
Rapport d'activité quinquennal
janvier 2013 – décembre 2017

Jean-Louis Giavitto

Table des matières

A Curriculum Vitæ	1
B Recherche scientifique 2013 – 2017	6
B.1 Activités scientifiques et résultats	6
B.2 Collaborations	23
B.3 Positionnement dans l'unité	25
B.4 L'équipe-projet INRIAT MuTant	26
B.5 Distinctions	27
C Publications depuis janvier 2013	28
C.1 Revue à comité de lecture	28
C.2 Actes de colloques à comité de lecture	29
C.3 Séminaires, workshops	30
C.4 Livres et ouvrages	32
C.5 Chapitres d'ouvrages	32
C.6 Logiciels : le système Antescofo	32
D Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique	35
D.1 Encadrement de thèse	35
D.2 Enseignement	36
D.3 Organisation de conférences et workshops, comités de programme	36
D.4 Vulgarisation	38
E Transfert technologique, relations industrielles et valorisation	39
F Encadrement, animation, gestion et direction de la recherche	40
F.1 Expertises	40
F.2 Gestion de la recherche	40
F.3 Activités éditoriales	41
F.4 Contrats de recherche	42
F.5 Direction d'unité	42
G Objectifs / Projet de recherche	45
G.1 Systèmes cyber temporel avec humain dans la boucle	45
G.2 Nouvelles approches pour la notation musicale	46
G.3 Gestion des flots temporels	48
G.4 Serveur de temps et compilation	48

A

Curriculum Vitæ

État civil

Né le : 26 mai 1963 à Mulhouse – Vivant maritalement
Adresse : UMR 9912 STMS (Science et Technologie de la Musique et du Son)
IRCAM – 1 place Igor Stravinsky, 75004 Paris
Tél/Email : 01 44 78 42 31 jean-louis.giavitto@ircam.fr
Web : <http://repmus.ircam.fr/giavitto>

Diplômes

Ingénieur : 1986 – Diplôme d’ingénieur ENSEEIHT, filière Informatique (École Nationale Supérieure d’ingénieur en Électronique, Électrotechnique, Informatique et Hydraulique de Toulouse)
DEA : 1986 – DEA d’informatique de l’Université Paul Sabatier à Toulouse
Doctorat : 1991 – Thèse de 3^{ème} cycle de l’Université de Paris-Sud
Habilitation : 1999 – Habilitation à diriger des recherches de l’Université de Paris-Sud

Carrière

1986–1988 : Ingénieur de Recherche au Centre de Recherche d’Alcatel-Alsthom (anciennement CGE), Laboratoires de Marcoussis, Division Informatique
1988–1990 : Chef de projet, Laboratoires de recherche de Marcoussis, Alcatel
1989–1991 : Étudiant en thèse de 3^{ème} cycle à l’Université d’Orsay
1991–1992 : Post-doctorant dans l’équipe Archi du LRI UR1 410, Université d’Orsay
1992–1995 : CR2 – LRI URA 410, Université d’Orsay
1996–2001 : CR1 – LRI URA 410, Université d’Orsay
2001–2005 : CR1 – LaMI UMR 8042, Université d’Evry Val d’Essonne & Genopole
2006 : CR1 – IBISC FRE 2873 (Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes), Université d’Evry Val d’Essonne & Genopole-Evry
2007 : DR2 – IBISC FRE 2873, Université d’Evry Val d’Essonne & Genopole
2008–2010 : DR2 – IBISC FRE 3190, Université d’Evry Val d’Essonne & Genopole
2011–2016 : DR2 – STMS UMR 9912, IRCAM et Université Pierre et Marie Curie
2012–2016 : chercheur dans l’équipe-projet INRIA MuTant
2017–... : DR1 – STMS UMR 9912, IRCAM et Sorbonne Université

Situation actuelle

Grade : DR1, département scientifique INS2I
Section du comité national : 06
Délégation régionale de l'unité : 01 Paris-Villejuif

Affectation : UMR STMS 9912 - Science et technologie de la Musique et du Son

Direction d'unités

LaMI : *Directeur-adjoint* (2001–2003). Le Laboratoire de Méthode Informatique, UMR 8042 était associé à Genopole et comptait 30 enseignants-chercheurs et autant de doctorants et post-doctorants. J'étais le seul CNRS.

LaMI : *Directeur* (2004–2005).

IBISC : *Directeur-adjoint* (2006–2007). J'ai fondé avec Etienne Colle le laboratoire *Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes* de l'université d'Evry, fusion du LaMI et du LSC (FRE 2494). Associé à Genopole-Evry, le laboratoire comptait à sa création 65 permanents et 70 doctorants.

