvement visuel effectif et non représenté, lui a emboîté le pas, avec les succès du dessin animé *cartoonisé*, du cinéma dessiné ou de la bande dessinée animée. On y raconte des histoires, à mi-chemin entre une mimesis visuelle et une mimesis discursive. On y est très loin d'un art visuel dynamique sans figuration. A ce jour, l'animation n'a pas de poids artistique. Je ne détaillerais pas les relations entre peinture et musique ou entre danse et musique. *Beaucoup des expériences actuelles les concernant me semblent être de l'ordre de la surcharge, donc de la tristesse, où quelque chose se cherche et ne se trouve pas.*

Faut-il donc aller aujourd'hui vers une nouvelle « *ut pictura poesis* » comme le tentent les multiples entreprises artistiques contemporaines audio-visuelles, choreographo-visuo-musicales, visuo-musicales ? Ou faut-il aller d'abord vers un « nouveau Laocoon », comme cela est en tout cas absolument nécessaire à ce que pourrait et devrait être un art du mouvement visuel ? L'examen de la danse serait ici très instructif. Art du mouvement en priorité évidente, elle se rapproche périodiquement de la musique, disant ainsi son amarrage avec les arts du temporaire et sa distinction d'avec les autographiques, peinture et sculpture. Mais différemment de la musique, elle se heurte depuis des siècles au plafond de verre d'une impossible écriture, ... *la danse, art temporaire impossiblement allographique*. Selon Frédéric Pouillaude [Pou04], la danse ne peut-être ni allographique, ni autographique. Elle existe néanmoins. Elle est en ceci, et peut-être en ceci seulement, proche des arts visuels du mouvement dont je parle ici. Toutes nos expériences personnelles de modélisation avec MIMESIS, nous conduisent dans ce sens, ainsi que la déception intense dans le schisme vécu entre la pratique de MIMESIS et l'œuvre, pourtant ô combien fondatrice, de P. Klee.

Quelque chose donc se cherche et ne se trouve pas.

4. FORME – MOUVEMENT : UNE FORME DE MULTIMODALITE

Les nouvelles technologies de modélisation et de simulation numériques devraient nous aider à y voir plus clair et à ouvrir de nouvelles portes tant conceptuelles, techniques qu'artistiques, à condition d'admettre que quelque chose de fondamental doit être remis sur le chevalet et être à nouveau débattu à la lumière des ouvertures techniques contemporaines.

Tout d'abord, l'ordinateur, par ses capacités de modélisation physique, se révèle être le premier outil qui nous permet d'avoir accès au mouvement pour lui-même. En effet, une première propriété de la synthèse

numérique, qui pourrait être à première vue considérée comme négative, est la dissociation des composantes effectuées par nature avec la modélisation et la simulation numérique. Alors que la forme, le mouvement, le son, les réactions optiques sont a priori difficilement dissociables, dans le monde des objets mécano-optiques, ils le sont par nature dans le monde de la représentation numérique : les procédés de synthèse de formes sont totalement dépourvus de processus de mouvement : il peut s'agir de géométrie pure. Il en est de même des procédés de synthèse de sons qui peuvent être totalement abstraits de la forme des corps sonores. Il en est également de même des procédés de synthèse du mouvement, par lesquels celui-ci peut sans aucune difficulté se satisfaire de formes extrêmement minimales comme des points lumineux sans traces. La nouveauté la plus importante ici est la possibilité de penser le mouvement sans la forme, d'apprendre à voir le mouvement sans la forme à l'aide du modèle physique modulaire et générique, et même à voir le mouvement sous diverses formes. Par conséquent, nous sommes à un instant historique unique qui nous permet de disposer d'un outil expérimental pour abstraire le mouvement de l'unicité triviale de l'objet et de le séparer de la figure.

Ensuite, dans ce contexte, la mise en relation entre formes et mouvements est construite et non donnée. Elle ne relève pas d'une *physis*, c'est-à-dire d'un *étant donné*, mais d'une *mathématé*, c'est-à-dire d'un *étant construit*. Le mouvement, ainsi abstrait des conditions de sa production matérielle (l'objet dans le monde mécano-optique, le support image par image photographique dans le cinéma), peut enfin être pensé selon toute son amplitude. Ce phénomène est similaire à celui de l'ouverture considérable du domaine sonore et musical avec les nouvelles technologies à partir des années 60, tant au niveau artistique que scientifique. Les conditions sont donc réunies pour l'envol d'un art du mouvement visuel.

Enfin, ces mêmes conditions techniques vont permettre de tester les similitudes et différences entre art de l'ouïe, art de l'œil, art du corps. Elles permettront d'en savoir davantage sur les supposées similitudes ou différences entre arts, et rendront possible le dépassement des postures actuelles - des partisans ou des contradicteurs - que les pratiques des nouvelles formes multimédia, encore puérides, ne règlent pas. Le point ici est de réaffirmer que l'identité d'un art du mouvement visuel, si elle existe, ne peut se saisir sans compréhension simultanée et relative d'autres fondamentaux, dans une démarche à la fois théorique, scientifique et artistique.

Notre posture consiste tout d'abord à assumer trois hypothèses comme fondatrices de notre propos :

- la première est qu'il y a a priori des différences fondamentales entre arts de la forme et art du temps. Elles pourraient se décliner selon plusieurs axes a priori

non réductibles : la forme / le mouvement, pour ce qui concerne les arts visuels, puis le positionnement sur l'axe autographique / allographique, auquel pourrait répondre l'axe « intensif » / « extensif », selon le degré d'importance réciproque de l'espace et du temps.

• La seconde est de considérer la question de la relation de la forme et du mouvement comme une question de *multimodalité*, au même titre que celle de la relation entre le son et l'image. D'une manière plus pragmatique, le domaine d'expressivité des séquences d'images animées produites par modèle physique peut être considérablement élargi, si l'on considère en effet le mouvement et la morphologie comme deux modalités de production et perception à part entière, auxquelles on donne les moyens de coopérer. On sait en effet, que les traitements des mouvements et des formes spatiales dans le cerveau sont deux processus distincts, dont on connaît d'ailleurs mal la coopération. En ce qui concerne la modélisation topologique, il est remarquable de constater que ce niveau de modélisation n'a jamais fait l'objet d'une mise entre les mains d'utilisateurs non concepteurs. Le modèle physique particulière est, de ce point de vue heuristique, un cadre tout à fait remarquable.

• La troisième consiste à négocier ensuite, et seulement ensuite, c'est-à-dire de manière non prématurée, le passage de la multimodalité à la multisensorialité, au sens donné à ce terme dans le programme scientifique de l'ACROE. La multimodalité consiste à proposer à la perception des signaux auditifs, visuels ou tactiles qui ne sont pas nécessairement corrélés, la perception ayant seule alors en charge la construction éventuelle d'une corrélation entre eux, qui se situe de ce fait uniquement du côté de l'homme. Dans la multisensorialité au contraire, les signaux proposés aux sens ne sont pas indépendants, et leur relation à l'action n'est pas seulement épistémique ou sémiotique mais également ergotique. Ils peuvent provenir d'une cause unique, un objet physique par exemple, qui d'emblée les corrélerent, côté monde, avant même leur perception. Le face-à-face « multimodalité / multisensorialité » serait une des conditions de base de la cognition incarnée, dont on connaît encore peu le fonctionnement. Là encore, les possibilités d'une reconstruction multisensorielle des phénomènes sensibles produits par synthèse numérique peuvent apporter des éclairages nouveaux, à la fois sur le fonctionnement de l'appréhension psycho-cognitive de chacune des modalités, et de leur couplage.

Ces étapes sont nécessaires pour dépasser l'état de jeunesse des arts multimodaux actuels. Elles sont fondamentales pour mieux comprendre et maîtriser ce problème si difficile de la perpétuelle évidence de l'identité ou de la différence entre la forme et le mouvement dans les arts visuels. Les études scientifiques et artistiques autour du mouvement visuel pour lui-même peuvent y jouer un rôle majeur, peut-être même un rôle moteur, du fait même de la radicalité de l'effort à effectuer pour sa naissance.

5. CONCLUSION

Un art du mouvement visuel peut et doit aujourd'hui naître. Les conditions sensibles sont réunies depuis longtemps, mais non les conditions techniques. Le cinéma puis les arts plastiques cinétiques en ont donné un avant-goût concret. Les nouvelles technologies de la modélisation et de la simulation lui en offrent toutes les perspectives. Il faut cependant travailler à en définir tous ses fondements et ses périmètres. A l'instar de P. Klee, qui méthodiquement, a élaboré vocabulaires et grammaires d'un art des formes et du mouvement dans et pour ces formes, un travail systématique d'exploration mais aussi de création doit être mené, de manière à faire jaillir les propriétés qui ne peuvent se fonder dans d'autres arts et qui, si cela n'advenait pas, continueraient à maintenir un état de tristesse artistique.

Pour autant, la proposition de Lessing est de toute évidence également à dépasser. Car en effet, si Lessing parle essentiellement de la différence entre les arts, le titre même de son ouvrage « Du Laocoon ou des frontières de la peinture et de la poésie » va dans le sens de la construction de frontières radicales, conduisant Greenberg à déclarer « Les arts d'avant-garde ont, dans les dernières cinquante années, atteint une pureté et réussi une délimitation radicale de leur champ d'activité sans exemple dans l'histoire des arts et de la culture. Les arts sont à présent en sécurité, chacun à l'intérieur de ses frontières légitimes, et le libre échange a été remplacé par l'autarcie ». [Gre1986] cité par [Lich03].

Ce n'est évidemment pas dans la ligne de visée contemporaine. Actuellement, jamais le rapprochement entre les formes artistiques n'a été autant possible et souhaité. La technologie nouvelle en est un fondement et un stimulateur sans précédent. Mais, cela ne se fera qu'au prix d'un nouveau cycle de compréhension et d'élucidation mêlant intimement art et science.

6. REFERENCES

- [1] [BBB98] S. Brandel, D. Bechmann and Y. Bertrand. *STIGMA: a 4-dimensional modeller for animation*. 9th Eurographics Workshop on animation and simulation, Lisbon, Portugal, 1998.
- [2] [BD93] Bechmann, D. et Dubreuil, N., « Animation through space and time based on a space deformation model », *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 4(3), juillet-septembre 1993, p 165-184.
- [3] [BL03] P. Boulenguez, A. Luciani. A physical particle model of morphogenesis. Proc. of WSCG'2003. Plzen (Czech Republic). 2003/02/3-7.
- [4] [BL99] J. Bloomenthal, C. Lim : Skeletal methods of shape manipulation. In *Shape Modeling International* (1999).
- [5] [Can98] Cani, M.P., "Layered Deformable Models with Implicit Surfaces", *Graphics Interface'98 Conference*, Vancouver, 18-20 juin 1998, p 201-208.

- [6] [CL95] B. Chanclou, A. Luciani. «Physical models and dynamic simulation of planetary motor vehicles with a great number of degrees of freedom»- Proc of IAS 4 Conf. - IOS Press - 1995 - pp 465-472
- [7] [Bru85] Claude-Paul Bruter. *Topologie et perception*. Maloine S.A. Editeur. 1985.
- [8] [CLH96] B. Chanclou, A. Luciani, A. Habibi. "Physical models of loose soils marked by a moving object" - Proc. of Computer Animation 96 - IEEE Computer Soc Press - 1996 - pp36-46
- [9] [Coq90] S. Coquillard. Extended Free-Form Deformation: A sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling. Dans *Computer Graphics, Proc of SIGGRAPH 90*, vol 24, 187-196.
- [10] [DCG08]. E. Darles, B. Crespin, D.Ghazanfarpour, « Une approche multirésolution lagrangienne pour la simulation de vagues déferlantes », Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique, vol. 2(1), 2008.
- [11] [DLC93] Y. Delnondedieu, A. Luciani, C. Cadoz. "Physical elementary component for modeling the sensory-motricity. The primary muscle", 4th Eurographics Workshop on Animation and Simulation, Ed. A. Luciani & D. Thalmann. Spain. Sept. 1993.
- [12] [DSB99] M. Desbrun, P. Schröder, and A. H. Barr. Interactive animation of structured deformable objects. In *Proceedings of Graphics Interface'99*, pages 1–8, Kingston, Ontario, Canada, June 1999.
- [13] [ELC06] Matthieu Evrard, Annie Luciani, Nicolas Castagné, MIMESIS: Interactive Interface for Mass-Interaction Modeling, Proceedings of CASA 2006. July 2006, N. Magnenat-Thalmann & al. editors.
- [14] [EMF02] D. Enright, S. Marschner, R. Fedkiw. Animation and Rendering of Complex Water Surfaces. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 736-744, SIGGRAPH'02, San Antonio, Texas, USA, July 2002. ACM Press (New York, USA).
- [15] [FSJ01] R. Fedkiw, J. Stam, and H. W. Jensen. Visual simulation of smoke. In Pocock, editor, *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH'01, pages 15–22, Los Angeles, USA, August 2001. ACM Press.
- [16] [GLN03] C. Guilbaud, A. Luciani, N. Castagné. Physically-based particle simulation and visualization of pastes and gels. Proc. of GRAPHICON. Moscou. 2003.
- [17] [Gree86] Greensberg. In *The collected essays and criticism*, J.O'Brian Eds, University of Chicago Press, 1986, Vol. 1, p.23-27).
- [18] [Gre97] Donald Greenspan. *Particle Modeling*. Birkhauser ed. 1997.
- [19] [GW95] A. Guy et B. Wyvill. Controlled blending for implicit surfaces using a graph. *Proc. of Implicit Surfaces '95*, pp 107-112, 1995.
- [20] [Hab97] Habibi, A., *Modèles Physiques Supports de la Relation Mouvement-Forme-Image*, Thèse de Doctorat d'Informatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, janvier 1997.
- [21] [Hel92] Helbing, D. 1992b. A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex*. Pp. 391-415.
- [22] [HL05] C. Hsieh, A. Luciani "Generating Dance Verbs and Assisting Computer Choreography". ACM Multimedia. Singapour. Nov.2005.
- [23] [HLTC03] L. Heigeas, A. Luciani, J. Thollot, N. Castagné. A physically-based particle model of emergent crowd behaviors. Proc. of GRAPHICON. 2003.
- [24] [JCD08] T. Jund, D. Cazier, J.F. Dufourd. Système de prédiction pour la détection de collisions dans un environnement déformable. Journées AFIG. 2008.
- [25] [Klee73]. Paul Klee. *Ecrits sur l'art/1 – La pensée créatrice*. Dessain et Tolra Eds. Trad. S. Girard 1973.
- [26] [KNB03] Z. Kacic-Alesic, M. Nordenstam, and D. Bullock. A practical dynamics system. In D. Breen and M. Lin, editors, *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation*, pages 7–16.
- [27] [Lessing, 1802]. G.E. Lessing. *Du Laocoon ou des limites respectives de la poésie et de la peinture*. A.A Renouard Eds. 1902.
- [28] [LG97]. A. Luciani, A. Godard. « Simulation of Physical Object Construction Featuring Irreversible State Changes", Proc of WSCG, Plzen, Csech republic, Ed by N. Magnenat-Thalmann & V. Skala, Feb 1997.
- [29] [LHD95]. A. Luciani, A. Habibi, A. Vapillon, Y. Duroc. «A Physical Model of Turbulent Fluids", 6th Eurographics Workshop on Animation and Simulation- Maastricht 1995 - Springer Verlag Ed. "Computer Science Series - pp16-29
- [30] [LHM95], A. Luciani, A. Habibi, E. Manzotti - "A Multi-scale Physical Models of Granular Materials", Proc. of Graphics Interface '95, 16-19 May 1995, Quebec City, Canada - pp136-146
- [31] [Lich03]. Jacqueline Lichtenstein. « La comparaison des arts ». Dictionnaire le Robert. Le Seuil. 2003.
- [32] [Lie89] Lienhardt, P., « Subdivisions of n-dimensional spaces and n-dimensional generalized maps », Proceedings of the fifth annual symposium on Computational geometry (SCG'89), 1989, p 228–236.
- [33] [LSM08] Léon, P.-F., Skapin, X., Meseure, P., « A topology-based animation model for the description of 2D models with a dynamic structure », *Virtual Reality Interactions and Physical Simulation (VRIPHYS)*, Grenoble, France, Novembre 2008.
- [34] [Luc00]. A. Luciani. "From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes : a mesoscopic physically-based particle model.

- Proceedings of Graphicon Conference. Moscow. Sept. 2000.
- [35] [Luc84] A. Luciani, C. Cadoz. "Modélisation et animation gestuelle d'objets - Le système ANIMA", CESTA - 1er Colloque Image, Biarritz 1984.
- [36] [Luc85] LUCIANI (A), "Un Outil Informatique de Création d'Images Animées : Modèles d'objets, Langage, Contrôle Gestuel en temps réel. Le Système ANIMA", Thèse de Docteur Ingénieur - I.N.P.G. - Grenoble 1985.
- [37] [MCG03] M. Müller, D. Charypar, and M. Gross. Particle-based fluid simulation for interactive applications. In M. L. D. Breen, editor, *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation*, pages 154–159.
- [38] [MDHL03] Meseure, P., Davanne, J., Hilde, L., Lenoir, J., France, L., Triquet, F., et Chaillou, C., « A Physically- Based Environment dedicated to Surgical Simulation », *International Symposium on Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling (IS4TM)*. 2003.
- [39] [Mandelbrojt] Jacques Mandelbrojt, « La pensée dynamique et musculaire dans la peinture, la poésie, la musique ... et la science ». Document prsonnel.
- [40] [MP89] G. S. P. Miller and A. Pearce. Globular dynamics : a connected particle system for animating viscous fluids, In *Computers & Graphics*, volume 23(3), pages 169–178, 1989. Elsevier.
- [41] [Mil88] G. S. P. Miller. The motion dynamics of snakes and worms. In *Computer Graphics, SIGGRAPH'88*, volume 22, pages 169–178.), August 1988. ACM Press.
- [42] [MSKG05] M Müller, B. Solenthaler , R. Keiser., M. Gross : Particle-based fluid-fluid interaction. In Proc. on Symposium on Computer Animation (2005), 237–244.
- [43] [NFJ02] D. Q. Nguyen, R. Fedkiw, and H. W. Jensen. Physically based modeling and animation of fire. In T. Appolloni editor, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 2002*, SIGGRAPH'02, pages 721–728, ACM Press (New York, USA).
- [44] [PL90] Prusinkiewicz P. et Lindenmayer A.. *The Algorithmic Beauty of Plants (The Virtual Laboratory)*. Springer, October 1990.
- [45] [Pou84] Frédéric Pouillaude. « D'une graphie qui ne dit rien : les ambiguïtés de la notation chorégraphique. CNRS. In POETIQUE (Collection). N°137. 2004.
- [46] [Ree83] William T. Reeves, "Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects", *Computer Graphics* 17:3 pp. 359-376, 1983.
- [47] [Tho88] René Thom. *Esquisse d'une sémiophysique*. InterEditions. 1988.
- [48] [RNN00] Rémion, Y., Nourrit, J.M., et Nocent, O., "Dynamic Animation of n-Dimensional Déformable Objects", *WSCG'2000 conference*, Plzen, Feb. 2000.
- [49] [Ton91] D. Tonnesen. Modeling liquids and solids using thermal particles. *Graphics Interface'91*. 1991.

SONIFICATION DES DONNEES – NOUVELLE VOIE DANS LA COMPREHENSION DES DONNEES (ENSEIGNEMENT ET PROJET TUTEUR A L'IUT DE BOURGES - DEPARTEMENT DES MESURES PHYSIQUES)

Jean-Pierre Martin

IUT de Bourges

Département Mesures Physiques
jmartin@bourges.univ-orleans.fr

Alexander Mihalic

IUT de Bourges

Département Mesures Physiques
mihalic@free.fr

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs années nous travaillons à l'IUT de Bourges au Département des Mesures Physiques sur divers projets de sonification des données. La sonification des données est une nouvelle discipline de compréhension des données scientifiques – au lieu d'une observation visuelle, il s'agit de transformer les données en paramètres sonores et auditifs. Dans ce but, nous avons mis en place, dans le département, des cours de sonification avec, comme support, des applications développées sous Max/MSP. Les applications qui transforment les données mesurées en paramètres sonores fonctionnent comme supports des cours et appareils de mesure virtuels. Parallèlement aux cours, le projet tutoré de cette année – aquarium sonore – a comme ambition d'être un projet interdisciplinaire, réunissant des étudiants des domaines scientifiques et artistiques.

1. INTRODUCTION

Depuis quelques dizaines d'années, le son prend une place particulière dans la représentation des données scientifiques. Fruit du développement des ordinateurs et de la facilité logicielle, le son devient un vecteur d'information à part dans la compréhension du monde qui nous entoure.

D'un côté l'automatisation de la collecte des données sous forme numérique et de l'autre leur traitement massif par des logiciels dédiés, créent une nouvelle forme de présentation des données – la sonification. La sonification est l'utilisation du son dans un but de perception auditive des données scientifiques. C'est la représentation acoustique des données mesurées.

La sonification est une voie complémentaire à la visualisation des données. Elle permet à l'observateur d'un événement physique d'entendre les changements des valeurs mesurées au lieu de les voir [1].

La raison d'une telle démarche est l'accumulation exponentielle des données mesurées automatiquement par les capteurs ou stockées sur les disques durs. De ce fait, l'accès à l'information et sa compréhension deviennent de plus en plus complexes pour l'observateur. Une des possibilités d'appréhender cette complexité est de changer la manière de percevoir

l'information en utilisant un autre sens que la vue : l'ouïe.

La sonification puise historiquement une partie de son expérience dans l'interrogation de l'homme sur la connaissance et les possibilités de perception du réel à travers le son. Ceci depuis l'Antiquité et Pythagore [2] en passant par Kepler [3] avec le calcul des sons produits par les planètes, jusqu'aujourd'hui avec les scientifiques utilisant le son pour entendre les données dans les domaines de la biologie [4], de la volcanologie [5] ou de la médecine [6]. L'expérience de la sonification puise une autre partie de ses sources dans l'application des données, concepts, modèles et algorithmes dans la composition musicale. Parmi de nombreux compositeurs citons son représentant le plus reconnu : Iannis Xenakis [7]. L'exemple de sa composition *Achorripsis* démontre l'intérêt des musicologues ainsi que des scientifiques pour les possibilités d'application des modèles et données extra-musicaux dans la composition [8].

Dans le présent l'article nous allons présenter la mise en place de l'enseignement de la sonification à l'IUT de Bourges et les outils logiciels que nous développons dans le cadre des cours, et enfin, les projets menés dans le cadre de cet enseignement, dont le dernier en date a pour ambition de réunir les étudiants des domaines scientifiques et artistiques pour créer une installation sonore et visuelle avec la participation de trois institutions à Bourges – IUT, Beaux Arts et Conservatoire de Musique.

2. COURS DE SONIFICATION A L'IUT DE BOURGES

La formation au Département Mesures Physiques de l'IUT de Bourges est assurée sur deux années. Elle conduit à l'obtention du Diplôme Universitaire de Technologie (DUT), spécialité Mesures Physiques. Le chef de département actuel est Jean Pierre Martin. Les enseignements comportent des cours (20%), des travaux dirigés (40%) et des travaux pratiques (40%). Ils sont complétés par des projets tutorés et un stage (10 semaines) en entreprise¹.

¹Pour plus d'informations voir le site web <http://www.bourges.univ-orleans.fr/iut/mp/>.

Les cours de sonification sont programmés pendant le troisième semestre (première moitié de la deuxième année d'études), pour environ une quarantaine d'étudiants. Les étudiants sont divisés en groupes d'une dizaine d'élèves et les cours sont donnés une fois par semaine dans la salle d'informatique. Chaque étudiant a à sa disposition un PC avec un logiciel comme support de cours. Le projet tutoré quant à lui est mené par deux à trois étudiants tout au long de la deuxième année.

3. LOGICIELS UTILISES POUR LES COURS

Chaque cours s'appuie sur une application développée dans l'environnement Max/MSP. Les applications sont en quelque sorte des appareils de mesures sonores virtuels.

3.1. Logiciels d'apprentissage sonore

Il existe ainsi cinq applications dont les buts sont : analyse sonore, synthèse (additive, modulation de fréquence, modulation d'amplitude) et étude des filtres. Les étudiants travaillent ainsi pour s'approprier le son en l'analysant et en le synthétisant tout en gardant la méthode de comparaison et le lien visuel – auditif.

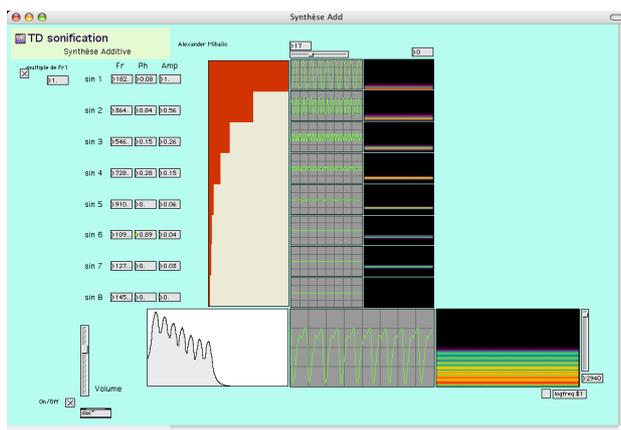


Figure 1. Application pour l'étude de la synthèse additive.

Chaque étudiant fait l'observation auditive et visuelle de l'expérience, note les résultats et en donne le rapport à la fin du cours.

Tous les logiciels gardent une structure unifiée de l'interface utilisateur. La partie haute est la partie des sources et la partie basse les sorties, avec les mêmes représentations visuelles. Dans le cas de l'application de sonification, la partie en haut à droite contient les paramètres de sonification.

3.2. Logiciels de sonification

Enfin les deux dernières applications, utilisées à la fin des cours, sont les applications pour la sonification des données proprement dites. Les étudiants manipulent et étudient les aspects sonores des données provenant de leur propre expérience en première année et d'une collecte de données sur internet directement pendant les cours.

3.2.1. Synthèse sonore basée sur les données mesurées par le diffractomètre.

Cette application transforme les données obtenues par un diffractomètre vers les « empreintes sonores » générées par la synthèse additive. Les données sont obtenues par les étudiants eux-mêmes, pendant la première année de leur cursus. L'appareil permet d'obtenir la composition atomique de l'échantillon de la matière observé. Le résultat se présente sous forme d'un tableau contenant l'angle et la valeur en pourcentage ou, plus simplement, sous forme d'un graphique avec les pics correspondant aux composants de l'échantillon.

L'étudiant remplit la partie « données mesurées ». C'est le tableau avec l'angle et la valeur correspondante mesurée (exprimée en pourcentage). L'application comporte trois mémoires pour stocker les données des trois échantillons. Il est possible ensuite de sauvegarder et relire les fichiers sur le disque dur. La partie « données sonores » calcule automatiquement les valeurs de fréquence et d'amplitude pour chaque oscillateur. La relation entre les données est la suivante : l'angle correspond à la fréquence et le pourcentage à l'amplitude.

L'application contient 20 oscillateurs et une partie des paramètres de sonification – mapping des fréquences en entrée et en sortie et les changements de transformation linéaire, exponentielle ou logarithmique pour les amplitudes des oscillateurs. L'étudiant, en archivant les données, obtient une base de données sonores où chaque échantillon sonore comporte un timbre spécifique correspondant à un échantillon de la matière. L'application donne ainsi un résultat sonore intemporel – le timbre



Figure 2. Application « mapping » - transformation des données par la synthèse additive.

3.2.2 Représentation sonore des données météorologiques.

A la différence du procédé précédent, cette application exprime l'évolution temporelle des données. Les données de températures sont collectées et mises en ligne par une station météo amateur disponible sur

internet². Les données sont transcrites par les étudiants directement dans un tableau de trente dates – une valeur de température pour une date, pendant un mois. Les valeurs sont visibles sous forme d'un graphe qui est en fait un séquenceur de données avec commandes de lecture, pause, mise en boucle et vitesse.

Les données, ainsi lues dans le temps, sont envoyées vers les paramètres suivants : fréquence de la synthèse, fréquence de coupure du filtre, index de modulation de la synthèse FM et paramètres de fréquence de filtre. L'étudiant choisit la source sonore (synthèse, bruit blanc) et règle ensuite les paramètres de sonification qui sont les mis au point de l'étendu de chacun des paramètres de la synthèse.

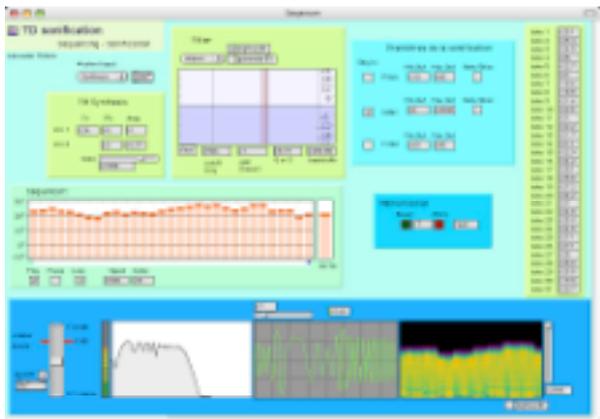


Figure 3. Application pour la transformation temporelle des données.

4. PROJET TUTEUR – « AQUARIUM SONORE »

« Aquarium sonore » est la sonification des données issues des mesures de température dans un liquide. Le projet consiste à créer une installation physique permettant de « plonger » virtuellement l'observateur – le scientifique qui mesure les données ou le visiteur d'une exposition – dans l'objet observé.

Le projet « Aquarium Sonore » s'appuie sur la possibilité de mettre en commun le savoir-faire, les connaissances scientifiques et artistiques et enfin le matériel et les lieux de trois institutions à Bourges : Département Mesures Physiques de l'IUT, École nationale Supérieure d'Art et Conservatoire de Musique et de Danse.

Cette collaboration se base sur la constitution d'un groupe de travail formé par des étudiants et des enseignants de ces trois institutions.

Le départ du projet est le projet tutoré nommé « Aquarium Sonore ». Ce projet a été mis en place l'année dernière au département Mesures Physiques de l'IUT de Bourges dans le cadre du cours de sonification des données. Son objectif est l'observation auditive tridimensionnelle de l'évolution de la température dans un liquide. Le projet est cette année mené par deux étudiants : Jordan Roux et Romain Dujour.

²Le site est disponible à l'adresse <http://www.meteo-oise.fr/>.

C'est une expérience de transformation des données thermiques en paramètres sonores. Le but du projet est l'immersion virtuelle de l'observateur dans l'objet observé en mesurant les températures dans un bac rempli d'eau à l'aide de huit capteurs de température.

4.1. Expérience

4.1.1. Description

Nous voulons mesurer les températures dans un bac rempli d'eau à l'aide de huit capteurs de température.

Le procédé « classique » d'un observateur est de mesurer les températures dans le récipient et de les visualiser par la suite sur des graphes. Ceci comporte un inconvénient majeur : la lecture des graphes est une projection d'un volume dans un plan. Un simple passage d'une vague du liquide chaud va être décomposé entre plusieurs graphiques placés l'un au-dessus de l'autre ou superposés avec 8 lignes de températures dans un seul graphique. Si l'exactitude est bien conservée, l'illisibilité d'un tel procédé est évidente. Le projet propose une autre approche par laquelle l'observateur perçoit directement les changements de température via les changements sonores.

Le récipient avec le liquide est situé au milieu de la pièce. Le récipient est équipé de 8 capteurs de température, un dans chaque coin. La pièce elle-même est équipée de 8 haut-parleurs, qui sont l'image des capteurs à l'intérieur du bac. Chaque haut-parleur est situé dans un coin de la pièce.

Ainsi, par la transformation géométrique d'homothétie, chaque capteur correspond à un haut-parleur. La pièce dans laquelle se situe l'observateur est une image du récipient contenant le liquide situé à l'intérieur de cette pièce même. Les changements sonores diffusés par les haut-parleurs correspondent aux changements de température mesurés par les capteurs correspondants.

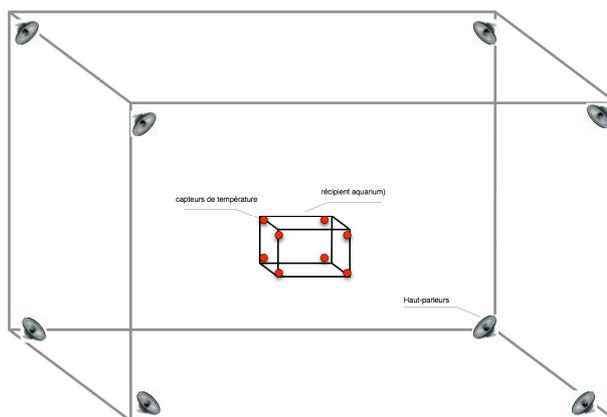


Figure 4. Schéma simplifié de l'installation « aquarium sonore ».

De cette manière, l'observateur se trouve plongé dans le récipient. Il peut observer virtuellement - par les changements des paramètres sonores - les changements de température à l'intérieur du récipient, endroit qui lui est physiquement inaccessible.

4.1.2. Réalisation technique

Nous avons réalisé les premiers tests d'acquisition des données des températures au mois de janvier. Le montage consiste à réaliser le hardware (principalement le circuit électronique d'amplification du signal des capteurs de température) et le software (le logiciel de sonification) de l'installation.

Le capteur de température utilisé est le LM35 DZ. Ses caractéristiques principales sont les suivantes : Plage de la tension d'alimentation - 0,2 Volt à 35 Volts Sensibilité- 10 mV/ °C ; Précision +/- 0,5°C (à 25°C). Le signal est décalé et amplifié pour pouvoir régler les limites des entrées des températures et contrôler ainsi l'étendu du signal envoyé vers le logiciel de sonification.

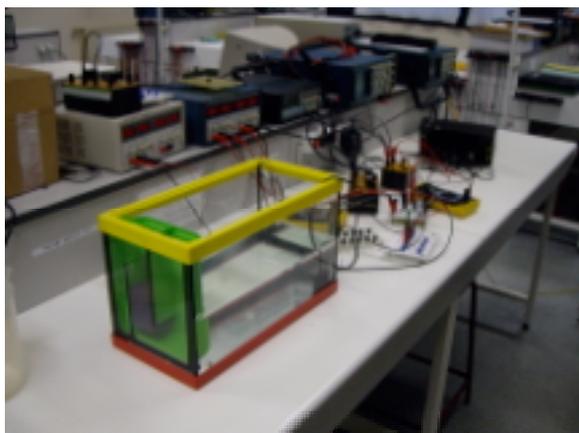


Figure 5. Les premiers tests des capteurs de température et des circuits électroniques.

Le signal est ensuite converti par l'interface analogique numérique Doepfler et envoyé vers l'ordinateur via l'interface MIDISPORT 4x4. Le logiciel de sonification sera programmé en Max/MSP entre les mois de mars et mai, en utilisant en partie les applications utilisées pendant les cours. Le résultat consiste en un signal audio envoyé sur les huit sorties de l'interface audio ESI ESP1010.

4.2. Collaboration entre les institutions

Le lien avec les partenaires se joue naturellement sur les capacités de chacun à utiliser les résultats de l'expérience en apportant son propre savoir-faire artistique ou scientifique.

Le groupe de travail est constitué d'un élève de chaque institut, travaillant avec son enseignant et coordonné par Alexander Mihalic du Département Mesures Physiques de l'IUT.

La réalisation est planifiée en deux étapes :

1 – collaboration technique, assemblage et présentation du prototype de l'aquarium pour les partenaires dans les locaux des Beaux Arts au mois de juin de cette année

2 – création d'une installation aboutie à la fin de l'année scolaire 2009-10

Voici les éléments de participation de chaque partenaire :

IUT – Département Mesures Physiques

- Construction de l'installation avec les capteurs.
- Montage des circuits électroniques et interfaçage analogique/numérique.
- Conversion des valeurs des températures en données MIDI, exploitées par la suite sur le PC avec le logiciel Max/MSP.
- Programmation d'une application de sonification et conversion des données.
- Conversion numérique/analogique et 8 sorties sur les haut-parleurs amplifiés. Le résultat consiste en un changement simple des paramètres sonores diffusés par les haut-parleurs.
- Établissement d'un protocole de connexion et échange des données pouvant par la suite être exploité par les partenaires.

Ceci concerne deux étudiants dans le cadre des projets tutorés de deuxième année, et par la suite, pour la finalisation de l'installation, un étudiant dans le cadre du stage de fin de deuxième année.

École nationale Supérieure d'Art de Bourges

- Exploitation des données fournies par l'application créée à l'IUT suivant le projet personnel de l'étudiant. Il peut s'agir de rendre visuels les changements des températures à l'intérieur du liquide en injectant différents produits colorants, créer une projection vidéo en utilisant les données etc.

Conservatoire de Musique et de Danse

Collaboration sous deux formes :

- création de matériaux sonores utilisables par l'application programmée à l'IUT
- création d'une application musicale qui communique avec l'application programmée à l'IUT. Il peut s'agir de séquences musicales dont les paramètres sont modifiés, suite aux changements de température.

5. CONCLUSION

Le projet est pour le moment trop récent pour pouvoir tirer des conclusions sur l'instrument scientifique fabriqué à l'IUT, sur l'installation et sur le projet artistique, qui prennent forme en ce moment. Nous sommes en train de construire le prototype de l'instrument de sonification dont les premiers résultats sont très encourageants. Après quelques problèmes de mise en place des circuits électriques, nous avons obtenu des signaux corrects en entrée du logiciel Max/MSP, pour l'exploitation sonore. Le prototype est maintenant fonctionnel pour les premiers tests et la détermination du mapping des paramètres des données mesurées, qui utilise les algorithmes de sonification inclus dans les logiciels utilisés pour les cours.

L'enseignement de la sonification à l'IUT de Bourges et les projets interdisciplinaires comme « aquarium sonore », permettent ainsi de changer les rapports et les relations entre les institutions scientifiques et artistiques de la ville. La participation des différentes institutions : IUT, Beaux Arts et Conservatoire de Musique, permet à chacun d'apporter sa propre expérience dans son propre domaine et de mettre sa spécificité à contribution pour le projet.

6. REFERENCES

- [1] Noirhomme-Fraiture, M. Schöller, O. Demoulin, C. Simoff, S. « Sonification of time dependent data », Second International Workshop on Visual Data Mining, Helsinki, Finlande, 2002.
- [2] Cotte, R. *Musique et symbolisme: Résonances cosmiques des œuvres et des instruments*, Éditions Dangles, St-Jean-de-Braye, 1988.
- [3] Kepler, J. *L'harmonie du monde*, Librairie A. Blanchard, 1979.
- [4] Munakata, N. Hayashi, K. « Gene Music: Tonal Assignments of Bases and Amino Acids », Visualizing Biological Information, Clifford Pickover (Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.), 1995.
- [5] Vicinanza, D. Yopez, H. « Music from Volcanoes on the Network », TERENA Networking Conference, Copenhagen, Denmark, 2007.
- [6] Ballora, M. Pennycook, B. Ivanov, P. Glass, L. Goldberger, L. « Heart Rate Sonification: A New Approach to Medical Diagnosis » Leonardo, February 2004, Vol. 37, No. 1.
- [7] Xenakis I., « Musiques formelles », Revue Musicale, Richard-Masse, 1963.
- [8] Childs, E. « Achorripsis: A Sonification of Probability Distributions », International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan, 2002.

LA SONIFICATION DE SÉQUENCES D'IMAGES À DES FINS MUSICALES

Jean-Marc Pelletier

Keio University

Graduate School of Media and Governance

5322 Endo, Fujisawa, Kanagawa, Japon

jovan@sfc.keio.ac.jp

RÉSUMÉ

Cet article décrit une méthode pour la sonification du mouvement dans des séquences d'images à des fins d'expression musicale. Le système veut permettre au compositeur de chercher des idées musicales dans le plus grand nombre possible de structures visuelles. C'est pourquoi une approche de bas niveau, basée sur un ensemble de vecteurs décrivant le mouvement d'un nombre variable de points saillants dans l'image a été choisie. Chaque vecteur de mouvement est associé à un élément sonore, soit un grain dans le cas de synthèse granulaire, ou un partiel pour la synthèse additive. Grâce à certains effets psychologiques de *Gestalt*, cette approche permet la création d'objets sonores perçus correspondant à des objets visuels, sans toutefois avoir à identifier ces objets préalablement.

1. INTRODUCTION

Dans cet article, une approche de la sonification de séquences d'images à des fins musicales sera présentée. L'expression « séquence d'image » est voulu dans un sens très large. Une image est ici tout champ bidimensionnel représentant quelque chose. Une image peut donc provenir d'une caméra, ou de n'importe quelle autre technique d'imagerie, être un plan d'une séquence d'animation, être générée en temps réel ou non, etc. La séquence d'image doit représenter une progression temporelle car le mouvement qui s'y trouve représenté servira de base à la sonification.

La sonification est définie comme « la transformation de relations entre des données en relations perçues dans un signal acoustique afin de faciliter la communication ou l'interprétation » [11]. Cette définition, cependant, n'est pas tout à fait satisfaisante dans un contexte artistique car les concepts de communication et d'interprétation y sont mal définis. La sonification d'image sera donc ici définie comme une traduction d'ordre iconique du visuel vers le sonore, c'est-à-dire que la transposition s'effectue dans le domaine morphologique (écoute/vision réduite) plutôt que sémantique ou causal [3].

2. PRÉCÉDENTS

2.1. Aperçu historique

La sonification d'image a été rendue possible d'abord par l'arrivée de la piste son optique au cinéma. Comme une piste son dite à densité fixe représente l'onde sonore par un tracé graphique, il devient facilement envisageable de synthétiser de nouveaux sons en y photographiant diverses formes. Déjà, en 1929, à Léninegrad, lors de la réalisation du premier film sonore soviétique (*Plan Vélíkiéh Rabot*, d'Abram Room), l'animateur Mikhaïl Tsékhanovski, en observant pour la première fois une piste son, proposa aux compositeurs Arséni Avraamov et Ievgéné Cholpo de chercher des musiques anciennes en photographiant des ornements égyptiens ou grecs [1]. Bien qu'Avraamov déçut Tsekhanovski en expliquant qu'un motif strictement périodique ne pourrait jamais produire de mélodie, il expérimenta lui-même la production de nouveaux timbres à partir de formes géométriques et l'inventeur Boris Iankovski, par curiosité, obtint un timbre rappelant celui du violoncelle à partir de profils en silhouette de ses collègues [7]. Vers 1932, l'animateur Allemand Oscar Fischinger travaillant alors sur son film expérimental *Tönende Ornamente* affirma avoir entendu un son rappelant un sifflement en photographiant l'image d'un motif égyptien de serpent sur une piste son [5]. Par la suite, en 1933, László Moholy-Nagy réalisa un film, *Tönendes ABC*, dans lequel autant la trame sonore que visuelle étaient composées de formes trouvées, tel des lettres ou des empreintes digitales, de manière à « montrer ce qu'on entend » [9].

Dans les années 1970, la vidéo a permis la sonification d'image en temps réel. Le synthétiseur *DIMI-O* (1970) d'Erkki Kurenniemi permettait de contrôler la génération de notes à partir d'un signal vidéo qui pouvait provenir d'une caméra [14]. En 1974, les artistes David Behrman, Bob Diamond et Robert Watts réalisèrent une pièce intitulée *Cloud Music* dans laquelle, à l'aide d'un système d'analyse vidéo, ils purent transformer les changements d'intensité de six points d'une image en signaux de contrôle analogiques, ce qui leur permit la sonification des mouvements de nuages, captés par une caméra [20]. Yasunao Tone, en 1976, pour sa pièce *Voice and Phenomena*, contrôla un synthétiseur en projetant des

images de caractères chinois sur un écran sur lequel il avait simplement installé quelques cellules photosensibles [4].

Par la suite et jusqu'à ce jour, les ordinateurs ont permis l'application de techniques de sonification plus poussées. À partir de 1983, l'artiste David Rokeby, dans des pièces comme *Reflexions*, *Body Language*, et *Very Nervous System* (1986-1990) [18] utilisa le mouvement capté par des caméras pour générer des événements sonores – différentes régions de l'image correspondant à différents sons. Yasunao Tone réalisa d'autres pièces utilisant des idéogrammes chinois, cette fois-ci utilisant des techniques numériques. Par exemple, dans *Musica Iconologos* (1992), les données d'une image numérisée sont tout simplement ré-interprétées en tant que courts fragments sonores en calculant et combinant les valeurs moyennes des axes horizontaux et verticaux [12]. Plus récemment, Woon Seung Yeo et Jonathan Berger proposèrent un système, *SonART*, pour la sonification d'images statiques [21]. Ils introduisirent les concepts de sondage (*probing*) et balayage (*scanning*) qui rapprochent leur travail de la synthèse *wave terrain*. Norihisa Nagano et Kazuhiro Jo, de leur part, ré-interprètent simplement et directement chaque pixel de l'image comme un échantillon sonore dans leur logiciel, et pièce du même nom, *Monalisa* [8].

Il existe de nombreux autres exemples d'applications musicales de techniques d'analyse d'image, mais souvent, les systèmes proposés ne permettent pas l'utilisation d'images arbitraires. Il peut s'agir, par exemple, de systèmes développés spécialement pour la danse, comme le système *EyeCon* de la troupe Palindrome [20], ou bien d'interfaces dédiées comme le *Mouthesizer* de Michael Lyons et Nobuji Tetsutani [13].

2.2. Pourquoi la sonification ?

On peut identifier un certain nombre de raisons pour utiliser la sonification comme outil de composition musicale. Tsékhanovski rêvait à une musique mystérieuse et latente, dissimulée dans les formes plastiques. L'idée que des sons ou des musiques cachées dans les formes du monde pourraient être découverts à l'aide de la technologie apparaît pour la première fois dans les écrits du poète Rainer Maria von Rilke. Dans un court texte de 1919, *Bruit premier (Ur-Geräusch)* [16], Rilke décrit comment, d'abord frappé par le caractère plastique du sillon phonographique, il remarqua ensuite sa similitude avec les sutures crâniennes, ce qui le poussa à rêver au « bruit premier » qui pourrait s'y cacher. Chez Tone ou Watts, influencés par le mouvement Fluxus, cette recherche de structures musicales dans les formes de la nature s'inscrit dans une esthétique Cagienne d'abandon de l'égo par l'artiste. La sonification leur permet d'accorder aux caractères chinois ou aux nuages un rôle non seulement thématique, mais aussi créateur.

Pour Kurenniemi et surtout Rokeby, l'analyse d'image se veut d'abord et avant tout un instrument d'interactivité, le geste humain ayant très souvent joué un rôle central dans l'utilisation du *DIMI-O* ou du *VNS*. Cependant, la simplicité relative des deux systèmes ne fixe que très peu de limites dans leurs modes d'opération, permettant autant une interaction directe, presque instrumentale, ou indirecte comme dans *Measure* (1992) de Rokeby [18].

3. L'ANALYSE D'IMAGE

3.1. Réduction

Le problème de la sonification d'images animées peut-être appréhendé en tant que processus de réduction d'information. Une séquence d'image vidéo d'une résolution de 640 par 480 pixels à 30 images par seconde est composée de 9 216 000 éléments (pixels), soit beaucoup plus que les 88 200 éléments par secondes d'un signal audio stéréo échantillonné à 44 100 Hz. Toute tentative de traduction vers le domaine sonore nécessite donc l'élimination d'une partie de l'information visuelle.

Dans sa forme brute, la séquence vidéo est très souvent composée d'une grande partie d'information redondante, par exemple, des régions uniformes (redondance spatiale) ou immobiles (redondance temporelle). C'est sur cette redondance que repose les fondements des techniques de compression vidéo [6] et d'un point de vue technologique la sonification d'images animées proposée dans cet article se rapproche de certains de ces algorithmes.

L'information contenue dans une séquence d'images brute n'est pas seulement redondante, elle est aussi, d'un point de vue sémantique, de bas niveau. Une image numérisée n'est qu'une collection de mesures locales d'intensité. Une être humain pourra y voir un visage, un paysage ou un texte écrit ; c'est donc qu'il est possible d'en extraire des informations d'ordre beaucoup plus élevé. Cependant, il est important de ne pas se laisser tromper par la facilité avec laquelle le cerveau humain acquiert ces informations : elles sont le produit d'une analyse d'une complexité qui dépasse encore de beaucoup les capacités de l'informatique actuelle. Néanmoins, il existe des algorithmes de vision industrielle qui nous permettent de découvrir qu'il y a un visage dans l'image, que ce visage appartient à une certaine personne et que cette personne semble être triste. (Dans le domaine musical et artistique, les travaux de recherche réalisés à *INFOMUS* portant sur l'extraction de paramètres affectifs de la danse sont de cet ordre [2].) Cependant, il s'agit ici d'algorithmes spécialistes. Un programme conçu pour détecter la présence de visages humains dans une image sera incapable de nous informer sur le contenu d'une image représentant un paysage ou une colonie microbienne. Ainsi, comme plus l'analyse est de haut niveau, plus elle est spécialiste, une approche généraliste, pouvant analyser

des images provenant de sources diverses et arbitraires se doit d'être de relativement bas niveau.

3.2. Points d'intérêt

La technique employée pour analyser l'image repose sur la détection de points d'intérêt, (*features*). Bien qu'il existe de nombreux algorithmes de détection de points d'intérêt, de façon générale, il s'agit d'un point possédant un voisinage de faible redondance spatiale. Le terme coin (*corner*) est aussi employé pour désigner ces points, et le plus souvent ils correspondent à des croisements de lignes ou des changements soudains de direction de contour. Un petit nombre de points d'intérêts, entre quelques dizaines ou centaines au plus, peuvent nous informer sur la structure générale d'une image. L'identification de ces points est d'ailleurs le premier stage de certaines analyses d'image de haut niveau, comme la reconnaissance de formes.

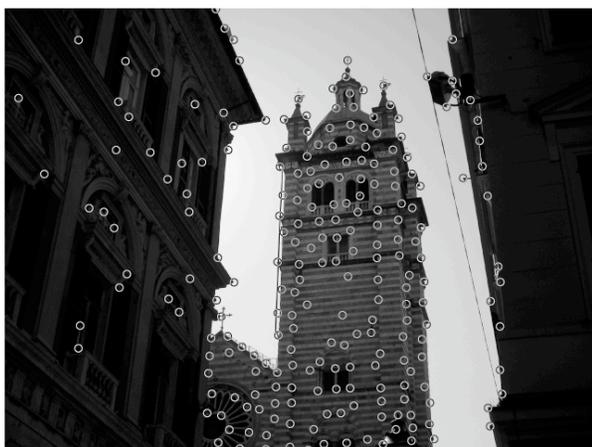


Figure 1. Les cercles marquent les points d'intérêt dans cette image.

3.3. Vecteurs de mouvement

Une fois les points d'intérêt identifiés pour deux images consécutives d'une séquence, il est possible d'établir des correspondances d'une image à l'autre. Pour chaque point d'intérêt dans une image, un algorithme cherche à trouver le point d'intérêt dans l'image suivante lui ressemblant le plus. Il existe à cette fin différentes approches [19] mais toutes produisent un ensemble de vecteurs décrivant le mouvement des points d'intérêts d'une image à l'autre. Les vecteurs sont exprimés sous la forme (x, y, a, θ) , où x et y représentent le point de départ du vecteur, a , son amplitude (vitesse) et θ , son angle. Tout comme l'ensemble des points d'intérêt peut nous informer sur la structure spatiale d'une image, le champ de vecteurs de mouvement peut décrire la structure spatio-temporelle d'une séquence d'images.

À ce stade, il serait possible de pousser l'analyse encore plus loin. Il existe, par exemple, des algorithmes permettant la reconstruction de formes tridimensionnelles à partir d'une séquence de vecteurs de mouvement. Il serait aussi possible de chercher à segmenter l'ensemble de vecteurs en grappes correspondant à des objets réels. Cependant, comme il sera démontré, une telle analyse n'est pas nécessaire à nos fins.

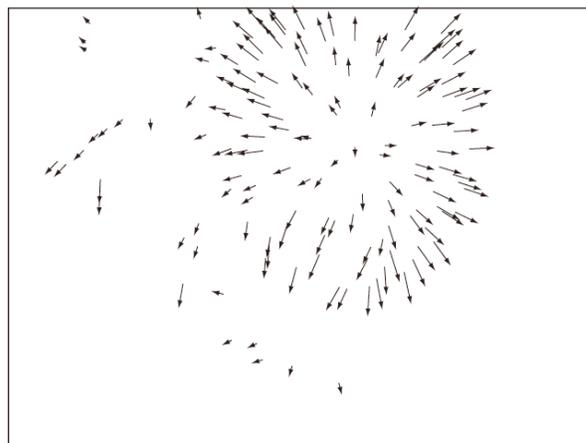


Figure 2. Les flèches représentent les vecteurs de mouvement. Même avec si peu d'information, on peut deviner des feux d'artifice.

4. SONIFICATION

4.1. Vecteurs et synthèse

Une fois les vecteurs de mouvement identifiés, la séquence d'image peut être sonifiée en interprétant chacun de ces vecteurs comme paramètres de contrôle d'un élément sonore d'une synthèse de type microsonique [17], par exemple un partiel dans le cas de synthèse additive ou un grain de synthèse granulaire. Comme le nombre de vecteurs de mouvement dépend surtout de la complexité de la forme visuelle de l'image, on peut déjà affirmer une équivalence : plus la structure spatiale d'une image sera dense, plus le nombre de composantes acoustiques sera grand et donc plus dense aussi sera le son. La quantité, relativement grande, des vecteurs, résout le problème du contrôle d'un grand nombre d'événements qui se pose dans la synthèse granulaire ou additive.

4.2. Association de paramètres

L'association de paramètres spatiaux (position, angle, grandeur) à des qualités acoustiques est réalisée de façon à préserver une similitude morphologique entre l'image et le son tout en laissant un certain degré de liberté au compositeur.

4.2.1. L'espace

La relation la plus évidente est celle de l'espace, car c'est la seule qualité qui soit réellement partagée par le sonore et le visuel. Il convient donc d'associer la position du vecteur de mouvement à celui de l'élément sonore. Par exemple, dans un système stéréo, on utilisera l'axe horizontal de façon à ce qu'un mouvement d'un côté de l'image sera associé à un son positionné au même endroit. Dans un système *surround*, on utilisera autant l'axe horizontal que vertical. Étant donné que le vecteur de mouvement nous informe aussi sur la direction et la vitesse du mouvement, il sera aussi possible de simuler l'effet Doppler. De cette façon, il est possible de générer facilement des trajectoires spatiales qui sont à la fois très complexes et cohérentes.

4.2.2. L'amplitude

Le contrôle d'amplitude s'effectue le plus souvent par la vitesse du vecteur de mouvement. Bien que dans le monde naturel, un mouvement rapide n'est pas nécessairement associé à un grand bruit, c'est une relation qui n'est pas non plus surprenante. En terminologie MIDI le paramètre de vitesse contrôle normalement l'amplitude, et un geste d'archet plus rapide, ou un coup de baguette plus vigoureux est d'habitude accompagné d'un son plus fort. De plus, l'approche présentée ici en est une de sonification du mouvement, donc il se doit qu'une absence de mouvement soit accompagnée par un silence.

4.2.3. Associations arbitraires

Le contrôle de la position et de l'amplitude ne sont pas donc particulièrement problématiques car il est facile d'établir des parallèles entre le sonore et le visuel. Cependant, des paramètres tels que la hauteur, ou – dans le cas de la synthèse granulaire – la transposition, n'ont aucun pendant visuel. Le compositeur se doit donc d'établir des correspondances tout à fait arbitraires pour contrôler ces paramètres. Ainsi, on pourra associer autant la position du vecteur que son angle à la fréquence d'un partiel.

L'aspect complètement arbitraire de certaines associations de paramètres n'est pas une faiblesse. Au contraire, il offre au compositeur une certaine liberté qui peut être jugée nécessaire. Une image, en soi, ne possède pas de son et l'acte de sonification est donc forcément lui-même arbitraire. Il revient donc au compositeur de choisir non seulement quelle image sonifier mais aussi de décider de la meilleure façon de le faire.

5. FORMES

Dans l'approche décrite si-dessus, l'image est réduite à un ensemble de points. Le tout est donc réduit à un ensemble de détails. Dans le cas de la synthèse sonore, un

ensemble de détails (partiels, grains) se joint pour former un tout. Si autant l'image de départ et le son produit forment des objets cohérents, leur nature ne peut pas être réduite à celle de leurs éléments. Ce constat est un des fondements de la psychologie de la forme (*Gestalt*) [10].

Comme il a été déjà mentionné, une analyse plus poussée de l'ensemble de vecteurs de mouvements, tout particulièrement la segmentation des vecteurs en grappes, n'est pas nécessaire. Quelqu'un visionnant une séquence d'images pourra très facilement identifier les objets qui s'y trouve. Cette identification est le résultat d'une analyse de haut niveau dont certaines règles sont décrites par les lois de la *Gestalt*. Par exemple si un danseur court d'un côté à l'autre de l'écran, pendant qu'un autre se dirige en direction inverse, nous reconnaitrons deux formes car leurs détails seront groupés proches l'un de l'autre (loi de la proximité) et se dirigeront dans la même direction (loi de destin commun). Même représentés sous une forme aussi réduite qu'un ensemble d'une centaine de points d'intérêts l'appartenance d'un point à la forme d'un danseur ou de l'autre sera à la fois évidente et entièrement d'ordre perceptuel.

Si on sonifie la séquence d'image représentant ces deux danseurs par synthèse additive, de la manière décrite si-dessus, en associant position avec hauteur, nous obtiendront un certain nombre de partiels positionnés près l'un de l'autre et de hauteur semblable (loi de proximité) et effectuant un glissando et un mouvement spatial dans la même direction (loi de destin commun). On entendra donc deux objets musicaux distincts, effectuant des glissandos et se déplaçant en directions opposées. Ces objets sont eux aussi entièrement perceptuels.

Les lois de proximité et de destin commun peuvent aussi fonctionner de façon inter-modale. On associera donc un objet sonore avec un objet qui lui est proche, ou un geste musical avec un mouvement visuel ayant le même profil dynamique.

6. IMPLÉMENTATION

Il existe présentement deux implémentations du système décrit dans cet article. La première consiste en un *external* pour Max/MSP/Jitter qui calcule les vecteurs de mouvements et qui est accompagné de *patch* démontrant des méthodes de synthèse sonore appropriées. La deuxième, et plus récente, prend la forme d'un logiciel autonome qui analyse des fichiers vidéos et communique, par le protocole UDP, à un environnement de synthèse sonore comme Max/MSP ou Supercollider les paramètres de contrôle générés. Dans les deux cas, l'analyse d'image peut être effectuée en temps réel à plus de 30 images par secondes.

7. DIRECTIONS FUTURES

Le type de point d'intérêt choisi pour le système décrit a l'avantage d'être polyvalent et facile à calculer. Ces points d'intérêts correspondent aussi bien à certains éléments visuellement saillants, ce qui est absolument nécessaire si on désire créer des parallèles perceptifs entre l'image et le son. Cependant, les *corners* ne sont pas le seul type d'élément de bas niveau qui puisse être détecté dans une image. Lignes, taches, textures ou couleurs sont autant d'éléments visuels qui peuvent servir de base à la sonification. Il faudra donc déterminer quel type de synthèse sonore se prête le mieux à ces éléments et quelles associations de paramètres offriront les meilleures possibilités d'expression musicale.

8. RÉFÉRENCES

- [1] Авраамов, А. "Синтетическая музыка", *Kinovedcheskie Zapiski*, no. 53, pp.325-333, 2001.
- [2] Camurri, A. Hashimoto, S. Ricchetti, M. Ricci, A. Suzuki, K. Trocca, R. and Volpe, G. "EyesWeb: Toward Gesture and Affect Recognition dans Interactive Dance and Music Systems," *Computer Music Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 57-69, Apr. 2000.
- [3] Chion, M. *L'audiovision : son et image au cinéma*. Nathan Université, Paris, 1994.
- [4] Cummings, A. Yasunao Tone. [en ligne] Disponible: www.bbc.co.uk/radio3/cutandsplice/tone2.shtml [Accédé: 29 jan. 2009]
- [5] Hacquart, G. *La musique et le cinéma*. P.U.F., Paris, 1959.
- [6] Haskell, B.G. Puri, A. Netravali, A. N. *Digital Video: an Introduction to MPEG-2*. Kluwer Academic Publishers, New York, 1996.
- [7] Iankovski, B. "Акустический синтез музыкальных красок", *Kinovedcheskie Zapiski*, no. 53, pp.353-367, 2001.
- [8] Jo, K. Nagano, N. "Monalisa: See the Sound, Hear the Image", dans *Proceedings of the 2008 International Conference on New Interfaces For Musical Expression*, pp.315-318, 2008.
- [9] Kaplan, L. *Laszlo Moholy-Nagy: Biographical Writings*. Duke University Press, North Carolina, 1995.
- [10] Koffka, K. *Principles of Gestalt Psychology*. Harcourt, New York, 1967.
- [11] Kramer, G., Walker, B., Bonebright, T., Cook, P., Flowers, J., Miner, N.; Neuhoff, J., Bargar, R., Barrass, S., Berger, J., Evreinov, G., Fitch, W., Gröhn, M., Handel, S., Kaper, H., Levkowitz, H., Lodha, S., Shinn-Cunningham, B., Simoni, M., Tipei, S. "The Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda", Report prepared for the National Science Foundation by members of the International Community for Auditory Display. ICAD, Santa Fe, NM, 1999.
- [12] LaBelle, B. *Background Noise*, Continuum International Publishing Group, London, 2006.
- [13] Lyons, M. J. Tetsutani, N. "Facing the Music: A Facial Action Controlled Musical Interface", dans *Proceedings, CHI 2001, Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 309-310, 2001
- [14] M. Ojanen, J. Suominen, T. Kallio, and K. Lassfolk, "Design principles and user interfaces of Erkki Kurenniemi's electronic musical instruments of the 1960's and 1970's," dans *Proceedings of the 2007 International Conference on New Interfaces For Musical Expression*, pp. 88-93, 2007.
- [15] Pelletier, J.M. "Sonified Motion Flow Fields as a Means of Musical Expression", dans *Proceedings of the 2008 International Conference on New Interfaces For Musical Expression*, pp. 158-163, 2008.
- [16] Rilke, R. M. *Oeuvres en prose*. Gallimard, Bibliothèque de la Pléiade, Paris, 1993.
- [17] Roads, C. *Microsound*. MIT Press, Cambridge Mass. 2001.
- [18] Rokeby D. Installations. [en ligne] Disponible: homepage.mac.com/davidrokeby/installations.html [Accédé: Jan. 29 2009]
- [19] Smith, P. Sinclair, D. Cipolla, R. and Wood, K. "Effective Corner Matching," dans *Proceedings of the 9th BritishMachine Vision Conference*, pp. 545-556, 1998.
- [20] Watts, R. Behrman, D. Diamond, R. Cloud Music. [en ligne] Disponible: www.vasulka.org/Kitchen/PDF_Eigenwelt/pdf/152-154.pdf [Accédé: Jan. 29 2009]
- [21] Wechsler, R. Weiß, F. Dowling, P. "EyeCon – A Motion Sensing Tool for Creating Interactive Dance, Music and Video Projections" dans *Proceedings of the Society for the Study of Artificial Intelligence and the Simulation of Behavior (SSAISB)'s convention: Motion, Emotion and Cognition at University of Leeds, England, March 29, 2004*, 2004
- [22] Yeo, W. Berger, J. "Application of Image Sonification Methods to Music", dans *Proceedings of the 2005 International Computer Music Conference*, 2005.

PRÉSENTATION DU MASTER 2 PROFESSIONNEL MUSIQUES APPLIQUÉES AUX ARTS VISUELS

Bertrand Merlier, Jean-Marc Serre
Université Lumière Lyon 2
Département Musique & Musicologie / Faculté LESLA
18, quai Claude Bernard
69365 LYON CEDEX 07
Bertrand.Merlier@univ-lyon2.fr jmserre@free.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente le master professionnel Musiques Appliquées Aux Arts Visuels, mis en place en 2007 par Bertrand Merlier et Jean-Marc Serre au sein du département Musique & Musicologie de l'université Lumière Lyon 2.

Une brève présentation des objectifs et du cursus est tout d'abord proposée, illustrée par la projection et l'écoute de quelques réalisations d'étudiants. Un bilan positif peut d'ores et déjà être dressé en cette fin de deuxième année d'existence.

Une réflexion sur l'usage de l'informatique musicale dans ce domaine créatif est finalement exposée, faisant en quelque sorte suite à notre intervention-invité des JIM'07 [3].

Mots-clés : pédagogie, création, musique de film ou de vidéos ou de jeux vidéos ou de produits multimédia, habillage sonore, *SoundDesign*, relations son-image, communication par le son, installation sonore.

1. PRÉSENTATION

L'édition 2007 des JIM a été l'occasion de faire un tour d'horizon des diverses formations universitaires ou au sein des conservatoires de musique dans les domaines de l'informatique, des sciences, des technologies appliquées à la musique (et plus généralement à la création artistique). Nous renvoyons le lecteur aux actes de ce colloque[1], ainsi qu'à l'annuaire édité depuis plus de dix années par Thélème Contemporain[2].

En septembre 2007, le département Musique & Musicologie de l'Université Lumière Lyon 2 a mis en place et ouvert **une formation originale et innovante** : le **Master 2 professionnel M.A.A.A.V.** « Musiques Appliquées Aux Arts Visuels ».

La description qui suit va nous permettre de situer cette formation, de montrer son originalité et sa complémentarité avec les autres offres du marché.

Le MAAAV est une **formation en création et conception musicale et sonore** à destination des arts visuels. Au-delà des musiques de film ou des musiques de scène, l'essor considérable des technologies numériques et du multimédia au sein de notre société est en train de faire émerger de nouveaux besoins tels que : la signalétique par le son, l'habillage sonore de sites web ou de lieux publics, la muséographie, la création musicale pour des produits audiovisuels ou multimédia (souvent en ligne), pour des jeux vidéos, pour de la communication d'entreprise, pour des émissions sur les webTV... **Donc, de nouveaux métiers, réclamant une parfaite maîtrise du musical, du sonore et des relations son-image !**

Ce cursus diplômant est ouvert aux étudiants en formation initiale (généralement issus d'un master 1 en musique), mais aussi aux adultes issus du monde professionnel (par le biais de la VAPP : Validation des Acquis Professionnels et Personnels). En 2008, quatre adultes ont été admis au titre de la VAPP dont trois pris en charge par l'ANPE ou l'AFDAS.

2. CONTENUS DU CURSUS DE FORMATION

La formation se répartit sur 2 semestres. L'enseignement du semestre 1 comporte trois modules :

- écriture instrumentale (Jean-Marc Serre),
- écriture sonore ou électroacoustique (*SoundDesign*, en anglais) (Bertrand Merlier)
- culture générale, du point de vue esthétique ou technologique. Des cours sur l'ensemble des arts visuels (histoire et esthétiques) ou sur l'histoire du cinéma sont assurés par des enseignants du département Arts du Spectacle (localisé dans la même faculté). Un intervenant extérieur artiste-vidéaste professionnel fournit l'ensemble des bases techniques liées à la capture des images, à leur manipulation.

Les deux premiers modules abordent évidemment l'analyse des relations musique-image, ainsi que les

questions de communication par le son. Le dernier module vise à garantir l'autonomie des étudiants face à la technologie (techniques de studio, notions de vidéo, *authoring* DVD...).

Plusieurs interventions de professionnels de différents horizons ponctuent ce premier semestre.

- En 2007 : Richard Bois, compositeur et représentant de l'UCMF (Union des Compositeurs de Musique de Films) ; Serge Basset, compositeur à FOLIMAGE, le trio USB-Sax (compositeurs-interprètes de ciné-concerts)...
- En 2008 : Simon Dufour, compositeur pour TV 8 Mont-Blanc ; Cécile Le Prado, compositeur, concepteur d'installations sonores, responsable du studio son de l'ENJMIN (École Nationale des Jeux et du Multimédia Interactifs Numériques), Neil Boynton, compositeur et artiste multimédia, LICA (Lancaster Institute for Contemporary Arts, UK)...

Le second semestre est dédié à un stage de 14 semaines en entreprise ou à un projet de création artistique encadré. Les objectifs de ce stage sont : l'insertion dans le milieu professionnel, l'apprentissage du travail au sein d'une équipe, l'acquisition d'une expérience grandeur nature qui s'inscrit dans le CV des étudiants.

3. L'ÉQUIPE PÉDAGOGIQUE

Le master-pro MAAAV est animé et coordonné par Bertrand Merlier (compositeur, Maître de Conférences en informatique musicale) et Jean-Marc Serre (compositeur, Professeur Agrégé en écriture instrumentale, analyse et orchestration). Deux intervenants extérieurs représentent le milieu professionnel dans les commissions pédagogiques : Jean-Paul Bouvatier (précurseur en Rhône-Alpes en matière d'enseignement de la composition musicale à l'image et Serge Basset, tous deux associés au Pôle Image de Valence – Drôme (FOLIMAGE, L'Équipée, l'école de la Poudrière, la Cartoucherie...).

4. LES COLLABORATIONS AVEC LE MILIEU PROFESSIONNEL

Le master-pro MAAAV est associé d'une part au master-pro GAMAGORA (jeu vidéo), d'autre part au master-pro DASI (Diffusion des Arts et du Savoir par l'Image) et au département ASIE (Arts du Spectacle)¹, situés dans la même université : échanges de cours ou d'enseignants, master-class communes, mise en binôme d'étudiants des différents masters. En 2007-2008, une bonne douzaine de musiques de courts-métrages ont été réalisées pour des travaux d'étudiants

¹ Le département ASIE enseigne la vidéo, la photo, la danse, le théâtre...

d'ASIE, à destination de documentaires diffusés sur Cap Canal ou Lyon TV. Ces collaborations en vue de réalisations sont renouvelées cette année et même assorties de la réalisation d'une musique pour le théâtre. Ces partenariats au sein d'une même université sont un atout qui mérite d'être signalé.

Après une année d'existence, la liste des collaborations est déjà longue : le CNSMD de Lyon (classe de musique à l'image), l'école Emile Cohl, l'ONL, l'UCMF (Union des Compositeurs de Musique de Films), l'ENJMIN (Ecole Nationale de Jeu vidéo et de Multimédia Interactif), SupInfoGraph Paris, SupInfoGraph Arles, Thélème Contemporain, Radio Labesse – Festival Co-errantes, Théâtre de l'Élysée...

5. PRODUCTIONS

Le master-pro MAAAV a produit l'an dernier quatre ciné-concerts (co-productions respectivement avec le Service Culturel de Lyon 2, l'Astrée Lyon 1, Thélème Contemporain et le Théâtre de l'Élysée), ainsi qu'un DVD-vidéo regroupant une sélection de travaux d'étudiants. Ce DVD est destiné à la communication externe en direction des institutions et du milieu professionnel.

Quelques extraits de ces réalisations sont en ligne sur le site Web : <http://sites.univ-lyon2.fr/musique/maaav/index.html>

Un espace vidéo MAAAV TV a été récemment ouvert sur *youtube* afin de référencer les travaux étudiants du MAAAV :

<http://www.youtube.com/Maaaviste>



Figure 1 : le DVD du MAAAV 2007-2008

Musiques instrumentales ou électroacoustiques ;
Présentation de certains stages de semestre 2.

Rappelons au passage que le master-pro MAAAV dispose au sein du département Musique d'un grand chœur, d'un ensemble vocal, d'une formation orchestrale et de tout un vivier d'instrumentistes allant du Kaoss pad au charango, en passant par le *Black Metal*.

6. LES STAGES

Les stages effectués par les étudiants correspondent assez bien aux objectifs diversifiés de la formation : jeux vidéo, muséographie sonore, réalisation d'installations sonores (dont une interactive), habillage sonore d'une radio, réalisation d'un DVD-vidéo musical, recherche en écriture multimédia... Preuve que dans le cahier des charges de notre diplôme, il ne fallait surtout pas se cantonner à une vision trop classique de style musique de film !

L'écriture musicale était bien sûr présente dans tous les projets, mais parmi d'autres éléments.

Trois étudiants (parmi les plus âgés) ont opté pour un stage de création personnelle encadré. Les autres ont trouvé des stages dans des associations ou des entreprises.

Des éléments de création artistique multimédia sont donnés dans le semestre de cours ; à charge pour les étudiants intéressés d'approfondir ces domaines durant le semestre de stage. L'an dernier, quatre stages ont porté sur des sujets de création sonore ou musicale dans des contextes non linéaires ou non standards : un habillage sonore et musical muséographique, deux installations visuelles et sonores. Le projet « Labyrinthe » explorait les questions de la vidéo et de la musique électroacoustique jouées toutes deux en direct dans un contexte de type musique de chambre. Des questions fort intéressantes ont pu être soulevées, telles que les modes d'interactions entre le visuel et le sonore, les instruments, les gestes expressifs, la notation d'éléments multimédia...

7. PREMIER BILAN

Le bilan de cette première année est positif.

- La première promotion d'étudiants nous a quitté il y a quelques mois, avec un taux d'embauche ou d'insertion dans le milieu professionnel en fin de stage (avant même la délivrance du diplôme) de plus de 50% !
- La deuxième promotion est actuellement en stage.
- Les demandes d'inscription pour la rentrée de sept 2009 (!) affluent déjà.
- Notons enfin que le budget du master-pro MAAAV a été équilibré dès la première année ! (élément important en ces temps de rigueur...).

8. RÉFLEXION SUR LES USAGES DE L'INFORMATIQUE MUSICALE

Avant de conclure, nous avons souhaité ajouter une petite réflexion concernant l'informatique musicale.

Cette formation est relativement innovante dans le contexte universitaire, comparativement à l'enseignement beaucoup plus traditionnel de la musique et de la musicologie.

Ce diplôme est par principe en liaison avec le milieu professionnel. Comme le montre clairement le paragraphe 6 dédié aux stages, l'outil informatique est omniprésent dans ce type d'activité. Personne n'a trouvé de stage de compositeur avec papier, crayon et gomme... Même pour faire de la musique bien classique ou bien populaire !

Regardons cet usage d'un peu plus près.

8.1. Outil de communication

Cette question (courriers électroniques, Internet, bases de données...) ne sera évidemment pas développé ici, même si elle est de toute évidence très importante.

8.2. Outil de création

La question de l'**outil de création artistique** est abondamment évoquée dans les cours (essentiellement dans le module écriture sonore ou électroacoustique). L'utilisation des séquenceurs audionumériques, logiciels de capture ou manipulation du son, synthétiseurs, échantillonneurs... est explicitée, illustrée par des travaux du répertoire, afin d'être ensuite mise en pratique par les étudiants.

Expérience pas toujours facile pour des musiciens traditionnels...

8.3. Outil de production

La « surprise » de la première année a été de constater – par le biais des intervenants extérieurs ou des suivis de stages – que dans le milieu audiovisuel le recours aux véritables instruments est fort rare.

La majeure partie des productions sont réalisées à l'aide d'instruments électronique (imitant ou non des instruments acoustiques). Force est aussi de constater que 90% des travaux passent par l'étape de l'écriture informatique et de la maquette par informatique.

L'écriture de partitions par ordinateur est généralement déjà bien maîtrisée par les étudiants. Toutefois, les cours d'écriture instrumentale « avec de vrais instruments » de la première année ont du évoluer en intégrant l'utilisation de banques de sons orchestrales de type EWSL (East West Symphonic Orchestra) relativement abordables et relativement correctes.

La réalisation de maquettes musicales utilisant des bibliothèques de sons instrumentaux s'avère être un gain de temps appréciable.

Ce qui n'empêche pas de jouer les meilleures réalisations à l'orchestre en ciné-concerts publics...

9. CONCLUSION

Cette aventure pédagogique – pari sur l'avenir et la modernité – semble démarrer sous de bons auspices et répondre aux souhaits des étudiants en matière d'offre de formation. En effet, le master-pro MAAAV attire – pour plus de la moitié de ses effectifs – des étudiants d'autres universités, d'autres pays ou d'autres horizons (formation continue).

Les contacts avec le milieu professionnel sont encourageants, mais doivent être consolidés ou étoffés. En France, le métier de *SoundDesigner* est très mal identifié, ce qui n'est pas le cas dans les pays anglo-saxons ou chez nos voisins belges, par exemples.

Soyons clairs ! Les débouchés de type compositeurs de musique de films sont quasiment inexistant ! Cela dit de nombreux autres métiers du son lié à l'image font leur apparition. La plupart des grandes villes s'équipent de leur web-TV et vont être confronté à de l'habillage musical ou sonore. Les sites Web sont désespérément silencieux. La muséographie sonore ou la sonalétique (guidage par le son) devraient prendre leur essor très bientôt¹.

Profitons de cette tribune pour dire très pragmatiquement que le master-pro MAAAV :

- est habilité à recevoir de la taxe d'apprentissage ; aide précieuse afin de disposer d'un équipement informatique performant.
- est ouvert à toute collaboration avec d'autres universités, écoles, entreprises, associations, en matière de musique ou d'habillage sonore et plus généralement de communication par le son.

Bertrand Merlier & Jean-Marc SERRE
responsables de la formation
Contact : maaav@free.fr

10. RÉFÉRENCES

10.1. Ouvrages et articles

- [1] Actes des JIM'07, Thème invité : pédagogie de la musique au XXI^e siècle, Université Lyon 2, 12-13-14 avril 07.
- [2] Annuaire des acteurs de l'informatique musicale et des musiques électroacoustiques, Thélème Contemporain, 10^{ème} édition, 2008.
<http://tc2.free.fr>
- [3] MERLIER Bertrand, *Les formations en Informatique Musicale*, Intervention invitée, JIM'07, Université Lyon 2, 13 avril 07.

10.2. Sites Web du master MAAAV

Deux sites miroirs :

- [4] <http://maaav.free.fr>
- [5] <http://sites.univ-lyon2.fr/musique/maaav/>

¹ France Telecom RD expérimente grandeur nature des Pages Jaunes sonores sur le Web : c'est-à-dire une géolocalisation ou une identité sonore du lieu.

L'INFORMATIQUE MUSICALE AU DEPARTEMENT DE MUSIQUE DE L'UNIVERSITE DE PARIS 8

Anne Sèdes

CICM-Centre de recherche Informatique et Création Musicale
Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord
Université de Paris8
cicm@univ-paris8.fr

RÉSUMÉ

Dans ce communiqué, nous présentons la place et les enjeux de l'informatique musicale dans les cursus de formation et dans l'activité de recherche et de création à l'université de Paris 8 Vincennes à Saint-Denis.

1. INTRODUCTION

L'U.F.R arts de l'université de Paris 8 – Vincennes à Saint-Denis regroupe les arts plastiques, la photographie, le cinéma, le théâtre, la danse, la philosophie et la musique. Cette université pionnière, qui fête cette année ces quarante ans, défend depuis ses origines les productions artistiques comme partie intégrante des productions de la recherche, et l'enseignement des arts par la pratique et par la réflexion sur cette pratique. Depuis les origines du Groupe Arts et Informatique de Vincennes (le GAIV), l'informatique musicale s'y est développée au département informatique puis au département de musique, pour s'intégrer depuis près de vingt dans les cursus qui y sont offerts, à l'initiative d'Horacio Vaggione. Dans le texte qui suit, on décrira la place et les enjeux de cette spécialité au sein des enseignements et de la recherche à l'université de Paris 8.

2. L'INFORMATIQUE MUSICALE AU DEP DE MUSIQUE DE L'UNIVERSITE DE PARIS 8.

Le département de musique de l'université de Paris 8 prépare à la licence de musique, en proposant entre autres options une mineure en composition assistée par ordinateur, ainsi qu'un master de musique et un doctorat "esthétique, sciences et technologies des arts, spécialité musique" où informatique et création musicale coexistent. L'objectif consiste ainsi à former des musiciens aux enjeux et aux savoirs-faire liés à l'informatique appliquée à la musique.

2.1. Le cursus de licence

Le cursus de licence est constitué d'un tronc commun à toutes les options, d'enseignements obligatoires en formation musicale, musicologie, pratiques et techniques de la musique, langues et méthodologie. L'option de mineure CAO comporte en 1ère année 60 heures de formation à l'acoustique musicale et à l'audio numérique. En 2ème année 60 heures de formation à la

synthèse et à la transformation des sons, 60 heures à la composition électroacoustique et 60 heures d'introduction à la programmation. Les logiciels abordés sont essentiellement Max/Msp ou Pure Data, Csound, Pro tools ou Reaper.

En troisième année, on poursuit 60 heures d'enseignement en composition électroacoustique et en programmation. S'ajoutent 60 heures de musicologie en "musique et mutation technologiques" et dans la partie dite "majeure" de la licence, 60 heures d'audition studio dédiée au mixage et au Mastering et 60 heures dédiée à l'écriture et à la composition instrumentale et mixte, avec introduction au logiciel PWGL.

2.2. Le cursus de master

Le cursus de master orienté recherche sur deux années comporte dix unités d'enseignement :

- 2 séminaires musique et outils informatiques
- 2 séminaires composition et recherche
- 3 séminaires de formalisation et épistémologie de la création musicale
- 2 séminaires de composition instrumentale et mixte.

L'équipe d'enseignement est constituée d'Anne Sèdes, d'Horacio Vaggione, de José Manuel Lopez Lopez et de Guilherme Carvalho.

Sous certaines conditions, des stages professionnalisant peuvent se substituer à un ou deux séminaires.

2.3. Les études doctorales

Le doctorat "esthétique, sciences et technologies des arts", spécialité musique est rattaché à l'EDESTA, école doctorale de l'UFR arts. La composante d'accueil est le CICM (Centre de recherche en Informatique et création musicale). Les directeurs de recherche sont Anne Sèdes et Horacio Vaggione.

Les sujets de recherche peuvent porter sur des approches aussi diverses que le développement d'outils logiciels pour la composition musicale, les instruments augmentés, les nouveaux moyens de diffusion de la création musicale, les objets logiciels audio-visuels pour la convergence image-son, les installations sonores interactives, etc.

Nous insistons sur le fait que le cadre d'étude est bien un cadre de sciences humaines, et non un cadre de sciences de l'ingénieur, ce qui n'exclue en rien une

approche rigoureuse des relations arts-sciences-technologies. Elle implique simplement une redéfinition des méthodes, adaptées aux attendus des sciences humaines et des sciences de l'art.

Etant une faculté de Sciences humaines, on doit noter également que les financements de thèse sont extrêmement rares, (une allocation de recherche tous les 10 ans, et encore). De rares CIFRE et quelques contrats d'ingénieurs de recherche sont offerts à nos jeunes chercheurs, en relation avec des projets de recherche industrielles développés dans l'équipe, répondant aux appels à projets de l'ANR ou à ceux du pôle de compétitivité francilien Cap Digital dont notre université est membre. Ainsi, le choix des sujets de recherche est en général relativement libre.

2.4. Les équipements

Le département de musique a pu équiper correctement deux studios à l'université de Paris 8 et nous avons pu en équiper un troisième au sein du thème de recherche "environnements virtuels et création" de la Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord plutôt destiné aux doctorants. Nos doctorants peuvent accéder également aux équipements de la Plate-forme Arts-Sciences-Technologies adossée à la MSH Paris Nord. Enfin, une salle de concert est disponible à l'université.

3. LA PLACE DE LA CREATION ARTISTIQUE

Comme on l'a dit en introduction, les équipes de l'université de Paris 8 ont toujours défendu le fait que la pratique de la création artistique est formatrice et doit pouvoir être mise en place au sein des cursus universitaires.

Aussi bien en licence qu'en master ou en doctorat, l'obtention de certaines unités d'enseignements passe par l'évaluation des travaux artistiques.

Ainsi les cours d'électroacoustique nécessitent la composition d'une pièce et son commentaire raisonné.

De même, les ateliers de composition instrumentale et mixte donnent lieu à une composition présentée en concert public en fin d'année, à l'université et dans des salles parisiennes ou dans le "9-3", en partenariat avec le raseau de création musicale en Seine-Saint-Denis ; cette composition est créée par des solistes renommés, souvent recrutés dans les rangs de l'ensemble Intercontemporain ou de l'itinéraire.

L'évaluation de ce type de travaux porte sur des critères d'acquisition des savoirs, de compétences techniques et évidemment artistiques. Ainsi, si toutes les pièces sont créées à l'université, seules les meilleures pièces, sélectionnées par un jury, sont jouées en salle parisienne, en général à l'Institut Cervantes dans le 8ème arrondissement de Paris. Parmi ce choix, des commandes de création seront passées à deux ou trois compositeurs par l'association Densité 93 pour le raseau de création musicale en Seine-Saint-Denis. Inutile de préciser que la formule, qui impose d'affronter la réalité des rudes contraintes du métier de compositeur, fonctionne en terme d'émulation.

L'ensemble des travaux artistiques valide en licence un projet artistique sous forme d'une unité d'enseignement.

En master et en doctorat, ils peuvent s'intégrer partiellement et de façon raisonnée aux travaux de recherche développés par ailleurs.

4. COMPETENCES OU FORMATION A DES METIERS ?

Le bassin d'emploi francilien est évidemment très riche, aussi bien dans le domaine du spectacle vivant, des industries culturelles et audiovisuelles que dans la vie musicale. D'ailleurs, Paris et ses grandes institutions musicales entraînent des étudiants de niveau international, qui après un passage au CNSM de Lyon et/ou de Paris, un Cours de composition à l'IRCAM ou ailleurs souhaite se construire un profil universitaire. Ce public côtoie de jeunes étudiants fraîchement bacheliers, ainsi que des ingénieurs venant compléter leur formation artistique. Cette mixité contribue à la richesse de notre département de musique et de son activité en Informatique et Création musicale.

Dans ce contexte, et en relation avec la réalité difficile du marché du travail à ce jour, il nous paraît raisonnable et responsable de privilégier l'acquisition de compétences, pouvant s'adapter au profil de chacun de nos étudiants, plutôt que d'appeler à une professionnalisation à outrance des formations en université, sans garantie réelle d'insertion sur le marché du travail. Les métiers de la musique et de la création artistique sont trop divers, spécialisés, et malheureusement marginaux, pour qu'on puisse les faire correspondre à un profil unique assurant une embauche en sortie du système universitaire. Il s'agit plutôt de fournir un ensemble de compétences qui vont permettre l'autonomie et l'adaptation des étudiants à l'offre professionnelle très hétérogène du monde de la musique et de la création artistique.

5. CONCLUSION

L'enseignement et la recherche vont de paire à l'université et s'alimentent l'un l'autre, c'est sans doute son principal atout, pour la production et l'acquisition de savoirs.

Le domaine professionnel de la musique est pluriel. Croiser un enseignement de la création musicale avec celui de l'informatique musicale par le biais de la « composition assistée par ordinateur », dans un cadre propre aux sciences de l'art, et s'appuyer sur la pratique autant que sur la théorie, nous paraît formateur. Il permet des transferts de compétences auprès du jeune public étudiant qui se les appropriera dans la multiplicité des voies qu'il saura lui-même se tracer.

Pour plus d'informations sur les cursus :

<http://www.artweb.univ-paris8.fr>

<http://cicm/mshparinord.org>

QUESTIONNER LA NOTION D'INSTRUMENT EN INFORMATIQUE MUSICALE :

ANALYSE DES DISCOURS SUR LES PRATIQUES DU META-INSTRUMENT ET DE LA META-MALLETTE

Caroline CANCE

IJLRA (UMR 7190 / Paris 6 / MCC)
Équipe LAM - *Lutheries Acoustique Musiques*
Groupe LCPE - *Langages Cognitions*
Pratiques et Ergonomie
cance@lam.jussieu.fr

Hugues GENEVOIS

IJLRA (UMR 7190 / Paris 6 / MCC)
Équipe LAM - *Lutheries Acoustique Musiques*
genevois@lam.jussieu.fr

RÉSUMÉ

En inventant de nouveaux dispositifs de production musicale, le XX^e siècle nous invite à réviser le concept d'instrument de musique et, par là, à tenter d'approcher le concept d'instrumentalité. On notera d'ailleurs que, depuis les années 70, les travaux et colloques portant sur les dispositifs de contrôle gestuel de la synthèse, et plus généralement sur les interfaces homme-machine (IHM), se sont considérablement développés.

En complément des approches centrées sur les qualités intrinsèques des dispositifs techniques, ainsi que des recherches portant sur l'interaction multisensorielle musicien-instrument, il nous a semblé utile d'examiner ici les pratiques, les usages et les communautés que ces dispositifs font émerger.

Nous pensons, en analysant notamment les différents types ou registres discursifs au sein desquels se déploient, s'inventent et se négocient de nouvelles définitions, que la question de l'instrument de musique se trouve en partie renouvelée grâce à l'apport de la linguistique. C'est, du moins, ce que nous tâcherons de montrer dans le présent article.

1. INTRODUCTION

Dans la musique, l'instrument fait, depuis toujours et dans toutes les cultures, partie du « paysage » (technique, expressif, symbolique...). Notre contribution explore les changements induits par le passage, au XX^e siècle, de l'instrument « mécanique » à l'instrument informatique, parfois dénommé en informatique musicale (IM) « instrument virtuel ».

Comment décrire ces changements ? Quelles en sont les conséquences ? En quoi ce qui se joue et s'invente par et pour des activités de création musicale peut-il se généraliser ? En effet, ces nouvelles interfaces et les pratiques qu'elles suscitent nous invitent à re-problématiser les concepts d'instrumentalité et d'orchestralité, en tenant compte des exigences expressives singulières propres à la musique, qui impliquent également le développement d'interfaces homme-machine de qualité.

Nous proposons dans cette communication d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations, tant en rappelant les cadres théoriques qui les conditionnent,

qu'en nous appuyant sur des travaux en cours (enquête linguistique sur les pratiques et les représentations d'utilisateurs de MAO). La réflexion et l'analyse proposées sont issues de travaux inscrits dans le cadre d'un projet ANR que nous décrirons succinctement.

Mais, en premier lieu, nous rappellerons les évolutions technologiques qui ont renouvelé notre rapport au son et à la musique... et à l'instrument.

2. DE L'INSTRUMENT MECANIQUE A L'INSTRUMENT NUMERIQUE

L'histoire de la musique et de ses instruments ne saurait être indépendante de l'histoire en général. Histoire des idées, histoire des arts, histoire des techniques, histoire des formes, histoire des sentiments et des affects, histoire de notre relation au monde, de notre vision du monde, autant d'histoires qui se mêlent et, parfois, se confondent. Non seulement, elle n'en est pas indépendante mais sans doute, à sa façon, contribue-t-elle à esquisser de nouvelles sensibilités, de nouveaux rapports au temps et à l'espace qui modifient notre « intelligence » *du* monde, ou plutôt, pourrait-on dire, notre intelligence *avec* le monde, au sens d'une relation étroite, complice, comme dans l'expression « intelligence avec l'ennemi ».