IBISC : *Directeur* (2008–2010).

GDR GPL : *Co-responsable* du pôle « programmation » du GDR GPL (Génie de la Programmation et du Logiciel) (2008–2011 avec Laurence Duchien et 2012–2015 avec Pierre-Etienne Moreau). Le pôle compte cinq groupes de travail regroupant environ 250 chercheurs et enseignants-chercheurs.

MuTant : *Responsable* de l'équipe-projet MuTant en 2016. L'équipe comptait un chercheur INRIA, et trois doctorants.

STMS : *Directeur-adjoint par interim* de l'UMR 9912 « Science et Technologie de la musique et du Son » de juin à décembre 2017.

STMS : *Directeur-adjoint* auprès de Brigitte d'Andréa-Novel, nouvelle directrice à partir de janvier 2018. Le laboratoire compte 40 permanents, autant de doctorants et une dizaine de post-doctorants et d'ingénieurs de développement sur contrat.

Fonctions d'évaluation (depuis 2010)

Recrutements. Commissions de spécialistes : Comité de sélection : ENSIIE (2010), Université de Paris Sud (2010), Université d'Evry (2010, 2011, 2013, 2017), Université de Paris Est (2011), UPMC (2013 et 2017). Comité de recrutement INRIA Sophia-Antipolis (2017). J'ai fait partie du comité CRFP de la délégation régionale Île-de-France Est (2010).

Bourses et Prix de thèse. Expertises ponctuelles pour des demandes de bourses de thèse école (région Bretagne, Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes (Cluster ISLES)). Président et organisateur du prix de thèse ASTI en 2009 (100 dossiers et 35 membres de jury). Membre du jury du prix de thèse du GDR GPL en 2015 et 2018. Jury de classement des bourses de thèse auprès de l'école doctorale EDITE (2011) et président de deux de ces jurys (2012 et 2017). Membre du conseil de l'école doctorale S&I (Université d'Evry, ENSIIE et Telecom Sud-Paris, 2006-2011) puis membre extérieur (jusqu'en 2015). Membre extérieur du conseil de l'école doctorale STIC Saclay (depuis 2015).

Programmes de recherche. Membre des comités d'évaluation : RNTL (2001 et 2002); ACI IMPBIO 2003–2004. Comité de préparation du programme ANR DEFIS (2007) puis

comité d'évaluation (2008–2009) puis expert pour le suivi des projets. Comité d'évaluation projet ANR Blanc SIMI3 en 2010. Programme européen FET (suivi de projet dans la thématique *Unconventional Computation* 2010–2015). Évaluation pour des actions incitatives INRIA.

Conseils d'administration et conseils scientifiques. Membre du conseil d'administration de l'ASTI (Société savante et professionnelle des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, 2005–2010), du conseil scientifique de l'ENSIIE (2007–2011), du conseil scientifique du LIFO (2009–2013), de l'école doctorale S&I (Université d'Evry, ENSIIE et Telecom Sud-Paris, membre nommé 2006–2010, membre extérieur 2011–2015), membre extérieur de l'école doctorale Saclay-STIC depuis 2016, membre du bureau de l'EDITE depuis 2017, et membre du comité scientifique de RSTI (Revue des Sciences et Technologies de l'Information) des éditions Lavoisier. Expert auprès de la région Rhône-Alpes pour le cluster Isle (2008–2010). Représentant de l'université d'Evry au conseil d'administration de l'ISC-PIF (2009–2010).

Congrès depuis 2010

J'ai participé aux comités de programmes d'une soixantaine de conférences et workshops, cf. <http://repmus.ircam.fr/giavitto/animation>, dont : Information Processing in Cells and Tissues (IPCAT'12, '15); Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICO'10 '11, '13, '15); Journées Francophones Internationales sur les Approches Formelles dans l'Assistance au Développement de Logiciels (AFADL'10, '12); International Conference on Mathematics and Computation in Music (MCM 2011); Genetic and Evolutionary Computation Conference ('12, '13, '15, '17, '18); International Conference on the History and Philosophy of Computing (HaPoC 2013), les Journées en Informatique Musicale (JIM'2014, '2016), 41st International Computer Music Conference (ICMC'2015), etc.

Enseignements depuis 2010

Mes activités d'enseignement se sont fortement réduites depuis mon arrivée à STMS. J'ai par contre assuré plusieurs tutoriaux : programmation spatiale (Université de Cali, Colombie en 2013) et le langage antescofo (summer school SMC à Hambourg en 2016, Forum Santiago du Chili en 2017).