Les quelques points de repère historiques qui suivent sont *a priori* connus de tous, et ont d'ailleurs été largement étudiés. Néanmoins, nous avons cru bon de les rappeler en quelques tableaux, très schématiques, mettant en scène des dualités tout à tour opposées ou complémentaires, diachroniques et synchroniques, afin de re-contextualiser notre problématique.

2.1. Histoire d'une double « mise à distance »

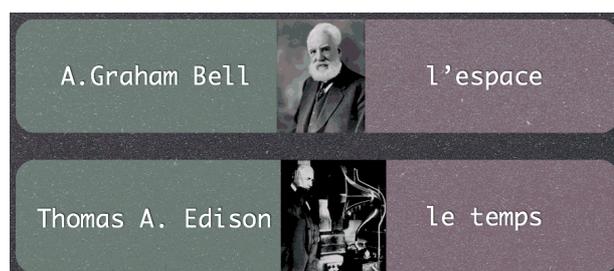


Figure 1. 1876 : Graham Bell invente le téléphone - 1877 : Thomas Edison invente le phonographe.

L'invention du téléphone et celle du phonographe, presque contemporaines l'une de l'autre, viennent, en permettant la transmission des sons à distance et leur enregistrement perturber notre relation « classique » aux sons, à la voix, à la musique. Désormais, les sons peuvent « voyager » dans l'espace et dans le temps. Ils ne sont plus nécessairement entendus à l'endroit et à l'instant de leur production.

2.2. Histoire d'un double « échappement »

Les développements de l'électricité, puis du numérique, contribueront plus tard à d'autres modes de « mise à distance » du corps dans la production musicale : la « fée Électricité » en apportant une énergie nouvelle, car jusque-là mécanique, aux machines et dispositifs instrumentaux, et le numérique en opérant un découplage radical par son mode de programmation, donc de contrôle, basé sur un codage symbolique.



Figure 2. Découplage énergétique – Découplage symbolique.

Les conséquences de ces découplages sur la relation musicien-instrument ont déjà fait l'objet d'études approfondies, notamment par Claude Cadoz [7].

Nous ne reviendrons pas sur ces points, sinon pour noter que ces technologies font passer d'un monde où la valeur est créée par le travail, l'énergie, à un monde où la valeur est liée à l'information, au symbolique, révolutions dont les conséquences artistiques, culturelles et sociales sont inévitables.

Ainsi, on ne devra peut-être pas s'étonner si, parallèlement à ces développements, de nouvelles sensibilités artistiques et de nouveaux paradigmes philosophiques et scientifiques s'éprouvent et s'inventent.

2.3. Les trois unités

Mais revenons à la question de l'instrument et, pour cela, empruntons un instant à un autre domaine que celui de la musique des concepts susceptibles d'aider notre réflexion.

Le théâtre antique reposait sur la règle des trois unités : unités de temps, de lieu et d'action. Dans une certaine mesure, la relation « classique » du musicien ou de l'auditeur avec les phénomènes sonores reposait sur les mêmes bases. Or, nous l'avons vu précédemment, ces trois unités, qui garantissaient la cohérence de la relation instrumentale, se trouvent brisées par les technologies nouvelles. En conséquence, là où le musicien et l'auditeur étaient en relation directe avec les sources sonores « primaires », ils se voient aujourd'hui, avec les

dispositifs de synthèse, confrontés à des sources « secondaires » produisant des simulacres dont rien ne garantit plus la cohérence. C'est précisément cette notion de « cohérence » que, dans le cadre du projet 2PIM, nous essayons de cerner et d'étudier.

3. LE PROJET 2PIM

Le projet 2PIM (Plate-forme de Programmation Interactive Multimédia autour du Méta-Instrument) est un projet ANR regroupant différents laboratoires de recherche et structures de création autour de Puce Muse, concepteur et utilisateur du Méta-Instrument : l'équipe LAM (UPMC – CNRS - MCC), le LIMSI (Paris XI - CNRS), le LaBRI (Bordeaux I - ENSEIRB - CNRS), l'Université McGill de Montréal, l'IRCAM et la Grande Fabrique (Dieppe – structure de création et de pédagogie musicales).

Dans ce programme, qui s'achève en 2009, il s'agit d'une part, pour permettre le co-développement et l'échange de projets de recherches utilisant le Méta-Instrument, de définir, normaliser et développer une Plate-forme de Programmation Interactive Multimodale (2PIM), d'autre part, d'étudier les relations entre gestes, sons, formes visuelles en mouvement et instruments à travers différents projets pilotes, utilisant le Méta-Instrument et la 2PIM.

3.1. Le Méta-Instrument

Le Méta-Instrument (MI) est une interface haptique, définie par ses concepteurs comme « un transducteur gestuel destiné à mesurer et numériser les gestes du musicien » [16]. Trois générations de MI ont été réalisées par Puce Muse depuis 1989.

La troisième génération ou MI-3 (*cf.* figure 3), compatible avec les 2 précédentes, a été créée en 2005. Le MI-3 permet de manipuler 54 variables simultanément et indépendamment les unes des autres.



Figure 3. Le Méta-Instrument 3^{ème} génération

Chaque « logiciel-instrument » s'insère dans une architecture standardisée appelée banque, permettant la gestion des commutations ou mixages entre « logiciels-

instruments ». Ces « logiciels-instruments » pilotent des systèmes sonores, graphiques ou lumineux.

Alors que le MI permet une pratique musicale experte et l'exploration « des limites de la performance individuelle » [16], Puce Muse a parallèlement développé la Méta-Mallette, pour offrir la possibilité d'une pratique musicale collective et « immédiate », c'est-à-dire ne nécessitant pas de connaissance préalable pour une première prise en main.

3.2. La Méta-Mallette

« La Méta-Mallette (MM) est un dispositif collectif de musique par ordinateur. Elle est utilisée dans des contextes différents, de l'animation ludique à la pédagogie, du spectacle de rue à l'audition en salle. Elle permet de découvrir, à travers plusieurs jeux / logiciels, différentes techniques de synthèse et de transformations sonores qui ont marqué l'histoire de la MAO, ainsi que des *compositions interactives* signées par des compositeurs / musiciens. » [17].

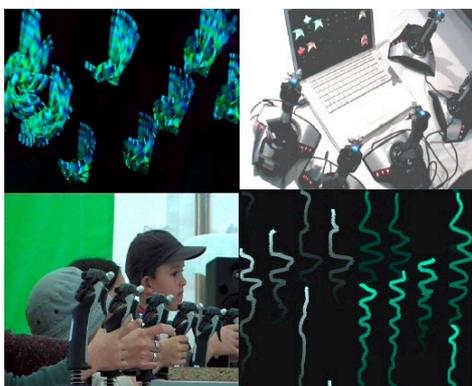


Figure 4. La Méta-Mallette

4. EVALUATION D'OBJETS AUDIO-VISUELS : CONTRIBUTION DE LA LINGUISTIQUE ET DE LA PSYCHOLOGIE COGNITIVE

Dans le cadre du projet 2PIM, une des contributions de l'équipe LAM consiste en l'évaluation d'instruments de musique virtuels visuels (instruments logiciels) sur la 2PIM, et à la mise en évidence et l'explicitation des interrelations entre geste, synthèse sonore et forme visuelle en mouvement.

4.1. Relations gestes, sons et formes en mouvement

En effet, la question des relations entre gestes, sons et formes en mouvement dans ces nouveaux dispositifs musicaux audiovisuels est primordiale dans ce genre de pratique, la multisensorialité se posant, nous semble-t-il, comme point de départ du questionnement.

Comme le remarque Claude Cadoz, qui parle de multisensorialité de la relation instrumentale [7, p.72], l'instrument ne peut s'envisager que comme dispositif / objet multisensoriel ou holisensoriel¹, qui engendre, de

¹ Nous avons proposé dans des travaux précédents [9] le concept d'*holiperception* pour rendre compte de la globalité de la perception comme point de départ et non comme reconstruction a posteriori après

par sa manipulation, des relations visuelles, auditives, kinesthésico-proprio-tactiles, entre le musicien et son instrument.

On remarquera que les pratiques musicales collectives, qui sont les plus courantes, engendrent, ou requièrent, la multisensorialité (auditive et visuelle tout au moins), la « monosensorialité » n'étant finalement qu'une exception et concernant certaines situations d'écoute musicale.

Nous avons vu dans la partie 2 les conséquences du passage de l'instrument mécanique à l'instrument qu'on a dit pour le moment numérique, et notamment le découplage / la rupture du lien direct entre le geste et l'énergie du geste effectué par le musicien sur son instrument et le résultat sonore engendré. Ainsi, nous avons pu voir que l'immense « liberté » rendue possible par les technologies numériques notamment sur la possibilité de relier le geste que l'on souhaite avec le son et ici la forme graphique (*mapping*) amènent à poser la question de la cohérence entre ce geste et la production musicale ici audio-visuelle qui en résulte suite au traitement logiciel.

Les études portant sur les interactions multisensorielles se développent depuis quelques années dans différents domaines qui ne partagent pas nécessairement les mêmes objectifs ou visées :

- de nombreux travaux ont été réalisés en cinéma dans le cadre de la musique à l'image [5] ;
- en psychologie, se développent actuellement des recherches sur la multisensorialité et notamment sur les interactions entre vision et audition dans lesquelles il s'agit le plus souvent d'évaluer l'influence d'une modalité sur l'autre [6] ;
- enfin, les travaux développés dans le cadre de recherches sur la suppléance perceptive [1] s'intéressent à la possibilité de rendre compte, via une autre modalité sensible, de données perceptives non accessibles directement (par exemple : stimuli tactiles pour des non-voyants...).

Questionner les relations entre gestes, sons et formes visuelles, dans le cadre de nouvelles pratiques musicales assistées par ordinateur, revient à interroger les conditions de cohérence qui conditionneraient la fusion perceptive (ou synchrèse, selon l'expression de Michel Chion – [11]), c'est à dire justement non pas tant l'analyse en trois composantes autonomes et leur influence respective mais l'émergence d'une forme globale, d'une sorte de Gestalt pour reprendre le concept issu de travaux en psychologie dans la première partie du XX^e siècle.

Parmi ces conditions de cohérence, les phénomènes de temporalité, spatialité et causalité semblent très importants et doivent entre autres permettre au(x) musicien(s) de reconnaître sa(leurs) production(s) musicale(s) et d'être capable d'anticiper sur ce qui va advenir ensuite, et notamment s'il joue dans un ensemble, de savoir qui va jouer...

séparation des sens, ce que sous-entend encore le terme de *multisensorialité*.

Il s'agit donc ici de s'interroger sur les problèmes de reconnaissance et de lisibilité du geste musical pour soi, pour l'autre, ainsi que sur la possibilité de retrouver sa trace propre dans un ensemble dynamique de traces. Se dessine également, de manière sous-jacente, la notion d'apprentissage et les conditions d'appropriation d'un objet. La dimension collective apparaît alors primordiale et ne peut être prise en compte qu'à travers l'observation de différentes communautés d'utilisateurs, et donc de pratiques.

4.2. Geste et Instrument

Claude Cadoz [7] considère que l'étude du geste instrumental passe nécessairement aussi par celle de l'instrument : « l'analyse du geste instrumental ne peut se faire indépendamment de l'objet auquel il s'applique car c'est dans leur assemblage que le problème de la transformation et de la transmission énergétique se résout ».

Ainsi, pour nous, questionner, dans une approche qu'on qualifiera de cognition située [26], les interrelations entre gestes, sons et formes visuelles en mouvement dans les nouvelles interfaces musicales audiovisuelles, telles que celles développées par Puce Muse, conduit nécessairement à explorer les dynamiques d'interaction entre musicien et dispositif instrumental et la question de l'identité même de ce dispositif instrumental. Nous nous intéressons ici tout particulièrement à ce dispositif instrumental en considérant que son statut même d'instrument doit être questionné à travers la relation geste-instrument mais aussi à travers d'autres relations. En effet, comme le souligne Claude Cadoz, il y a une nécessaire indissociation entre l'utilisation de nouvelles technologies et la compréhension sociale de leurs conditions d'apparition et de ce qu'elles engendrent, ou de ce à quoi elles contribuent.

Ainsi, nous inscrivons ce travail dans une approche pluridisciplinaire qui met à contribution des cadres théoriques et épistémologiques issus des sciences humaines, notamment de la linguistique, de la psychologie et de la cognition située, et propose de les articuler aux connaissances et développements de la musicologie et de l'informatique musicale.

5. DEFINIR L'INSTRUMENTALITE

Qu'est-ce qu'un instrument ? Qu'est-ce qui fait d'un instrument un instrument ? Comment un instrument devient instrument ? Quelles sont en quelque sorte les conditions requises pour conférer à un dispositif son instrumentalité ?

Pour commencer à aborder ces questions, nous nous intéressons aux définitions existantes dans la littérature. Après un parcours non exhaustif des définitions générales proposées par les lexicographes, nous proposons une brève analyse contrastive de quelques terminologies et définitions implicites et explicites utilisées en informatique musicale, afin de mettre en évidence les présupposés qu'elles sous-tendent.

5.1. L'instrument dans les dictionnaires

L'instrument, dans Le Petit Robert (PR) [21], est défini dans un premier temps comme un « objet fabriqué servant à exécuter quelque chose, à faire une opération ». Les auteurs remarquent que « *instrument* est plus général et moins concret que *outil* et désigne des objets plus simples que *appareil, machine*. (...) ».

Sont ensuite exemplifiées différentes catégories d'instruments, telles que les *instruments de chirurgie*, les *instruments de mesure*, etc. La seconde entrée est consacrée aux instruments de musique qui sont énumérés par catégories mais ne sont pas définis. On trouve par exemple, la classification organologique :

aérophone, cordophone, idiophone, membranophone ; les instruments de l'orchestre ; Instruments à cordes (banjo, contrebasse, guitare, ...) ; Instruments à clavier (clavecin, clavicorde, épinette, ...) ; à clavier et soufflerie (accordéon, harmonium, orgue) (...) jusqu'aux Instruments contemporains : synthétiseur (cf. Ondes Martenot) ; Instruments automatiques, mécaniques (cf. Boîte* à musique, piano* mécanique) et Instruments à ondes électriques.*

Le TLFi (Trésor de la Langue Française informatisé) [18] définit quant à lui de façon générale l'instrument comme « désignant une chose concrète permettant d'agir sur le monde physique ». Distinction est ensuite faite entre :

- un sens générique A : « Objet fabriqué en vue d'une utilisation particulière pour faire ou créer quelque chose, pour exécuter ou favoriser une opération (dans une technique, un art, une science) » ;
- et un sens B, spécifique à l'instrument de musique, (emploi absolu instrument) : « Objet entièrement construit ou préparé à partir d'un autre objet naturel ou artificiel, conçu pour produire des sons et servir de moyen d'expression au compositeur et à l'interprète ».

Dans le PR, la définition générique de l'instrument passe par une opposition avec l'outil. Dans une analyse spécifique des définitions dictionnaires de *instrument* et *outil* contrastant PR, TLFi et un 3^e dictionnaire (Zygom), E. Bruillard remarque à ce sujet que si « la notion d'effectuation d'un travail apparaît, l'outil semble plus directement lié à l'action sur la matière, tandis que l'instrument correspond à d'autres usages plus généraux et moins concrets. » [5]. Il illustre son analyse par une citation de Simondon :

« Le XVIII^e siècle a été le grand moment du développement des outils et des instruments, si l'on entend par outil l'objet technique qui permet de prolonger et d'armer le corps pour accomplir un geste, et par instrument l'objet technique qui permet de prolonger et d'adapter le corps pour obtenir une meilleure perception ; l'instrument est outil de perception. Certains objets techniques sont à la fois des outils et des instruments, mais on peut les dénommer outils ou instruments selon la prédominance de la fonction active ou de la fonction perceptive » ([22], p.114).

Il est intéressant de noter ici la dimension perceptive accordée spécifiquement à l'instrument. Néanmoins, les nombreux travaux menés, tant en psychologie de la

perception qu'en neurophysiologie, dans la lignée de la phénoménologie développée aux XIX^e et XX^e siècles, ont montré le couplage entre perception et action, la distinction entre fonction active et perceptive devenant dès lors moins pertinente.

Le TLFi, dans sa définition générale, ajoute la notion de création. De plus, il propose une définition de l'instrument de musique non pas par exemplaires (comme le PR) mais dans laquelle interviennent la notion d'objet naturel ou artificiel, ainsi que des agents : le compositeur et l'interprète.

Ce travail de recueil et d'analyse rapide des définitions de la notion d'*instrument* nécessiterait bien évidemment d'être complété par une analyse des définitions de l'instrument en musicologie et en ethnomusicologie, qui fera l'objet de travaux ultérieurs.

5.2. Terminologie en informatique musicale : instrument, interface et interaction instrumentale

En informatique musicale, on rencontre une grande variété de dénominations pour désigner les objets matériels et logiciels qui sont développés et utilisés. Il n'est cependant pas aisé de s'y retrouver entre ces diverses terminologies, qui ne sont pas le plus souvent définies.

Il faut noter ici que ce processus est propre à toute nouvelle technologie et pratique émergente, qui voit un besoin de création et de stabilisation de vocabulaire commun. Ceci étant, il est intéressant de se pencher sur les diverses terminologies qui ont cours actuellement car elles véhiculent des présupposés souvent implicites qui ne sont pas sans conséquence. Un relevé, non exhaustif, des désignations présentes dans les titres et dans le corps de publications en informatique musicale (actes des précédents colloques NIME, JIM, etc.) met en évidence cette diversité tant lexicale que sémantique. Il y est notamment question de :

- *instrument numérique*
- *instrument logiciel*
- *digital musical instrument*
- *digital musical interface*
- *interface musicale² - musical interface*
- *interface de communication instrumentale*
- *instrument virtuel*
- *interactive instrument*
- *sound sustain virtual instruments*
- *virtual and tangible instrument ...*

Dans ce domaine, *instrument* n'est plus concurrent avec *outil*³ mais avec *interface*. Ce terme est défini par le PR dans le domaine technologique comme la « limite commune à deux ensembles ou appareils » et en informatique comme la « jonction permettant un transfert d'informations entre deux éléments d'un système

² Il serait intéressant de proposer une analyse contrastive des terminologies anglo-saxonnes et francophones, néanmoins on se contentera ici de lister différentes désignations trouvées en anglais et en français.

³ Bien qu'*outil* soit très utilisé en informatique, cf. notamment la réflexion de Bruillard sur l'ordinateur comme outil ou instrument à l'école [5].

informatique ». Le TLFi donne la définition informatique parue au B.O. : « Jonction entre deux matériels ou logiciels leur permettant d'échanger des informations par l'adoption de règles communes physiques ou logiques » et précise qu'*interface* désigne au sens figuré une « zone de contacts et d'échanges ».

On remarque ici que la notion d'interface introduit une incertitude quand à la matérialité de l'objet désigné. S'agit-il de la « couche » logicielle, de l'interface physique entre le musicien et l'ordinateur ?

Cette question transparaît également dans l'utilisation de dénominations complexes (pas un simple nom mais un nom suivi ou précédé – suivant la langue - d'un ou plusieurs adjectifs) telles que *instrument numérique*, *digital instrument*, *instrument virtuel*, *virtual and tangible instrument...* La notion de *virtuel* mériterait à elle seule un article et on renverra ici aux réflexions présentes notamment dans les ouvrages de Lévy [19], de Cadoz [8]. Il semble toutefois que l'ensemble de ces dénominations soit davantage centré sur l'aspect logiciel, informatique que sur le dispositif matériel avec lequel il est couplé.

Dans cette liste, une dénomination diffère des autres, toutes construites autour soit du nom *instrument*, soit du nom *interface*. Ainsi, *interface de communication instrumentale* a la particularité d'articuler *interface* avec *instrument*, via la qualification par l'adjectif construit *instrumental*. Ici le dispositif est défini comme une interface caractérisée par son instrumentalité. Cet intitulé proposé par Cadoz est à mettre en parallèle d'autres dénominations utilisées par l'auteur et ses collaborateurs telles que *instrumental (gesture) interaction* [6].

On assiste ici à un déplacement de paradigme : il s'agit d'explicitier les dynamiques d'interaction (gestuelle avant tout) entre le musicien et le dispositif matériel et informatique qu'il utilise. La préférence va alors à une utilisation explicitée, théorisée de *instrumental* à la place d'*instrument*. En effet, pour Cadoz, ([7], p. 50) « l'instrument est de la matière conditionnée pour assurer la transmission d'une certaine énergie des muscles aux tympanes ». Il définit par ailleurs « comme instrumentale toute activité relationnelle qui fait appel à un dispositif matériel (l'instrument) extérieur au corps humain et telle que :

- sa finalité nécessite une consommation d'énergie en dehors des frontières du corps humain et de l'instrument ;
- et une partie au moins de cette énergie provient du corps humain » (p.61).

Ce travail de définition et d'explicitation l'amène à poser « deux conditions (...) requises pour attribuer (...) le caractère d'instrumentalité au geste ou à la chaîne (communicationnelle ou interactionnelle) qui relie l'homme à son environnement (humain ou matériel) : le geste doit être ergotique ; la chaîne soit assurer une continuité énergétique ». Ceci a pour conséquence qu'un dispositif ne pourra être alors qualifié d'instrumental que s'il renferme à la fois des capteurs (de gestes) et des effecteurs (retour d'effort). Dans ce cadre, le Méta-

Instrument (tout comme la Méta-Mallette) ne saurait être un instrument⁴.

Ainsi, pour Cadoz, l'ordinateur ne peut être considéré comme un instrument, mais plutôt comme une représentation d'instrument ([7], p.80 et 89). Il existe des positionnements alternatifs, tels que celui développé par Toeplitz, pour qui l'ordinateur est en passe de devenir un instrument de scène [24].

5.3. Du dispositif comme interface à la relation instrumentale en usage ?

Ce parcours a permis de mettre en évidence une multiplicité des dénominations en partie liée au caractère novateur, émergent et récent du domaine qui nécessite une phase de recherche et d'élaboration collective et négociée de consensus. Cette phase passe notamment par la proposition et la confrontation de différentes dénominations (au sein de colloques et de publications) avant de parvenir à une terminologie stabilisée.

Le fait que les dénominations choisies ne sont pas toujours définies clairement et, en contraste, le besoin d'explicitation et de théorisation soulevé par certains travaux illustre bien qu'il s'agit, au-delà d'un problème de précision terminologique, d'un signe (parmi d'autres) du changement de paradigme induit par ces nouvelles technologies musicales.

Si la question de l'instrumentalité des nouveaux outils de création musicale assistée par ordinateur s'est vue quelques fois posée, les réflexions et travaux se sont le plus souvent centrés sur le dispositif en lui-même. Très souvent, il semble que l'instrumentalité d'un dispositif soit pensée comme dépendante en grande partie, voire uniquement, des progrès technologiques, en faisant le pré-supposé qu'avec la qualité des interfaces les qualités instrumentales du dispositif vont s'en trouver augmentées *de facto*. Le travail sur les modèles de synthèse physiques, qui s'attachent à reproduire un certain « réalisme » (en ce qu'ils visent à simuler des processus mécaniques) est à cet égard intéressant, mais peut rester centré sur le seul dispositif.

D'autres recherches, davantage centrées sur les relations de couplage sensori-moteur entre musicien et instrument, entre utilisateur et interface⁵, insistent sur la dimension fondamentale de l'interaction, enrichissant au passage la conception d'instrumentalité en IM, en introduisant l'utilisateur dans le système conçu comme boucle de perception-action.

Si toutes ces recherches et innovations ont donné de nombreux fruits et continuent à apporter à la fois des nouveaux dispositifs et alimenter les recherches et les réflexions, il nous semble important ici de partir d'un point de vue peu voire pas exploré, celui des usages ie des pratiques, des connaissances et des représentations d'utilisateurs, acteurs de cette communauté. En effet tout instrument a une histoire, s'inscrit dans des pratiques culturelles, sociales, collectives. Si depuis des

millénaires, d'innombrables artefacts musicaux ont été créés, expérimentés, ce n'est que dans une histoire et une négociation collective, au sein de pratiques et d'écoute musicales que se sont constitués les instruments qui nous sont aujourd'hui familiers.

Nous proposons dans la partie suivante d'explorer et de questionner le caractère instrumental ou non des dispositifs MI et MM qui nous intéresse à travers une enquête linguistique sur les usages, les pratiques et les connaissances des utilisateurs de ces dispositifs.

6. LE META-INSTRUMENT ET LA META-MALLETTE : DES INSTRUMENTS ?

Dans le cadre de l'étude « Évaluation d'objets audiovisuels : contribution de la linguistique et de la psychologie cognitive », nous cherchons donc à explorer et analyser les relations entre sons, gestes, formes visuelles en mouvement et instruments, lors de pratiques pédagogiques et de création, utilisant de nouvelles interfaces numériques musicales (cf. 3.2).

Ces recherches s'inscrivent en linguistique cognitive ([20] et [14]) et sont basées sur le recueil et l'analyse de discours à propos d'expériences sensibles multisensorielles artistiques. Après une description des objectifs et de la méthodologie employée, nous présentons quelques résultats d'une première analyse des discours recueillis, spécifiquement focalisée sur les notions d'instrument et d'instrumentalité, objets de cette communication.

6.1. Objectifs et hypothèses : Relations entre discours, pratiques et représentations

Dans le champ des sciences du langage, la linguistique cognitive s'intéresse plus particulièrement aux relations entre langue, discours, cognition et pratiques [14]. Elle étudie les ressources linguistiques (les mots) et la façon dont elles sont agencées en discours (l'organisation en énoncés) avec l'hypothèse que les mots et la manière dont ils sont utilisés nous donne des indications sur la façon dont les individus vivent et perçoivent leurs interactions avec leur environnement.

Plus encore, les ressources dont nous disposons, qui sont plus ou moins partagées par une communauté linguistique (l'ensemble des locuteurs du français, ou à des niveaux plus restreints la communauté de l'informatique musicale par ex.) et les possibilités d'agencement liées à la langue que nous parlons vont non seulement rendre compte mais aussi contribuer à construire notre expérience du monde.

On a pu voir dans la partie 5, à travers la mise en perspective de quelques définitions et dénominations renvoyant à des objets ou à des notions sémantiquement proches (instrument, outil, interface), que le point de vue sur ces objets est très différent selon les mots utilisés pour les désigner.

Les systèmes linguistiques fonctionnent ainsi toujours dans ce qu'on appelle une sémantique différentielle [20]. De même qu'on a pu voir que les dictionnaires définissent *instrument* par rapport à *outil*, ou que les chercheurs en

⁴ qu'il qualifie par ailleurs de métaphore gestuelle.

⁵ Une partie de ces problématiques traverse aussi nécessairement la communauté des IHM, cf. notamment les réflexions de M. Beaudoin-Lafon [3].

IM mettent parfois en perspective *interface* et *instrument*, cette mise en tension entre différentes pratiques, différentes façons de parler d'un « même objet » est constante et fondamentale. Elle contribue à construire les « objets » et nos rapports à ces objets par des jeux d'opposition, et en même temps nous permet de mieux comprendre ce que sont ces objets et comment les appréhender, les transformer. C'est pourquoi il est primordial de toujours procéder par analyses contrastives, entre différents discours rendant compte de différentes pratiques. Ceci permet de dégager les ressources et connaissances partagées, et celles qui sont plus spécifiques à des usages et/ou à des individus.

6.2. Méthodologie

Une enquête linguistique exploratoire⁶ (composée d'entretiens semi-directifs enregistrés en audio) a donc été réalisée auprès de dix utilisateurs et utilisatrices (créateurs, développeurs, musiciens compositeurs et/ou interprètes, chercheurs, pédagogues⁷, élèves de conservatoire, enfants participant à des ateliers) de dispositifs de Musique Assistée par Ordinateur⁸.

La méthodologie des entretiens semi-directifs [4] consiste à ne pas disposer d'un questionnaire pré-établi mais d'un guide d'entretien comprenant les différentes thématiques à aborder⁹. La construction du guide d'entretien va du plus général au plus spécifique et privilégie les questionnements ouverts (ex. : *pour toi c'est quoi le Méta-Instrument ? qu'est-ce qui le caractérise ?*). Afin de disposer d'une partie pouvant être véritablement contrastée entre les différents participants, un questionnaire oral identique pour tous (toujours ouvert) a été posé en fin d'entretien. Il a concerné successivement les notions de *son*, *forme visuelle*, *geste* et *instrument* et était structuré de la manière suivante :

- *peux tu me donner 5 exemples de son ?*
- *pour toi qu'est-ce qu'un son ?*
(idem pour forme visuelle, geste et instrument)

L'objectif de ces questions était multiple. Outre qu'il offre la possibilité de contraster les discours des différents sujets, ce questionnaire s'inscrit dans une série de travaux menés au LCPE depuis une dizaine d'année sur les « objets sensoriels » que sont les couleurs, les bruits, les sons, les odeurs, les gestes, les voix ... [13]. D'autre part, il s'agissait de mettre en perspective les recoupements et les décalages entre les définitions qui pouvaient se construire en discours et celles données en fin d'entretien à propos des « objets » qui nous intéressent dans l'ensemble de cette étude. A ce sujet, il faut noter que lors des 2 premiers entretiens, seuls *son*, *forme visuelle* et *geste* étaient questionnés : c'est au cours de ces 2

⁶ A notre connaissance, à l'exception d'une initiative récente [23], la mise à contribution de la linguistique et des méthodologies d'analyse linguistique de discours est inédite dans ce domaine.

⁷ certain-e-s ayant des doubles ou triples compétences.

⁸ Si toutes les personnes interviewées ont déjà utilisé le MI et/ou la MM, certains utilisent d'autres dispositifs (voire en ont créé).

⁹ qui peuvent et vont donc varier en fonction des personnes interviewées, même si certaines thématiques seront toujours abordées.

entretiens qu'est apparue la nécessité de questionner les personnes sur la notion d'*instrument*.

Après écoute des entretiens (au total 20 heures) et rédaction d'un synopsis pour chacun d'entre eux, certaines parties des entretiens ont été intégralement transcrites (notamment le questionnaire de fin). Des analyses linguistiques¹⁰ de différents ordres ont été menées : analyses lexicale (mots utilisés), morphosyntaxique (forme et agencement des mots entre eux), sémantique (signification) et discursive (agencement dans le discours) permettant d'émettre des inférences sur les relations des locuteurs aux phénomènes évoqués, sur la construction de leur rapport à ces instruments dont ils jouent et/ou qu'ils conçoivent et aux objets audiovisuels qu'ils permettent de créer.

6.3. Résultats et discussion

On parcourra ici brièvement quelques définitions et exemples d'instrument donnés par les locuteurs en présentant les inférences qu'elles permettent de faire sur la notion d'instrument dans le cadre de ces pratiques en informatique musicale.

En guise d'introduction, voici un extrait comprenant les premiers instants du tout premier entretien mené qui nous semble illustrer parfaitement nos questionnements :

CC : de manière générale pour toi (...) alors là on va prendre Méta-Mallette et Méta-Instrument ensemble (...) **comment tu décrirais tu caractériserais ces euh**

L1 : ces instruments

CC : ces instruments là

L1 : euh pour moi donc le Méta Instrument et la Méta-Mallette sont des instruments qui permettent de gérer du son et de l'image en temps réel

6.3.1. Qu'est-ce qu'un instrument ?

Tout comme nous avons observé différents niveaux de définition de l'instrument dans les dictionnaires, les locuteurs se sont placés à des niveaux de généricité plus ou moins importants :

Certains définissent un instrument de manière générale, par ex. :

- *quelque chose qui sert à instrumenter (...) un instrument ça sert à transformer le monde (L3)*
- *oui c'est le lien entre faire quelque chose et la volonté de le faire quoi (L5)*

À l'exception de L3, les locuteurs qui produisent d'abord une définition générale parlent ensuite spécifiquement de la musique.

D'autres définissent directement un instrument de musique, par ex. :

- *c'est ... un ... un un outil de de rendu (...) audio ouais qui transcrit que ce soit un geste ou une pensée en son (L6)*
- *un instrument ben c'est un c'est un outil qui permet de faire des sons (L7)*

¹⁰ Dans le prolongement des méthodologies d'analyse développées en [9] et [10].

Ensuite, un instrument pourra être défini :

- par ce **qu'il permet** :
 - *transformer le monde (L3),*
 - *faire des sons (L7),*
 - *des possibilités de toucher le son (L8)*
- ou par ses **propriétés** / conditions :
 - *on peut on peut euh donner une fonction instrumentale à des choses qui sont pas des instruments (L4)*
 - *un instrument c'est un assemblage de bidules qui a été pensé encore une fois (...) pour une action euh très précise (L9)*
- ou par ce **qu'il caractérise** :
 - *un instrument c'est ce qui fait de nous des êtres humains (L5)*

Une même définition pouvant renfermer plusieurs de ces aspects.

6.3.2. Méta-Instrument et Méta-Mallette : des instrumentalités plurielles

Qu'ils soient spontanément donnés comme exemples d'instrument (plus souvent le cas pour le Méta-Instrument que pour la Méta-Mallette), ou que la question de la définition de l'instrument amène les locuteurs à se questionner sur la nature instrumentale des dispositifs dont ils ont parlé durant l'entretien, plusieurs processus récurrents apparaissent. On remarque régulièrement :

- une définition par jeux d'opposition successives entre Méta-Instrument et Méta-Mallette ;
- des négociations sans cesse renouvelées quant aux frontières, à la clôture, de ce qui est considéré comme instrument.

L'exemple de L1 nous illustre cette opposition entre un méta-INSTRUMENT

qu'est ce que c'est pour toi que le Méta-Instrument ?
donc comme moi j'te disais pour moi donc c'est un **instrument** voilà donc ... que j'réfère plutôt à un **instrument d'musique (L1)**

et un méta-DISPOSITIF

du coup la Méta-Mallette contrairement au Méta-Instrument j'dirais **moins qu'est un instrument de musique mais beaucoup plus un dispositif musical et visuel (...)** qui va se composer d'un logiciel et d'un nombre d'instruments euh... qui pour le moment sont plutôt des joysticks (L1)

6.4. Clôtures de l'instrument ?

Si la plupart des personnes interrogées accordent le statut d'instrument au Méta-Instrument, ils passent néanmoins leur temps, en fonction des contextes, à renégocier et à exclure le Méta-Instrument des instruments, puis à l'inclure, celui-ci étant à la fois :

- moins qu'un instrument : il ne peut l'être qu'avec les logiciels – appelés instruments logiciels ou instruments virtuels ou instruments et l'ordinateur :

non en lui-même je le mettrais pas dans les instruments c'est le méta instrument plus euh ce qu'on appelle l'instrument logiciel la paire en fait c'est le Méta-Instrument et son interprétation en son et en image dans le cadre de ce qu'on fait (...) ça serait plus le couple Méta-Instrument et algorithme d'interprétation (...) le Méta-Instrument en lui-même n'est pas un instrument à mon sens (L6)

- ou plus : comparé aux autres instruments, son raccordement obligatoire à l'objet informatique lui confère des propriétés le transformant en « hyper » ou « méta » instrument :

je pense oui que ce sont des instruments c'est plus qu'un instrument parce que en fait dedans ils ont des mémoires (...) parce que même l'instrument de Serge aussi il a une mémoire donc nous on a une mémoire qui fait une mémoire de la musique (L9)

On relèvera ici des traces de renégociations permanentes des frontières définitoires de l'instrument, selon les usages et les pratiques, et ce parfois pour un même locuteur.

De plus, si la Méta-Mallette est qualifiée de *dispositif* par la plupart des utilisateurs¹¹, L1 revenant même sur sa première définition (cf. extrait donné en introduction) :

... du coup la Méta-Mallette contrairement au Méta-Instrument j'dirais **moins qu'est un instrument de musique mais beaucoup plus un dispositif musical et visuel (...)** qui va se composer d'un logiciel et d'un nombre d'instruments euh... qui pour le moment sont plutôt des joysticks (L1)

On voit que lorsqu'il s'agit de faire référence aux joysticks dans un contexte de pratique musicale, ils peuvent donc alors être appelés *instruments*.

Questionnée à ce sujet, L1 s'explique :

En fait quand j'en parle je vais dire instrument pour joystick dans le sens ou ... dans le sens où tu prends ton instrument pour en jouer (...) donc tu vas prendre l'objet joystick pour jouer (...) et en même temps communément quand on parle la Méta-Mallette quand on sait un peu ce qu'il y a dedans (...) quand on parle d'instrument c'est la petite partie logicielle qui va déterminer comment tes sons et tes images vont réagir (L1)

On retiendra que le joystick n'est pas **un instrument** mais qu'il devient **ton/mon/vos instrument(s)** dès lors que la personne à laquelle on s'adresse (ou dont on parle) est en train de jouer (notamment dans une pratique d'orchestre).

Ainsi, si une définition « objective » (en ce sens qu'elle a pour visée d'abstraire l'objet défini de tout contexte) qui en quelque sorte efface/gomme/oublie le musicien, l'utilisateur, peut exclure le dispositif de toute instrumentalité, dès lors que l'utilisateur fait son apparition et s'approprie le dispositif de jeu, celui-ci peut devenir plus facilement instrument.

On ajoutera ici que les utilisateurs experts (notamment du MI) lorsqu'ils sont questionnés, disent qu'ils font ou développent quant à eux **leurs instruments**¹².

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

À travers les questions que nous avons voulu soulever dans cette communication et les quelques éléments de réponse que nous proposons, sont mises à jour des conditions d'instrumentalité relatives aux pratiques et aux situations d'usage des dispositifs « évalués » quelque peu orthogonales à celles avancées d'ordinaire en IM, qui s'appuient en général sur les caractéristiques techniques. De plusieurs ordres, elles s'articulent autour de la notion

¹¹ seuls les enfants parlent spontanément et uniquement d'*instrument*.

¹² il s'agit alors d'instruments logiciels.

de pratique individuelle ou collective, de transmission et de partage de savoir-faire, de répertoire, d'histoire de l'instrument. Ainsi, c'est finalement le va-et-vient incessant entre l'observation des nouveaux « instruments » en usage et la mise en place de méthodes d'évaluation, qui amène à questionner l'instrumentalité.

De même, en ethnomusicologie, face à la diversité, à la variation des *instrumentarii*, le chercheur est obligé de se questionner. Là où il y a consensus, pour une tradition culturelle donnée, sur le statut d'instrument d'un artefact, ce même statut peut paraître complètement abscons pour d'autres cultures. Il nous semble d'ailleurs productif d'utiliser une partie des méthodes de l'anthropologie, de l'ethnomusicologie, de la linguistique, et plus généralement des sciences humaines, pour appréhender ces questions. C'est l'utilisation de ces méthodes qui permet de re-questionner des concepts qui semblaient d'évidence, ontologiques. Ce travail n'a pas vocation à trancher sur la question de savoir si tel ou tel dispositif rentre dans la catégorie des instruments ou non, mais il propose une réflexion sur les conditions d'instrumentalité et sur la façon dont les nouvelles « technologies / pratiques / expressions » musicales renouvellent ces questions. Nous avons voulu ici mettre l'accent sur la nécessité de considérer davantage l'ensemble du système musicien(s)-dispositif et les dynamiques qui le soutiennent. De celles-ci émergent et se co-construisent l'identité de l'instrumentiste et de l'instrument et de l'expérience gestuelle, auditive et visuelle... multimodale.

À travers l'examen de différents discours (discours lexicographique, scientifique et technologique et discours de divers utilisateurs), ont pu être mis en évidence des décalages et ajustements entre des discours objectivant sur l'ordinateur/l'interface comme instrument ou non et les pratiques instrumentales et discursives. Dans notre enquête, la définition du dispositif musical comme instrument s'est révélée en partie dépendante de la définition générique de l'instrument pour les locuteurs. Il n'y a pas nécessairement adéquation complète entre définition générique et spécifique ; il y a sans cesse négociation et entrelacs dans lesquels le Méta-Instrument, par exemple, s'inscrit dans un rapport différentiel avec l'instrument classique ou traditionnel, avec la Méta-Mallette, etc. Ainsi, c'est une multiplicité de concepts d'instrument et de rapports à l'instrument / dispositif / interface qui est ici mise à jour comme co-construction du geste, de l'expression musicale et de l'instrument en fonction des usages et des situations même de pratiques.

À ce sujet, parlant de l'instrument dans son sens générique, H. Wallon remarquait que « primitif ou perfectionné, banal ou spécialisé, un instrument se définit par les usages qui lui sont reconnus, il est façonné par eux » (cité dans le PR). S. Bahuchet, dans sa contribution au numéro spécial de la revue *Corps écrit* consacré à *L'Instrument*, note quant à lui que chez les Pygmées d'Afrique centrale, les instruments sont des « outils de l'éphémère », un objet inutilisé étant abandonné tel quel sans soin et n'"existant" qu'en usage ([12], p.16). Le concept d'instrument n'apparaît donc pas comme une

ontologie. Si un instrument est bien une construction matérielle, technologique, que l'on peut et doit tenter de cerner, le concept désigné par le mot « instrument » inclut aussi le statut accordé à un outil dans un cadre historique, culturel, social, et inscrit dans des pratiques musicales. Ainsi, un des locuteurs interrogés a-t-il pu dire lors de l'entretien : « *On ne naît pas instrument, on le devient* ».

Vers une nouvelle instrumentalité ?

Un peu à la manière de Marc Battier, proposant dans un article consacré au Theremin, une étude sur la perception du Theremin au début du XX^e siècle, s'appuyant sur des commentaires des auditeurs dont les journalistes de l'époque se sont fait écho [2], nous nous sommes intéressés ici aux différents discours sur ces nouveaux « instruments » mais en questionnant ici les utilisateurs¹³.

Ce travail, qui constitue une recherche en soi, s'inscrit cependant comme préalable dans le cadre d'une étude située des phénomènes d'interaction entre musicien(s) et nouvelles technologies / interfaces / dispositifs. En amont d'une expérience d'évaluation de nouveaux modèles de comportements dans le cadre du développement de nouveaux instruments logiciels, il propose aussi quelques éléments de cadrage épistémologique pour explorer et accroître les connaissances sur les relations entre gestes, sons et formes en mouvements.

Enfin, il s'inscrit aussi en prélude et en parallèle à un autre travail d'observation, de description et d'analyse de pratiques musicales pédagogiques et artistiques centré sur l'expérience en cours du Méta-Orchestre (Puce Muse résidence UPMC). Au cours de ces observations, rendues possibles notamment par un important recueil de données vidéo, il s'agira de questionner les conditions de constitution et d'émergence d'une communauté de pratiques musicales, donc de questionner les conditions d'instrumentalité et d'orchestralité. L'orchestre de joysticks, en tant que pratique collective, invite ainsi à une réflexion sur les relations entre instrumentalité et orchestralité¹⁴ ainsi que sur la dimension collective, partagée, de l'instrument.

¹³ Il serait également nécessaire de proposer une étude sur l'instrumentalité du point de vue de la perception par les auditeurs / spectateurs.

¹⁴ d'autres expérimentations d'orchestres (de « *laptop* ») commencent à émerger dans la communauté de l'informatique musicale [25].

8. REMERCIEMENTS

Nous remercions les partenaires du projet ANR 2IPM, et tout spécialement toutes les personnes qui ont acceptées de participer aux entretiens.

9. REFERENCES

- [1] Auvray, M., Lenay, C., O'Regan, K. et Lefèvre, J. "Suppléance perceptives, immersion et informations proprioceptives", *Arob@se*, 2005, pp. 94-113.
- [2] Battier, M. "L'approche gestuelle dans l'histoire de la lutherie électronique. Etude de cas: le theremin", *Les nouveaux gestes de la musique*, H. Genevois et R. de Vivo (eds). Marseille: Editions Parenthèses, 1999, pp. 139-156.
- [3] Beaudouin-Lafon, M. "Moins d'interface pour plus d'interaction", *Interfaces Homme-Machine et Création Musicale*, H. Vinet et F. Delalande (eds), Hermès, 1999, pp. 123-141.
- [4] Blanchet, A. *Dire et faire dire : l'entretien*, Paris : Armand Colin, 2003.
- [5] Bruillard, E. "L'ordinateur à l'école : de l'outil à l'instrument", *L'ordinateur à l'école : de l'introduction à l'intégration*, L-O. Pochon et A. Blanchet (eds.), Neuchâtel : IRDP, 1997, pp. 99-118.
- [6] Cadoz, C. et Wanderley, M. "Gesture and Music", *Trends in Gestural Control of Music*, M. Wanderley & M. Battier (eds). Paris : IRCAM, 2000.
- [7] Cadoz, C. "Musique, geste, technologie", *Les nouveaux gestes de la musique*, H. Genevois et R. de Vivo (eds). Marseille: Editions Parenthèses, 1999, pp. 47-92.
- [8] Cadoz, C. *Les réalités virtuelles*, Paris: Flammarion, 2004.
- [9] Cance, C. *Expériences de la couleur, ressources linguistiques et processus discursifs dans la construction d'un espace visuel : l'habitable automobile*, Doctorat de Sciences du Langage, Université Paris 3 - Sorbonne Nouvelle, direction : D. Dubois, 2008, non publié.
- [10] Cance, C., Bardot, A., Dubois, D. et Giboreau, A. "Colours and matters in real and virtual spaces. Linguistic analysis to evaluate technical devices", *Proceedings of Materials and Sensations Workshop*, Pau, 2008.
- [11] Chion, M. *L'audio-vision - Son et image au cinéma*, Coll. « Cinéma », Armand Colin, Paris, 2005.
- [12] Didier, B. (dir.), *L'instrument. Revue Corps écrit*, n°35, 1991.
- [13] Dubois, D. "From psychophysics to semiophysics: Categories as Acts of Meaning : a case study from olfaction and audition, back to colors", *Speaking of colors and odors. An interdisciplinary approach to cognitive and linguistic categorization of color vision and olfaction*, M. Plumacher & P. Holz (Eds.), Amsterdam : Benjamins, 2006, pp. 45-119.
- [14] Dubois, D. "Sens communs et sens commun : Expériences sensibles, connaissance(s) ou doxa ?", *Langue Française*, n° spécial « sens commun », 2008, pp. 41-53.
- [15] Kubovy, M. et Van Valkenburg, D. "Auditory and visual objects", *Cognition*, 80, 2001, pp. 97-126.
- [16] de Laubier, S. et Goudard, V. "Meta-Instrument 3: a look over 17 years of practice", *Proceedings of International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME'06)*, Paris, 2006.
- [17] de Laubier, S. et Goudard, V. "Puce Muse - La Méta-Mallette", *Proceedings of Journées d'Informatique Musicale (JIM2007)*, Lyon, 2007.
- [18] Le Trésor de la Langue Française informatisé : <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>
- [19] Lévy, P. *Qu'est-ce que le virtuel ?* Paris: La Découverte, 1995.
- [20] Rastier, F. *Sémantique et recherches cognitives*, Paris : PUF, 1991.
- [21] Rey-Debove, J. et Rey, A. (éds.), *Le nouveau petit Robert : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, Paris, 2007.
- [22] Simondon, G. *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris : Aubier, 1958.
- [23] Stowell, D., Plumbley, M.D. et Bryan-Kinns, N. "Discourse analysis evaluation method for expressive musical interfaces", *Proceedings of New Interfaces for Musical Expression (NIME'08)*, Genova, 2008.
- [24] Toeplitz, K. "L'ordinateur comme instrument de concert - aussi une question d'écriture?", *Proceedings of Journées d'Informatique Musicale (JIM2002)*, Marseille, 2002.
- [25] Trueman, D. "Why a laptop orchestra ?", *Organised Sound*, vol 12, n°2, 2007, pp. 171-179.
- [26] Varela, F., Thompson, E. et Rosch, E. *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*, Cambridge, MA: MIT Press, 1991.

LE CORPS SONORE, ENTRE ECRITURE CHOREGRAPHIQUE ET ECRITURE MUSICALE

Dominique Besson

Le Tambour Qui Parle

muse.dbesson@gmail.com

http://tqp.free.fr/bio_Dominique_Besson/

RÉSUMÉ

Ce texte présente une expérience de collaboration entre une chorégraphe et une compositrice dans le cadre du projet *L'Orgiaque*.

On décrit ici le projet, ses enjeux artistiques, ses protocoles opératoires ainsi que le dispositif sur lequel repose sa mise en œuvre, *le Ring*, un instrument de composition et de spatialisation temps réel, qui place le public dans un cercle de haut-parleurs et permet de capter la matière sonore dans le souffle même des danseuses.

On analyse ainsi les étapes de la création d'un langage commun, de la notion de corps collectif à celle de corps sonore.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui il est possible d'observer la matière sonore, de la projeter dans l'espace physique, de manipuler ses composantes, en un mot de l'organiser. Cette nouvelle maniabilité réintroduit le geste dans la pratique compositionnelle et permet d'assister à la naissance de formes inédites, intelligibles mais non toujours prévisibles.

L'imprévisibilité des phénomènes émergents bouscule notre approche de la réalité dans laquelle, comme le dit le physicien Jorge Wagensberg, « *nos recherches sont conditionnées par ce que l'on espère découvrir* » [11] alors que nos modèles de représentations restent incomplets et qu'ils n'épuisent pas le réel.

Les gestes effectués lors de la fabrication d'un objet sonore, ou lors de sa mise en espace dans l'espace physique, font partie de l'écriture, de la partition.

Par le geste s'opère comme le dit Edgard Morin dans *La Méthode*, « *un phénomène d'apprentissage mettant le savoir en cycle* » [7, 8] et au cours duquel la conscience intérieure du mouvement se trouve reliée à la générativité du sonore.

Le geste pose la question de savoir dans quelle mesure il faut laisser le temps donner forme aux choses avant de chercher à vouloir les circonstancier.

Les compositeurs (eux aussi) dansent à leur manière dans l'espace sonore. Tchouang-Tseu a dit « *n'écoutes pas par ton esprit mais par ton souffle* » [10].

C'est précisément à travers ces notions de *temps* et de *souffle* que je souhaiterais pouvoir faire part de mon

expérience de compositrice lors de ma récente collaboration avec la chorégraphe Isabelle Choinière, dans le cadre de son projet *L'Orgiaque*. [6].

La démarche d'Isabelle Choinière, qui consiste à aborder le mouvement comme un vecteur d'introspection, un moyen d'accéder à un état second où le geste s'autonomise des codes habituels, établis, puis s'auto organise en fonction de ce qu'il révèle, de ce qu'il délie à l'intérieur de supra sensible, trouve une profonde résonance dans ma pratique musicale.

2. OBJECTIFS

Une expérience de déstabilisation sensorielle par synesthésie sonore.

L'Orgiaque d'Isabelle Choinière aborde la *dansé-ité*, soit un état de la sensibilité : « *une capacité d'organiser le mouvement d'une manière auto-affective et réflexive, induite par le mouvement lui-même* ».

Son « *...approche se veut une méthode de dérèglement raisonné de tous les sens, de l'érotique qui vectorise le corps* ». [5].

En demandant aux cinq danseuses de cette chorégraphie de laisser leur souffle s'autonomiser, se « *langagéfier* », elle introduit un changement de repère en donnant corps par le son à quelque chose de très intime : la perception intérieure du mouvement.

Pour mettre en œuvre l'expérience, elle a souhaité utiliser les nouvelles technologies de spatialisation du son dans son écriture chorégraphique afin de médier hors, c'est-à-dire à l'extérieur, quelque chose de l'ordre de l'intime : le Corps Sonore.

« *Cette extéroception est une façon de réorganiser de nouveaux chemins à la sensation, mais qui eux, passent par le dehors, ceux passant par le dedans étant la proprioception. Le corps sonore (le son généré en temps réel par les danseuses) est médié, le sonore est organisé par le gestuel. Cette relation est une invitation à une exploration de la sensation par elle-même, un voyage des sens, un ailleurs qui est finalement soi-même.* ». [5].

3. MISE EN ŒUVRE

Vouloir atteindre la notion de corps sonore, en prenant comme matériau de départ des sons engendrés par des danseurs, soulève certaines questions liées aux

codes établis, aux notions de représentation, de temps en musique, d'objet sonore, de forme, d'œuvre.

3.1. Les codes établis

La plupart du temps un compositeur s'adresse à ses interprètes au moyen d'un langage codé, une écriture qui s'appuie sur des éléments de vocabulaire, des systèmes de représentation et de notation que seul le musicien sait décrypter. Face à la danse dans un contexte où les danseurs sont aussi les interprètes, le compositeur ne peut pas compter uniquement sur ce langage pour s'adresser à l'imaginaire des danseurs. Car les termes, même s'ils sont parfois partagés, ne véhiculent pas le même champs sémantique selon qu'ils s'adressent à des interprètes musiciens ou à des danseurs.

Il faudra donc avoir recours à des modèles, pour encre des éléments de vocabulaire commun dans l'imaginaire du corps collectif.

3.2. La notion de modèle

Un modèle est un schéma d'organisation théorique qui vise une représentation précise de la musique.

Dans un premier temps, on a principalement cherché à tisser des correspondances entre le mouvement et le temps musical, et à établir un vocabulaire commun permettant d'approcher le langage du corps sonore.

Pour établir ce vocabulaire des exemples sonores didactiques ont été composés, dans lesquels se trouvent consignés divers modes de jeux et qui donnent lieu à des objets sonores singuliers, identifiables et reproductibles par émission vocale. Ces exemples sont tous réalisés à la clarinette. L'instrumentiste travaille ici sans l'embouchure, le corps de l'instrument sert de caisse de résonance, d'amplificateur à des suites de souffles phonétiques.

3.3. Le souffle et le temps

Demander à des danseuses de générer des objets sonores tout en assumant leur fonction d'interprète ne va pas de soi.

Il s'agit de faire émerger des objets sonores signifiants, qui se meuvent comme un corps, en utilisant la voix, et plus spécifiquement le souffle, comme prolongement naturel de la *corporéité*.

Pour qu'il y ait souffle, il faut qu'il y ait mouvement d'inspiration ou d'expiration.

La particularité du souffle est qu'il est conditionné par notre nature intrinsèque, notre fonctionnement biologique, notre capacité respiratoire.

Cependant, grâce à notre capacité d'identification musculaire à l'objet que l'on cherche à représenter, nous pouvons nous adapter, réguler notre souffle, anticiper.

Pour les danseuses, gérer leur souffle leur permet de mener la figure chorégraphique, de trouver le rythme d'oxygénation nécessaire pour mener le mouvement à son terme.

Le même processus d'identification musculaire à l'objet à représenter survient chez le musicien interprète, pour qui le souffle conditionne la qualité du geste instrumental.

La voix est un instrument particulier car elle repose sur le souffle : pas de son sans le souffle et pas de souffle sans mouvement.

Demander aux danseurs de se servir de leur voix en dansant complexifie la représentation de l'objet à atteindre, puisqu'il faut faire la place aux mouvements musculaires qui vont diriger le souffle vers les objets sonores recherchés, les intégrer dans la performance chorégraphique.

Il faut pouvoir les relier avec ceux qui animent les autres muscles du corps, les inscrire dans le temps de la figure chorégraphique en cours : le compositeur seul ne peut y parvenir, car il n'a pas la connaissance intime du mouvement que partage la chorégraphe avec ses danseuses et les danseuses entre elles. Il faut donc ouvrir le temps, pouvoir laisser la danse donner de son temps.

Cela conduit à penser des formes et des types d'objets sonores qui, lorsqu'ils seront animés d'une vie propre autonome dans leur répétition spatiotemporelle, formeront l'espace sonore. En d'autres termes, organiser un temps qui s'ouvre au corps et qui le révèle.

En laissant le corps collectif aller de son propre rythme vers l'objet sonore, on ouvre la forme.

3.4. L'ouverture formelle

En ce qui concerne l'objet sonore, ce partage permet d'assister à la naissance de formes inédites, sans cesse renouvelées mais circonstanciées.

Du point de vue musical, ou sonore, ce mode de production est très spécifique car il introduit de l'imprévu sur un ensemble de critères constitutifs de l'objet sonore, comme le temps de début, la durée, le temps de fin, le profil dynamique, le timbre, le registre, l'attaque, le grain...

Or ces critères sont les garants de son identité formelle.

Introduire de l'aléatoire sur les attaques, les durées, les registres des sons constitutifs du corps sonore, en laissant les danseurs explorer leur ressenti selon des registres préalablement circonstanciés, permet de rejoindre la notion de forme ouverte.

Par exemple dans *Morph*, l'une des sections de la chorégraphie, les objets sonores spécifiés pour la voix sont des sons produits par des inspirations ou des expirations brèves. Le corps collectif doit explorer l'ouverture du diaphragme, du larynx, de la cavité buccale, et tisser des relations entre les mouvements et les sons produits : ouverture et registre, vitesse et dynamique, à la recherche de quelque modèle, de quelques repères.

On voit à quel point la combinatoire est infinie.

On obtient ainsi un objet sonore polymorphe et changeant doté d'une certaine élasticité et qui s'autorégule comme un corps. Sa projection dans l'espace physique, son éclatement à la surface de la

couronne des huit haut-parleurs agit en retour sur la proprioception des acteurs impliquant la conscience de ce qui se tisse ensemble.

3.5. Le corps sonore

Un corps c'est aussi une mémoire, et cette mémoire constitue notre interface avec le réel, l'extérieur. Aussi j'ai proposé à Isabelle Choinière d'introduire dans l'espace composable d'autres matériaux sonores que ceux qui sont émis par le corps collectif afin de permettre au corps sonore de se mouvoir et d'habiter dans divers milieux, comme l'eau, l'air, d'être animé par des rythmes musicaux extérieurs à lui-même, de se diviser, de se démultiplier, de se projeter dans le temps afin d'être tour à tour contenu et contenant.

Ces matériaux sonores complémentaires sont constitués d'échantillons préalablement fabriqués en studio dont les comportements spatio-temporels sont programmés dans des *presets* (tableaux).

Le fait de pouvoir programmer préalablement les comportements spatio-temporels de ces échantillons sonores permet d'introduire dans l'espace composable un « espace sonore fixé » manipulable en tant qu'objet d'une nature autre que celle composée par les sons du corps collectif, de travailler sur plusieurs plans sonores.

On s'en sert pour immerger le corps collectif dans un ressenti extérieur à lui-même et qui l'influence par sa propre métrique, son propre temps musical. Ce sont des espaces sonores musicaux composés à partir de mélismes instrumentaux, forgés en studio.

Le troisième type de matériaux est lui aussi constitué de sons préalablement acquis en studio, mais contrairement aux précédents leur comportement spatio-temporel n'est pas fixé. Ce sont des sons autonomes qui me permettent d'interagir avec les danseuses, de vivre l'expérience du corps collectif, de m'y associer en m'incorporant à mon tour dans le corps sonore.

3.6. Spatialisation et traitements

Générer un corps sonore, en prenant comme matériau de départ des sons générés par les danseuses, questionne la notion d'espace sonore dans laquelle plusieurs natures d'espace doivent pouvoir cohabiter simultanément : c'est le propre des musiques électroacoustiques que de mélanger, mixer ensemble des portions d'espaces-temps rapportées, constituées d'objets sonores variés dans l'espace et dans le temps (proches, lointains, localisés, diffus...), de manière à ce qu'ils puissent s'envelopper les uns les autres et non être disposés les uns à côté des autres.

Les objets sonores émis par les danseuses, mêmes s'ils diffèrent dans leur typologie (continus, itératifs, lisses, granuleux, mélodiques...), sont semblables au niveau de leur image spatiale, puisqu'ils sont tous captés à égale distance de leur source émettrice (la distance qui sépare la bouche de la danseuse du micro aérien placé sur le haut de son front). Ils véhiculeront donc tous de fait la même image d'espace.

La spatialisation des sons, qui consiste à gérer le comportement spatio-temporel des sources sonores dans l'espace physique, permet d'introduire les notions de relief, de distance et de trajectoire, de rendre perceptible l'écoulement du temps par le mouvement lui-même, d'introduire la dramaturgie du mouvement.

Par ailleurs, les traitements en temps réel que nous allons expérimenter et implémenter dans la prochaine étape de réalisation permettront d'insuffler des images d'espaces dans les sons captés en direct, par exemple on sait que l'on peut donner la sensation d'un déplacement par simple manipulation des coefficients de réverbération et d'ouverture de la bande passante, ou bien encore de détourner un flux pour générer un matériau sonore abstrait, afin d'introduire des situations inédites où la convergence du virtuel et du physique permet d'instaurer un jeu entre différents plans sonores.

.../...

4. LE DISPOSITIF

Lorsque je l'ai rencontrée, Isabelle Choinière avait déjà mené une première expérience de synesthésie sonore en équipant ses danseuses de micros aériens afin d'étudier le rendu sonore de leurs souffles et elle cherchait à donner corps à ces souffles en s'intéressant aux dispositifs de projections pluri-phoniques..

Très vite nous avons entrepris de collaborer car nous nous sommes retrouvées en phase dans notre approche et mon outil de composition spatiale pouvait constituer le dispositif de médiation nécessaire à la mise en œuvre de l'expérience.

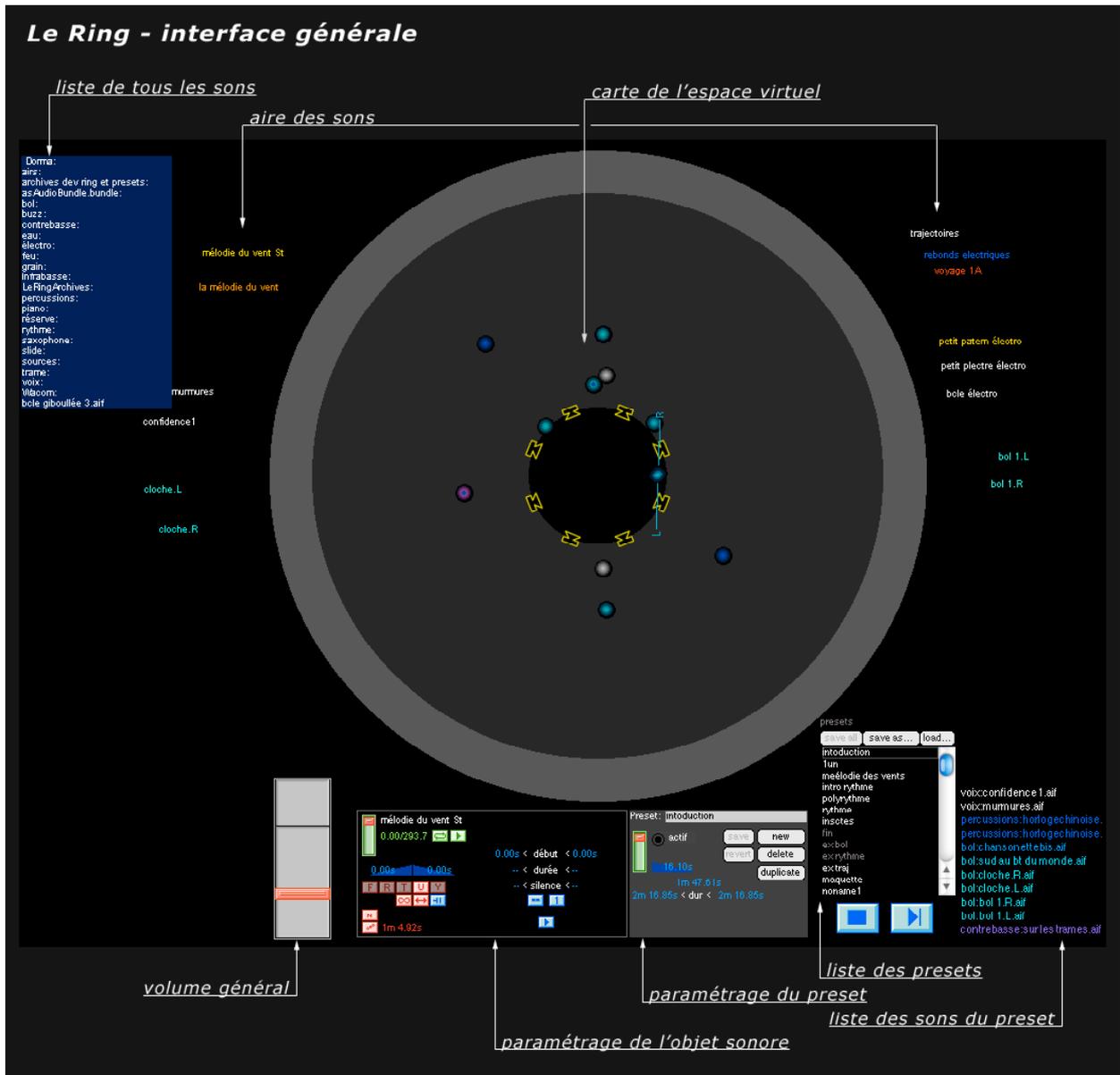
Le Ring [3] est un instrument temps réel de composition spatial qui me permet, en public, de piloter dans l'espace des sources sonores captées sur le plateau ou préalablement produites en studio.

Dans sa forme actuelle, *Le Ring* est basé sur une couronne de huit haut-parleurs identiques régulièrement répartis sur un cercle et orientés de façon concentrique. On est donc dans un plan horizontal.

Le rendu sonore fonctionne actuellement par contrôle de l'amplitude et de la phase de la contribution de chaque source dans chacun des haut-parleurs, qu'on peut considérer comme des microphones dans l'espace virtuel et des sources dans l'espace réel. Le modèle de spatialisation ne prend en compte pour l'instant que l'onde directe entre chaque source et chaque haut-parleur.

L'interface graphique de composition est principalement spatiale (et non temporelle comme dans un outil de montage). Le système permet l'animation d'un certain nombre de sources mono ou stéréo, selon des trajectoires programmées (va et vient, cercle,...) ou dessinées librement à main levée sur une carte de l'espace virtuel.

Le séquençage temporel est structuré en tableaux (presets) composés d'objets sonores, programmables dans leur itération temporelle et spatiale. Le moteur de séquençage est donc basé sur la notion d'objet autonome, doté d'un comportement temporel programmé (par des paramètres numériques de durée, sur lesquels on peut faire intervenir une part d'aléatoire).





Un éditeur de trajectoire, utilisant une tablette graphique, permet d'introduire la notion d'enveloppe spatiale, où l'amplitude de la source est contrôlée par la pression sur le stylet, un peu comme le ferait un peintre. On peut ainsi travailler le geste instrumental tout en observant son impact dans l'espace sonore en temps réel.

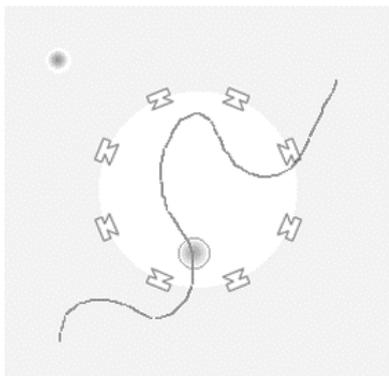
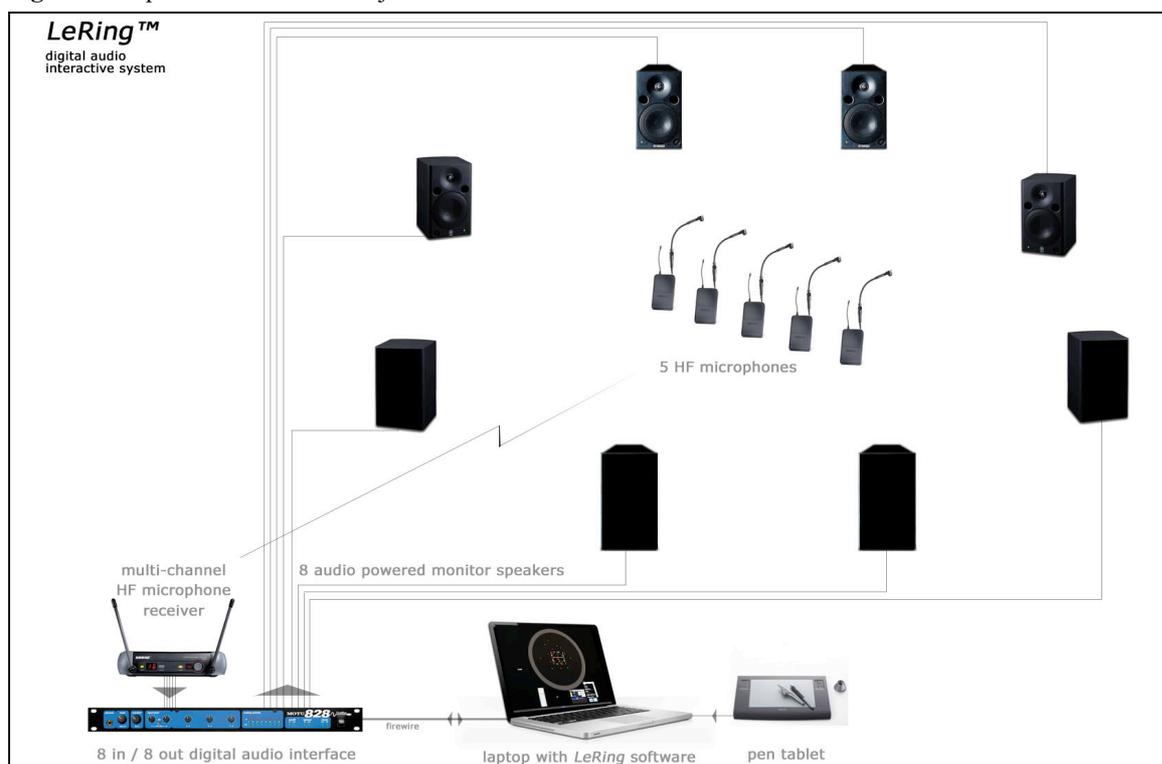


Figure 1. Représentation d'une trajectoire.



Développements en cours

Récemment nous avons mise en œuvre un développement spécifique qui consiste à utiliser les entrées de la carte son (8 entrées dans le cas de la MOTU 828), considérées comme des sources que l'on peut positionner et déplacer dans l'aire de jeu comme les échantillons actuels. Cette ouverture a de nombreux avantages : elle ouvre la porte aux outils de synthèse et de traitement existants (Protools ou équivalent et leurs plugins, Max, etc.), elle permet aussi d'étendre le Ring à une utilisation live, dans laquelle les sources entrantes sont issus d'instruments acoustiques ou électroniques, joués en temps réel.

Cette orientation, cohérente avec le travail que nous menons actuellement sur la mise au point du contrôle de la phase de l'onde directe, oriente le Ring dans la direction d'un *système ouvert de spatialisation temps réel doté de fonctions de mémorisation graduelle du signal et des trajectoires*.

Interfacées comme des entrées temps réel dans le Ring, les cinq sources sonores générées par les danseuses deviennent donc pilotables dans l'espace et dans le temps.

Le dispositif scénique qui entoure l'auditeur introduit ici une situation d'écoute singulière où celui-ci ne peut plus localiser visuellement toutes les sources en présence. Il se retrouve enveloppé, immergé au coeur du corps sonore et les mouvements qui s'y déploient introduisent un surplus de « *matérialité sensible* ».

5. MODES DE JEUX

Munies de cette possibilité, nous avons imaginé et scénarisé des protocoles d'expérimentation sensorielle en définissant des règles de comportements : des modes de jeux qui nous ont conduit à la frontière du sensible.

Liés au dispositif et à la diversification des matériaux sonores se développent plusieurs modes de jeux.

5.1. Cas n°1 - Le corps collectif interagit sur la partition sonore

Le morph - Projection Homothétique

Les danseuses dirigent le geste du compositeur interprète à qui il revient au cours de la performance de médier les sons du corps collectif en fonction de ses mouvements et de ses déplacements afin de créer, tout ou en partie, le corps sonore.

Le compositeur opère une translation homothétique, en projetant dans l'espace plan délimité par la couronne des huit haut-parleurs disposés autour du public la position et les déplacements des sources sonores générées par les danseuses, en contrôlant leur niveau de sortie sur chacun des huit haut-parleurs.

On obtient ainsi une sorte de forme mouvante, animée, douée d'une vie propre qui s'auto-organise au sens organique : un corps sonore.

Du point de vue du compositeur, la spécificité de ce mode d'interaction tient dans le fait de devoir suivre simultanément les évolutions des cinq points du corps collectif (en réalité cinq comportements spatio-temporels distincts) alors que l'on ne peut en isoler naturellement qu'un seul en même temps.

Dans cette situation, il faut apprendre à lire le mouvement en détournant les limites de la perception des phénomènes simultanés, s'orienter dans l'espace de la figure chorégraphique afin de pouvoir en donner lecture à son tour, en la sculptant dans l'espace acoustique, en en donnant une projection, un agrandissement...

Il y a alors médiation à travers et par le compositeur interprète.

On aurait pu confier cette tâche à un système qui opérerait par capteurs de mouvement, mais ce n'est volontairement pas le cas ici, car ce qui nous intéresse c'est d'explorer une nouvelle relation de l'individu au collectif et à l'individuel.

Le corps collectif est très sensible très réactif à son corps sonore.

C'est un peu comme s'il s'y logeait, s'y prolongeait, découvrirait son étendu, son infini.

Il y a quelque chose de l'ordre du flux, de la sève qui monte qui se répand ou qui se heurte.

Il faut pouvoir décomposer chaque figure chorégraphique, bien connaître chaque mouvement, chaque geste, les penser, les visualiser, les vivre de l'intérieur pour pouvoir s'identifier musculairement à l'objet recherché, afin d'optimiser son geste lors des

performances. Le compositeur devient ici l'interprète du corps collectif.

La relation qui s'installe avec les danseuses est intime, presque affective. Cette responsabilité nous connecte avec une forme de ressenti kinesthésique du mouvement des cinq membres du corps collectif et qui oriente le geste de composition spatial.

Le propre de cette écriture est que son temps est partagé, qu'il est dicté par le corps et que les choses ne se reproduisent jamais à l'identique. Au cours de chaque performance, l'imprévisibilité du mouvement nous oblige à vivre l'expérience du geste, du corps collectif et cette expérience réalimente notre imaginaire en nous ouvrant de nouveaux horizons.

5.2. Cas n°2 - L'espace sonore n'est pas corrélé spatialement à la partition chorégraphique

L'espace sonore agit sur le ressenti du corps collectif

C'est le cas le plus classique.

L'espace sonore ne conditionne pas les déplacements dans l'espace physique du corps collectif.

Ici il n'y a pas de corrélation entre la localisation auditive des sources sonores et la localisation des danseurs.

L'espace sonore génère un univers abstrait dans lequel s'opère une certaine dramaturgie du mouvement. Par exemple la section qui suit le *Morph*, et que l'on a nommée *La Vague*, est une section purement musicale, constituée de sons tenus, tissés ensembles, animés de phénomènes ondulatoires.

Une fois déployée dans l'espace, elle influence le corps collectif, elle s'immisce dans son rythme biologique et le relie à sa propre respiration, son propre souffle. Ici le corps sonore est musique.

5.3. Cas n°3 - L'espace sonore est corrélé spatialement à la partition chorégraphique, il fait l'objet d'une indexation topique.

Dans ce protocole, le corps sonore pilote les déplacements sur le tapis de danse du corps collectif avec ou sans la participation du compositeur.

Plusieurs situations peuvent advenir et fournir les éléments d'une combinatoire.

En voici quelques-unes.

5.3.1. Situation 1

L'espace sonore est fixé, c'est-à-dire qu'il est pré-composé et que sa mise en espace est prédéfinie en fonction de l'intention chorégraphique.

Par exemple, dans la section que l'on a appelée *La Masse*, l'espace sonore est constitué de sons distincts qui se détachent de l'ensemble et se mettent à tourner dans l'espace créant un rythme, une bascule oscillante de gauche à droite, d'avant en arrière, qui s'empare du corps collectif comme s'il était tiré par un fil invisible.

La chorégraphe partitionne son corps collectif en regard de ce mode de jeu.

Elle spécifie par son écriture chorégraphique qui fait quoi.

Ici elle a choisi de ne faire se détacher ensemble tour à tour que deux ou trois membres du corps collectif, comme s'ils étaient soumis à l'attraction d'une force incompressible et qui les aspirait, les faisait rouler sur eux-mêmes, les mélangeaient avant de les quitter et de les laisser rejoindre leurs orbites initiales.

5.3.2. Situation 2

L'espace sonore est fixé, c'est-à-dire composé à l'avance, mais sa mise en espace n'est pas totalement close. Ici, contrairement à la situation précédente, les sons, les objets sonores ne font pas tous l'objet d'un partitionnement spatio-temporel préalablement défini.

Certains objets sont prêts composés et interagissent avec le déplacement du corps collectif selon une partition prédéfinie à l'avance d'autres sont en attente.

Les objets sonores en attente sont des objets spécifiques destinés à établir une interaction avec un ou deux danseurs en même temps. Ils permettent au compositeur de s'emparer en temps réel d'un ou plusieurs point du corps collectif, de les en extraire, de les faire se distinguer au cours d'une performance qui s'apparente au solo et d'installer un véritable dialogue avec le ou les danseurs concernés. Au cours de cet échange, le danseur est libre de sa trajectoire au sol dans les limites fixées par le chorégraphe.

Il peut choisir de se laisser guider dans l'espace, de prolonger le geste spatial du compositeur, d'en donner lecture sur le tapis de danse ou au contraire de le fuir, de s'en éloigner. Dans tous les cas s'installe une écriture polyphonique, contrapuntique où se dessinent des mouvements parallèles, obliques ou contraires.

6. CONCLUSION

Dans ce dispositif, le public se trouve à la fois disposé autour du corps collectif des danseuses et plongé dans le corps sonore produit par la couronne de haut-parleurs.

Dans l'état actuel, la conduite de la relation essentielle entre l'extérieur et l'intérieur de ce corps repose principalement sur l'action du compositeur-interprète, qui doit faire face à une complexité croissante des relations spatiales et temporelles des objets qu'il manipule.

Notre démarche expérimentale nous a permis d'éprouver cette complexité de façon souple et intuitive, grâce à un système simple et robuste, mais encore limité dans sa combinatoire.

Nous travaillons actuellement à des fonctions de mémorisation des sources sonores captées sur le plateau et des trajectoires tracées au cours de la performance, de façon à permettre une structuration de l'écriture et de l'interprétation, tout en conservant cette capacité de création sensible dans l'instant.

C'est parce qu'il y a un juste équilibre entre l'investigation créatrice et les limites ressenties du système que nous savons aujourd'hui poursuivre nos développements.

Il s'agit en particulier de traitements plus élaborés sur les sources sonores captées en temps réel et de l'usage d'une surface tactile multi-touch, interfacée avec le Ring, et qui devrait permettre au compositeur interprète d'interagir simultanément avec toutes les sources du corps sonore en jouant avec ses dix doigts.

Le compositeur interprète devra étendre sa gestuelle instrumentale en fonction de l'évolution de l'instrument, par un travail d'apprentissage lié au protocole chorégraphique qui permettra d'entrevoir puis de fixer l'écriture de nouvelles combinatoires.

En conclusion, cette expérience constitue une étape importante liée à l'apprentissage du corps, et des techniques dans leurs diversités.

Elle nous a permis de mettre en place de véritables interactions tant au niveau de l'écriture, que de l'interprétation.

L'expérience de situations où l'on se trouve en position d'inter-acteur nous renseigne sur l'indicible, le non quantifiable, le sensible, tout en nous permettant de repousser les limites de nos modèles.

7. REFERENCES

- [1] Besson Dominique. "La Transcription des musiques électroacoustiques, que noter, comment et pourquoi ?", *Revue Analyse Musicale*, n°24, juin 1991.
- [2] Besson Dominique. *Les Musicographies*. CDROM, co-production INA-GRM, Les 38èmes Rugissants, Mois du Graphisme d'Echirolles, édition INA/GRM, 1995.
- [3] Besson Dominique. *Une exploration de l'espace musical, approche historique et expérimentale dans le cadre d'un instrument dédié à la spatialisation en temps réel : le Ring*. Mémoire de DEA, Direction Horacio Vagionne, Université PARIS VIII Vincennes-Saint Denis, Année 2004-2005.
- [4] Besson Dominique. *Paroles Trouvées*. Site internet : http://tqp.free.fr/Paroles_Trouvees/
- [5] Choinière, Isabelle. (à paraître), "À la recherche d'un nouveau modèle chorégraphique adapté à notre époque. L'orgiaque ; une stratégie via les technologies pour renouveler l'expérience sensorielle et perceptuelle du monde". *Actes du Congrès Ricerca e Futuro, arte, tecnologia e coscienza / Scenari dell'arte technoetica*, Center for Contemporary Art Luigi Pecci, Prato, Italie, du 9 au 12 décembre 2007. A paraître dans une publication du Centro Pecci per l'Arte, en 2008 et sous format livre et DVD, en anglais et en portugais, en 2008.
- [6] Choinière, Isabelle. *corps indice*. Site internet : <http://www.corpsindice.com/>

- [7] Morin, Edgard. *La méthode* (t.5.1), L'identité humaine. Le seuil, Nouvelle édition, collection Points,2003.
- [8] Morin, Edgard. *La méthode* (t.6), L'Éthique complexe . Le seuil, Paris.
- [9] Schmitt, Antoine. Gratin. Site internet : <http://www.gratin.org/as/>
- [10] Tchouang-tseu. *Le Rêve du papillon*. Traduction de Jean-Jacques Lafitte. Albin Michel, Paris, 2002.
- [11] Wagensberg, Jorge. *L'âme de la méduse Idées sur la complexité du monde*. Le Seuil, Paris 1997.

VIRAGE : UNE REFLEXION PLURIDISCIPLINAIRE AUTOUR DU TEMPS DANS LA CREATION NUMERIQUE

P. Baltazar
GMEA

A. Allombert
LaBRI

R. Marczak
LaBRI

J.M. Couturier
Blue Yeti

M. Roy
Blue Yeti

A. Sèdes
CICM

M. Desainte-Catherine
LaBRI

RÉSUMÉ

Nous présentons dans cet article l'évolution du projet Virage dont l'objectif est d'aboutir à une plateforme autour de l'écriture du temps et de l'interaction dans la régie numérique du spectacle vivant. Ce projet entend répondre à des questions posées par un groupe de travail de l'AFIM. Ses objectifs sont de produire un état de l'art de la pratique de la régie numérique dans le spectacle vivant, puis de réaliser une maquette fonctionnelle basée sur ce premier constat, maquette qui sera mise entre les mains de régisseurs afin d'obtenir des impressions face à un nouveau type d'outils.

1. INTRODUCTION

Le projet Virage prétend aborder des problématiques liées à l'écriture du temps et de l'interaction dans la régie numérique de spectacle vivant et la création d'outils muséographiques. En effet, depuis quelques années, les pratiques des régisseurs et des créateurs ont évolué pour intégrer de plus en plus les outils numériques. Son, image, vidéo, mais aussi avec l'évolution des matériels, lumière ou commandes de machinerie, les différents contenus manipulés par les régisseurs du spectacle vivant peuvent désormais être contrôlés numériquement. Pour faire face à ces évolutions, les praticiens se sont tournés vers des diverses applications souvent dédiées à un type de contenu ou issues d'autres communautés (informatique musicale par exemple). Cependant, les situations de mise en scène de plus en plus complexes rendent difficile l'écriture des contenus dans le temps et de la manière d'interagir avec eux, faute d'outils permettant de mêler la représentation de contenus variés et l'expression des relations temporelles qu'ils entretiennent entre eux. Ces problématiques sont proches de celles rencontrées par les artistes numériques lors de la création d'installations interactives, ou encore lors de l'élaboration d'interfaces pour la muséographie. On retrouve l'écriture dans le temps de contenus variés avec lequel un utilisateur, le visiteur en l'occurrence, va interagir.

Le projet dont nous présentons les avancements ici a pour but d'éclaircir cette question en proposant la maquette d'un séquenceur interactif pour l'écriture du temps et de l'interaction à destination des régisseurs.

Cette maquette sera ensuite mise entre les mains des praticiens pour identifier plus précisément leurs besoins dans ce domaine. Compte tenu de la nouveauté que constitue pareil outils vis à vis des utilisateurs, notre méthodologie a mis l'accent sur la pratique des acteurs de terrain afin que leur approche du métier viennent alimenter directement les réflexions théoriques autour du modèle. Des utilisateurs continuellement associés à ces réflexions ont pu suivre l'évolution du modèle pour qu'il reste compatible avec leurs usages.

Nous présentons tout d'abord le contexte dans lequel ce projet est né et les enjeux auxquels il entend répondre. Puis nous développons le modèle théorique sur lequel s'appuie notre prototype avant d'exposer les états d'avancement du développement de cette maquette.

2. CONTEXTE ET ENJEUX

Il convient de signaler en premier lieu que le développement du séquenceur décrit dans cet article a lieu dans le contexte de l'appel à projets Audiovisuel et Multimédia 2007 de l'Agence Nationale de la Recherche, pour la période 2008/2009 dans la catégorie Recherche industrielle. Cette catégorisation implique que l'objectif du projet n'est pas d'aboutir à un produit fini, mais à un cahier des charges pour des développements futurs, en s'appuyant sur une étude des usages réalisée tout au long du projet à partir d'expériences concrètes de mise en oeuvre de prototypes en situation de création artistique. Le champ de recherche du projet en termes de domaine d'activité concerne principalement les métiers créatifs du spectacle vivant, et s'articule autour des notions d'interopérabilité, de modularité, et de l'écriture de comportements de matériaux créatifs (son, image, lumière...) et de leurs interactions autour d'un modèle de "temps souple". La démarche de recherche se veut pragmatique, en confrontant les modèles formels aux pratiques du terrain, par leur implémentation dans des prototypes livrés régulièrement aux gens de l'art et évalués par ceux-ci sous l'oeil de l'équipe du CICM-MSH Paris Nord, chargée de l'étude des usages. En préalable aux premiers développements, et afin d'en définir les directions et priorités, ont déjà été publiés le rapport d'activité du groupe de travail Outils et pratiques du sonore dans le spectacle vivant, missionné

par l'AFIM ([4]), qui a permis l'élaboration du consortium de la plateforme Virage, ainsi que l'étude des usages initiale réalisée au sein du projet ([8]).

La conclusion principale de cette étude des usages a confirmé la nécessité de travailler autour des notions d'interopérabilité et de modularité, en visant la combinaison de nos développements avec les environnements logiciels et matériels existants et correspondant aux habitudes des praticiens, plutôt que l'intégration de cette réalité complexe et multiple dans un illusoire logiciel unique et certainement trop polyvalent pour être viable. Dans le souci de rendre techniquement possible cette interopérabilité, il nous est donc apparu nécessaire de mener un travail de recherche en vue d'un protocole, intitulé Minuit¹, et permettant de relier les environnements avec une implication minimale de l'utilisateur. La société *Stantum*² (anciennement *JazzMutant*) conduit cette partie du projet en cherchant à dépasser conjointement les limites des protocoles existants, à savoir MIDI (obsolescence, absence de descripteurs) et OSC (trop grande ouverture, absence de système de découverte des services). Ce souci d'interopérabilité nous a également mené à envisager une certaine indépendance vis-à-vis des media mis en oeuvre dans l'écriture artistique en ne cherchant pas à les contrôler directement, comme c'est le cas dans la plupart des logiciels créatifs, mais en permettant l'écriture de comportements des paramètres de logiciels dédiés.

Cette indépendance à la durée intrinsèque des medias manipulés permet alors d'envisager la mise en oeuvre de la notion de "temps souple", qui est un des enjeux majeurs du spectacle vivant dans la mesure où celui-ci s'élabore en relation à un temps vivant, le temps "du plateau théâtral", le temps humain de l'acteur, du danseur, de l'interprète en général... La relation à ce temps humain est généralement traitée en combinant de façon "artisanale" l'élaboration sur des séquenceurs media dédiés (e.g. Pro-Tools, FinalCut Pro, etc...) de séquences média digées, ensuite combinées et tuilées lors de déclenchements successifs au long du spectacle, comme autant de rendez-vous appelés *cues* par les gens de l'art, et éventuellement enrichis par quelques micro-événements joués en direct sur des dispositifs de type sampler. Ces dispositifs ad hoc ont fait leurs preuves et continueront certainement d'être employés dans le spectacle vivant pendant quelques temps encore, mais il nous a cependant paru pertinent d'explorer la possibilité d'une écriture temporelle à la fois plus souple et plus précise des comportements et interactions des contenus media, grâce au modèle de séquenceur interactif proposé par le LaBRI en étendant aux problématiques du

spectacle vivant leurs propositions précédentes BOXES et iScore, comparables à certains égards à une transposition du modèle Gantt à la création musicale.

Comme cela sera décrit en détail ci-dessous, les prototypes du séquenceur interactif Virage permettront de manipuler des objets temporels, pouvant contenir états, comportements et mises en correspondances (ou mappings) de paramètres matérialisés par des messages Minuit envoyés vers des dispositifs numériques de génération et de manipulation de média (développés dans MaxMSP à l'aide des frameworks Tapemovie³ et Jamoma⁴ pour l'expérimentation dans le cadre du projet). Ces objets temporels seront reliés par des intervalles contraints permettant de définir des relations d'antériorité ou de postériorité (au sens des relations de Allen), correspondant à des durées fixes, souples ou bornées, et permettant ainsi de définir une certaine permanence dans la structure du scénario interactif généré, tout en permettant les modulations en direct lors de l'exécution. Outre l'aspect d'écriture temporelle des comportements des media, le deuxième enjeu fort du séquenceur proposé par la plate-forme Virage concerne l'écriture de l'interaction, soit entre paramètres de dispositifs media hétérogènes (e.g. un paramètre d'analyse sonore agissant sur un paramètre de synthèse vidéo...), soit entre des paramètres d'interfaces gestuelles (que ce soient à l'aide de capteurs sur scène ou de contrôleurs en régie...) et des paramètres de génération ou de manipulation des media. Dans les deux cas, le séquenceur vise la mise en oeuvre intuitive et précise de telles transductions entre les différents matériaux créatifs dont la mise en relation dynamique est l'essence du spectacle vivant.