Encadrement de thèse et jurys

Direction de thèse	début de ma carrière	10 dernières années	4 dernières années
thèses encadrées	6	0	0
Thèses co-encadrées	6	5	5
Total	12	5	5

Devenir des thésards : 1 professeur des Universités (UPEC), 3 Maîtres de Conférence (UPEC, Univ. de Nantes et Université de Lille), 1 CR au CNRS, 1 ingénieur de recherche à l'institut européen des brevets en Hollande, 2 architectes logiciels dans le secteur industriel (Thales et Sanofi), 1 créateur de start-up et 1 compositrice de musique (et 2 thèses en cours).

Jurys de thèse	début de ma carrière	10 dernières années	4 dernières années
Rapporteur HdR	6	6	3
Rapporteur thèses étrangères	4	3	0
Rapporteur thèses française	13	7	3
Examineur (incluant directions)	20	12	8
Total	43	28	14

Publications et diffusions

Publications	début de ma carrière	10 dernières années	4 dernières années
Revue	19	11	6
Colloques (avec actes et referees)	83	33	23
Conférences internat. invitées	17	17	10
Editions et chapitres	31	19	10

La plupart de mes publications et présentations sont disponibles à partir de la page <http://repmus.ircam.fr/giavitto/publications>. Ces travaux ont été publiés avec plus d'une cinquantaine de co-auteurs et ont été présentés dans une centaine de séminaires.

Développement de logiciels

Les langages $8_{1/2}$ et MGS sont en open source et représentent chacun plus de 70 000 lignes de codes en C, C++ et Ocaml. Les différentes versions de l'environnement MGS et des outils associés (visualisateur, éditeur graphique de règles) sont accessibles depuis l'adresse <http://mgs.spatial-computing.org> (50% des accès sont extérieurs à la France). Le site web du logiciel Antescofo est accessible à l'adresse <http://repmus.ircam.fr/antESCOfo>. Il est disponible en téléchargement via le forum de l'IRCAM <http://forumnet.ircam.fr/product/antESCOfo/>.

Mes logiciels sont utilisés, par exemple avec Antescofo programmé dans une centaine de concerts depuis 2011, en France et à l'étranger (Corée, États-Unis, Allemagne, Angleterre, Chili, Cuba, *etc.*). Cette technologie a donné lieu à la création d'une start-up et un accord de PI avec le CNRS.

Activités éditoriales

J'ai été le rédacteur en chef de *Technique et Science Informatique* (TSI) de 2002 à 2016 <http://tsi.e-revues.com>. TSI est le principal journal scientifique généraliste d'informatique francophone. Cette revue publie dix numéros par an (plus de 1200 pages d'articles de recherche en informatique). Sous ma direction, plus de 700 articles ont été publiés nécessitant chacun au moins quatre fiches de lecture.

J'ai été lecteur pour diverses revues : HOSC, BioSystems, TCS, Physica D, Computer Vision, Natural Computing, The Computer Journal, JCSS, *etc.*

Activités de recherche

Mes travaux de recherche portent sur la conception et l'étude de nouveaux mécanismes de programmation et leurs applications à la modélisation, la simulation, l'analyse, la synthèse et le contrôle de systèmes dynamiques complexes. Ils visent à spécifier, représenter et programmer des activités dans le *temps* et dans l'*espace* à partir de la notion d'*interaction*.

Méthodes. Mes méthodes s'appuient sur des notions empruntées à la topologie algébrique, la programmation déclarative, les langages synchrones et les systèmes de réduction abstraits et la programmation parallèle et en temps-réel.

Applications. À mon entrée en 1992 au CNRS, mon domaine d'application privilégié était la simulation massivement parallèle en physique et en science cognitive (représentation de connaissances symboliques). À mon arrivée en 2000 à Évry, je me suis tourné vers le développement de langages de haut niveau permettant la spécification de systèmes ouverts et/ou à structure dynamique, en visant en particulier la biologie des systèmes, la biologie du développement et la biologie synthétique. En rejoignant l'IRCAM en janvier 2011, j'ai abordé de nouvelles applications en lien avec la représentation et la manipulation d'objets musicaux, tant au niveau de l'analyse musicale et de la composition que de la performance. Je m'intéresse par exemple à la spécification d'interactions temps-réels impliquant des relations temporelles complexes lors de performances, dans le contexte des œuvres musicales mixtes et ouvertes. Le langage Antescofo sur lequel je travaille actuellement est utilisé dans plus d'une centaine de créations depuis 2011 en musique mixte, impliquant la Philharmonique de Berlin, de Los Angeles ou encore l'orchestre de Radio France. Une start-up est issue de ces travaux avec pour objectif de développer un système d'accompagnement automatique grand public sur plates-formes mobiles (téléphones, tablettes) : <https://www.antescofo.com>.