La recherche menée au sein de la plate-forme Virage vise ainsi à repousser les limites de l'existant, notamment concernant le caractère "insulaire" des environnements logiciels ou matériels utilisés par les praticiens du spectacle vivant, ainsi que leurs limitations en termes d'écriture du temps et de l'interaction ([1]). Afin de rester dans une démarche pragmatique, le projet s'appuie cependant sur l'existant, et confrontera ses résultats de manière progressive et incrémentale lors de sessions d'expérimentation et d'évaluation mis en oeuvre par les membres et partenaires de la plate-forme issus de diverses branches de la création artistique, correspondant à autant de situations spécifiques. Ces sessions auront lieu en situation de création artistique, pour être aussi réalistes que possible, quoique hors temps de production afin de ne pas biaiser le travail de recherche par cause de contraintes de résultats artistiques. Elles seront menées par des artistes et compagnies sélectionnés pour la pertinence de leur démarche vis-à-vis des thèmes de recherche du projet, et accompagnés durant les deux ans du projet, afin de garder un suivi de l'évolution. Les axes développés seront en accord avec les orientations des membres les accueillant, à savoir :

¹ La fonctionnalité principale du protocole est la découverte de nom de domaine. Celle-ci permet à une application se connectant à un réseau de connaître automatiquement les services disponibles sur ce réseau, ainsi que les messages pour communiquer avec les applications délivrant ces services. Cette fonctionnalité avait été identifiée comme une amélioration sérieuse du protocole OSC [7].

² <http://stantum.com>

³ <http://tapemovie.org>

⁴ <http://janoma.org>

- pour le GMEA : la création sonore pour le spectacle vivant (théâtre, danse) et le concert (situation instrumentale autour des lutheries informatiques...)
- pour didascalie.net : la régie numérique dans le cadre du spectacle vivant, avec un axe fort autour de la vidéo-scénographie (en collaboration avec le LIMSICNRS)

Pour compléter ce panel d'évaluations, plusieurs partenaires tiers se sont joints au projet et mèneront eux aussi des chantiers de recherche et d'expérimentation autour des thèmes qui leur sont propres et qui complèteront ainsi ceux des deux membres de Virage : iMal (Centre des cultures digitales, Bruxelles), GMEM (Centre National de Création Musicale de Marseille), ISTS (Institut de formation aux métiers du spectacle, Avignon), BEK (Centre des arts électroniques de Bergen, Norvège).

3. EVOLUTION DU MODELE THEORIQUE

Dans [3], nous présentons des recherches théoriques ainsi que quelques efforts de développement menés au LaBRI en collaboration avec l'Ircam pour atteindre un système de partitions interactives utilisant des contraintes temporelles Iscore. Nous signalons dans cet article qu'il était question d'adapter notre formalisme à la pratique de la régie numérique du spectacle vivant dans le cadre de la participation du LaBRI au projet Virage. Nous présentons ici les principales modifications que nous avons réalisées. Ces évolutions du modèle font écho d'une part à des perspectives vers lesquelles nous souhaitions nous orienter et d'autre part à des réflexions des utilisateurs associés au projet.

3.1. Retour sur le modèle théorique

Rappelons rapidement quelques points fondamentaux du modèle de partitions interactives pensé pour permettre l'interprétation de pièces musicales numériques. La notion d'interprétation implique qu'un compositeur crée un matériau musical qui sera modifié lors de l'exécution de la pièce par un interprète. Ces possibilités de modification par le musicien sont encadrées par le compositeur qui définit des limites à ces modifications. Nous nous intéressons à des modifications des caractéristiques temporelles de la partition et plus exactement à des décalages sur les débuts et les fins des notes qui les composent. Par conséquent, le cadre fixé par le compositeur concerne l'organisation temporelle de la pièce et il doit être capable de définir une organisation temporelle globale qu'il souhaite voir respectée quoi qu'il arrive. Pour ce faire, il dispose des relations de Allen grâce auxquelles il peut décrire les relations temporelles existant entre les notes. En outre, le compositeur précise explicitement les débuts ou fins de note que le musicien pourra modifier. Ces débuts et fins de note sont appelés les *événements* de la partition. Le compositeur peut rendre un

événement *interactif* en y plaçant un point d'interaction ; le musicien pourra alors contrôler directement le déclenchement de l'événement lors de l'exécution de la pièce. Dans le cas contraire, l'événement est dit *statique*. Notons que pour affiner l'écriture de l'organisation temporelle de sa pièce, le compositeur dispose également de relations temporelles quantitatives : il peut préciser si un intervalle de temps séparant deux événements doit rester constant, peut être modifier dans une certaine mesure ou prendre n'importe quelle valeur. La version écrite de la partition ne représente donc plus qu'une possibilité d'interprétation parmi de nombreuses autres. Naturellement ; le système maintient les contraintes temporelles imposées par le compositeur : si au cours de l'exécution le musicien décale le déclenchement d'un événement interactif, le système va recalculer les dates des événements non encore déclenchés pour qu'elles respectent la date effective de l'événement interactif et les contraintes temporelles.

Précisons enfin que pour la phase d'exécution d'une partition, nous la compilons en une représentation interprétable par une machine abstraite capable d'exécuter le contenu musical de la partition tout en réagissant aux déclenchements des événements interactifs. Cette compilation implique une transformation en réseaux de Pétri ; pour plus de détail, le lecteur pourra se référer à [2].

Dans le cadre de Virage, ce modèle théorique a été repris dans la mesure où les notes des partitions pouvaient également représenter des processus manipulant des contenus autres que musicaux (vidéo, lumières...) et en particulier des processus qu'on retrouve dans la régie numérique. Pour s'adapter à cette nouvelle utilisation, le modèle a connu une modification de vocabulaire. Le terme "partition" a laissé la place à celui de "conduite" tandis que les notes devenaient des "objets temporels".

3.2. Les processus

Dans la version précédente de *Iscore*, le contenu des notes restaient en dehors de notre champ d'investigation. Sans nous atteler à résoudre totalement la question de la représentation des contenus des objets temporels, nous avons introduits la notion de *processus*. Un processus correspond à une opération algorithmique déterministe et non-conditionnelle qui possède éventuellement des *entrées* pour accepter des arguments. De plus un processus exhibe des *étapes de calcul* qui représentent des moments caractérisés de son algorithme. Les étapes les plus naturelles d'un processus sont son début et sa fin, cependant dans le cas d'un processus ponctuel la fin du processus n'existe pas. En outre, des étapes intermédiaires peuvent être spécifiées, un exemple simple étant un processus de lecture d'une courbe de valeurs dont on va caractériser le passage par un extremum. Le caractère déterministe et non-conditionnel des algorithmes associés nous permet d'affirmer que le nombre d'étapes d'un processus est

constant à chaque exécution et qu'elles se déroulent toujours dans le même ordre. Un objet temporel représente une exécution dans le temps du processus qui lui est associé.

3.3. Les points de contrôle

En lien avec les étapes de calcul des processus, nous avons introduit des points intermédiaires dans le déroulement des objets temporels. Ces points qui s'ajoutent aux débuts et aux fins d'objets, ont naturellement pour but de représenter les moments de déclenchement des étapes de calcul des processus associés. Ils sont appelés *points de contrôle*. Formellement, soit OT un objet temporel de durée d , un ensemble de points de contrôle \mathcal{P} datés lui est associé. On a :

- si \mathcal{P} est réduit à $\{(start(OT), 0)\}$ alors OT est ponctuel et $d=0$
- sinon $\mathcal{P} = \{(pc_1, 0), \dots, (pc_i, d_i), \dots, (pc_n, d)\}$ avec $pc_1 = start(OT)$ et $pc_n = end(OT)$

Les points de contrôle pc_i sont datés relativement à la date de début de l'objet. On voit bien ici qu'un objet temporel est la représentation en temps d'un processus abstrait puisqu'il permet de dater le déclenchement des étapes de calcul du processus.

Les points d'interaction peuvent être définis sur n'importe quel point de contrôle.

3.4. Les relations temporelles

Dans notre modèle précédent, on pouvait spécifier une seule relation de Allen entre deux objets ce qui réduisait les possibilités par rapport au formalisme de Allen qui utilise les opérateurs *et* et *ou* pour construire une grammaire à partir des relations de base. En outre, ces relations de base ne semblaient pas convenir aux utilisateurs du spectacle vivant. L'introduction des points de contrôle nous a permis de répondre à ce double problème en remplaçant les relations de Allen originelles par des relations temporelles définies entre deux points de contrôle et qui spécifie les caractéristiques de l'intervalle de temps entre ces points. Plus précisément, on trouve deux cas de relations temporelles : **pre** et **post**.

Soient deux points contrôle pc_1 et pc_2 , une relation $(pre, pc_1, pc_2, \Delta_{min}, \Delta_{max})$ impose la contrainte :

$$\Delta_{min} \leq date(pc_2) - date(pc_1) \leq \Delta_{max}$$

Les valeurs des Δ sont non-nulles et éventuellement infinies. Une relation $(post, pc_1, pc_2, \Delta_{min}, \Delta_{max})$ est équivalente à une relation $(pre, pc_2, pc_1, \Delta_{min}, \Delta_{max})$. Ces nouvelles relations permettent de préciser dans le même temps des contraintes quantitatives sur les intervalles de temps. On peut reconstruire les relations de Allen originelles en combinant des relations **pre** et **post** sur les débuts et fins d'objet. L'écriture du temps devient donc la spécification d'intervalle séparant des événements de la conduite.

La figure 1 présente un exemple de conduite interactive. On y trouve deux objets dont les processus associés sont des lectures de courbes. Le point de contrôle intermédiaire de l'objet *son* est rendu interactif par l'ajout d'un point d'interaction et une relation temporelle **pre** est définie entre les deux débuts.

3.5. Machine ECO

La machine ECO est une machine abstraite permettant l'exécution des partitions [6]. Elle s'exécute en interprétant un environnement contenant toutes les informations nécessaires au déroulement de la conduite ainsi qu'à l'interaction. Pour créer l'environnement, la conduite est compilée, les informations temporelles sont représentées par un réseau de Pétri associé à un solveur de contraintes.

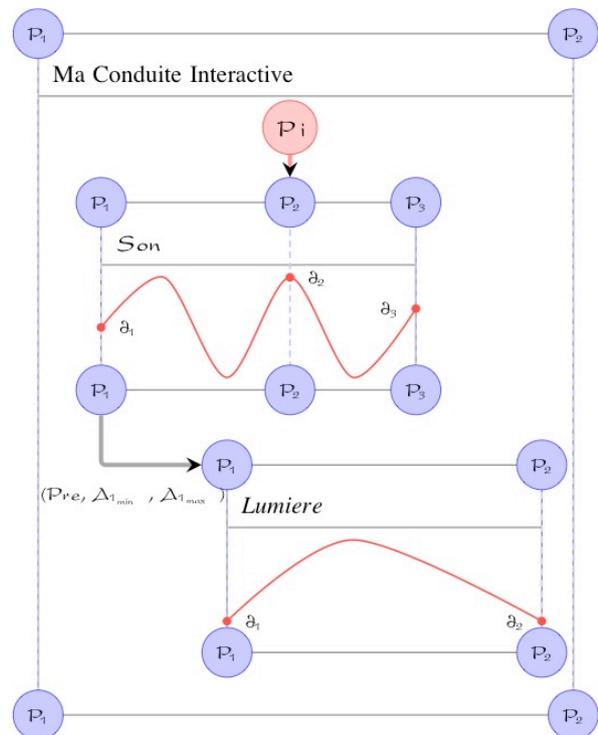


Figure 1. Un exemple de conduite interactive

Nous avons ajouté au formalisme de la machine une partie concernant les processus. L'ajout des points intermédiaires modifie quelque peu l'algorithme de compilation des partitions en réseaux. Cependant chaque point est représenté par une transition, les places d'attente du réseau ainsi que les arcs reliant les éléments traduisent les contraintes temporelles de la partition. Le CSP permet de réagir aux modifications dues à l'interaction de l'utilisateur. Au cours de l'exécution, lorsqu'une transition est franchie, le réseau envoie un message au processus concerné pour qu'il déclenche l'étape de calcul associée à la transition. La figure 2 présente cette machine.

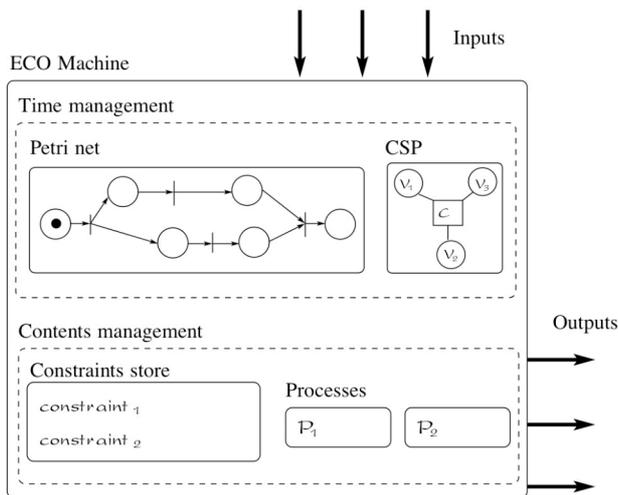


Figure 2. La machine ECO

4. IMPLEMENTATION

Dans cette partie, nous allons présenter l'implémentation du moteur, en décrivant l'architecture, les fonctionnalités, son état actuel et les évolutions prévues sur le moyen terme. Cette architecture correspond à l'implémentation du formalisme de conduites interactives précédemment décrit. Par moteur, nous parlons en réalité de la réunion de deux moteurs, correspondant à deux phases essentielles de la création d'un spectacle vivant : un moteur d'édition pour la composition, et un moteur d'exécution pour la performance. Le moteur d'édition permet de créer et manipuler les conduites tandis que le moteur d'exécution permet l'interprétation de la conduite.

4.1. Environnement

Le moteur est implémenté en C++ sous Mac OSX ; sa licence libre rend le code source entièrement disponible et observable, permettant entre autre l'ajout de fonctionnalités spécifiques. Le développement au sein de VIRAGE a été grandement facilité par les développements précédents d'Iscore par Antoine Allombert et Bruno Valèze :

- Antoine Allombert a développé le moteur d'exécution en Common LISP dans OpenMusic, lors du déroulement de sa thèse. Une grande partie du code présent dans le moteur d'exécution de VIRAGE provient d'un portage de son code.
- Bruno Valèze a développé pour BOXES un moteur d'édition en C++, basé sur le solveur de contraintes GeCode. Ce moteur est malheureusement très dépendant de son interface graphique sous QT. De plus, il utilise encore les relations de Allen, maintenant remplacées par des relations d'antériorité et de postériorité. Le moteur d'édition présent dans VIRAGE s'inspire fortement de ce développement, mais n'a pas pu l'utiliser en l'état.

4.2. Objectifs

Les objectifs de l'implémentation de ce moteur sont multiples :

- Proposer des fonctionnalités d'édition et d'exécution qui seront testées par les utilisateurs associées au projet.
- Implémenter la totalité du formalisme de conduites interactives.
- Rendre totalement indépendant le moteur de l'interface graphique
- Réussir à le rendre multiplateforme.

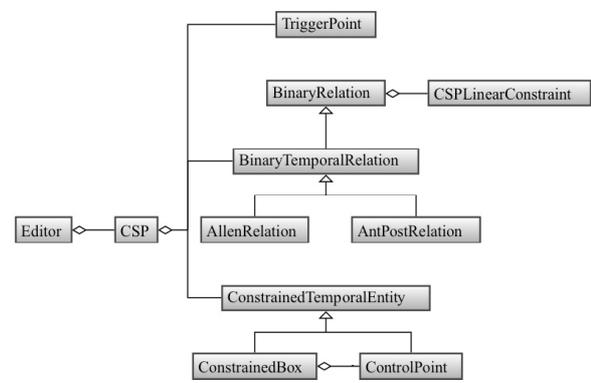
4.3. Architecture

4.3.1. Classe Engines

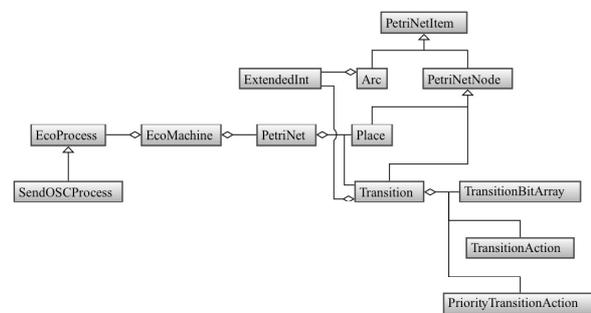
Engines est une classe permettant de rendre plus facile l'utilisation du moteur ; par exemple pour le développeur d'une interface graphique. En effet, pour éviter aux utilisateurs du moteur de rentrer dans les détails d'implémentation, cette classe centralise toutes les fonctions nécessaires à la composition et à l'exécution. Ainsi, l'utilisateur n'a pas à se demander ce qui a trait au moteur d'édition, ou ce qui a trait au moteur d'exécution. Il suffit donc à l'utilisateur d'instancier un objet Engines pour disposer de toutes les fonctionnalités implémentées. Nous verrons ces fonctionnalités dans le chapitre suivant.



(a) Diagramme pour la classe Engines



(b) Diagramme pour la classe Editor



(c) Diagramme pour la classe ECOMachine

Figure 3. Diagrammes de Classe

4.3.2. Classe Editor

Editor est une classe permettant la mise en place de la composition avec des objets temporels contraints (ou non) entre eux. Chaque boîte créée contient automatiquement deux points de contrôle : un au début, et un à la fin. Ces points contiennent une variable représentant leur date de début, et cette variable est ajoutée au solveur de contraintes GeCode. A chaque modification, par exemple l'ajout d'une nouvelle relation, le solveur de GeCode met à jour toutes ses variables pour fournir une solution respectant les contraintes. Cette classe permet également l'ajout d'interaction avec les points de déclenchement. Chaque objet temporel créé est manipulable grâce à un identifiant unique.

4.3.3. Classe ECOMachine

ECOMachine est une classe permettant l'exécution d'une conduite. Elle implémente le modèle de machine ECO présenté plus haut, elle contient donc un interpréteur de réseau de Pétri et un gestionnaire de processus. Les parties concernant la résolutions de contraintes en temps réel ne sont pas encore intégrées. Les fonctionnalités des processus ne sont pas limitées à celles implémentées pour l'instant, il leur suffit de pouvoir comprendre l'information fournit par le réseau de Pétri à chaque franchissement de transition. Tout processus héritant de la classe ECOProcess répond à cet exigence. Pour le moment, un seul type de processus est proposé. Il permet l'envoi d'un message OSC au début et à la fin d'une boîte. Mais dans un futur proche, il existera d'autres processus, comme l'envoi de courbe, le mapping, la captation scénique, ...

4.4. Fonctionnalités

Nous présentons les différentes fonctionnalités utilisateurs du moteur.

– Edition

- addBox : ajoute une boîte, et fournit à l'utilisateur son identifiant unique.
- removeBox : supprime une boîte.
- addAntPostRelation : ajoute une relation entre deux points de contrôle, et fournit à l'utilisateur son identifiant unique, ainsi que la liste des boîtes dont la position est modifiée pour respecter les contraintes.
- removeTemporalRelation : supprime une relation.
- performMoving : déplace une boîte, et fournit à l'utilisateur la liste des boîtes dont la position est modifiée pour respecter les contraintes.
- getBeginValue : fournit à l'utilisateur la date de début d'une boîte.
- getEndValue : fournit à l'utilisateur la date de fin d'une boîte.
- nbControlPoint : fournit à l'utilisateur le nombre total de points de contrôle contenus dans la boîte.

- setControlPointMessageToSend : spécifie un message à envoyer lors du franchissement d'un point de contrôle.
 - removeControlPointMessageToSend : enlève le message précédemment spécifié.
 - addTriggerPoint : ajoute un point de déclenchement, et fournit à l'utilisateur son identifiant unique.
 - removeTriggerPoint : supprime un point de déclenchement.
 - setTriggerPointRelatedControlPoint : relie un point de déclenchement avec un point de contrôle.
 - removeTriggerPointRelatedControlPoint : supprime le lien entre un point de déclenchement et un point de contrôle.
 - setTriggerPointMessage : spécifie le message déclenchant le point de déclenchement.
 - getTriggerPointMessage : fournit le message spécifié précédemment.
- Passage de l'édition à l'exécution
- compile : crée le réseau de Petri du moteur d'exécution à partir du moteur d'édition.
- Exécution
- setIpAddress : indique l'adresse de l'application avec laquelle le processus va communiquer.
 - getIpAddress : fournit l'adresse précédemment spécifiée.
 - setPort : indique le port de l'application avec laquelle le processus va communiquer.
 - getPort : fournit le port précédemment spécifié.
 - setTriggerPort : spécifie le port d'écoute pour les messages de déclenchement.
 - getTriggerPort : fournit le port précédemment spécifié.
 - run : lance l'exécution de la conduite.
 - stop : arrête l'exécution de la conduite.
 - isRunning : indique si une exécution de la conduite est en cours.
- Une fonctionnalité de sauvegarde et de chargement à partir d'un format XML dédié est également implémenté.

4.5. Evolutions

Le moteur en est pour le moment à la moitié de son développement au sein projet VIRAGE. Les premiers retours d'utilisation vont bientôt nous parvenir, et nous pourrons alors rajouter des fonctionnalités essentielles pour les créateurs de spectacles vivants. Voici une liste non exhaustive des prochains développements, sachant que cette liste sera mise à jour après les premiers tests en situation :

- Ajout de la hiérarchie : boîtes dans des boîtes.
- Ajout de plusieurs point de contrôle au milieu des boîtes ; ne pas se limiter à 2 points.
- Ajout des processus de contrôle continu : envoi de courbe.
- Ajout du mapping.
- Ajout d'une fonction d'accélération du déroulement lors de l'exécution.
- Ajout d'une fonction permettant d'aller à un point quelconque de la composition.

5. CHOIX ET CONCEPTION DE L'INTERFACE GRAPHIQUE

5.1. Ecriture du temps souple - gestion de scénario interactif

L'enjeu central autour de la question des interfaces Homme- Machine pour le séquenceur VIRAGE est de permettre l'écriture du temps souple par l'intermédiaire d'une interface graphique adaptée. Celle-ci doit permettre à des utilisateurs non-spécialistes de la programmation informatique de créer des scénarios interactifs complexes. Le travail de recherche mené autour de la question des interfaces a pour but de rendre transparent à l'utilisateur le formalisme sous-jacent à la création des scénarios.

Cette interface sera compatible avec les périphériques d'entrée usuels (clavier, souris) mais également avec d'autres types d'interfaces de contrôle, comme celles qui seront développées par le LIMSI, notamment pour l'édition des données contenues dans le scénario interactif. On s'appuiera sur le protocole de communication MINUIT pour permettre la réception et l'envoi de données ; l'interface graphique permettra également de paramétrer l'envoi et la réception de données minuit.

En mode écriture, le scénario interactif sera édité graphiquement, par l'assemblage d'éléments graphiques correspondant à des objets temporels et des intervalles permettant de créer des contraintes temporelles entre ces objets. Ces objets temporels pourront être associés à des paramètres de contrôle de modules multimédia (générateurs de sons, de vidéo, lumières, . . .) ou des regroupements de ces paramètres. Des points de déclenchements pourront être placés sur l'interface et reliés aux objets temporels ; en mode exécution, ils permettront de déclencher l'exécution d'un objet temporel ou de terminer son exécution. Le basculement en mode exécution se fera par l'intermédiaire d'une commande d'exécution (bouton "play") et l'interface graphique permettra de visualiser le déroulement du temps et l'exécution des actions.

De très nombreux paramètres devront être manipulés en cours d'édition ou en cours de jeu, ou encore restitués pour information : comment alors ne pas surcharger l'interface et la rendre utilisable par l'utilisateur ? Une démarche de conception centrée utilisateur doit donc être adoptée.

5.2. Etat de l'art des IHM et étude des usages

La première étape a été la constitution d'un état de l'art des IHM des logiciels existants, tels que séquenceurs audio, logiciels de montage vidéo, logiciels d'animation, outils de gestion du temps . . . Cette étude visait à explorer et commenter les différentes solutions d'interfaces mises en œuvre pour effectuer des tâches précises selon différents critères d'analyses :

- partie séquenceur : positionnement de données/infos dans le temps, navigation dans le temps, navigation dans les données, actions sur le temps, actions sur les données
- partie interactive : Ajout de contraintes temporelles, création de scénarios interactifs, mapping et routage
- critères ergonomiques : visualisation / représentation des données, accès aux fonctions, aspect visuel, types d'interactions mises en jeu, niveau d'expertise demandé, degré d'interaction [5], personnalisation possible de l'interface graphique

L'étude des usages menée par le CICM et destinée à restituer la façon dont travaillent les praticiens, nous a apporté un cadre de contraintes propres aux utilisateurs concernés par le séquenceur VIRAGE et nous a permis d'orienter nos choix d'interfaces pour la conception des premières maquette d'interface ⁵. Ces deux études ont permis d'établir un cahier des charges fonctionnel de l'interface. Ci-dessous nous en indiquons les principaux blocs de fonctions :

- Visualisation des événements temporels et navigation dans le scénario interactif
- Construction du scénario : insertion d'objets temporels, d'intervalles, de points de déclenchement et manipulation de ceux-ci, possibilités d'imbrications d'éléments dans un objet temporel
- Edition des contenus de chaque blocs
- Gestion des données : courbes
- Mapping/routage : gestion des entrées sorties MINUIT, création de mapping entrées / sorties
- Contrôle du scénario en mode exécution
- Gestion de bibliothèques de scénarios facilitant l'édition
- Déport des interfaces des logiciels contrôlés par le séquenceur
- Gestion de configurations de paramètres minuit : sélection d'ensembles de paramètres, captures d'états, association aux objets temporels
- Fonctions générales du logiciel

5.3. Maquettes de principe et maquettes fonctionnelles d'interface

Les maquettes papier proposent ainsi un premier principe fonctionnel d'interface. Ces maquettes ont été présentées et évaluées par les praticiens et chercheurs du projet. Durant la première partie du projet, les maquettes papier ont donc évolué jusqu'à aboutir à un modèle permettant de répondre aux différents cas pratiques pouvant être rencontrés sur le terrain. Les figures 4 et 5 présentent des versions successives de ces maquettes papier.

⁵ <http://www.plateforme-virage.org/publication-etude-des-usages.html>

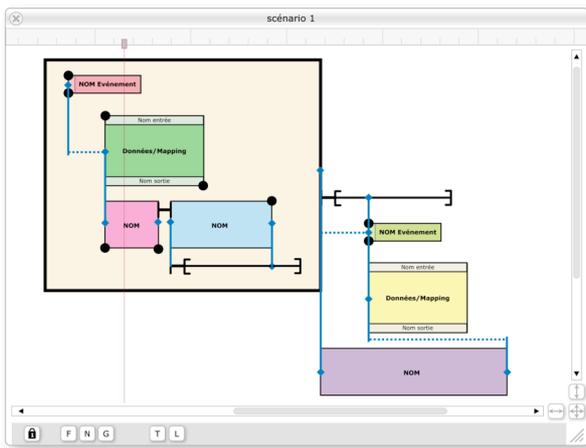


Figure 4. Version 1 de la maquette de principe de l'interface du séquenceur VIRAGE : fenêtre de visualisation du scénario interactif

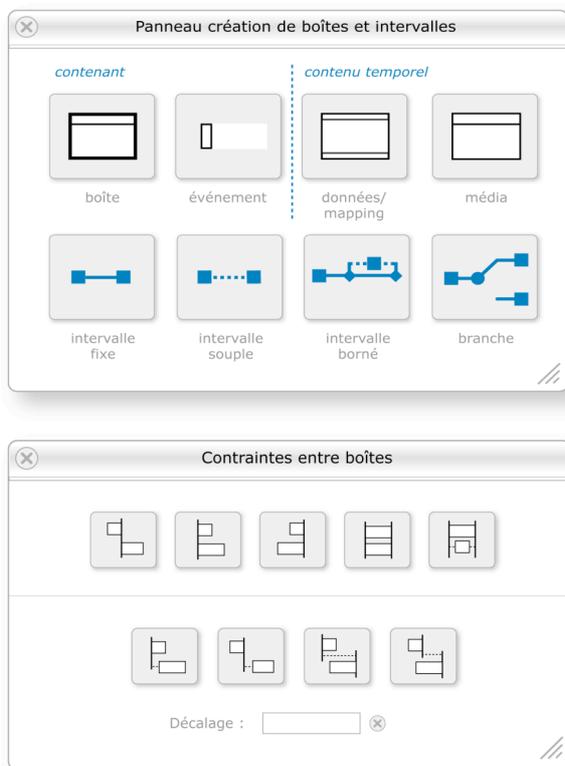


Figure 5. Version 3 de la maquette de principe : panneau de création de boîtes et intervalles et panneau contraintes entre boîtes

Les maquettes papier modélisent l'ensemble des fonctions déterminées dans le cahier des charges et proposent une première représentation d'interface dans laquelle les fonctions sont représentées et positionnées, sans critères graphiques. Pour évaluer ces maquettes, nous les avons mises en situation avec des cas concrets apportés par les praticiens et observés dans quelle mesure elles permettaient ou non de construire un scénario interactif.

Comme déjà évoqué dans la partie concernant le formalisme, nous avons préféré parler d'intervalles contraints plutôt que de relations de Allen. Du point de vue utilisateur, la notion de relations de Allen, même si elle permettent de bien décrire formellement les différentes contraintes entre objets temporels d'un scénario interactif, n'est pas facilement accessible pour l'utilisateur et ne correspond pas toujours à la logique pratique de création d'un scénario et de créations de contraintes entre événements et blocs temporels.

Après la présentation des premières maquette papier, nous avons démarré le développement d'une maquette fonctionnelle du séquenceur interactif. Cette maquette fonctionnelle permettra de tester en situation réelle le principe du séquenceur VIRAGE. La figure 6 présente une capture d'écran de la version actuelle de la maquette fonctionnelle.

L'environnement de développement retenu pour la création de l'interface graphique est *JUCE*⁶, notamment utilisé pour le développement de l'interface graphique de l'application MAX5. Cette maquette correspond à la partie interface graphique développée par Blue Yeti associée au moteur développée par le LaBRI. La première version de la maquette est mise à disposition en février 2009 aux participants du projet VIRAGE. Cette version doit permettre de placer des objets temporels, définir leur comportement, les contraindre par l'ajout d'intervalles fixes, souples ou bornés, définir des points de déclenchement pour démarrer ou terminer un objet temporel, définir des messages Minuit qui pourront être envoyés en début et fin d'exécution d'objets temporels et exécuter le scénario.

La version suivante intégrera :

- Les fonctionnalités complètes de configuration d'échanges de données MINUIT (choix des paramètres à contrôler ou à recevoir), création de configuration de paramètres (presets, capture d'états), mémorisation de configuration de paramètres
- Édition de courbes, automatisation (enregistrement de données entrantes sous forme de courbe)
- Gestion de mapping entre entrées et sorties

Cette première version sera évaluée par le CICM lors de différents tests en contexte de production artistique auprès des divers partenaires du projet Virage (GMEA, Di-dascalie.net, ISTS Avignon, MSH Paris Nord). Les retours des utilisateurs seront analysés et transmis à l'ensemble de l'équipe. Le protocole d'évaluation sera précisé par le CICM lors de la livraison de la maquette.

6. CONCLUSION

Nous avons présenté un bilan à mi-parcours du projet *Virage* visant à la création d'une plate-forme autour de l'écriture du temps et de l'interaction dans la régie numérique dans le spectacle vivant. Déjà, plusieurs objectifs du projet ont été atteints : un état de l'art de la

⁶ <http://www.rawmaterialsoftware.com/juce/>

pratique actuelle des régisseurs a pu être dressé par le CICM. De ce travail, ainsi que la réflexion avec les régisseurs associés au projet, a pu naître une description formelle de ce que devrait être une conduite interactive et des mécanismes permettant de la manipuler. Partant de là, l'implémentation de la maquette du séquenceur a pu être entamée et les premiers test seront effectués très prochainement. Outre la création de la maquette, le projet Virage aura permis d'entamer la réflexion autour de problématiques complexes en maintenant l'interdisciplinarité entre des communautés diverses. Nous estimons que la méthodologie ayant permis de maintenir ce dialogue est un apport du projet.

7. REFERENCES

- [1] Outils et pratiques du sonore dans le spectacle vivant, rapport du groupe de travail interdisciplinaire de l'afim. Technical report, Association Française d'Informatique Musicale. www.afimasso.org/IMG/pdf/GT_son_spect_viv.pdf.
- [2] A. Allombert, G. Assayag, and M. Desainte-Catherine. A system of interactive scores based on petri nets. In *Pr. of the 4th Sound and Music Computing Conference (2007)*, Lefkada, Greece, July 2007.
- [3] A. Allombert, G. Assayag, and M. Desainte-Catherine. De boxes core : vers une ecriture de l'interaction. In *Pr. of the 13th Journées d'Informatique Musicale (2008)*, Albi, France, Mars 2008.
- [4] P. Baltazar and G. Gagneré. Outils et pratique du sonore dans le spectacle vivant. In *Actes des Journées d'Informatiques Musicales (JIM07)*, Lyon, France, pages 153–162, Avril 2007.
- [5] M. Beaudouin-Lafon. Instrumental interaction : an interaction model for designing post-wimp user interfaces. In *CHI Letters : Proc. of the ACM Human Factors in Computing Systems (CHI 2000)*, La Haye, Pays-Bas, volume 2, pages 446–453. ACM Press, Avril 2000.
- [6] M. Desainte-Catherine and A. Allombert. Interactive scores : A model for specifying temporal relations between interactive and static events. *Journal of New Music Research*, 34(4), December 2005.
- [7] T. Place, T. Lossius, A. Refsum Jensenius, N. Peters, and Pascal Baltazare. Addressing classes by differentiating values and properties in osc. In *Proc. of the 8th International Conference New Interfaces for Musical Expression, NIME08*, Genova, Italy, June 2008.
- [8] A. Santini, A. Sédès, and B. Simon. Etude des usages, des outils, et des besoins dans les métiers de la régie numérique dans le spectacle vivant. état de art. Technical report, CICM, MSH Paris Nord, Novembre 2008. <http://www.pplateforme-virage.org/publicationetude-des-usages.html>.

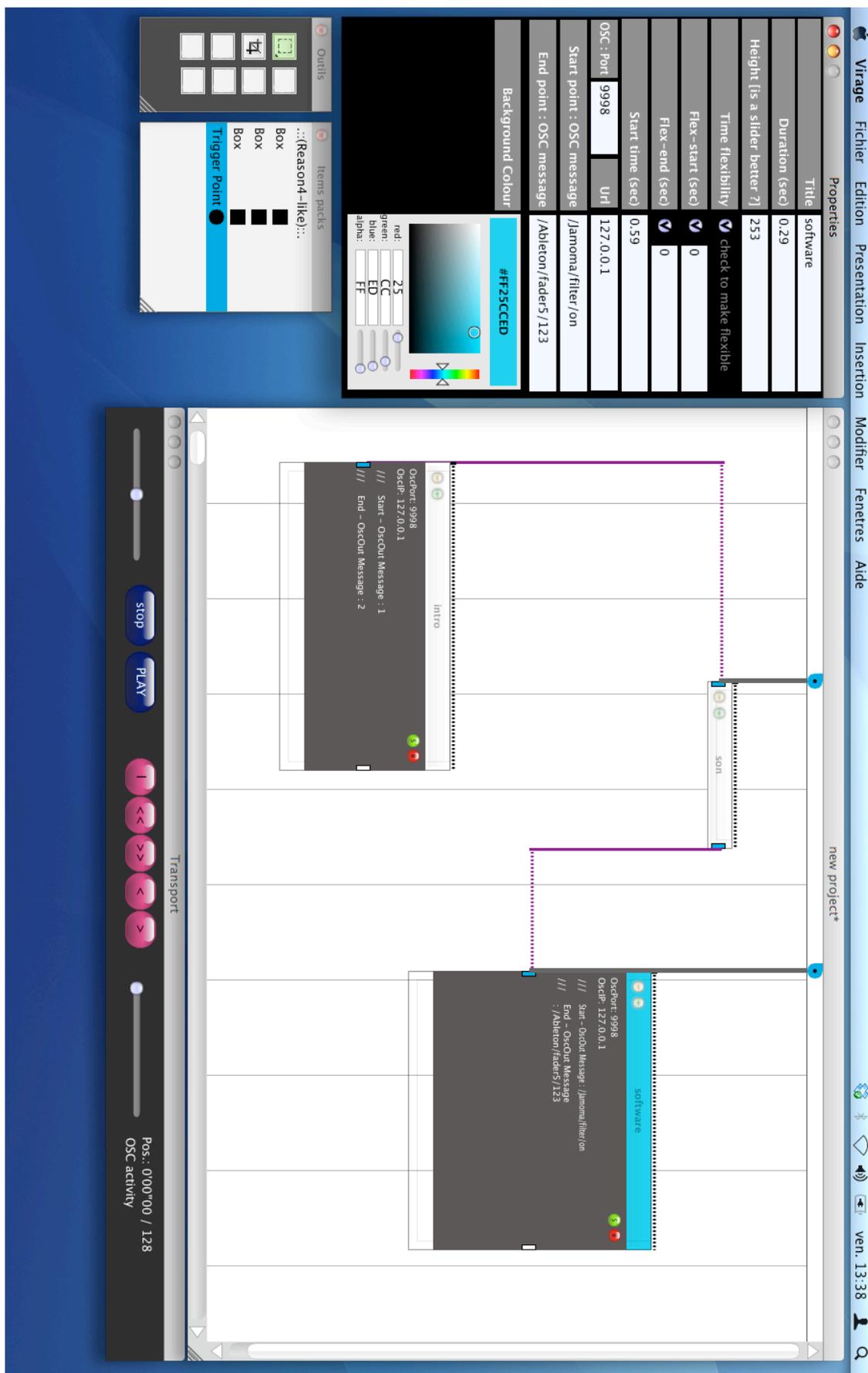


Figure 6. Une capture d'écran de la maquette fonctionnelle

GENESIS³ – PLATE-FORME POUR LA CREATION MUSICALE A L'AIDE DES MODELES PHYSIQUES CORDIS-ANIMA

Nicolas Castagné
ACROE
castagne@imag.fr

Claude Cadoz
ACROE & Laboratoire ICA, INPG
cadoz@imag.fr

RÉSUMÉ

GENESIS³ est une toute nouvelle version de l'environnement GENESIS pour la création musicale à l'aide des modèles physiques masse-interaction CORDIS-ANIMA. Elle a été conçue avec un recul de plus de dix années sur l'ancienne version et ses utilisations. Nous profitons de la sortie de GENESIS³ pour présenter une analyse du « paradigme logiciel » porté par GENESIS, en particulier en ce qui concerne les fonctionnalités et l'ergonomie offertes, les processus de création que l'environnement permet de mettre en œuvre et son positionnement dans l'état de l'art des logiciels musicaux utilisant les modèles physiques.

1. INTRODUCTION

Les « modèles physiques » ont une relativement longue histoire dans le domaine de l'Informatique Musicale. Depuis les premiers travaux dans les années 70 de Hiller et Ruiz, puis de Cadoz, de nombreuses techniques de modélisation et de nombreux modèles, algorithmes, et logiciels ont été proposés. Le travail de recherche et de développement reste intense, et l'engouement suscité par les « modèles physiques » dès les années 80 reste fort. Pourtant, la modélisation physique peine à s'installer dans les pratiques musicales.

1.1. Outils

Une rapide revue des logiciels qui ont recours au « modèle physique » montre que la majorité d'entre eux sont construits autour d'un algorithme modélisant une catégorie de corps sonore. Ils se présentent alors comme des systèmes de synthèse « haut de gamme » dédiés à la synthèse d'une catégorie de sons et viennent s'insérer dans les outils courants de l'informatique musicale – soit sous forme de « *plug-ins* » de synthèse, soit sous forme de synthétiseur hardware. Mais ils ne proposent pas, ou très peu, de moyens de modélisation. A l'inverse, il existe encore peu de logiciels ou systèmes qui visent à rendre l'utilisateur - musicien responsable de la conception des modèles. La plupart des environnements de modélisation disponibles (bibliothèque C/C++, langages dédiés...) sont de fait plus destinés à un usage scientifique que musical. Et, dans les quelques modèles proposés au musicien [8, 9, 10, 13], les briques de modélisation sont le plus souvent des

modèles de structure vibrante déjà construits, qu'il s'agit essentiellement de paramétrer et assembler entre eux.

Ainsi, si l'intérêt du modèle physique en ce qui concerne la qualité des sons générés tend à se répandre, peu de systèmes font le double pari que « l'utilisateur final » (musicien, compositeur...) est à même de mettre en œuvre un processus de modélisation physique complexe et qu'un tel processus a un intérêt réel dans le cadre d'une activité de création musicale.

Quelques raisons peuvent être avancées.

La première a trait aux réalités du marché de la synthèse sonore, dont l'un des moteurs essentiels est la recherche d'une plus grande qualité des sons de synthèse. Dans ce contexte, les modèles physiques offrent par nature un intérêt évident. Il n'est donc guère étonnant qu'ils se soient d'abord répandus en tant qu'algorithme de synthèse ou « *qu'expandeur* » : ils rencontrent ainsi une demande d'un « immédiatement utilisable ».

Une seconde raison envisageable est que le « portage aux usages » du modèle physique est pensé dans une situation de forte prédominance des systèmes de traitement du signal (qu'il soit sonore ou événementiel/MIDI), assise sur plus de cinquante années d'Informatique Musicale. La modélisation physique a ainsi tendance à être envisagée dans le contexte des techniques, systèmes, pratiques et savoir faire relevant du paradigme du signal, via l'incorporation de modèles dans des environnements logiciels « signal » répandus et pris en main par le plus grand nombre – exemples [8, 13].

Enfin, une troisième raison, plus délicate à analyser, relève à la fois de présupposés quant aux compétences nécessaires à la mise au point d'un modèle physique et de nécessités quant aux formalismes de modélisation susceptibles d'être pris en main par un musicien. Pour beaucoup, concevoir un modèle physique demanderait obligatoirement de manipuler des équations complexes et des moyens d'analyse numérique délicats, fort éloignés de tout discours et de tout savoir-faire musical. Ce n'est, pourtant, qu'un à-priori. De la même manière que les environnements de traitement du signal modulaire permettent de réaliser des systèmes de traitement à très haut niveau sans que, par exemple, une connaissance de la « transformée en Z » ne soit indispensable, il est possible d'envisager des systèmes permettant à un utilisateur final de concevoir des modèles physiques très complexes sans qu'il ne soit, par

exemple, nécessaire de manipuler frontalement des équations différentielles non-linéaires. La responsabilité des concepteurs de systèmes est, ici, engagée.

1.2. Création

Si l'on se tourne maintenant vers les usages du « modèle physique » en situation de création musicale, il apparaît que la modélisation physique est encore peu courante. Plus précisément, si des modèles préconçus sont bien utilisés en tant qu'algorithme de synthèse, parfois d'ailleurs sans que leur statut de « modèle physique » ne soit connu de l'utilisateur, les compositeurs ou musiciens sont encore rarement confrontés à l'activité de modélisation physique elle-même. Il est ainsi remarquable, par exemple, que des analyses des rapports entre création et « modèle physique », telle que celle proposée dans [5], se penchent essentiellement sur l'utilisation de modèles physiques par des compositeurs (modèles qui sont incidemment en général conçus préalablement par des scientifiques), et non pas sur l'impact du recours à la modélisation physique sur le travail compositionnel.

En d'autres termes, si le modèle physique est parfois utilisé par des musiciens, il n'est toujours pas « parlé ». Et l'impact potentiel du paradigme de la modélisation physique sur les processus de la création n'est pas encore pleinement mesuré.

1.3. Parallèle

Un parallèle avec le développement de la « synthèse du signal » fait apparaître un certain nombre de points marquants.

Tout d'abord, alors que l'univers du traitement du signal dans le contexte de l'Informatique Musicale s'est historiquement fondé sur une triple recherche technologique, scientifique et musicale (à commencer par les travaux de Mathews, Risset et leurs équipes), il semble que le modèle physique tende à être envisagé de façon beaucoup plus séparée : aux scientifiques la responsabilité et la prérogative de faire des modèles, aux musiciens celle de les utiliser.

Ensuite, alors que les outils « signal » étaient dès l'origine conçus de façon modulaire et ouverte, permettant à l'utilisateur de tester ses modèles, les « modèles physiques » sont quant à eux le plus souvent présentés comme des « boîtes noires » de synthèse dotées de quelques paramètres de réglage.

Enfin, alors qu'il existe aujourd'hui de nombreux outils modulaires permettant à un musicien de pratiquer le traitement du signal à très haut niveau, sans pour autant qu'il ne lui soit nécessaire de manipuler frontalement la théorie du signal, très peu de projets logiciels s'appuient sur un pari comparable en matière de modélisation physique.

L'évolution des outils « signal » a eu tendance à s'accompagner du développement progressif d'un véritable savoir faire en matière de compréhension,

synthèse et manipulation du signal sonore musicale auprès des musiciens (à minima des musiciens intéressés), allant jusqu'à ce qu'informatique musicale et traitement du signal sonore soient pour beaucoup presque synonymes. De façon notable, le développement des outils « physique » tend à sauter cette étape. Il y a là un risque de passer à côté des réels apports du paradigme de la modélisation physique en tant qu'outil pour la création.

1.4. Et pourtant...

Pourtant, la modélisation physique peut bien être envisagée comme une activité musicale.

Un musicien (qu'il soit compositeur ou instrumentiste) acquiert au cours de sa formation une connaissance à minima intuitive de la physique des corps sonores et une sensibilité forte à la matérialité des objets musicaux. Pour ne prendre que quelques exemples, les notions d'énergie, d'oscillation, d'interaction entre objets, d'inertie, de tension, d'amortissement, d'excitation, de percussion font partie du langage de la musique et du savoir intime du musicien, qu'il soit instrumentiste ou compositeur. Or, ces notions sont bien mieux appréhendables par le paradigme de la modélisation physique que par celui du signal.

De là, il est permis de supposer que la « modélisation physique » est à même d'être embrassée par un musicien, et ce de façon tout aussi pertinente, et peut être plus pertinente, que lorsqu'il s'agit d'avoir recours à la « modélisation du signal », qu'il soit sonore ou événementiel. Encore faut-il, bien sûr, d'une part que les techniques de modélisation et les environnements de modélisation adéquats soient conçus, d'autre part que l'utilisateur - musicien développe un savoir faire pratique, théorique et artistique avec ces outils.

1.5. GENESIS

Le projet GENESIS s'inscrit dans ce contexte. Considéré dans son ensemble, le projet a pour objet de faire figurer la modélisation physique au coeur des outils de l'utilisateur-créateur, ou encore de faire de la modélisation physique une activité de création.

GENESIS est un modéleur - simulateur dédié à la création musicale à l'aide des modèles physiques masse-interaction ou « particuliers ». Avec cet environnement, l'utilisateur est totalement maître de l'activité abstraite de construction du modèle.

Le projet s'appuie sur une quadruple recherche : recherche *technologique*, en ce qu'il s'agit d'identifier les principes, fonctionnalités et ergonomies originales d'un nouveau « paradigme logiciel » pour la musique ; recherche *scientifique*, en ce qu'il convient de porter un regard scientifique sur les possibilités en matière de modélisation dans l'environnement [11] : recherche *pédagogique*, afin d'identifier les moyens permettant de développer progressivement un savoir faire pratique et théorique auprès des utilisateurs [12] ; recherche

musicale enfin, relativement aux nouveaux processus de création qu'il convient d'inventer et aux nouvelles musicologies portées en gestation par le projet.

A l'occasion de la sortie de GENESIS³ (G³), la toute nouvelle version de GENESIS, cet article propose une analyse du « paradigme logiciel » propre à l'environnement, en particulier en portant un regard sur les fonctionnalités et l'ergonomie du logiciel et sur les processus de création qui sont mis en œuvre en l'utilisant.

La section 2 présente les objectifs qui ont gouverné la maturation de GENESIS³. Les sections 3 à 9 discutent les fondamentaux de l'environnement : formalisme de modélisation, fonctionnalités majeures, principes ergonomiques. Enfin, la section 10 propose une analyse des processus de création avec le logiciel.

2. DE GENESIS-1 A GENESIS³

Le projet GENESIS est fondée sur les recherches menées au groupe ACROE-ICA depuis 1976. Il a débuté en 1990 par la réalisation d'un premier prototype d'interface graphique et s'est poursuivi en 1995 par un prototype de GENESIS-1. De 1996 à 2005, la série GENESIS-1 [3] a été conçue et développée dans un processus en boucle. En parallèle, un réseau international d'utilisateurs a été progressivement constitué. GENESIS-1 est aujourd'hui diffusé dans plusieurs centres de Recherche et de Création. Il est utilisé régulièrement par un nombre croissant de compositeurs, pédagogues et étudiants. Il a été impliqué dans la création d'œuvres musicales régulièrement primées.

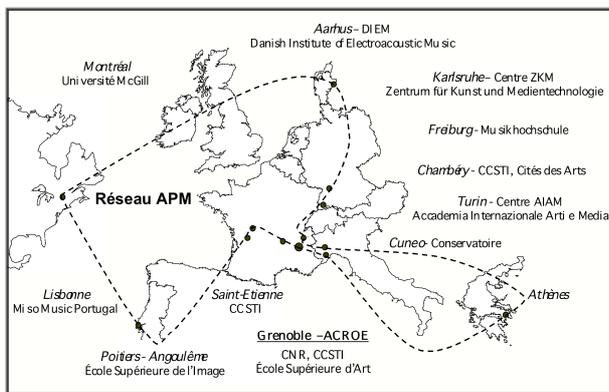


Figure 1 : diffusion de GENESIS

La conception d'un environnement nouveau et destiné au créateur tel que GENESIS *ne peut* se ramener aux méthodologies usuelles de l'Interaction Homme Machine. La collaboration avec les utilisateurs s'est déroulée comme une participation active à la maturation du logiciel, pendant laquelle la « raison d'être » de l'outil elle-même émergeait au fur et à mesure de sa conception. Autour de quelques objectifs communs, il s'agissait d'inventer des processus de création, dans une interaction mêlant les trois types de points de vue : scientifique, technologique et artistique. L'outil apparaît

alors comme le moyen qui permet de mettre en œuvre ces processus, mais aussi d'une certaine façon comme leur représentation. Cette démarche de « création d'un outil pour la création » nécessite du temps. Plus de dix années après la première version de GENESIS-1, cette démarche est plus que jamais active.

En 2005, nous avons entrepris une refonte profonde de l'environnement. Ce travail a abouti en janvier 2009 à la version *alpha* de GENESIS³ (G³), actuellement en cours de test. Les objectifs poursuivis dans la conception de cette nouvelle version sont multiples.

Il s'agissait d'abord de disposer d'une version s'insérant dans les plateformes informatiques des utilisateurs. En conséquence, G³ fonctionne sur Macintosh, sur Windows et UNIX/Linux, et dispose de nouvelles fonctionnalités permettant une insertion aisée de l'environnement dans les processus de travail des utilisateurs (import/export, copier/coller, lien avec d'autres environnements, etc.).

Plus fondamentalement, il s'agissait de stabiliser l'ensemble des éléments qui font la signature de GENESIS. G³ se présente donc comme une maturation de GENESIS-1, forte des nombreux tests et prototypes réalisés avec l'ancienne version et plus encore des connaissances accumulées lors de ses utilisations en situation de création.

Enfin, un troisième objectif consistait à poser les bases conceptuelles (fonctionnalités fondamentale, ergonomie générale, éléments génériques d'interface, langage de modélisation...) et matérielles (structures de données optimisées, codes réutilisables, formats de fichiers...) des futurs environnements de modélisation - simulation qui seront réalisés dans le laboratoire.

Pour ce faire, la conception de G³ a mobilisé l'ensemble des équipes du laboratoire et a nécessité une analyse approfondie de chacun des logiciels de modélisation - simulation réalisés à ce jour (en particulier GENESIS-1 pour la création musicale et MIMESIS [6] pour la création de mouvement et d'images animées) ainsi qu'une étude transversale des besoins. Le cœur de G³ est le résultat de ce processus de convergence. Aussi, plus qu'un simple « portage » d'un GENESIS-1 amélioré, G³ est la première brique d'une suite logicielle complète de modélisation - simulation physique pour la création. Derrière G³ se profile une nouvelle version de l'environnement MIMESIS ainsi qu'un nouvel environnement pour la modélisation et la création avec les systèmes de simulation temps réels multisensorielle ERGON [7] dotés de périphériques à retour d'effort. Ce dernier environnement sera, alors, un modeleur pour la modélisation d'objets dynamiques multisensoriels visibles, sonores, tactiles et manipulables dans une perspective de création, dans lequel cohabiteront des « objets » ou modèles multi-échelle, multi-fréquence et multi-dimensionnel (1D, 2D ou 3D). Ainsi, la mise en œuvre de G³ préfigure la découverte et l'expérimentation de nouvelles pratiques artistiques – et, pourquoi pas, d'un nouvel « Art des objets virtuels ».

3. FORMALISME

GENESIS est construit sur, et autour, d'une version du formalisme CORDIS-ANIMA [1], qui propose une formalisation précise du principe de modélisation et de simulation physique masse-interaction.

CORDIS-ANIMA est un formalisme extrêmement modulaire, ce qui présente un avantage évident lorsqu'il s'agit de laisser un utilisateur - créateur concevoir ses propres modèles. Un modèle CORDIS-ANIMA est un réseau de modules physiques élémentaires. Chaque module est un modèle d'un comportement physique élémentaire ; il est muni d'un algorithme paramétré encodant ce comportement. On distingue deux catégories essentielles de modules : les <MAT>, éléments matériels dotés d'une position dans l'espace de simulation, dont l'algorithme calcule la nouvelle position sur la base des forces reçues et les <LIA>, éléments de liaison connectés à deux <MAT>, dont l'algorithme calcule une force en fonction de la position et de la vitesse des <MAT> connectés. CORDIS-ANIMA définit également de nombreux *types de modules* <MAT> et <LIA> en fonction du comportement élémentaire modélisé (pour les <MAT> : point fixe, inertie, entrée ou sortie... Pour les <LIA> : élasticité, viscosité, relation de butée percussive, nombreux types d'interactions non linéaires...). Un modèle consiste alors en l'assemblage d'instances de ces types de modules (ou plus simplement «de modules») au sein d'un réseau physique.

Au delà du cadre formel fort et cohérent que propose CORDIS-ANIMA, des libertés sont laissées dans l'implantation qui en est faite. Nous précisons dans la suite la version de CORDIS-ANIMA qui est utilisée dans G³.

3.1. Uni-dimensionnalité

Le formalisme ne présuppose pas la dimensionnalité de l'espace de simulation (c'est-à-dire la dimension des vecteurs encodant les positions et les forces). Cet espace peut, en particulier, être uni-dimensionnel, plan ou tridimensionnel.

Dans GENESIS, l'espace de simulation est *unidimensionnel* : toute variable physique (force, position) n'est définie que sur un axe unique (« l'axe des mouvements ») et n'est calculée que suivant cet axe. De plus, les algorithmes des <LIA> ne considèrent pas la *distance* entre les <MAT> connectés, mais la *différence de positions* sur cet axe (qui peut être négative).

Le choix de la version unidimensionnelle peut se justifier par le fait que les vibrations acoustiques dans les objets réels sont en première approche le plus souvent mono dimensionnelles. Aussi, les modèles unidimensionnels permettent d'obtenir une très large variabilité dans les sons de synthèse, avec une bonne pertinence sonore. Qui plus est, n'avoir qu'un unique axe de mouvement permet de considérablement faciliter le processus de modélisation, en évitant la prise en compte de nombre des difficultés inhérentes à la

spatialité. Enfin, tel que discuté dans la section 5, cela autorise d'utiliser les deux dimensions de l'établi de modélisation comme un espace de liberté dans l'organisation des modèles.

3.2. Un très petit nombre de type de modules...

Nous avons veillé à limiter au maximum les types de modules disponibles dans GENESIS. Des tests ont été effectués au fur et à mesure des versions afin d'estimer la pertinence des modules envisagés. Dans G³, 12 modules, et seulement 12, ont été retenus et sont disponibles pour concevoir des modèles. De même, seulement 6 types de paramètres physiques et 2 types de conditions initiales existent. L'ensemble est résumé dans le tableau de la figure 2. Il convient de noter, qui plus est, que 4 de ces types de modules remplissent la fonction d'entrée/sortie et que les REF et CEL sont en fait des combinaisons d'autres types de modules. La base d'algorithmes physiques est donc réduite à 6.

<i>Modules <MAT> physiques</i>		
MAS	Inertie	$X0, V0$ Masse ponctuelle
SOL	Aucun	$X0$ Point fixe
CEL	Inertie Raideur Amortissement	$X0, V0$ Oscillateur physique élémentaire
<i>Modules <LIA> physiques</i>		
RES	Raideur	Elasticité
FRO	Amortissement	Viscosité
REF	Raideur Amortissement	Visco-élasticité
BUT	Raideur, Amortissement	Butée (liaison visco-élastique conditionnée à la différence de position)
LNL	Courbe $f(\Delta Position)$ Courbe $f(\Delta Vitesse)$	Liaison non-linéaire généralisée
<i><MAT> d'entrée/sortie</i>		
SOF	Aucun	$X0$ Sortie. Point fixe. Envoie la force reçue dans un fichier son ou sur haut parleur
ENX	Aucun	Aucun Entrée. Lit sa position dans un fichier geste.
<i>Demi-<LIA> d'entrée/sortie (connectés à un <MAT> unique)</i>		
SOX	Aucun	Sortie. Point fixe. Envoie la position du <MAT> connecté dans un fichier son ou sur haut parleur.
ENF	Aucun	Entrée. Lit la force à appliquer au <MAT> connecté dans un fichier geste

Figure 2. les 12 types de modules. En deuxième colonne : les paramètres physiques (*et conditions initiales* pour les <MAT>)

Cette extrême limitation du nombre et de la complexité des briques élémentaires supportant l'activité de modélisation fait qu'il est relativement aisé pour l'utilisateur de s'imprégner en profondeur de leurs caractéristiques. C'est également une signature forte de

GENESIS, qui le distingue notablement de ce qui est proposé dans les autres environnements modulaires, en particulier pour la création musicale, dans lesquels les types de modules élémentaires sont bien plus nombreux et souvent plus complexes.

3.3. ... mais un très grand nombre d'instances

A l'inverse, conformément aux besoins des utilisations exigeantes du logiciel, G³ a été conçu pour permettre la mise en œuvre d'un nombre très important de modules (ie : d'instances des types de modules). La version actuelle accepte sans difficulté 100000 modules et nous travaillons pour découpler ce nombre.

On peut remarquer que les modèles réalisés dans d'autres environnements modulaires en Informatique Musicale comportent typiquement de l'ordre de 100 à 1000 fois moins d'éléments. Incidemment, en Informatique Graphique, si bien évidemment les logiciels de modélisation 3D supportent de très nombreux *vertex*, ceux-ci sont très rarement considérés individuellement mais au contraire manipulés en groupe *via* les formes qu'ils constituent.

Ainsi, le support d'un très grand nombre de modules est à nouveau une spécificité de GENESIS. Il a d'importantes conséquences sur l'ensemble du logiciel, tel que discuté dans la suite de cet article.

4. PRINCIPES

Une « philosophie » centrale dans GENESIS est de laisser l'utilisateur travailler au plus près du formalisme. GENESIS pourrait donc se définir comme un environnement permettant de pratiquer CORDIS-ANIMA. Cela est rendu possible car CORDIS-ANIMA présente *par nature* une forte « utilisabilité » (voir [4]). Cela est également souhaitable afin d'éviter de cacher l'activité de modélisation physique, sur laquelle nous voulons focaliser l'utilisateur, par un recours systématique à des fonctions de plus haut niveau. Ainsi, par exemple, si l'utilisateur souhaite un modèle de corde, il lui est d'abord proposé dans G³ de *construire* cette corde en assemblant et paramétrant des modules de façon adéquate. Cela, toutefois, n'interdit pas d'ajouter des fonctionnalités non immédiatement déduite du formalisme, qui prennent en compte le contexte musical de l'utilisation de GENESIS en permettant par exemple de modifier le modèle en cours d'édition en fonction de critères plus usuels dans les contextes musicaux. G³ propose bien sûr de telles fonctions, présentées dans cet article, mais nous avons systématiquement pris garde qu'elles ne fassent pas mystère de leur action sur le modèle et qu'il soit toujours possible d'en éditer ultérieurement le résultat en revenant à un niveau plus élémentaire.

Une seconde volonté importante, d'ailleurs corollaire de ce qui précède, est de toujours permettre à l'utilisateur d'accéder (de paramétrer, de reconnecter, de supprimer...) chaque module de façon indépendante. C'est la une chose nécessaire aussi bien pour la

topologie du réseau <MAT> / <LIA> (les grands réseaux à topologie régulière sont rares et, au contraire, les réseaux très hétérogènes nécessitant une action locale de l'utilisateur sont courants) que pour les paramètres (des parties à paramètres homogènes peuvent exister, mais ne constituent pas une règle absolue). Cette seconde volonté, alliée au fait qu'un modèle peut avoir un très grand nombre de modules, a là encore un impact sur l'ensemble du logiciel.

Enfin, un troisième choix fondamental est que l'environnement n'est pas orienté vers une utilisation temps réel. Il convient toutefois de noter qu'il n'y a aucune d'opposition *fondamentale* entre GENESIS et le temps réel ; CORDIS-ANIMA d'ailleurs été introduit précisément dans le contexte de la simulation multisensorielle interactive temps réel, qui reste une préoccupation majeure au laboratoire. Par contre, dans la mesure où GENESIS se veut un environnement de création complet, prenant en compte le niveau compositionnel, nous avons préféré mettre l'accent sur la possibilité d'éditer des modèles complexes et de grande taille, donc par nature « temps différé », plutôt que sur un support immédiat du temps réel. Le moteur de simulation embarqué dans GENESIS est donc un moteur « temps différé » ou dans le meilleur des cas « temps réel mou » qui ne prend pas de flux en entrée – à part, le cas échéant un fichier gestuel. La connexion de GENESIS au moteur temps réel dur synchrone développé au laboratoire est, elle, envisagée dans un proche avenir.

5. ETABLI

Tout comme dans G1, G³ est organisé autour d'une représentation graphique des modèles sur un « établi de lutherie » (figure 3). Une palette comprend un réservoir (inépuisable !?) de modules ainsi qu'un certain nombre d'outils de manipulation. Le modèle est éditable sur l'établi à la souris (ajout de module, connexions <LIA> / <MAT>, déplacement et réorganisation, suppression...) suivant les principes de la *manipulation directe*. La manipulation repose largement sur le principe de la sélection. La représentation des modèles et les actions de manipulation sont inspirées de celles de G1 – le lecteur peut se référer à [3] pour plus de détail.

L'unique axe des mouvements (ou « axe physique ») est l'axe perpendiculaire à l'établi. En conséquence, les deux dimensions de l'établi sont vierges de toute signification physique. Déplacer un module suivant sur l'établi n'a *aucun* effet sur les sons générés. L'utilisateur peut utiliser librement la disposition des modules sur l'établi pour représenter tout type d'information de nature symbolique. Les deux dimensions permettent par exemple une approche graphique (ou picturale) du processus de modélisation. Elles sont parfois aussi utilisées pour souligner la topologie du réseau <MAT> / <LIA> d'une partie de l'objet, pour symboliser le temps de la gauche vers la droite, ou pour exprimer visuellement une sorte de « partition » d'objets physiques, résultant d'une

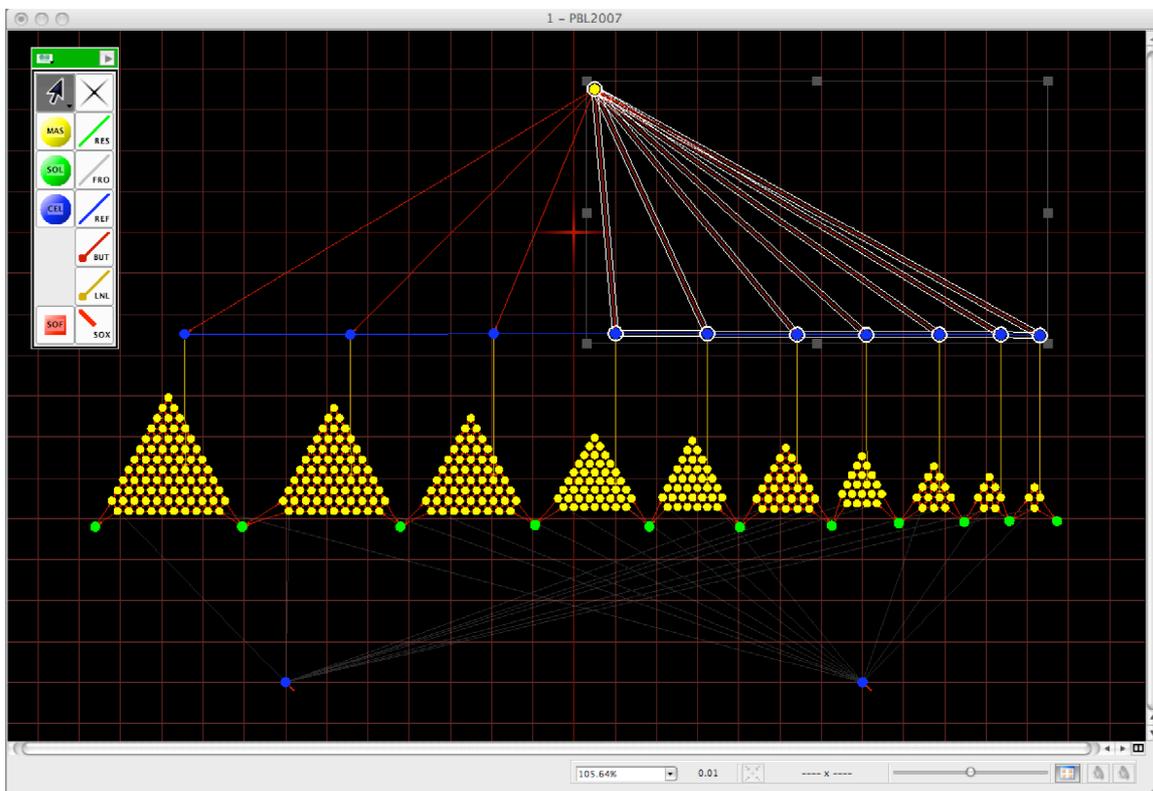


Figure 3. un modèle sur un établi (ici, sur plateforme Macintosh)

« composition » d'objets entre eux. De fait, les utilisations de la liberté de placement permise par l'établi varient d'un utilisateur à l'autre, d'un modèle à l'autre, ou même entre différentes parties d'un même modèle. De nouveaux usages sont régulièrement découverts et expérimentés par les utilisateurs.

Deux autres propriétés importantes de l'établi sont sa *taille* (quelques 100x100 m2) et, en conséquence, l'importance des *fonctionnalités de navigation* qui y sont offertes.

L'établi GENESIS s'inspire du principe des *interfaces zoomables* [14]. L'utilisateur peut zoomer en arrière ou en avant dans un facteur très important (10^5). G³ offre un ensemble de fonctionnalités de navigation optimisant le positionnement dans un tel espace. La représentation des modèles (ie : le niveau de précision dans la représentation d'une partie de modèle) dépend quant à elle du facteur de zoom et de la complexité du modèle suivant un algorithme heuristique visant à maximiser l'information pertinente affichée. De même, les possibilités de manipulation directe sont fonction de la complexité de la partie visible du modèle. En particulier, à certains niveaux de zoom les modules sont sélectionnés globalement sur la base de leur proximité sur l'établi ; alors qu'un zoom dans le modèle rend à nouveau chaque module manipulable de façon indépendante.

Enfin, une autre fonctionnalité originale sur l'établi est la possibilité d'y faire figurer des *commentaires hypertexte* ou « smart notes » afin d'annoter le modèle. Les liens hypertexte placés dans ces commentaires référencent des parties des éléments du modèle ou des éléments d'interface, à l'aide d'une syntaxe spécifique. Ils permettent, par exemple, de sélectionner rapidement

une partie de modèle, d'accéder immédiatement à un autre point de vue sur le modèle, etc.

6. LABELS

Nous avons consacré une attention particulière aux fonctionnalités permettant de manipuler et de maîtriser des modèles de grande taille. La première de ces fonctionnalités est bien sur la sélection, qui permet d'éditer globalement l'ensemble des modules sélectionnés. Elle n'est toutefois pas suffisante.

Dans l'objectif d'organiser des structures complexes, les solutions de loin les plus courantes, en particulier dans le contexte des outils d'informatique musicale, sont le *groupement* et l'*encapsulation*. Le groupement consiste à regrouper divers éléments de telle sorte qu'ils deviennent manipulables comme un tout. L'encapsulation ajoute au groupement le fait de cacher la complexité inhérente des éléments groupés en leur substituant une représentation iconique. Groupement et encapsulation permettent, à des degrés divers, d'organiser la complexité d'un document complet sous forme d'arbre. L'encapsulation permet en outre de simplifier l'organisation de l'espace de travail et est supposée réduire la charge cognitive de l'utilisateur en cachant des niveaux de complexité.

Toutefois, nous postulons que ni groupement ni encapsulation ne sont appropriés à GENESIS. Plusieurs raisons peuvent être avancées.

Tout d'abord, la position des modules sur l'établi est porteuse de sens et il est souhaitable qu'elle soit à tout instant modifiable de façon aisée.

Ensuite, il importe que chaque module reste accessible individuellement. Le cas des connexions

illustre cette assertion : alors que dans un modèle modulaire de signal il est possible de prédéterminer les entrées et sorties d'un « patch », n'importe quel <MAT> d'un modèle GENESIS est susceptible de recevoir de nouvelles connexions à n'importe quel moment. Par exemple, une « plaque » constituée de nombreux modules sonnera différemment suivant qu'elle est percutée au centre ou au bord ; prédéfinir le point d'excitation ne fait guère sens, et dans tous les cas l'utilisateur doit pouvoir le modifier aisément.

Par ailleurs, et plus fondamentalement, le processus de modélisation physique avec les réseaux CORDIS-ANIMA implique qu'il est le plus souvent impossible (et à *mimima* très difficile) de *strictement* isoler des sous parties dans le réseau. Dans un modèle physique, toute partie interagit bi directionnellement avec les autres – le cas échéant par parties interposées, bien sur. En conséquence, toute modification portant sur une partie du réseau, qu'elle soit paramétrique ou structurelle, nécessite pour conserver un fonctionnement cohérent du modèle de modifier en retour d'autres parties en interaction. De même, il n'est guère possible d'isoler des parties réutilisables en l'état : utiliser dans un modèle une partie conçue dans un autre modèle nécessite souvent des adaptations structurelles et / ou paramétriques en profondeur.

Enfin, de façon tout aussi importante, il apparaît que l'activité de modélisation nécessite de considérer tour à tour des parties de modèles qui se recoupent entre elles. Dans un cas, par exemple, il peut s'agir de déplacer globalement une partie sur l'établi ; dans d'autre, il peut s'agir de sélectionner uniquement certains modules dans cette partie pour leur appliquer un traitement qui leur est propre ; dans un troisième, il s'agira de considérer d'autres modules dans cette partie en même temps que certains modules d'autres parties pour modifier les paramètres physiques de ces modules ; etc.

En conséquence de cette analyse, il apparaît que *par nature* les réseaux physiques masse-interaction se prêtent mal à une approche structurelle en arbre, telle que portée par le principe de l'encapsulation. Aussi, nous avons consacré une attention particulière à la conception d'une fonctionnalité originale que nous appelons le *système de labellisation*.

Dans G^3 , un *label* est une chaîne de caractères qui désigne un module.

Un label peut comporter des *chiffres* ; le système a été optimisé pour traiter de façon extrêmement efficace des grands nombres de modules labellisés par des labels qui diffèrent les uns des autres d'un simple entier.

Un label peut également comprendre des séparateurs « / » en nombre quelconque. Ces séparateurs sont pris en compte par le système pour regrouper les labels entre eux sur la base de leur proximité syntaxique. On appelle alors *sous réseau* un ensemble de module qui partagent des labels ayant le même radical. Par exemple, si trois modules sont labellisés avec */filament/extrémités/extr1*, */filament/extrémités/extr2*, et */filament/module*, alors */filament* référence un sous réseau constitué de 3 modules et

/filament/extremities/ référence un autre sous réseau avec 2 modules.

L'utilisateur peut définir autant de labels pour un module qu'il existe de contextes, de tâches d'édition, de situations dans lesquelles ce module est susceptible d'être impliqué. Ainsi, un module pourrait être labellisé en même temps */filament/corde/m* et */sortiesAudio/module13*. De même, un module peut appartenir à autant de sous réseaux que nécessaire.

En conclusion, le système de labellisation permet d'organiser les *labels* des modules sous forme d'un graphe orienté, dans lequel les nœuds désignent des sous réseaux, et les feuilles des modules, mais ce *sans imposer une structuration au réseau lui même*.

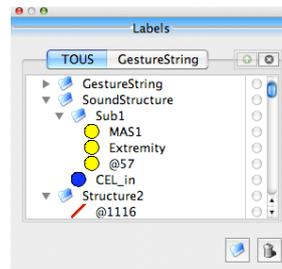


Figure 4. Fenêtre des labels

Dans GENESIS, le système de labellisation est relativement transversal. Il est notamment accessible dans plusieurs écrans, en particulier : dans la *fenêtre des labels* (figure 4), dans le menu contextuel de l'établi, dans les « smart notes » et dans le langage de modélisation PNSL (section suivante).

7. LANGAGE

La version actuelle de l'environnement MIMESIS [6] pour la création graphique incorpore un langage de script pour CORDIS-ANIMA qui intervient à plusieurs étapes clés du processus de modélisation. Les utilisations de MIMESIS ont montré que, pour de nombreux actes de modélisation, le recours à un langage (à la programmation) est particulièrement adapté. Ce n'est d'ailleurs pas chose étonnante puisque, par nature, la modélisation est une activité conceptuelle.

Dans le cadre de la conception de G^3 et plus généralement des bases de la future suite logicielle telle que présentée section 2, nous avons entrepris d'étendre les possibilités du langage MIMESIS et de réfléchir aux conditions de la collaboration de ce langage avec les outils de manipulation directe disponibles dans l'interface. Il s'agit, à terme, de réaliser une interface *multimodale* dans laquelle l'utilisateur pourra choisir le style d'interaction (langage / manipulation directe) le plus adapté à ses besoins du moment.

Le résultat de ce travail est la définition d'un nouveau langage, que nous appelons PNSL (Physics Network Scripting Language – Language de script pour les réseaux physiques). Cet article ne prétend pas présenter les quelques 67 commandes et 13 paquetages de PNSL ; nous dirons, toutefois, quelques mots sur PNSL et sur ce qu'il permettra de faire dans G^3 .

PNSL est un *langage de script* – construit sur le langage Tcl. A ce titre, il n'a pas été conçu pour *décrire* les modèles, mais bien pour les *programmer* – c'est à dire pour accompagner le processus de modélisation.

PNSL est un langage de modélisation. A l'inverse de nombre des langages accompagnant les interfaces, qui offrent des commandes permettant de manipuler l'interface, PNSL est focalisé sur le modèle et sa conception, suivant les règles du formalisme CORDIS-ANIMA. De la même manière que l'interface graphique de G³ permet de travailler au plus près du formalisme CORDIS-ANIMA, PNSL offre donc toutes les commandes permettant d'instancier, de connecter, de paramétrer, etc. les modules d'un modèle.

PNSL est *générique* dans le contexte de CORDIS-ANIMA ; il est adapté à n'importe quel type de modèle, quels que soient sa dimensionnalité (unidimensionnel, 1D, 2D, 3D), ou les catégories de phénomènes sensibles qu'il génère (image animée, son...). Le langage est ainsi amené à devenir une pièce centrale dans la suite logicielle en gestation (section 2).

PNSL a été conçu pour pouvoir être utilisé avec des *modèles de grandes tailles*, aussi bien en termes d'efficacité que de pouvoir expressif. En particulier, PNSL propose un système d'expressions régulières – les « *Labels Picker Expressions* » – qui permettent de sélectionner de façon concise des ensembles de labels.

Enfin, PNSL a été pensé pour « l'utilisateur final » du logiciel ; il pourra bien sûr être utilisé par les développeurs des logiciels pour réaliser rapidement et efficacement des fonctionnalités *ad hoc*, mais il est plus fondamentalement appelé à être pris en main par les utilisateurs – en particulier les musiciens – au même titre que l'interface de G³.

Dans la version actuelle de G³, et dans l'attente d'une intégration plus profonde du langage à l'interface, PNSL est proposé comme un *langage de macro*. Dans la *fenêtre des scripts*, l'utilisateur crée, modifie, édite et paramètre ses scripts. A tout instant, il peut exécuter un script sur un modèle en cours de conception. L'exécution du script modifie alors l'état du modèle, ce qui est immédiatement visible sur l'établi.

Les possibilités nouvelles offertes par PNSL sont pressenties comme étant importantes, mais ont tout juste commencé à être testées. Quelques exemples peuvent être d'ores et déjà cités, tels que :

Problème inverse : générer un modèle CORDIS-ANIMA de telle sorte qu'il dispose de propriétés reflétant un ensemble de contraintes souhaitées (par exemple : un spectre en fréquence), en utilisant des procédés d'analyse numérique ;

Edition des paramètres : calculer les paramètres d'un ensemble de modules de telle sorte qu'ils soient liés par certaines lois mathématiques ou physiques.

Position sur l'établi : placer automatiquement les modules sur l'établi de telle sorte que leur position reflète certaines propriétés des modèles qu'ils constituent. Par exemple : placement sur l'axe vertical en fonction de la fréquence propre du premier mode des

modèles, placement horizontal pour refléter l'instant auquel le modèle intervient dans une composition, etc.

8. AUTRES OUTILS

Les fonctionnalités fondamentales de la partie « *modeleur* » de GENESIS sont complétées par un ensemble d'outils qui permettent tour à tour d'analyser, de modifier, de générer ou d'organiser les modèles.

Sans présumer des développements à venir, nous listons ici les principaux outils disponibles dans l'actuelle version de G³.

La *fenêtre de génération* de topologie permet la génération de réseaux à topologie régulière (corde, plaque, etc.)

L'*analyseur modal* permet le calcul de l'ensemble des propriétés modales (fréquences propres, amortissement, déformée modale) d'un réseaux CORDIS, dès lors qu'il est linéaire. La *fenêtre d'analyse/accordage* offre plusieurs représentation du résultat des analyses modales et permet « d'accorder » à une fréquence donnée une structure linéaire préalablement analysée. L'accordage modifie les paramètres physiques de telle sorte que le mode considéré oscille à la fréquence voulue – les autres modes étant décalés en conséquence.

La *fenêtre d'organisation* propose un ensemble d'outil permettant de modifier le placement des modules sur l'établi en fonction de divers critères géométriques ou prenant en compte la topologie du réseaux de modules.

9. SIMULATION

Une particularité de GENESIS est que le modèle simulé peut donner lieu à deux types d'observation : visuelle (visualisation des déformations du modèle dans un espace 2D+1, c'est à dire comprenant le plan de l'établi additionné de l'axe perpendiculaire des mouvements) et sonore (écoute du signal sonore généré). Bien plus que le simple moyen de générer le signal sonore « final », la fonctionnalité de simulation est un outil essentiel dans l'activité de modélisation. L'utilisateur a très régulièrement recours à la simulation du modèle en cours de conception pour comprendre le comportement du modèle, évaluer le résultat obtenu, ou valider les actions de modélisation.

Avec G³, l'intégration des moyens de simulation dans le *modeleur* a franchi un degré de maturité.

Tout d'abord, nous avons maintenu le choix de deux écrans pour la conception et la simulation, soulignant ainsi que l'activité de l'utilisateur y est d'importance comparable, quoi que très différente. Ainsi, dans l'*établi* ont lieu les actions de conception et, dans la *fenêtre de simulation* (figure 5), le modèle prend vie.

La *fenêtre de simulation* propose plusieurs organisations suivant le besoin de l'utilisateur. L'organisation *écouter* permet de lancer le calcul de simulation, d'écouter le son obtenu et le cas échéant de visualiser la forme d'onde du signal sonore.

L'organisation *regarder* permet de visualiser les déformations du modèle au fur et mesure de son calcul et de contrôler la vitesse de calcul. Enfin, l'organisation complète (figure 5) offre un accès à l'ensemble de ces fonctionnalités.

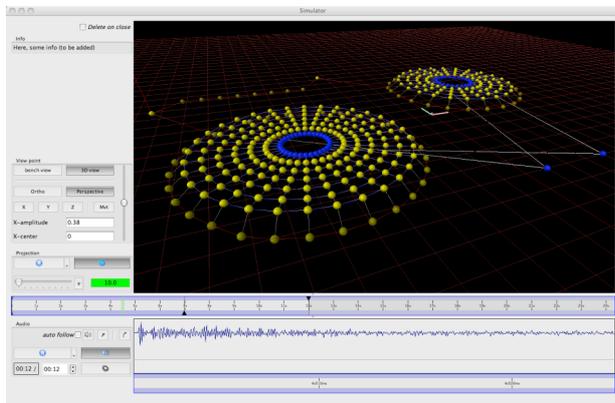


Figure 5. La fenêtre de simulation.

Un autre outil proposé, qui n'existait pas dans G1, est la *liste des simulations* qui liste l'ensemble des simulations réalisées depuis l'ouverture de l'application. Avec cette fenêtre, dans la mesure ou le lancement d'une simulation correspond de façon générale à un incrément significatif dans la conception du modèle, l'utilisateur garde une trace des étapes de son travail. Depuis cette fenêtre, pour chaque *item* de la liste, il est notamment possible de contrôler le processus de simulation, d'écouter les sons produits, de rouvrir la fenêtre de simulation, ou encore de rouvrir le modèle tel qu'il était lors du lancement de la simulation.

Enfin, notons que nous avons voulu dans G³ généraliser la possibilité d'un usage de plusieurs simulateurs CORDIS-ANIMA, de telle sorte que choisir le simulateur utilisé soit facilité. Cela permettra en particulier, dans un avenir proche, de connecter GENESIS au simulateurs TELLURIS et ERGON [7] conçus dans notre groupe de recherche. Ces simulateurs temps réel synchrones, multisensoriels, interactifs et utilisant les dispositifs gestuels à retour d'effort ERGOS permettront alors d'ouvrir GENESIS au temps réel et à l'instrumentalité, telle qu'elle est envisagée au laboratoire.

10. PROCESSUS DE CREATION

Utiliser GENESIS revient toujours à concevoir un modèle physique, puis à le mettre en vie. Contrairement à d'autres approches du modèle physique pour la création sonore et musicale, le logiciel ne repose pas sur des primitives toutes faites de morceaux d'instruments, réduisant la modélisation à une activité de juxtaposition et de paramétrage. GENESIS rend le musicien maître de l'activité abstraite de construction du modèle. Ainsi, les utilisateurs et utilisations de GENESIS démontrent qu'un musicien qui n'est pas scientifique est à même de s'appuyer sur une certaine « physique intuitive » pour

conduire seul un processus de modélisation physique qui peut être extrêmement complexe. Par ailleurs, avec ce logiciel la modélisation physique particulière devient bien un paradigme pour la musique, un langage pour « penser » et « écrire » le corps sonore.

Par contre, il est certain que les démarches mises en œuvre par les utilisateurs - compositeurs peuvent être très diverses. En particulier, une analyse des quelques 50000 modèles créés à ce jour avec G1 puis G³ au sein du groupe d'utilisateurs permet de mettre en évidence deux pôles complémentaires dans le processus de création mis en œuvre.

Dans le premier cas, GENESIS est utilisé essentiellement comme un générateur de sons. Les modèles peuvent être relativement simples, comprenant de quelques modules à quelques centaines de modules. Le son généré est lui-même relativement court – de l'ordre de quelques secondes à quelques dizaines de secondes. Il est ensuite exporté à la manière d'un « objet sonore », puis importé dans un autre environnement dans lequel il subira des transformations de montage et de modification, à la discrétion du compositeur. La composition de l'œuvre elle-même n'intervient donc pas précisément dans GENESIS, mais dans d'autres environnements, par exemple avec une démarche relevant de la musique concrète.

Dans le second cas, la totalité du processus de création musicale est réalisée dans GENESIS, en utilisant exclusivement le principe du modèle physique.

Ce processus est appelé par Cadoz la « composition (avec/des) modèles physiques » [2]. Il consiste à faire cohabiter dans un même modèle diverses catégories de structures physiques, certaines oscillant à haute fréquence (ie : produisant un son), d'autres à basse fréquence (typiquement : à la fréquence du geste). La simulation de telles structures en interaction génère alors une succession d'événements sonores – une « phrases sonore » – au lieu d'un son unique.

Cadoz montre qu'il est possible d'étendre considérablement cette démarche. Ainsi, des modèles très complexes, mêlant de nombreuses structures d'échelle variables et couvrant des fonctions musicales diverses, permettent de générer, lorsqu'ils sont simulés sans aucune interaction de l'utilisateur et sans qu'il n'y ait besoin de traitement ultérieur, non seulement un son, non seulement une succession de son, mais *une œuvre musicale de sons fixés complète et structurée*.

Dans ce processus de composition, le temps et la répartition temporelle des événements musicaux sont maîtrisés :

- Par les structures oscillant à basses fréquences qui remplissent la fonction de générateur d'événements. Concevoir une telle structure correspond à la conception, ou la « composition », des événements musicaux qu'elle génère lorsqu'elle interagit avec les structures sonores qu'elle active.
- Par des assemblages élémentaires composées d'un module MAS et d'une liaison BUT, elle-même connectée à une structure.

Nous appelons un tel composant un « déclencheur ». Lancé depuis une position initiale soigneusement choisie, et avec une certaine vitesse initiale, le MAS viendra « déclencher » la structure connectée à une date maîtrisée durant la simulation. Suivant les paramètres physiques utilisés pour le BUT, l'événement déclenché peut être une percussion, un étouffement, une excitation par plectre, etc. De même, la structure déclenchée peut être soit une structure sonore, soit une structure basse fréquence qui, à son tour, commencera son travail sur les structures avec lesquelles elle est en interaction. Quoi qu'il en soit, l'ensemble des « déclencheurs » d'un modèle permet de disposer d'un moyen simple mais adéquat d'écriture temporelle des événements sonores.

Le processus de « composition (avec/des) modèles physiques » a été mis en œuvre dans diverses œuvres au cours des années passées, notamment par Cadoz.

Un premier de ses avantages est qu'il permet d'étendre l'intérêt reconnu des modèles physiques en matière de qualité des phénomènes générés de l'échelle des sons à l'échelle des événements sonores, en rompant le paradigme du contrôle « top/down » porté par les systèmes de signaux. De fait, les structures génératrices d'événements étant perturbées par la rétroaction des structures « contrôlées », les événements sonores successifs qui sont générés présentent « naturellement » des différences légères dans leur placement temporel, dans la qualité de l'attaque ou encore dans leur timbre. Ces différences peuvent être musicalement pertinentes et porteuses d'expressivité ; elles sont, d'une certaine manière, à l'image des effets de l'interaction d'un musicien avec son instrument.

Plus fondamentalement, ce processus démontre que le potentiel du paradigme de modélisation physique particulière, lorsqu'il est envisagé dans le contexte de la création musicale, dépasse le cadre de la synthèse de son où il est traditionnellement cantonné, pour adresser l'ensemble du processus de la création musicale, incluant les problématiques compositionnelles. Avec ce processus, GENESIS offre au musicien la possibilité de « physicaliser » ses idées musicales et non seulement sonores ou instrumentales. Ainsi, GENESIS démontre que les modèles physiques sont porteurs d'une possible uniformisation des paradigmes pour la création et sont susceptibles d'apporter une solution à une « coupure ontologique » séculaire : celle du matériau (le son) et celle de la structure (la composition).

11. CONCLUSION

A l'occasion de la sortie de GENESIS³, nous avons voulu proposer une analyse des propriétés saillantes de GENESIS et préciser les processus de création avec l'environnement. Cet article a ainsi montré pourquoi GENESIS porte un « paradigme logiciel » original, comment les « modèles physiques » peuvent supporter une véritable activité de création musicale, bien au delà du rôle de génération du matériau sonore qui lui est souvent dévolu, et en quoi une telle activité de création à l'aide du modèle physique est nouvelle et intéressante.

GENESIS³ est actuellement en version alpha ; les tests sont en cours et une première version stable sortira très prochainement.

12. REFERENCES

- [1] Cadoz C., Luciani A. and Florens J. L., 1993: *CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis - the General Formalism*. Computer music journal 17(4):19-29.
- [2] Cadoz, C.: *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation. pico..TERA, a Piece Entirely Generated by a Physical Model*, ICMC'02 proceedings, Sweden, 2002.
- [3] Castagne, N, Cadoz, C: *GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling*. Proceedings of the International Computer Music Conference ICMC, Sweden, 2002.
- [4] Castagne N & Cadoz C: *A goals-based review of Physical modelling*, International Computer Music Conference - ICMC 2005 – Barcelonne - pp 343-346.
- [5] Chafe, C. *Case Studies of Physical Models in Music Composition*. International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, 2004.
- [6] Evrard M, Luciani A, Castagné N : *MIMESIS: Interactive Interface for Mass-Interaction Modeling*, Proceedings of CASA, Geneva, 2006, N Magnenat-Thalmann & al. editors. pp177-186.
- [7] Florens JL, Luciani A, Castagne N, Cadoz C. *ERGOS: a Multi-degrees of Freedom and Versatile Force-feedback panoply*. Proceedings of Eurospatics, pp356-360, Germany, 2004.
- [8] Henry C. *mpd : Physical modelling for Pure Data* Poster, International Computer Music Conferences, november 2004, Miami, florida
- [9] Morrison JD, Adrien JM : *MOSAIC : a Framework for Modal Synthesis* – Computer Music journal vol 17/1 – MIT Press, 1993.
- [10] Pearson, M: *TAO: a physical modelling system and related issues*. Organised Sound, 1, 1996 , pp 43-50
- [11] Poyer F. & Cadoz C. : *Déformations de structures vibroacoustiques ; simulation par réseaux masse-interaction ; application à la synthèse de sons évolutifs*. In Actes des 14^{èmes} journées d'Informatique musicale – JIM-09, Grenoble, 2009.
- [12] Tache, O & Cadoz, C. : *Vers un instrumentarium pour les modèles musicaux Cordis-Anima*. In Actes des 14^{èmes} journées d'Informatique musicale – JIM-09, Grenoble, 2009.
- [13] Trueman D. and DuBois R. L., *PeRColate — A Collection of Synthesis, Signal Processing, and Image Processing Objects for Max, MSP, and Nato*, online: <http://www.music.columbia.edu/PeRColate/>
- [14] Ziat, M.: *Zoomable Interfaces*, in *Enaction and Enactive Interfaces, a Handbook of Terms*, edited by A. Luciani and C. Cadoz, Enactive System Books, 2007 – pp164.

VERS UN INSTRUMENTARIUM POUR LES MODELES MUSICAUX CORDIS-ANIMA

Olivier Tache
ACROE
olivier.tache@imag.fr

Claude Cadoz
ACROE & Laboratoire ICA
claude.cadoz@imag.fr

RÉSUMÉ

La modélisation physique propose un changement de paradigme dans l'Informatique Musicale, en se concentrant sur la modélisation de corps sonores virtuels plutôt que sur la modélisation des sons eux-mêmes. Elle conduit à reconsidérer en profondeur la relation entre le musicien et l'ordinateur, aussi bien au niveau conceptuel que pratique, en particulier lorsqu'il s'agit pour le musicien ou le compositeur de *pratiquer* la création de modèles. Des changements aussi importants nécessitent la mise à disposition d'outils d'apprentissage adaptés, prenant en compte les spécificités de la modélisation physique et allant plus loin que les concepts de bibliothèque de modèles et de tutorial qui sont souvent mis en pratique dans les environnements d'Informatique Musicale. Cet article introduit un cadre théorique et pratique, l'Instrumentarium, répondant à cette problématique dans le contexte du système de modélisation et de simulation CORDIS-ANIMA et dont l'objectif est de représenter de façon complète et structurée les possibilités offertes par ce formalisme. L'Instrumentarium comporte en particulier une ontologie des modèles musicaux CORDIS-ANIMA, s'appuyant sur une analyse fonctionnelle que nous présentons ici. Ces résultats pourraient être élargis afin de proposer une ontologie générale des modèles construits avec d'autres méthodes de modélisation.

1. INTRODUCTION

La modélisation physique est l'un des paradigmes les plus prometteurs en Informatique Musicale depuis les années 80. On considère généralement qu'elle offre la possibilité d'établir des interactions intuitives et expressives avec les algorithmes de synthèse sonore, et de produire des sons d'un grand réalisme [11] [14]. A un niveau plus fondamental, elle modifie de façon radicale la relation avec l'ordinateur, en réaffirmant l'importance de la matérialité et de la situation instrumentale dans le processus de création [1] [10].

Les modèles physiques sont de plus en plus utilisés par les compositeurs [7] [9], et le nombre de logiciels faisant appel à la modélisation s'accroît progressivement. Cependant, la diffusion de la modélisation physique peut sembler relativement lente si l'on considère l'immense intérêt suscité lorsqu'elle a commencé à être largement connue [15]. Ceci s'explique par plusieurs facteurs, dont le premier est probablement le « fossé » entre des promesses initiales

quelques peu grossies par les préconceptions concernant les réalités virtuelles et les possibilités réellement offertes jusqu'à présent. En effet, la modélisation physique ne permet aujourd'hui de synthétiser des sons réellement réalistes que pour un nombre limité de familles d'instruments, et les interfaces haptiques, qui permettent effectivement de mettre en place des interactions d'un nouveau genre avec les modèles, ne sont pas encore disponibles à large échelle, ni à des tarifs abordables.

La façon dont la modélisation physique est proposée à l'utilisation constitue un autre problème. Tandis que les environnements modulaires basés sur le traitement du signal, comme Max/MSP ou Reaktor, connaissent une popularité croissante, seul un nombre très limité d'environnement modulaires de modélisation physique existent aujourd'hui. La plupart des outils basés sur la modélisation physique sont disponibles sous la forme d'instruments virtuels prêts à l'emploi, qui permettent uniquement de changer certains paramètres du modèle sous-jacent et ne donnent pas accès à sa structure interne. Or, cette approche – qui vise bien évidemment à proposer des outils faciles à utiliser – masque le potentiel réel des méthodes de modélisation. La *pratique* de la modélisation (et non *l'utilisation de modèles*) dans un environnement modulaire est probablement la meilleure façon pour l'utilisateur de découvrir ce potentiel [5], notamment en ce qui concerne la synthèse de sons non réalistes – bien que plausibles – et la génération de structures musicales grâce à des objets physiques virtuels.

La modularité présente des avantages bien connus par rapport aux approches non modulaires ; elle est un gage de généralité pour les environnements qui y font appel, et elle offre à l'utilisateur une liberté inégalable. En contrepartie, elle est plus exigeante en matière de compétences, de temps et d'expérience. Dans les environnements basés sur le traitement du signal – dont on peut dire qu'ils font partie d'une « culture du signal » presque universelle – les difficultés inhérentes à la modularité sont généralement traitées en mettant à la disposition de l'utilisateur des tutoriaux et une librairie bien fournie de modèles. En ce qui concerne la modélisation physique, ces moyens sont insuffisants étant donné que les concepts fondamentaux que les utilisateurs doivent appréhender pour pouvoir la pratiquer sont loin d'être aussi répandus que ceux des « approches signal ». Face à ce constat, il est tout à fait évident qu'une diffusion réussie de ces nouvelles

méthodes de création passe nécessairement par le développement de nouveaux outils permettant la transmission des connaissances entre les modélisateurs experts et les utilisateurs finaux.

Dans le contexte des modèles physique masses-interactions CORDIS-ANIMA [2], nous avons abordé cette question en concevant un cadre conceptuel et pratique, appelé *Instrumentarium*, qui va au-delà des notions de bibliothèque de modèles ou de tutorial [13]. Le projet *Instrumentarium* vise à proposer une ontologie des modèles CORDIS-ANIMA [8] utilisés pour la création musicale et ainsi à expliciter en quoi les éléments fondamentaux de ce formalisme « font système » dans ce domaine. A un deuxième niveau, il a pour objectif de fournir des informations techniques essentielles pour la pratique (analyse du comportement de modèles, présentation de techniques de modélisation, utilisation et configuration de composants, etc.).

Le cœur du niveau conceptuel de l'*Instrumentarium* est constitué d'une liste de fonctions correspondant aux différents rôles que peuvent avoir les parties d'un modèle. Elles décrivent d'une façon très générale la manière dont un modèle produit son résultat sonore ou musical, et sont par conséquent un outil fondamental pour la compréhension et la création des modèles.

Après avoir rappelé les principes essentiels de CORDIS-ANIMA (Section 2), nous présenterons de façon plus détaillée le projet *Instrumentarium* (Section 3) pour nous focaliser sur ses aspects relatifs à l'analyse fonctionnelle (Section 4).

2. CORDIS-ANIMA

CORDIS-ANIMA est un système modulaire de modélisation et de simulation d'objets physiques, utilisé pour la création musicale, la synthèse de mouvements visuels et la simulation multisensorielle interactive [2]. Un modèle CORDIS-ANIMA est un réseau constitué d'*éléments matériels* (les modules <MAT>) et d'*éléments de liaison* (les modules <LIA>). Un module <LIA> simule une interaction entre deux modules <MAT>. A chaque étape de la simulation, il calcule deux forces opposées selon la différence de position et/ou de vitesse de ceux-ci. Un module <MAT> calcule sa position courante en fonction de la somme des forces reçues par des modules <LIA> à l'étape précédente de la simulation (Figure 1).

Tous les environnements de modélisation basés sur CORDIS-ANIMA proposent 5 types de modules élémentaires : deux modules <MAT>, le MAS (masse ponctuelle) et le SOL (point fixe), et trois modules <LIA> linéaires (RES, FRO et REF) qui correspondent respectivement à un ressort, à une friction visqueuse et à un ressort viscoélastique. L'une des caractéristiques les plus importantes de CORDIS-ANIMA est la prise en compte générale des interactions non linéaires, permettant de modéliser un large éventail de phénomènes et de comportements physiques. Différents modules <LIA> non linéaires sont proposés selon les applications.

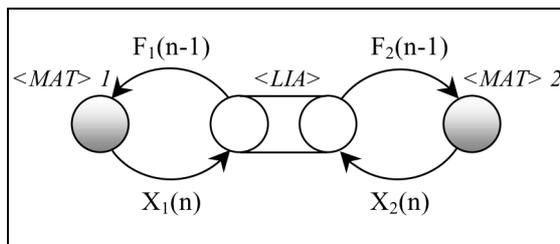


Figure 1. Calcul des forces et des positions dans un modèle CORDIS-ANIMA composé de deux modules <MAT> et d'un module <LIA>.

Les réseaux CORDIS-ANIMA peuvent être construits soit par programmation textuelle (en particulier avec le langage dédié PNSL [6]) ou à l'aide d'une interface graphique interactive.

2.1. Application à la création musicale

Les modèles mis en oeuvre pour la création musicale comprennent généralement plusieurs objets situés à des fréquences différentes. D'un côté, les *objets micro-temporels* (ou *acoustiques*) ont des modes de vibration situés dans le domaine audible et peuvent être vus comme des « instruments virtuels » ; ils sont responsables de la production du son. De l'autre, les *objets macro-temporels* ont soit des oscillations situées en dessous du domaine audible, soit aucune oscillation ; ils produisent des mouvements qui peuvent être utilisés comme des « gestes » virtuels appliqués à d'autres objets, que ceux-ci soient micro- ou macro-temporels, par exemple pour réaliser l'excitation ou l'étirement d'une structure vibrante. La coexistence de plusieurs échelles temporelles permet de générer des formes macro-temporelles et donc des structures musicales. Plusieurs pièces de musique ont d'ailleurs été entièrement réalisées avec un seul modèle CORDIS-ANIMA [3].

2.2. GENESIS

GENESIS est un environnement graphique pour la création musicale, basé sur CORDIS-ANIMA [4] [6]. Son interface permet à l'utilisateur de créer des modèles en manipulant à la souris les modules élémentaires disposés sur un établi virtuel. Un certain nombre d'outils sont disponibles pour réaliser rapidement des tâches courantes, comme l'édition de paramètres de nombreux modules simultanément et la génération automatique d'objets (cordes, membranes, etc.).

Dix modules physiques sont implémentés dans GENESIS. En plus des modules de base évoqués précédemment, deux interactions non linéaires sont disponibles : le module BUT (« butée ») qui permet principalement la simulation de collisions, et le module LNL, une interaction complètement définie par l'utilisateur permettant de simuler une grande variété d'objets et de phénomènes : structures acoustiques non linéaires, frottement d'archet, pincement, etc.

Les travaux décrits dans cet article sont basés sur des modèles réalisés avec GENESIS.

3. DESCRIPTION DU PROJET INSTRUMENTARIUM

L'objectif du projet Instrumentarium est de proposer un cadre général pour l'apprentissage de la création avec les modèles physiques CORDIS-ANIMA. Celui-ci se concrétisera en particulier par l'intégration de différents éléments à l'environnement didactique de GENESIS :

- Une présentation du système conceptuel représentant de façon générale l'organisation interne des modèles ;
- Une série de documents ciblés décrivant les objets physiques et les techniques de modélisation les plus courants et donnant des détails pratiques sur leur utilisation (contexte, paramétrage, référence à des objets ou des phénomènes réels, etc.) ;
- Une vaste librairie de modèles, structurée selon les principes du système conceptuel.

3.1. Motivations

Le système conceptuel que nous venons d'évoquer est l'élément qui distingue l'Instrumentarium des environnements d'apprentissage habituellement proposés pour les logiciels de création musicale. Son originalité et son intérêt résident dans le fait qu'il apporte une compréhension globale des possibilités offertes par CORDIS-ANIMA, au lieu de les introduire d'une façon linéaire qui permettrait beaucoup plus difficilement de s'en faire une représentation complète. Cette nouvelle approche est indispensable afin de pratiquer de façon créative et efficace la modélisation physique avec GENESIS. En effet, CORDIS-ANIMA est basé sur un nombre de modules très restreint par rapport à la plupart des environnements modulaires de création musicale. Cette modularité « extrême » a un impact très positif dans le processus d'apprentissage, en particulier lors des premiers contacts avec ce paradigme de modélisation : en effet, la découverte de ses bases ne demande que la compréhension d'un nombre limité de modules, qui sont associés à des concepts intuitifs, tels que l'inertie, la vitesse, l'élasticité ou le frottement. En contrepartie, ceci implique que la création avec CORDIS-ANIMA repose sur une approche de relativement bas niveau, puisque les modèles sont construits par assemblage de modules élémentaires au comportement très simple. Par conséquent, il peut être difficile pour un utilisateur non expérimenté d'imaginer quel objet ou quel modèle peut réaliser une idée sonore ou musicale précise. Les comportements complexes, susceptibles d'entrer dans le champ musical, émergent de l'organisation précise de centaines ou de milliers de modules en interaction. Le travail de création musicale avec CORDIS-ANIMA, s'appuyant sur une maîtrise solide des niveaux élémentaires, suppose la structuration des parties d'un modèle à différents niveaux de

complexité permettant l'articulation du propos musical. Ceci ne peut pas être fait sans une représentation claire et complète de ce qu'est un modèle et de comment il peut être structuré.

Depuis la première version de GENESIS, plus de 50.000 modèles ont été réalisés. Bien que très différents les uns des autres, ils partagent de façon évidente certains schémas d'organisation. Ceci est particulièrement significatif dans la mesure où ces modèles ont été réalisés avant qu'une « théorie générale » des modèles musicaux CORDIS-ANIMA soit proposée. En particulier, alors que les utilisateurs les plus expérimentés de GENESIS ont développé leur savoir-faire principalement par eux-mêmes, ils ont abouti à des schémas de modélisation similaires. On peut alors dire que de la pratique émerge un « langage » propre à la création musicale s'appuyant sur les modèles CORDIS-ANIMA. L'un des objectifs principaux du projet Instrumentarium est de spécifier ce langage en tant que partie intégrante des connaissances relatives à la création musicale avec cet outil, afin de pouvoir le transmettre aux nouveaux utilisateurs.

3.2. Travaux précédents

Une première structuration des modèles CORDIS-ANIMA a été proposée avant le début du projet Instrumentarium. Elle prend la forme d'une hiérarchie de composants physiques directement inspirée de l'analyse de la chaîne d'éléments menant, dans la situation instrumentale traditionnelle, des gestes instrumentaux à la perception du son par l'auditeur : exciteur, structure vibrante, résonateur, environnement aérien, etc. Cette hiérarchisation prend également en compte les aspects compositionnels, à travers deux catégories de composants : les « Instrumentistes » et les « Chefs ». De façon métaphorique, ces composants ont le même rôle que leurs référents réels : l'Instrumentiste « joue » d'un corps sonore à l'aide d'un exciteur, et le Chef a pour fonction d'activer ou d'arrêter un ou plusieurs Instrumentistes. Notons que, dans cette proposition, les catégories de composants sont directement associées à des modules ou des réseaux CORDIS-ANIMA précis : il s'agit donc d'un système relativement fermé, alors que de nombreux autres composants que ceux décrits pourraient remplir le même rôle.

Cette approche est cohérente, car il est effectivement possible de construire et d'analyser des modèles selon cette hiérarchisation. Cependant, elle présente un manque évident de généralité – qui était déjà connu lors de sa formulation. La référence constante à la situation instrumentale traditionnelle masque en effet la possibilité de construire des modèles tout à fait pertinents du point de vue sonore et musical, dont la structure ne s'y conforme pas voire qui ne pourraient même pas exister dans le monde réel. Il est impossible d'ailleurs impossible d'analyser certains modèles de manière non ambiguë de cette façon. Par exemple, une corde dotée d'un coefficient de viscosité négatif (une

situation impossible dans la réalité, le frottement apportant de l'énergie au lieu d'en faire perdre) est à la fois une structure vibrante et une source d'énergie. Bien qu'il n'y ait pas d'excitateur dans ce modèle, une excitation à bien lieu en permanence lorsque la corde est en mouvement.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'aspect compositionnel, il faut noter que les modèles peuvent comporter d'avantage de niveaux de structuration que ceux proposés (l'Instrumentiste et le Chef). On peut par exemple imaginer l'existence de « Super-Chefs », et ainsi de suite.

En fonction de ces remarques, et afin de garantir la généralité de l'Instrumentarium, nous avons évité au maximum les références à la situation musicale traditionnelle et aux instruments acoustiques dans nos travaux. Ceci peut paraître surprenant dans le contexte de la modélisation physique, qui se prête particulièrement à de tels rapprochements, mais nous considérons que l'utilisation d'un vocabulaire emprunté aux situations réelles n'est pas la meilleure manière de décrire de façon générale des modèles dont certains sont particulièrement abstraits. De même, nous n'avons pas pris en compte les interprétations perceptives ou musicales des modèles et des phénomènes qu'ils produisent, jugeant que ces aspects devraient rester ouverts aux utilisateurs, en fonction des approches de chacun d'entre eux. De façon générale, l'Instrumentarium se limite à parler des objets et des phénomènes physiques, afin de ne pas orienter le processus d'apprentissage.

3.3. Structuration de l'ontologie des modèles CORDIS-ANIMA

En tant que système conceptuel, l'Instrumentarium comporte trois niveaux qui constituent une ontologie des modèles musicaux CORDIS-ANIMA, chacun étant construit sur le précédent. Le premier niveau est basé sur la distinction entre les aspects structurels et fonctionnels des modèles, et spécifie le vocabulaire élémentaire permettant de décrire sans ambiguïté l'organisation des réseaux CORDIS-ANIMA – ce qui constitue une étape cruciale et délicate étant donné leur complexité et leur diversité. Le second niveau décrit les différentes fonctions qui peuvent être réalisées dans un modèle par ses constituants. Enfin, le troisième niveau présente les principaux schémas d'organisation mis en œuvre lors de la construction de modèles.

3.3.1. Premier niveau : analyse structurelle et fonctionnelle des modèles

Dans le premier niveau, les modèles sont considérés comme des systèmes généraux (au sens de la Systémique) envisagés selon deux points de vue complémentaires (Figure 2).

Du point de vue *structurel*, un modèle est considéré comme un ensemble de *structures en interaction*. Une structure correspond dans ce contexte à la notion

courante d'objet matériel. Elle est définie comme une partie solide, indépendante et clairement identifiée d'un modèle. Ceci signifie en particulier que :

- l'énergie se propage librement en son sein : tout apport d'énergie provoque donc la mise en mouvement de tous les modules <MAT> mobiles ;
- « l'éclatement » de la structure (c'est-à-dire le fait que certains modules s'éloignent librement des autres à un moment donné de la simulation) est impossible. Ceci implique que tout module <MAT> doit être relié à au moins un autre par une interaction élastique.

Du point de vue *fonctionnel*, un modèle est défini comme un ensemble de *composants* interconnectés, chacun réalisant une *fonction* et contribuant au résultat global de la simulation. Une fonction correspond au rôle d'une partie d'un modèle à un niveau physique, par exemple « produire une vibration à une fréquence audible » ; il s'agit donc le plus souvent d'une action physique. Un composant peut être un module, une structure (par exemple, une corde ou une membrane) ou un ensemble de structures. Un réseau CORDIS-ANIMA donné aura différents rôles selon le contexte dans lequel il est utilisé, il ne doit donc pas être considéré comme un composant en soi. Par ailleurs, de nombreux composants différents peuvent réaliser une même action

L'identification des fonctions réalisées dans un modèle et des composants associés est appelée *l'analyse fonctionnelle*. Elle permet de construire un graphe fonctionnel résumant l'organisation du modèle à ce niveau, c'est-à-dire la composition des différentes fonctions en vue de la production du résultat final. Cette représentation associe chaque fonction au composant qui la réalise, les flèches représentant l'application d'une fonction à un composant.

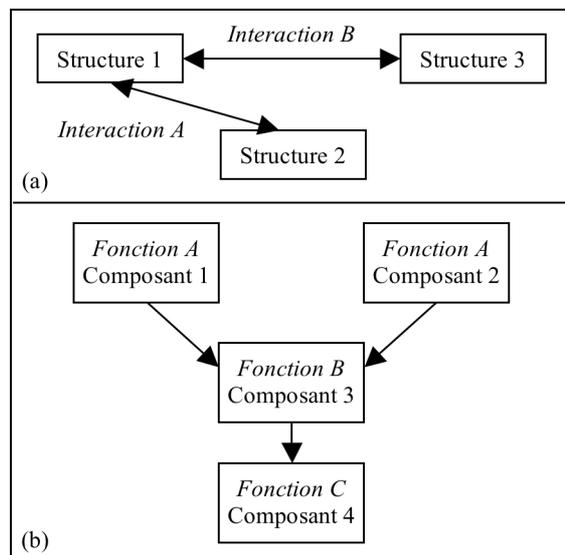


Figure 2. Représentation structurelle (a) et fonctionnelle (b) des modèles physiques.

La distinction entre ces deux approches des modèles est l'une des clés de l'Instrumentarium. En effet, le fait de séparer la fonction de l'objet permet de comprendre

la structuration d'un modèle sans avoir à prendre en considération les nombreuses variables (types d'interactions, paramètres physiques, conditions initiales, etc.) qui déterminent son comportement exact. Il est alors possible, dans une première étape, d'analyser ou de créer des modèles à un niveau plus élevé que celui des modules pris individuellement, ce qui est, bien entendu, d'une grande importance lorsqu'il s'agit de modèles composés de milliers d'entités élémentaires.

3.3.2. *Second niveau : les fonctions*

La liste de fonctions que nous avons établie (cf. section suivante) permet de décrire de façon complète comment un modèle « marche » au niveau physique. Par rapport à la proposition précédente, cette approche ne se focalise plus sur les objets, mais sur le domaine plus général des actions physiques, ce qui permet de prendre en compte des modèles ayant une organisation inhabituelle, comme la corde à viscosité négative évoquée ci-dessus. L'*Instrumentarium* fait référence à des composants précis, cependant ceux-ci ne sont plus comme précédemment les représentants de catégories prédéfinies, mais simplement des exemples illustrant différentes façons de réaliser les fonctions.

3.3.3. *Troisième niveau : principaux schémas d'organisation*

Le troisième niveau traite principalement de la structuration des modèles en niveaux hiérarchiques basés non pas sur des rôles différenciés, mais sur les différentes échelles d'inertie des structures qui les composent. En effet, les inerties des structures macro- et micro-temporelles diffèrent généralement de plusieurs ordres de grandeur, de sorte que le comportement des premières est indépendant de celui des secondes. Cette technique de modélisation fondamentale permet de construire des composants qui agissent sur d'autres sans être influencés en retour, une situation nécessaire pour des applications compositionnelles – comme la production d'un rythme régulier – qui se basent sur un découplage entre les niveaux micro- et macro-temporels. Il est ensuite possible de faire varier le degré de hiérarchisation en jouant sur la différence entre les échelles d'inertie. On peut ainsi passer continûment du cas où l'interaction entre deux structures est unidirectionnelle (on retrouve alors la situation de *contrôle*, caractéristique des systèmes à traitement du signal) à celui où elle est bidirectionnelle.

4. LES FONCTIONS PHYSIQUES

Afin de concevoir l'*Instrumentarium* en minimisant la tendance – naturelle – à être influencés par notre propre pratique de GENESIS et le risque d'oublier certains aspects, nous avons adopté une démarche *bottom-up*, partant du corpus des modèles GENESIS réalisés depuis la première version de l'environnement pour élaborer les concepts de l'ontologie. Nous avons

tout d'abord réalisé un inventaire de ces modèles, qui nous a conduit à dresser une liste d'environ 150 « éléments » (types de modèles, composants, techniques de modélisation, phénomènes physiques, etc.) caractérisant la création musicale avec CORDIS-ANIMA. Ces éléments ont ensuite été regroupés en différentes catégories, parmi lesquelles 9 ont été identifiées comme des fonctions.

4.1. Fonctions fondamentales

Plusieurs conditions doivent être remplies pour qu'un modèle puisse produire des sons utilisables : il doit contenir au moins une structure micro-temporelle, qui va produire les oscillations audibles ; celle-ci doit être mise en mouvement, ce qui implique qu'elle soit connectée à une source d'énergie, ou qu'elle en intègre une ; enfin, ses mouvements doivent être captés. Dans la plupart des cas, le modélisateur prendra également soin d'ajouter un amortissement à son modèle (par exemple en utilisant des interactions viscoélastiques pour construire la structure micro-temporelle), à moins qu'il souhaite travailler avec des sons qui ne s'arrêtent jamais.

De ces conditions, on tire directement une liste de quatre fonctions qui doivent nécessairement être réalisées dans tout modèle sonore : la *Génération acoustique* (la production de mouvements à fréquence audible), l'*Excitation* (la transmission d'énergie d'une source vers une structure), l'*Amortissement* et la *Captation*. Les trois dernières fonctions peuvent aussi bien s'appliquer au niveau macro-temporel que micro-temporel, ce qui est important pour la généralité de l'ontologie proposée.

4.2. Fonctions facultatives

Ces fonctions ne sont pas directement nécessaires pour produire un son ; elles sont toutefois présentes dans la plupart des modèles un tant soit peu élaborés.

La *Génération macro-temporelle* est l'équivalent de la génération dans le domaine macro-temporel. Elle correspond à la production de mouvements à basse fréquence par une structure.

La *Modification* est l'action de modifier les propriétés ou le comportement d'une structure en cours de simulation. On distingue trois sous-catégories : la perturbation élastique (c'est-à-dire le fait de confiner les mouvements de modules <MAT> dans une zone déterminée à l'aide de butées élastiques), l'étirement, et la modification structurelle dynamique [12]. La modification d'une structure acoustique permet en particulier d'obtenir des changements dynamiques du timbre ou de la hauteur du son qu'elle produit.

Le *Déclenchement* est un type particulier d'*Excitation*. Il correspond au lancement d'un « processus physique » (c'est-à-dire une succession d'événements unis par un lien de causalité) par la transmission d'une quantité d'énergie entre une source et une structure cible. Cette fonction revêt une

importance toute particulière au niveau compositionnel, puisque le fait de programmer un déclenchement (qui peut entraîner la production d'une structure musicale élaborée) peut être vu comme un acte d'écriture.

Les deux dernières fonctions sont d'un niveau plus élevé que celles qui précèdent. Elles sont encore peu utilisées, toutefois elles répondent à des besoins importants et seront par conséquent développées dans un futur proche.

La *Métrie* correspond à la réalisation de mesures (de position, de vitesse, d'accélération, etc.) à l'intérieur d'un modèle grâce à des composants dédiés. Il existe par exemple des composants, construits uniquement à l'aide de modules CORDIS-ANIMA, permettant de réaliser une forme d'analyse spectrale à l'intérieur même d'un modèle. L'utilisation de tels composants permet de s'informer sur le déroulement d'une simulation, mais aussi de contrôler le comportement d'une partie d'un modèle en fonction de celui d'une autre partie. On peut ainsi réaliser de façon complètement physique des opérations logiques s'intégrant à des processus compositionnels. Par exemple, il est possible d'arrêter automatiquement les mouvements d'une structure A lorsqu'une structure B est excitée pour la première fois, et ce sans que le modélisateur ne connaisse à l'avance le moment où cet événement se produira.

Enfin, l'*Initialisation* est l'action de placer une structure dans un état physique donné (exprimé en fonction de la position et de la vitesse de ses modules <MAT>) afin de l'utiliser (ou de la réutiliser) dans un objectif précis. Certains composants doivent en effet se trouver dans un certain état initial pour remplir leur fonction, état qui peut ne pas être celui dans lequel il se trouve à l'issue d'une première utilisation. La capacité de réinitialiser un composant (au lieu d'en utiliser une nouvelle copie à chaque fois qu'on en a besoin) permet de produire des modèles plus légers, à la fois au niveau du coût cognitif et du coût en temps de calcul

4.3. Composition des fonctions

Les fonctions physiques que nous venons de décrire rapidement peuvent être intégrées dans un schéma de composition global (Figure 3).

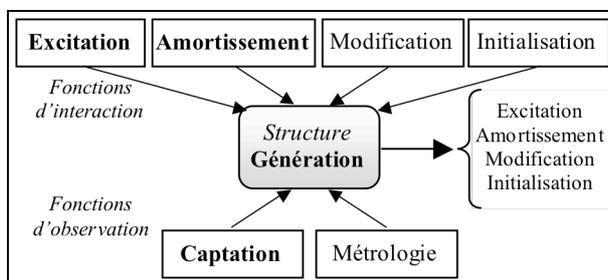


Figure 3. Application des fonctions physiques à une structure. Les fonctions fondamentales sont notées en gras.

Cette représentation est centrée sur une structure remplissant la fonction de Génération acoustique ou

macro-temporelle. Elle peut être excitée, amortie, modifiée ou initialisée, et ses mouvements peuvent être captés ou mesurés. L'Excitation, l'Amortissement, la Modification et l'Initialisation sont appelées des *fonctions d'interaction*, car elles affectent l'état physique de la structure. Au contraire, la Captation et la Métrie ont une influence nulle ou négligeable sur son comportement, elles sont donc appelées les *fonctions d'observation*.

Toute structure d'un modèle est considérée comme un « agent » pouvant participer à la réalisation de différentes fonctions à l'aide de composants correspondants. Par exemple, un oscillateur accordé à la fréquence de 0,1 Hz peut être utilisé pour amortir une structure acoustique toutes les 10 secondes.

Ce schéma de composition des fonctions n'impose aucune restriction sur le nombre de niveaux hiérarchiques et peut être appliqué de façon récursive : une structure agit sur une seconde, qui agit elle-même sur une troisième et ainsi de suite. Il est ainsi possible de conceptualiser des modèles présentant un degré de structuration arbitrairement élevé.

4.4. Exemple : la « Condensacorde »

Le modèle GENESIS « Condensacorde » (Figure 4) est une corde virtuelle composée de six segments pouvant se détacher les uns des autres lorsque l'amplitude de ses oscillations devient forte ; chaque segment est en effet connecté à ses voisins par une liaison viscoélastique qui s'interrompt lorsque leur distance est supérieure à un certain seuil.

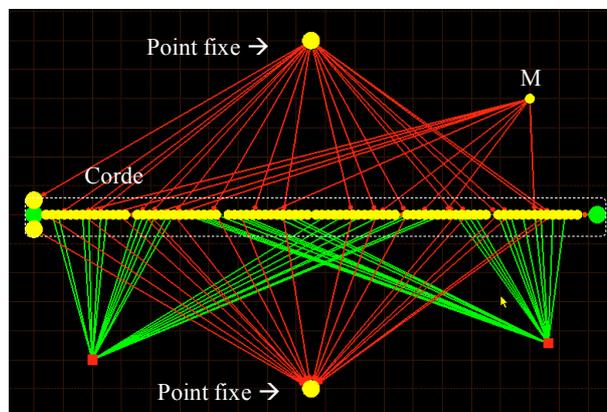


Figure 4. Le modèle « Condensacorde » sur l'établi GENESIS.

Au début de la simulation, la corde est entièrement brisée par une collision avec une masse (M) ; ses segments vont alors commencer à rebondir entre deux points fixes situés de part et d'autre de la position initiale, à une fréquence située dans le domaine macro-temporel. Perdant progressivement leur énergie lors de ces rebonds, ils se connectent à nouveau jusqu'à ce que la corde se reforme finalement.

Ce modèle est pour le moins inhabituel : il ne correspond en effet à aucun instrument acoustique – tout juste peut-on le rapprocher de la famille des maracas en

raison de la présence de « grains » qui s'entrechoquent dans une zone fermée – et il est probablement impossible de construire un tel objet dans le monde réel. En outre, la production du son se fait d'une manière particulière : un événement sonore est produit à chaque fois qu'un segment percute l'un des points fixes ou que deux segments se croisent, se connectent un instant puis se déconnectent à nouveau du fait de leur vitesse propre. À l'exception de la masse provoquant la fragmentation initiale de la corde, ce modèle ne comprend pas d'excitateur à proprement parler ; il produit pourtant une séquence complexe de sons, composée de nombreux événements distincts.

Grâce à l'analyse fonctionnelle que nous avons présentée, on peut donner une représentation complète de la façon dont ce modèle fonctionne, ce qui serait impossible avec les concepts traditionnels issus des instruments acoustiques (Figure 5). Les segments de corde sont des composants de Génération acoustique, qui sont excités par la collision initiale. Les interactions reliant les segments entre eux sont des composants de Modification – plus précisément, ils réalisent une modification structurelle temporaire ; ils sont à l'origine d'une partie des événements sonores produits par le modèle, lorsqu'une connexion est établie ou interrompue.

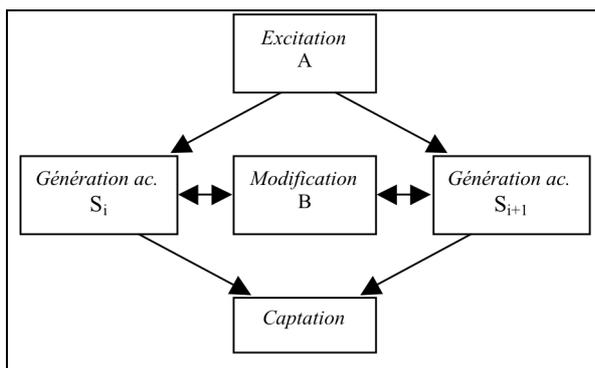


Figure 5. Graphe fonctionnel simplifié du modèle « Condensacorde ». Seuls deux segments de cordes (S_i et S_{i+1}) sont représentés, et les interactions avec les points fixes ont été omises.

5. CONCLUSION

Comme le montre l'exemple du modèle « Condensacorde », l'ontologie des modèles musicaux CORDIS-ANIMA que nous proposons permet de représenter de façon non ambiguë l'organisation structurelle et fonctionnelle d'objets virtuels complexes, n'ayant pas de lien avec les instruments réels et présentant des mécanismes originaux de production sonore. La validation de cette ontologie a été amorcée par l'analyse d'une grande quantité de modèles de ce type, et d'autres plus classiques, ainsi que la création d'une pièce musicale, *Utsikten* (O. Tache, 2007), qui a mis en œuvre ses principes.

Ainsi un ensemble restreint et structuré de concepts fondamentaux nous a permis de construire un système conceptuel qui semble à même de rendre compte, à un niveau physique, des différentes possibilités offertes par CORDIS-ANIMA en matière de création musicale.

Le projet Instrumentarium n'est pas pour autant terminé, puisqu'il reste à concrétiser ce système, en commençant par la réalisation des parties correspondantes dans l'environnement didactique de GENESIS. Par ailleurs, l'Instrumentarium doit maintenant être confronté à la pratique de nombreux utilisateurs sur une période de temps étendue, dans des situations d'apprentissage et de création. C'est en effet la seule manière d'évaluer la pertinence pédagogique et créative d'un système conceptuel de cette portée et de cette complexité, et d'identifier les aspects qui devront être améliorés. La conception de l'Instrumentarium coïncide avec la sortie d'une nouvelle version de GENESIS (G^3). Le nombre potentiel d'utilisateurs s'accroîtra de façon importante avec celle-ci, puisqu'il s'agit d'un environnement multi-plateforme (Windows, Mac OS X, Linux), tandis que la version précédente était uniquement destinée au système d'exploitation IRIX. On peut ainsi s'attendre à ce qu'une importante communauté d'utilisateurs contribue prochainement aux évolutions futures de l'Instrumentarium.

A un niveau plus théorique, nos travaux pourraient ouvrir de nouvelles perspectives pour la modélisation physique dans l'Informatique Musicale. Les différentes méthodes de modélisation disponibles actuellement sont très différentes les unes des autres, étant donné qu'elles ne sont pas basées sur les mêmes notions et les mêmes techniques. Cependant, elles représentent toutes, d'une manière ou d'une autre, des objets physiques virtuels qui ont la même raison d'être : produire des sons et de la musique. Dans ce contexte, construire une ontologie commune à ces méthodes serait une étape décisive pour leur diffusion et pour celle de la modélisation physique en général, dans la mesure où cet outil permettrait de les présenter de façon unifiée et donc plus pédagogique. Par conséquent, nous étudierons très prochainement dans quelle mesure l'ontologie développée pour les modèles CORDIS-ANIMA pourrait être généralisée dans cet objectif.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été soutenus par le ministère de la Culture et de la Communication, et le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

7. REFERENCES

- [1] Cadoz C., Luciani A. et J.L. Florens. Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms: The Cordis System. *Computer Music Journal*, 8(3), p. 60–73, 1984.
- [2] Cadoz, C., A. Luciani et J.L. Florens. CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis – The General

- Formalism. *Computer Music Journal*, 17(1), p. 19-29, 1993.
- [3] Cadoz C., "The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA", a piece entirely generated by physical model", *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Göteborg, Suède, 2002.
- [4] Castagné, N. et C. Cadoz. GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling. *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Göteborg, Suède, 2002.
- [5] Castagné, N. et C. Cadoz. "10 criteria for evaluating physical modelling schemes for music creation". In *Proceedings of the 6th Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03)*, Londres, Royaume-Uni, 2003.
- [6] Castagné, N. et C. Cadoz. GENESIS software paradigm update. *Soumis à l'International Computer Music Conference*, Montréal, Canada, 2009.
- [7] Chafe, C. Case Studies of Physical Models in Music Composition. *Proc. 18th Intl. Cong. Acoustics (ICA)*. Kyoto, Japon, 2004.
- [8] Gruber, T. R. A translation approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2), p. 199-220, 1993.
- [9] Kojs, J., Serafin, S. et C. Chafe. Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications. *Leonardo Music Journal*, 17, 2007.
- [10] Luciani, A. Ordinateur, geste réel, matière simulée. *Les cinq sens de la création : Art, technologie, sensorialité*. Ed. par Borillo M. t A. Sauvageot, Champ Vallon, Seyssel, 1996.
- [11] Smith III, J. O. Physical modeling synthesis update *Computer Music Journal*, 20(2), p. 44-56, 1996.
- [12] Tache, O. et C. Cadoz. Generation of Complex Sound Sequences Using Physical Models with Dynamical Structures. *Proceedings of the International Computer Music Conference*. New Orleans, USA, p. 1-8, 2006.
- [13] Tache, O. *Conception d'un Instrumentarium pour la création musicale à l'aide des modèles physiques CORDIS-ANIMA*. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, October 2008.
- [14] Välimäki, V., Pakarinen, J., Erkut, C. et M. Karjalainen. Discrete-time modelling of musical instruments. *Reports On Progress In Physics*, 69(1), p. 1-78, 2005
- [15] *A Roadmap for Sound and Music Computing, Version 1.0*. Ed. par Serra, X., Leman, M. and G. Widmer. The S2S² Consortium, p. 53, April 2007. <http://www.soundandmusiccomputing.org>

DEFORMATIONS DE STRUCTURES VIBROACOUSTIQUES SIMULATION PAR RESEAUX MASSE-INTERACTION APPLICATION A LA SYNTHESE DE SONS EVOLUTIFS

François Poyer

Laboratoire ICA, INPG
Francois.Poyer@imag.fr

Claude Cadoz

ACROE & Laboratoire ICA, INPG
Claude.Cadoz@imag.fr

RÉSUMÉ

Cet article traite de la modélisation de structures vibrantes, et de leur exploitation musicale, à l'aide de l'environnement de synthèse sonore et de création musicale GENESIS. Basé sur le formalisme CORDIS-ANIMA, l'environnement GENESIS permet de modéliser la matière vibrante de manière discrète, sous forme de réseaux topologiques masse-interaction. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à des réseaux CORDIS-ANIMA ayant de fortes analogies avec des structures réelles - barres, cordes, plaques, membranes - et à la manière de passer continûment d'une structure à une autre en faisant varier certains paramètres du modèle. Une famille de structures aux propriétés modales bien caractérisées a ainsi pu être construite et utilisée dans un contexte musical, notamment en régime d'oscillations auto-entretenues où l'inharmonicité est génératrice d'une grande variété de comportements dynamiques différents. Enfin, la possibilité de passer au cours de la simulation d'une structure à une autre en faisant varier certains paramètres permet de simuler une structure vibrante subissant des déformations au cours du temps, permettant de synthétiser des évolutions sonores caractéristiques du processus physique appliqué.

1. INTRODUCTION

La synthèse sonore par modélisation physique, qui existe depuis maintenant plus de 30 ans, s'est peu à peu imposée comme un moyen très efficace de production de sons naturels à l'écoute. Parmi les différents types de synthèse sonore par modélisation physique, la méthode dite « particulière », développée à l'ACROE et au laboratoire ICA et reposant sur le formalisme masse-interaction CORDIS-ANIMA [1], s'est révélée un procédé au fort potentiel créatif de par la modularité du formalisme utilisé et le grand nombre de paramètres manipulables au sein d'un réseau CORDIS-ANIMA. Travailler au sein de l'environnement GENESIS [2], le logiciel développé par l'ACROE permettant d'utiliser cette approche « particulière », est en outre assez intuitif puisque l'on manipule des inerties, raideurs, frottements..., notions parlantes, même à un non physicien. A l'aide du formalisme CORDIS-ANIMA,

on a donc accès à une infinité de réseaux masse-interaction, tous différents par leurs comportements et les sons qu'ils vont produire. Néanmoins, comme pour tout procédé de synthèse proposant un vaste espace de champs sonores possibles, il peut être difficile pour le néophyte de savoir quel est l'effet produit sur le son lorsqu'il change tel ou tel paramètre de son modèle. Il est donc nécessaire de trouver des modèles de référence correspondant à des familles de sons pertinentes pour l'oreille, permettant de structurer la modélisation, ou du moins de constituer des repères par rapport auxquels il sera plus facile d'analyser un modèle quelconque.

L'étude présentée ici s'inscrit dans cette optique et vise au développement de modèles physiques de structures vibrantes ayant de fortes analogies avec des structures réelles. Le moyen de passer continûment - en faisant varier certains paramètres continûment - d'une structure à l'autre est envisagé et l'influence sur les propriétés modales de la structure est analysée. De plus ce processus permettant de passer d'une structure à une autre est d'autant plus pertinent pour les sons résultants qu'il a de fortes analogies avec des processus physiques réels. On peut alors imaginer de l'appliquer de manière dynamique, au cours de la simulation et de l'extrapoler à d'autres réseaux CORDIS-ANIMA.

2. LA MODELISATION PHYSIQUE AVEC LE FORMALISME CORDIS-ANIMA

2.1. Le formalisme CORDIS-ANIMA

Le formalisme CORDIS-ANIMA sur lequel repose la synthèse sonore par modèle physique « particulière » permet de construire des objets sous forme de réseaux de modules élémentaires reliés les uns aux autres. On en distingue deux grandes catégories : les modules <MAT> qui correspondent à des points matériels ayant par exemple une inertie (module MAS), et des modules <LIA> représentant l'interaction s'établissant entre deux modules <MAT>. Ces interactions seront par exemple des élasticités (module RES), viscosités (module FRO) ou des interactions non-linéaires (modules BUT et LNL). Ainsi, à l'aide de ce formalisme, il est possible de construire une infinité de réseaux masse-interaction

différents qui correspondent en quelque sorte à une vision discrète, spatialement et temporellement, des lois de la physique. Le principal avantage de ce langage est sa cohérence puisque par exemple, la manière d'indiquer une interaction entre deux modèles construits avec CORDIS-ANIMA va être la même que celle utilisée pour construire ces deux modèles. Dans les deux cas, on utilisera des modules <LIA>. Ainsi, il est possible de produire très simplement des modèles de plus en plus complexes en faisant interagir entre eux des modèles plus élémentaires.

2.2. Comment aborder la modélisation avec le formalisme CORDIS-ANIMA ?

2.2.1. Que nous disent nos oreilles ?

Comme pour toute technique de synthèse, le moyen d'obtenir avec CORDIS-ANIMA un type particulier de phénomène sonore, entendu ou imaginé, n'est pas forcément facile à trouver. Se pose d'abord la question de savoir selon quels critères d'analyse on caractérise ce son et ensuite comment relier cette analyse au formalisme utilisé pour la synthèse. Un type d'analyse largement répandu est celui faisant appel au spectrogramme. Il peut sembler légitime puisqu'il a été montré que la membrane basilaire, située dans notre oreille interne, était une sorte d'analyseur qui faisait correspondre à une fréquence reçue, un groupe précis de neurones à travers lesquels l'information se propage jusqu'à notre cerveau. Mais cet organe n'est qu'un maillon de la chaîne constituant notre système auditif, qui est bien plus qu'un analyseur de spectre. Ainsi, comme l'a dit Jean-Claude Risset [14] en citant la théorie écologique de Gibson, lorsque l'on perçoit un son, les informations captées par notre oreille vont être intégrées beaucoup plus dans un but de reconnaissance d'un objet et d'un processus physique générateur de ce son que pour connaître toutes les fréquences contenues dans son spectre. C'est pour cela que des techniques de synthèse s'attachant à simuler le comportement de la source d'un son vont permettre d'obtenir aisément des sons jugés naturels à l'écoute car notre oreille reconnaît dans la conséquence - le son - la cause qui l'a produite - le processus physique générateur. Ainsi une description d'un son en termes de corps vibrant, de geste générateur d'énergie, de processus physique d'excitation... sera adaptée à ces techniques.

2.2.2. Un pont entre la structure vibrante et le son : l'analyse modale

Néanmoins, ce que notre perception reconnaît comme une hauteur ou un timbre reste dans une large mesure lié aux fréquences des vibrations constituant, au cours du temps, le son entendu. Il n'est donc pas question de nier l'utilité certaine de la vision « spectrale » des sons en musique. Mais comment tenir compte de celle-ci avec une approche de synthèse par modèles physiques ? Un outil qui va se révéler fort utile est l'analyse/synthèse

modale qui permet de réaliser un pont entre la vision « spectrale » des sons et la structure matérielle à l'origine de ce son puisqu'une structure vibrante va avoir des modes de vibration privilégiés à des fréquences données. Il est ainsi possible de réaliser l'analyse modale d'une structure vibrante, qui peut ensuite être reliée, dans certains cas simples d'excitation, aux composantes fréquentielles du son obtenu. A l'inverse, le spectrogramme d'un son peut nous renseigner sur les caractéristiques modales de la structure vibrante qui l'a engendré et sur comment elle l'a engendré, même si remonter, à partir d'un enregistrement sonore, à la structure vibrante et à l'excitation reste une chose extrêmement difficile voire impossible.

2.2.3. Différentes approches pour la modélisation avec le logiciel GENESIS

La figure 1 schématise différentes approches et techniques possibles lorsque l'on veut obtenir un son d'un type donné avec le langage CORDIS-ANIMA. Il est évident que celle-ci est loin d'être exhaustive et que d'autres approches existent.

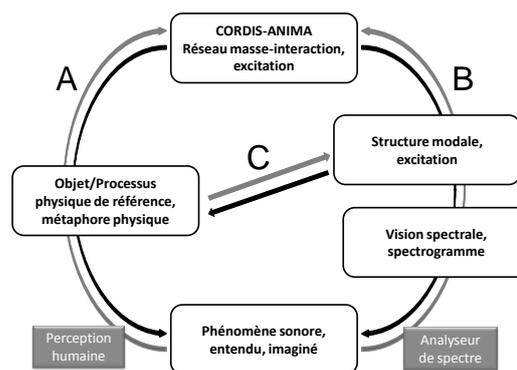


Figure 1. Différents moyens de passer du phénomène sonore au modèle CORDIS-ANIMA et vice-versa.

Le chemin B (aller et retour) correspond à ce qui a été décrit ci-dessus, c'est-à-dire le lien entre le phénomène sonore et le modèle CORDIS-ANIMA via la structure modale. Des recherches ont été menées sur ce sujet au laboratoire ICA, notamment comment associer à toute structure modale donnée un réseau CORDIS-ANIMA [17]. Le chemin A correspond à une méthode de modélisation reposant sur l'analyse auditive du son en terme d'objets (peau, corde, barre en métal...) et de processus physiques (percutée, frottée, grattée, pincée...), voire de métaphores physiques. Rappelons que ce ne sont pas les uniques chemins que l'on peut emprunter lorsque l'on pratique la modélisation physique avec le langage CORDIS-ANIMA. Par exemple, des chemins hybrides peuvent exister (mélanges entre A et B, passage par le chemin C) et l'on peut très bien envisager un phénomène sonore directement sous forme d'une structure CORDIS-

ANIMA (sans passer par des considérations fréquentielles ou physiques), basée sur notre expérience de modélisation avec ce langage. De manière générale, les chemins décrits à la figure 1 relèvent d'une approche analytique alors que, comme Olivier Tache le précise dans sa thèse [16] on peut envisager une approche structurelle de la modélisation.

Dans cet article, nous employons un chemin hybride puisque nous partons de la modélisation de structures physiques réelles (flèches grise du chemin A) (cordes, barres, membranes, plaques,...) et analysons les rapports qu'elles entretiennent au niveau de leurs caractéristiques modales. A partir de là il est possible, en faisant varier certains paramètres du modèle, de passer continûment d'une structure à l'autre. On obtient alors une famille de structures dont les propriétés modales sont caractérisées. De plus, comme dit précédemment, la manière de modifier les paramètres du modèle est analogue à un processus physique réel, ce qui assure un certain réalisme des structures intermédiaires et donc une certaine plausibilité des sons obtenus lorsque l'on applique notre processus de transformation.

3. « EPAISSIR » UN RESEAU CORDIS-ANIMA

3.1. Modèles de cordes et de barres

3.1.1. Le chapelet de masses

L'un des modèles les plus utilisés par les pratiquants du logiciel GENESIS est celui du chapelet de masses reliées par des viscoélasticités et attaché ou non à ses extrémités. Ce modèle permet de représenter une corde, que l'on va ensuite pouvoir percuter, pincer, frotter... L'influence sur les modes de la discrétisation spatiale de notre corde implique qu'elle n'est pas harmonique, les fréquences des modes étant données par¹ :

$$f_n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \left| \sin\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right) \right|, \quad (1)$$

pour un chapelet attaché aux deux bouts contenant N masses de valeur d'inertie M reliées par des ressorts d'élasticité K . n est l'indice du mode. On vérifie que pour $n \ll N$, l'approximation $\sin(x) \approx x$ redonne des fréquences multiples du fondamental f_1 . Il sera donc nécessaire d'utiliser un nombre de masses suffisant si l'on veut obtenir une structure dont les premiers modes sont approximativement en distribution harmonique. Par exemple, le tableau ci-dessous donne les fréquences des

cinq premiers modes d'une corde de 31 masses, rapportées à la fréquence fondamentale.

mode	1	2	3	4	5
f_n/f_1	1,000	1,998	2,990	3,976	4,952

Tableau 1. Fréquences des cinq premiers modes d'une corde de 31 masses.

3.1.2. Modèle de barre en flexion

Lors de sa modélisation, on néglige les efforts internes résultant de la flexion de la corde au cours de son mouvement car ils sont d'un ordre de grandeur beaucoup plus faible que les efforts dus à la tension de la corde. Imaginons maintenant que nous accroissions le diamètre de sa section. Les efforts de flexion ne sont plus négligeables et doivent être pris en compte. Supposons même qu'ils sont beaucoup plus importants que les efforts de tension : nous nous trouvons dans le cas théorique de la barre en flexion.

Au contraire de la corde, les modèles de barre réalisés avec CORDIS-ANIMA sont extrêmement peu nombreux. En réalité, une seule étude a été précédemment réalisée sur ce thème par Pirouz Djoharian et Jean-Loup Florens qui utilisait deux couches de chapelets masse-ressort en interaction [4]. Une autre approche a été utilisée dans cette étude, en essayant de traduire sous forme de réseau CORDIS-ANIMA un modèle souvent employé pour expliquer le comportement d'une barre en flexion, décrit par exemple dans [7] et schématisé sur la figure 2(b) ci-dessous.

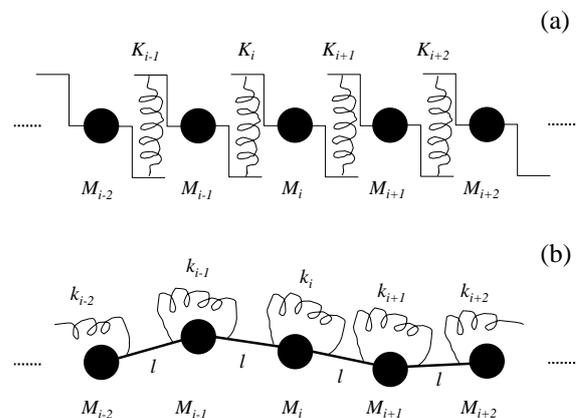


Figure 2. (a) Chapelet masse-ressort tel que celui utilisé dans GENESIS pour modéliser une corde. (b) Modélisation discrète d'une barre vibrante en flexion.

En (a), nous avons rappelé le formalisme suivant lequel s'effectue la modélisation dans GENESIS sur l'exemple du chapelet masse-ressort. Les masses M_i , dont le mouvement s'effectue verticalement, sont reliées par des ressorts en élongation d'élasticité K_i . Dans ce cas, le

¹ Il est à noter que l'on a considéré ici uniquement la discrétisation spatiale pour le calcul des fréquences. La discrétisation temporelle intrinsèque à la simulation améliore l'harmonicité, d'autant plus que l'élasticité est grande. On peut même obtenir une structure parfaitement harmonique (cf. [10] p.113), mais l'on est alors confronté à des problèmes de divergence de l'algorithme de simulation.

déplacement u_i de la masse M_i dépend de celui des masses M_{i-1} et M_{i+1} via l'équation :

$$M_i \ddot{u}_i = -K_{i+1}(u_i - u_{i+1}) - K_i(u_i - u_{i-1}) \quad (2)$$

Pour le modèle discret d'une barre vibrant en flexion, en (b), les masses M_i sont reliées par des tiges rigides de longueur l . Chaque tige est en interaction avec ses voisines via des ressorts en rotation, d'élasticité k_i . Supposons maintenant que la masse M_i effectue un déplacement vertical u_i toutes les autres masses restant immobiles. Ce déplacement implique un changement de l'angle que font, avec l'horizontale, les deux tiges reliées à la masse, ce qui implique une extension ou une compression des ressorts en $i-1$, i et $i+1$. De plus, l'expression de la force provenant du ressort en i met en jeu les déplacements en $i-1$, i et $i+1$. En conséquence, le déplacement u_i de la masse M_i va dépendre de celui des masses M_{i-2} , M_{i-1} , M_{i+1} et M_{i+2} selon (avec $l=1$) :

$$M_i \ddot{u}_i = 2k_i(u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i) - k_{i+1}(u_{i+2} + u_i - 2u_{i+1}) - k_{i-1}(u_i + u_{i-2} - 2u_{i-1}) \quad (3)$$

L'idée est donc de trouver un réseau CORDIS-ANIMA qui possède la même équation du mouvement pour la masse M_i . Puisqu'il faut que les déplacements u_{i-2} et u_{i+2} interviennent, on peut envisager un réseau tel que celui représenté sur la figure 3 ci-dessous, où la masse M_i est reliée par des ressorts aux masses M_{i-2} , M_{i-1} , M_{i+1} et M_{i+2} .

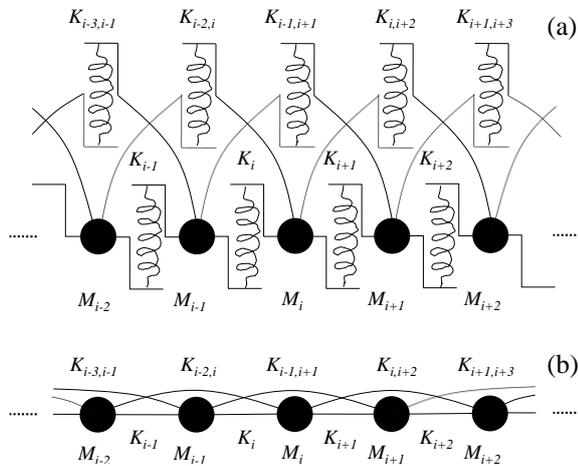


Figure 3. (a) Réseau CORDIS-ANIMA pour la modélisation d'une barre. (b) Représentation simplifiée du réseau.

L'équation pour la masse M_i est alors :

$$M_i \ddot{u}_i = -K_i(u_i - u_{i-1}) - K_{i+1}(u_i - u_{i+1}) - K_{i-2,i}(u_i - u_{i-2}) - K_{i,i+2}(u_i - u_{i+2}) \quad (4)$$

L'identification entre les paramètres d'élasticité du modèle de la figure 2(b) et ceux de la figure 3 nous donne :

$$\begin{aligned} K_{i-2,i} &= -k_{i-1} & K_{i,i+2} &= -k_{i+1} \\ K_i &= 2(k_{i-1} + k_i) & K_{i+1} &= 2(k_i + k_{i+1}) \end{aligned} \quad (5)$$

ce qui permet de modéliser une barre de section variable. Dans le cas d'une barre homogène à section fixe ($k_i=K$), on obtient $K_i=K_{i+1}=4K$ et $K_{i-2,i}=K_{i,i+2}=-K$. Il est à noter que ces résultats sont compatibles avec la discrétisation de l'équation aux dérivées partielles de la barre homogène (vision continue), qui relie la dérivée seconde en temps du déplacement à sa dérivée quatrième en espace. En effet, la discrétisation de la dérivée seconde en espace d'une fonction f donne à une constante près :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Rightarrow f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}, \quad (6)$$

d'où pour une dérivée quatrième du déplacement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \Rightarrow & (u_{i+2} - 2u_{i+1} + u_i) - 2(u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}) \\ & + (u_i - 2u_{i-1} + u_{i-2}) = 4(u_i - u_{i+1}) + 4(u_i - u_{i-1}) \\ & - (u_i - u_{i+2}) - (u_i - u_{i-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

On voit apparaître dans la dernière expression des termes d'élasticité positive et négative en rapport 4, comme obtenu ci-dessus.

Il reste enfin à modéliser les conditions en bout de barre. Dans [6] sont abordées trois type de conditions aux limites : extrémité libre, extrémité en appui, extrémité encadrée. La figure suivante récapitule la modélisation de ces trois conditions dans le cas de la barre homogène.

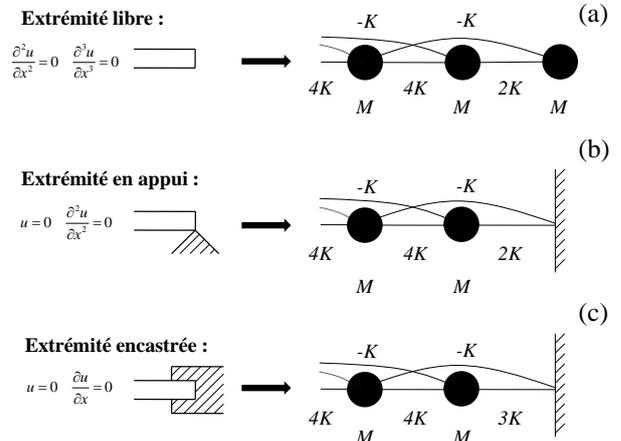


Figure 4. Modélisation sous forme de réseaux CORDIS-ANIMA de trois conditions aux limites classiques de la barre en flexion (représentation simplifiée) : (a) Extrémité libre. (b) Extrémité en appui. (c) Extrémité encadrée.

Il est ainsi possible de modéliser une barre et les conditions à chacune de ses extrémités, conditions qui vont avoir un impact sur les modes de vibration de cette dernière. Cette modélisation est en outre compatible avec la vision continue. En effet par exemple d'après [6] les

modes de la barre continue en appui à ses deux extrémités ne suivent pas une loi harmonique mais parabolique, ce que l'on retrouve bien avec notre modèle (cf. tableau 2 ci-dessous pour un modèle de barre contenant 124 masses).

mode	1	2	3	4	5
f_n/f_1	1,000	3,999	8,996	15,98	24,97

Tableau 2. Fréquences des cinq premiers modes d'un modèle CORDIS-ANIMA de barre en appui sur ses extrémités contenant 124 masses. On observe une loi parabolique.

3.1.3. De la corde à la barre

On ne va considérer, pour simplifier, que des structures homogènes dans ce paragraphe. Après avoir vu comment modéliser une corde et une barre en flexion avec le formalisme CORDIS-ANIMA, il peut être intéressant, vue leur proximité topologique, de construire des modèles hybrides à mi-chemin entre ces deux modèles de référence. En effet, qu'est-ce qui différencie une corde d'une barre ? C'est l'origine de l'énergie potentielle associée aux vibrations de la structure. Pour la première, nous avons affaire à une structure tendue dont on a négligé l'élasticité alors que pour la deuxième, aucune tension n'est considérée et les vibrations sont uniquement dues à l'élasticité de la structure. Un modèle hybride apparaîtra donc comme une structure plus ou moins tendue, possédant une certaine élasticité. Les modèles de corde et de barre sont en fait des cas limites de cette structure. La figure 5 récapitule la manière de construire une telle structure hybride avec le formalisme CORDIS-ANIMA. Il est à noter que les élasticités négatives auront leur module compris entre 0 et le quart de l'élasticité positive K .

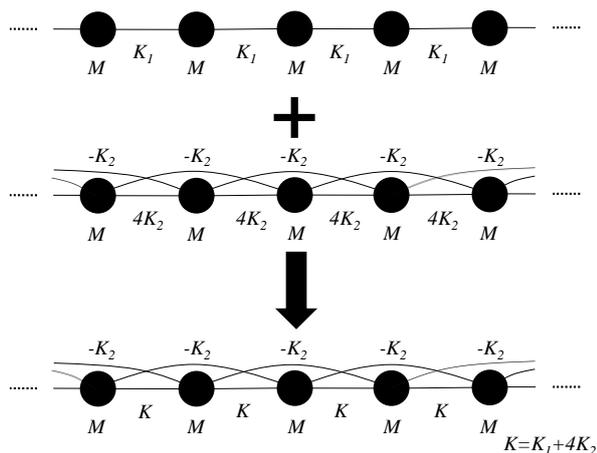


Figure 5. Construction d'un modèle de structure linéique tendue et élastique, hybride entre corde et barre.

On a donc obtenu toute une famille de structures, allant du modèle idéal de corde à celui de la barre, dont les propriétés modales seront analysées au 4.

3.2. Généralisation du procédé à d'autres réseaux CORDIS-ANIMA

Le procédé employé pour passer d'un modèle de corde à celui d'une barre en ajoutant des élasticités négatives au chapelet masse-ressort (qualifié d'« épaissement » de la structure), aboutit à un étalement fréquentiel des modes du chapelet, tout en gardant une structure homogène et des déformées modales voisines de celles du modèle de corde. Il est envisageable de généraliser ce procédé à toute structure construite avec le formalisme CORDIS-ANIMA.

3.2.1. De la membrane à la plaque

Un autre modèle couramment utilisé est celui représentant une membrane rectangulaire tendue uniformément, constitué d'un réseau carré de masses en interaction via des viscoélasticités (cf. figure 6). Voyons comment le procédé d'« épaissement » va s'appliquer à ce modèle.

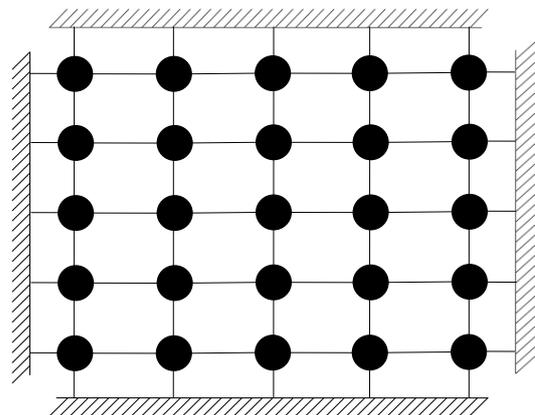


Figure 6. Réseau CORDIS-ANIMA correspondant à une membrane tendue uniformément (représentation simplifiée).

Il est tentant d'appliquer directement ce que nous avons fait pour la barre selon les horizontales et les verticales du réseau. Mais il faut noter que l'on doit normalement obtenir de la sorte un modèle de plaque rectangulaire. En outre nous avons remarqué à la section précédente que le modèle de barre pouvait se retrouver directement par une discrétisation de l'équation aux dérivées partielles (équation (7)) de la barre continue. Pour une plaque, le terme spatial de l'équation aux dérivées partielles donne pour une plaque rectangulaire homogène et isotrope [3] :

$$K \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right) \quad (8)$$

Il faut ainsi prendre en compte en plus un terme de dérivées croisées. La figure 7 présente le moyen d'obtenir, avec des réseaux CORDIS-ANIMA, les différents termes de (8) ce qui permet finalement de construire une plaque rectangulaire. Il est à noter qu'il est aussi possible avec cette approche d'envisager des modèles non homogènes et non isotropes.

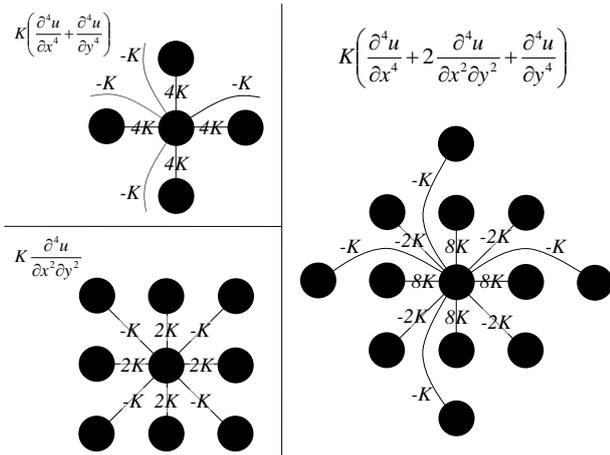


Figure 7. Traduction sous forme de réseau CORDIS-ANIMA des différents termes de (8). Pour plus de clarté, on n'a représenté que les liaisons partant de la masse centrale.

On retrouve alors bien avec notre modèle les modes obtenus avec la vision continue (cf. figure 8).

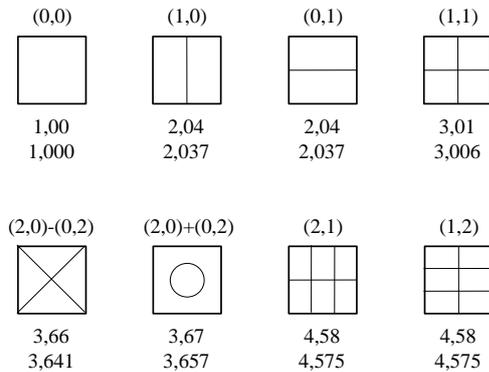


Figure 8. Huit premiers modes d'une plaque carrée homogène et isotrope, encadrée à sa périphérie, d'après [6]. Les nœuds des déformées modales ont été marqués en traits fins. Sous chaque mode sont indiquées la fréquence du mode en vision continue puis la fréquence du mode du modèle de plaque réalisé avec un réseau CORDIS-ANIMA de 31 masses par 31 masses (fréquences rapportées à celle du mode fondamental).

De même qu'en 3.1.3, on peut imaginer toute une palette de structures se situant entre le modèle de membrane et celui de plaque, correspondant à une plaque plus ou moins tendue ou à une membrane plus ou moins élastique.

3.2.2. « Épaississement » d'autres structures vibrantes CORDIS-ANIMA

Nous avons donc vu comment passer d'une structure tendue à une structure élastique pour des réseaux linéiques (1D) et surfaciques (2D). La grande majorité des structures construites dans GENESIS dérivent de celles-ci. Par exemple, « épaissir » un réseau contenant des interactions non-linéaires à la place d'interactions élastiques ne pose pas de problèmes particuliers. On peut ensuite envisager des réseaux de dimensions supérieures (3D, 4D...) en généralisant (8) au nombre de dimensions voulu. La propriété d'étalement des fréquences des modes reste, bien qu'il soit plus difficile d'appréhender ces réseaux avec une vision basée sur la physique.

4. ET LA MUSIQUE DANS TOUT ÇA ?

Nous allons maintenant voir comment tirer profit, dans un contexte musical, des caractéristiques des objets dont nous venons de parler.

4.1. Evolution des modes d'une structure

Considérons tout d'abord un modèle CORDIS-ANIMA de structure tendue/élastique - telle que celle représentée à la figure 5 - dont les ressorts négatifs ont une élasticité dont on peut changer la valeur (entre 0 et le quart des élasticités positives). Une telle structure est représentée à la figure 9 ainsi que l'évolution des fréquences de ses modes de vibration.

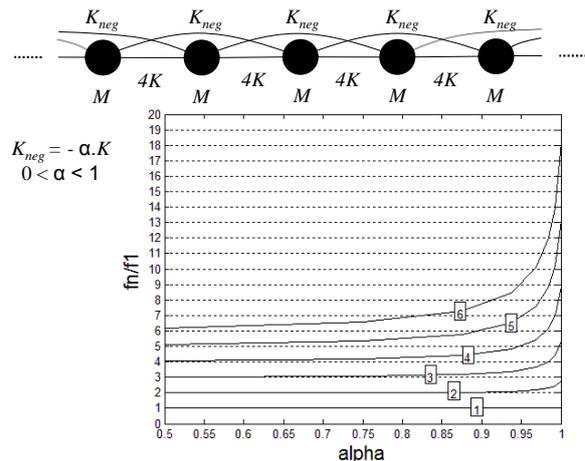


Figure 9. Modèle de structure tendue/élastique. Evolution des fréquences des modes de vibration de la structure en fonction du paramètre α . Pour $\alpha=1$ la structure se comporte comme une barre encadrée à ses deux extrémités.

Nous pouvons voir que lorsque le paramètre α décroît, on tend assez rapidement vers une structure harmonique. Pratiquement, on peut considérer que pour α inférieur à 0,5 les premiers modes sont en distribution harmonique. Il est à remarquer que pour une évolution progressive du paramètre α de la valeur 1 à 0, la structure peut être vue comme un objet qui perd progressivement ses propriétés élastiques au profit d'efforts de tension, un peu comme si l'on avait une barre qui sous l'effet d'une traction subissait une diminution forte de sa section tendant ainsi vers une corde. Un modèle CORDIS-ANIMA utilisant des ressorts négatifs non-linéaires a été développé, qui permet de faire varier le paramètre α au cours du temps et donc de passer progressivement d'une barre à une corde au cours de la simulation. La figure 10 présente le spectrogramme du son calculé lorsque l'on simule cette structure, pincée par un plectre.

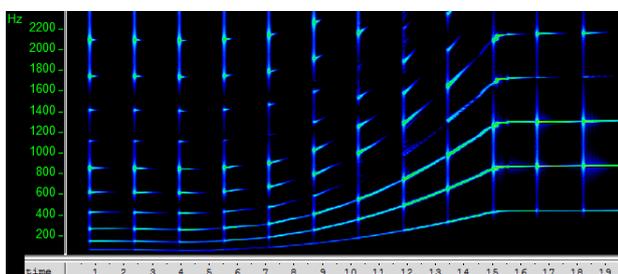


Figure 10. Spectrogramme du son calculé d'un modèle de structure tendue/élastique, pincée à intervalles réguliers, et passant progressivement de l'état « barre » à l'état « corde ».

Les barres verticales du spectrogramme correspondent à l'impulsion donnée à chaque passage du plectre. On observe que le spectre des premiers sons est clairement inharmonique, puis progressivement le fondamental croît en fréquence car en moyenne, la valeur des élasticités des ressorts du modèle croît (puisque les élasticités négatives décroissent). On remarque enfin que les derniers sons ont un spectre harmonique. A l'oreille, on entend des sons de type corde pincée. Il est à noter que l'évolution du modèle au cours de cet exemple ne représente pas un processus physique que l'on pourrait rencontrer dans la réalité puisque cela correspondrait à une barre qui voit son rayon diminuer jusqu'à former une corde. Néanmoins, à l'écoute, l'évolution du son reste caractéristique du processus opéré : on a l'impression d'une structure relativement massive au début pour terminer sur une structure extrêmement « frêle ».

Un autre modèle, subissant des variations continues de paramètres, cette fois-ci analogues à un processus physiquement réalisable, est celui de la corde élastique tendue progressivement. Le modèle est celui de la structure hybride de la figure 5 et dont le paramètre K_1 va évoluer dans une gamme allant de 0 à une valeur très supérieure à K_2 . La figure 11 présente le modèle et le spectrogramme obtenu, toujours dans le cas où la structure est pincée.

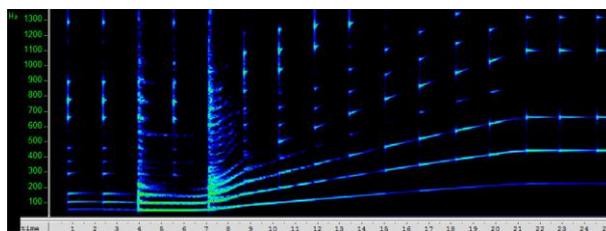
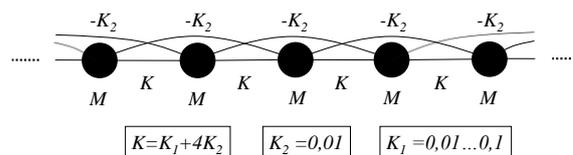


Figure 11. Spectrogramme du son calculé d'un modèle de corde élastique, pincée à intervalles réguliers, et tendue progressivement.

De même que précédemment, on passe de sons inharmoniques à des sons harmoniques. Néanmoins cette fois-ci, le paramètre qui varie est celui correspondant à la tension de la corde. A l'écoute, on a l'impression d'une corde pincée qui est progressivement tendue jusqu'à obtenir environ un La3. Les élasticités négatives jouent un rôle relativement important particulièrement dans les sons graves permettant de simuler de manière plausible des structures qui sont peu tendues.

Finalement, l'écoute des sons obtenus à l'aide de ces modèles permet de reconnaître d'une part les caractéristiques, et d'autre part l'évolution des caractéristiques des structures utilisées.

Nous allons maintenant voir dans la partie suivante comment la structure modale influe sur l'établissement de régimes auto-oscillants pour les modèles vus précédemment.

4.2. Applications pour des régimes auto-oscillants

Nous nous intéressons dans ce paragraphe à l'étude des structures précédentes en régime d'oscillations auto-entretenues, c'est-à-dire des oscillations analogues à celles observées pour les cordes frottées ou dans les instruments à anche. Il n'est bien évidemment pas question de refaire la théorie de tels régimes d'oscillations (cf. par exemple [3] et [8]) mais de rappeler les grandes caractéristiques de ceux-ci afin de voir comment les mettre à profit pour les structures précédentes, dans un contexte musical.

De manière générale, l'établissement d'auto-oscillations, nécessite une source d'énergie continue reliée à une structure vibrante via une interaction non-linéaire. Par exemple, pour une corde frottée, la source d'énergie sera le mouvement de translation que l'instrumentiste imprime à l'archet, la structure vibrante sera la corde de l'instrument et l'interaction non-linéaire est celle qui a lieu entre les crins de l'archet et la corde. Ce type d'interaction a largement été étudié [11] [12] et peut être modélisée notamment par une force dépendant

de la différence de vitesse archet-corde. Via le module LNL (liaison non-linéaire) de CORDIS-ANIMA, il est possible de reproduire une telle interaction et donc de simuler avec GENESIS un archet frottant une structure vibrante. Il est à noter que nous avons pris l'exemple de la corde frottée mais que les considérations précédente sont très générales et s'appliquent aussi bien aux instruments à anche via des analogies « force exercée par l'archet/vitesse de l'air entrant » et « différence de vitesse archet-corde/différence de pression amont-aval de l'anche ».

Selon les caractéristiques modales de la structure vibrante, il va être plus ou moins facile d'obtenir un son stable et riche lorsqu'elle est le siège d'oscillations auto-entretenues. En effet, une des caractéristiques du régime auto-oscillant est que les composantes spectrales du son produit sont en distribution harmonique. Ceci vient de la condition appliquée au niveau de l'archet, c'est-à-dire une vitesse constante ou tout du moins des variations de vitesse très faibles par rapport à celles de la structure vibrante. De ce fait les modes propres de la structure doivent « s'organiser » afin de répondre à cette condition au niveau du point de contact avec l'archet, c'est-à-dire que même pour une structure modale inharmonique, certains modes modifieront plus ou moins leur fréquence d'oscillation afin d'obtenir un mouvement de vibration comportant uniquement des composantes harmoniques. Bien évidemment, plus la structure sera inharmonique et plus il sera difficile de trouver une série de modes à peu près compatibles et les sons obtenus peuvent alors ne posséder qu'une ou deux composantes fréquentielles, ou le régime peut être plus ou moins chaotique, le système n'arrivant pas à se stabiliser sur un régime particulier d'oscillations. C'est ce qu'ont d'ailleurs montré certaines études expérimentales et simulations numériques sur les barres frottées : par exemple celles de Essl et Cook [5] ou celles de Inacio, Henrique et Antunes [9]. Il n'est pas question ici de s'attaquer au problème théorique de l'établissement de tel ou tel régime en fonction de l'interaction non-linéaire et de la structure modale, (problème faisant intervenir la théorie des systèmes dynamiques et faisant encore actuellement l'objet de recherches, voir par exemple [8]) mais, plus pragmatiquement, d'observer les différents régimes d'oscillations produits sur nos structures lorsqu'on les « frotte » et que l'on fait varier leurs caractéristiques modales, afin d'envisager leur intérêt musical.

A la figure 12, nous pouvons voir le spectrogramme du son obtenu lors de la simulation d'un modèle de structure tendue/élastique (cf. figure 9) frottée dont on fait varier le paramètre α . Au début du son, ses caractéristiques modales correspondent à celles d'une barre encastrée à ses deux extrémités et progressivement elles tendent vers celles d'une corde attachée aux deux bouts.

Plus précisément, les fréquences des modes de cette structure sont données dans le tableau 3 pour trois valeurs différentes de α .

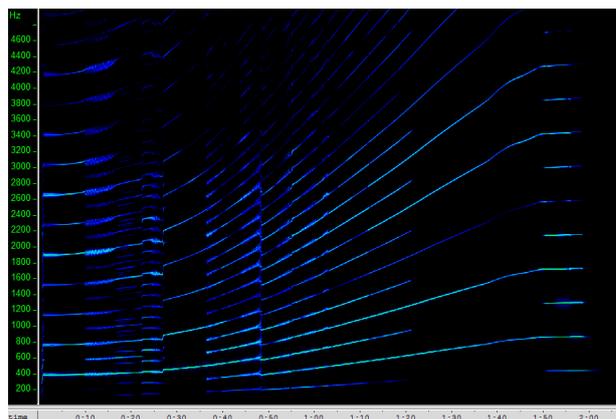


Figure 12. Spectrogramme du son calculé d'un modèle de structure tendue/élastique frottée régulièrement et dont on fait varier le paramètre α .

mode	Fréquences (Hz)		
	$\alpha = 1$	$\alpha = 15/16$	$\alpha = 0$
1	45	122	435
2	125	255	870
3	245	409	1304
4	403	588	1736
5	599	796	2165
6	830	1033	2591

Tableau 3. Fréquences des six premiers modes du modèle de structure tendue/élastique pour trois valeurs de α .

Si l'on suit l'évolution du son au cours du temps sur le spectrogramme de la figure 12, nous pouvons voir qu'au début du son, c'est-à-dire pour $\alpha = 1$, le système se stabilise sur un régime harmonique d'oscillations ayant un fondamental à environ 400Hz, ce qui correspond à l'excitation des modes 4 et 6 de la structure. Ceci est dû en grande partie au fait que la structure est fortement inharmonique et qu'il est plus difficile de construire une série à peu près harmonique avec les modes inférieurs. Puis, dans la zone temporelle située entre 10 et 30 secondes, le signal est très bruité et l'on peut remarquer que le système oscille entre un régime où la composante autour de 400Hz correspond à une harmonique deux et un autre où elle serait l'harmonique trois. En effet, dans cette zone, la structure a un mode 2 entre 150 et 200 Hz et un mode 3 vers 300Hz. On peut donc envisager soit la série [150, 300, 450,...] soit [200, 400,...] d'où l'instabilité. Lorsque $\alpha = 15/16$, c'est-à-dire dans cet exemple vers 30 secondes, on peut déjà envisager d'obtenir une distribution harmonique à partir des modes 1, 2 et 3 de la structure. C'est ce que l'on observe à partir de la seconde 35, où une oscillation de Helmholtz se met en place mais est perturbée par l'évolution des modes de la structure. A l'écoute, on entend une sorte de vibrato puis réarrangement des fréquences des modes pour donner lieu à un nouveau régime de Helmholtz (entre les

secondes 45 et 50). Il est de plus à noter que de manière générale, le mode sur lequel va se fixer l'oscillation est peu prévisible. Ainsi, entre la seconde 30 et la fin du son, on obtiendra différents régimes d'oscillations ayant pour fondamental le mode trois, deux ou un. Ce fait dépend bien évidemment des caractéristiques d'excitation de la structure (fonction non-linéaire employée, point d'excitation sur la structure, vitesse de l'excitateur) mais ne dépend pas par contre de la vitesse du processus par lequel α évolue.

Le modèle de la corde élastique progressivement tendue, présenté à la figure 11 peut aussi être utilisé en régime auto-oscillant. Le spectrogramme du son obtenu est reproduit à la figure 13.

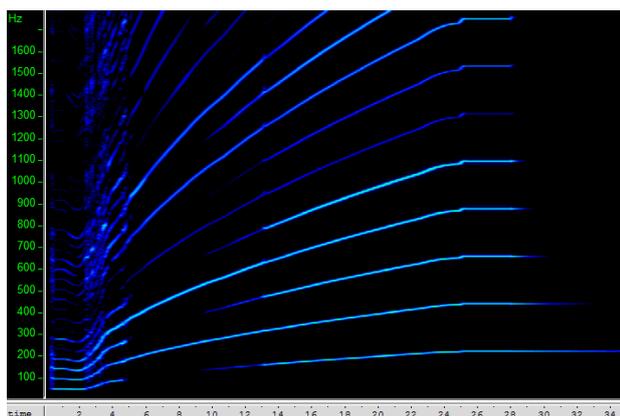


Figure 13. Spectrogramme du son calculé d'un modèle de corde élastique, frottée régulièrement, et tendue progressivement.

Nous pouvons voir que, comme on s'y attend, le fait d'imprimer une tension de plus en plus forte sur la corde implique une élévation de la note. De plus, à l'écoute, on entend le mouvement de Helmholtz démarrer à partir de la seconde 12, d'abord assez rugueux, puis de plus en plus clair. On obtient ainsi une palette de sons de corde frottée, plus ou moins rugueux selon le degré d'harmonicité des modes de la structure. Il est à remarquer que la plausibilité du son n'est pas forcément la meilleure lorsque l'on est à la valeur de tension maximale (donc lorsque la structure est la plus harmonique).

L'étude réalisée sur ces deux modèles dans le cas d'oscillations auto-entretenues a révélé une variété importante de régimes d'oscillations dont les caractéristiques peuvent être mises à profit dans un contexte musical. Bien sûr, surtout lorsque l'inharmonicité est importante, certains régimes instables peuvent ne pas être plaisants à l'oreille et la quasi-imprévisibilité de ceux-ci peut paraître réhébitorie. C'est d'ailleurs pour cela que dans la quasi-totalité des instruments de musique réels à oscillations auto-entretenues, le résonateur a des modes de vibration harmoniques, pour des raisons de facilité de jeu et de

stabilité du timbre. Néanmoins, dans un contexte de synthèse numérique en différé, si l'on perd l'expressivité et l'intention de l'instrumentiste, on a en revanche la précision de la machine qui permet d'exploiter, à des échelles plus petites, des modèles qui peuvent paraître instables sur une échelle plus grande de paramètres.

Enfin, il est à remarquer que les modèles présentés ici correspondent à une version très épurée d'un instrument de musique et peuvent par conséquent paraître « arides ». Il est possible, toujours en s'inspirant des instruments réels, de rajouter des éléments jouant sur les qualités musicales des sons obtenus, par exemple une structure jouant le même rôle que la caisse de résonance d'un violon. Le spectrogramme présenté à la figure 14 est celui d'un son produit par une des structures présentées dans cet article, qui passe donc d'une distribution modale inharmonique à harmonique au cours de la simulation et qui en outre est couplée avec un modèle de plaque résonnante (tel que celui de la figure 7).

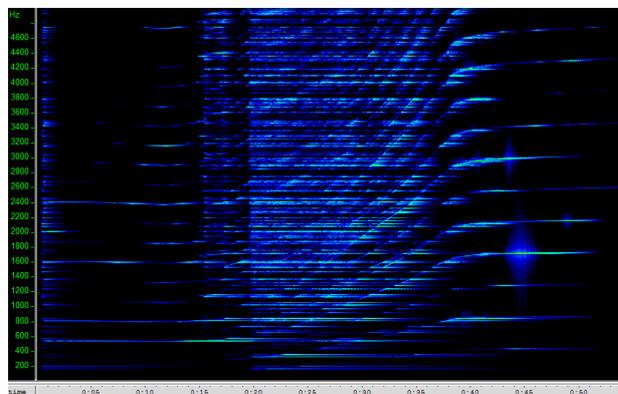


Figure 14. Spectrogramme du son calculé d'un modèle de structure tendue/élastique frottée, couplée à une plaque résonnante.

Dans cet exemple, l'évolution de l'harmonicité de la structure implique des changements de régimes auto-oscillants, comme ceux que l'on a vus plus haut, ce qui amène une certaine dynamique au son. La plaque résonnante, quant à elle, a un rôle d'« homogénéisation » du timbre. On peut remarquer sur le spectrogramme l'évolution des modes de la structure (lignes obliques) ainsi que ceux de la plaque résonnante (lignes horizontales). L'évolution des modes de la structure révèle ainsi les caractéristiques modales de la plaque résonnante, ce qui est à l'origine de la stabilité du timbre du son produit. Il est à noter enfin que l'effet produit à l'écoute de cette séquence sonore n'est pas sans rappeler le célèbre son paradoxal synthétisé par Jean-Claude Risset, qui semble monter sans cesse dans les aigus et rester pourtant toujours dans le même registre, voire baisser de registre [15]. Nous avons en effet ici un cas analogue puisque l'on a une structure produisant une dynamique spectrale ascendante, révélant les propriétés modales stable d'une autre structure ; l'enveloppe spectrale du son reste donc toujours la même.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de produire des modèles physiques de structures vibrantes ayant de fortes analogies avec des structures réelles harmoniques et inharmoniques. Des techniques de modélisation permettant de passer continûment d'une structure à l'autre ont été développées, qui simulent, en outre, des processus bien définis, tels que des déformations ou des tensions appliquées à une structure. Des familles de structures plus ou moins harmoniques ont ainsi été obtenues dont le comportement en régime auto-oscillant va dépendre fortement de leurs caractéristiques modales et des paramètres d'excitation. Les premiers résultats ont montré une richesse des comportements qui peuvent être mis à profit dans un contexte musical.

Enfin, il est à noter que les sons auto-entretenus obtenus dans cette étude manquent pour l'instant d'expressivité puisque nous nous sommes concentrés uniquement sur les modes de la structure et leur influence sur les sons obtenus lorsqu'on la frotte à vitesse constante. Il reste encore à développer des structures vibrant à basses fréquences dont certaines caractéristiques pourraient être analogues à celles du geste d'un instrumentiste tel qu'un violoniste ou un clarinettiste. Quelques-unes de telles structures ont déjà été développées (cf. par exemple [13]) mais une recherche plus approfondie doit être menée afin de détecter quelles caractéristiques du mouvement peuvent être intéressantes dans un contexte musical et comment les retrouver avec un modèle CORDIS-ANIMA.

6. REFERENCES

- [1] Cadoz, C., Luciani, A. et Florens, J. L. "CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis – the General Formalism", *Computer Music Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 19-29, 1993.
- [2] Castagné, N. et Cadoz, C. "GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling", *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco, International Computer Music Association, 2002.
- [3] Chaigne, A. et Kergomard, J. *Acoustique des instruments de musique*. Belin, Paris, 2008.
- [4] Djoharian, P. "Shape and material design in physical modeling sound synthesis", *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Berlin, International Computer Music Association, 2000.
- [5] Essl G. et Cook P. "Measurement and efficient simulations of bowed bars" *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.108, pp. 379–388, 2000.
- [6] Fletcher, N.H. et Rossing, T.D. *The Physics of Musical Instruments*, 2nd Edition, Springer, New York, 2005.
- [7] Gladwell, G. M. L. *Inverse Problems in Vibration*, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] Guckenheimer, J. et Holmes, P. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. Applied Mathematical Sciences Vol. 42, Springer-Verlag, New York, 1983.
- [9] Inacio, O., Henrique, L. and Antunes, J. "Simulation of the oscillation regimes of bowed bars: a non-linear modal approach", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 8, pp. 77-95, 2003.
- [10] Kontogeorgakopoulos, A. *Théorie et pratique de la transformation du son musical à l'aide des modèles physiques : Une approche instrumentale des effets audionumériques fondée sur le système CORDIS-ANIMA*, Thèse de doctorat, Laboratoire ICA, INPG, 2008.
- [11] Lazarus, *Die Behandlung der Selbsterregten Kippschwingungen der Gestrichenen Saite mit Hilfe der Endlichen Laplace Transformation*, Thèse de doctorat, Technische Universität Berlin, 1972.
- [12] McIntyre, M. E., Schumacher, R. T., Woodhouse, J. "On the oscillation of musical instruments", *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 74, pp. 1325-1345, 1983.
- [13] Poyer, F. and Cadoz C. "Production of immersive musical architectures by physical modeling of self-sustained oscillating structures", *Proc. of the International Comp. Music Conference*, Copenhagen, International Computer Music Association, 2007.
- [14] Risset, J.-C. "Modèles physiques et perception – Modèles physiques et composition", *Modèles physiques, Création musicale et Ordinateur*, Vol. III. p. 709-720. Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, 1994.
- [15] Risset, J.-C. "Son musical et perception auditive", *Les instruments de l'orchestre*, pp. 149-165, Belin, 1995.
- [16] Tache, O. *Conception d'un instrumentarium pour la création musicale à l'aide des modèles physiques CORDIS-ANIMA*, Thèse de doctorat, Laboratoire ICA, INPG, 2008.
- [17] Villeneuve, J. *Problème inverse, résolution et intégration au sein de GENESIS*, Rapport de stage de recherche de M1 Physique UJF, ACROE-ICA, 2008.

Index des auteurs

Allombert, A.	151
Anquetil, Eric	65
Baltazar, P.	151
Barkati, Karim.....	25
Baud, Jean-François.....	41
Baudouin, Olivier.....	77
Béranger, Sébastien	35
Besson, Dominique.....	143
Bossis, Bruno	65
Cadoz, Claude	161, 171, 179
Cance, Caroline.....	133
Castagné, Nicolas.....	161
Couturier, J.M.	151
Daudin, Christophe	59
Desainte-Catherine, M.....	151
Fober, Dominique	59
Genevois, Hugues	133
Hanna, Pierre	49
Haury, Jean.....	9
Lemouton, Serge	19
Letz, Stéphane.....	59
Luciani, Annie.....	105
Luga, Hervé.....	93
Macé, Sébastien	65
Mandelbrojt, Jacques	85
Marczak, R.	151
Martin, Jean-Pierre.....	115
Merlier, Bertrand.....	127
Mihalic, Alexander	115
Orlarey, Yann	59
Pelletier, Jean-Marc	121
Poyer, François.....	179
Robine, Matthias	49
Rocher, Thomas	49
Roy, M.	151
Sèdes, Anne	41, 131
Serre, Jean-Marc	127
Tache, Olivier.....	171
Thollot, Joëlle.....	91