Le fil rouge reliant ces différents domaines d'application est la *morphogénèse*, comprise comme un processus dont la structure dynamique est regardée à travers les relations spatiales ou temporelles de ses constituants.

Les applications internes à l'informatique de mes travaux portent sur les modèles de calcul, les modèles de programmation et les architectures matérielles non-conventionnelles, les langages dédiés (DSL), l'interaction temps-réel ainsi que l'analyse statique, l'évaluation et la compilation.

B

Recherche scientifique 2013 – 2017

B.1 Activités scientifiques et résultats

Mon projet de recherche s'intitule

*Modèles du temps et structures spatiales
dans les approches langages en informatique musicale*

et vise à concevoir et développer des “outils langages” (langages dédiés, interprètes, techniques de compilation, d’analyse statique, de vérification, approches syntaxiques, *etc.*) pour répondre à différentes applications en informatique musicale, avec un focus sur les aspects temporels et spatiaux.

Je présenterai les résultats de ce mi-parcours suivant trois directions de recherche :

- programmation spatiale pour l’analyse et la composition musicale,
- temps performatif et projet *Antescofo*,
- concepts et outils pour les œuvres interactives.

B.1.1 Programmation spatiale pour l’analyse et la composition musicale

J’ai développé dès la fin des années 1990 la notion de programmation spatiale avec deux objectifs initiaux :

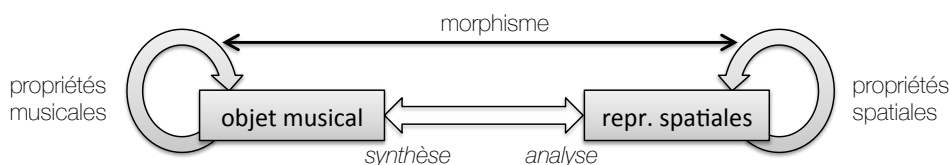
- fournir des abstractions inspirées de la physique et permettant de programmer les calculateurs parallèles de manière globale,
- étudier l’usage d’abstractions spatiales dans des modèles de calculs non-conventionnels, en particulier abstraitement les structures de données d’un point de vue spatial comme un espace dans lequel le calcul se déplace.

Ces objectifs ont rencontrés plusieurs communautés émergentes ou bien établies, mais avec un focus spécifique¹. Les applications de cette notion à des problèmes de représentations des connaissances [VGS98a, VGS98b], longtemps resté spécifique à ma ligne de recherche, rencontre aujourd’hui le développement de l’*analyse topologique des données* [Zom12, CM17].

À mon arrivée à l’Ircam en 2011, j’ai appliqué des notions issues de la programmation spatiale à un domaine de recherche musicale qui remonte au moins à *Euler* et qui vise à développer des représentations géométriques de notions musicales, principalement les hauteurs et les accords. Cette approche a donné lieu à la thèse de Louis Bigo (lauréat du prix du jeune chercheur en informatique musicale en 2013 et qui a été recruté comme maître de conférence à Lille) puis celle de Mathias Bergomi.

1. cf. la série des workshops *Spatial Computing* organisés régulièrement de 2008 à 2014 <http://www.spatial-computing.org>, les numéros spéciaux organisés dans les ACM TAAS, The Computer Journal et The Knowledge Engineering Reviews ou encore des articles de synthèse comme [DHGG06, BV15, BMS11, DSM13]

La figure B.1 donne quelques exemples. La motivation est que la représentation géométrique capture des informations pertinentes sur l'organisation musicale donc qu'en disant des choses sur la représentation spatiale, on dise des choses (pertinentes et intéressantes !) sur l'objet musical initial :



Ces techniques, utilisées en analyse, ont donné lieu à de nouveaux outils d'aide à la composition dans la thèse de Julia Blondeau. C'est là un domaine complètement nouveau que je compte continuer à développer et qui est potentiellement le vecteur de nouvelles approches pour la notation musicale.

Espace de hauteurs et représentations des accords

Les travaux dans cet axe ont débuté par le stage de Louis Bigo qui a ensuite poursuivi en thèse. Nous nous sommes principalement concentrés sur des représentations topologiques, laissant de côté des aspects métriques qui sont par ailleurs étudiés par l'école néo-riemanienne² et en particulier par R. Cohn [Coh98]. Nous avons montré que différents *Tonnetze* proposés dans la littérature pouvaient se construire comme le graphe de Cayley de la présentation d'un sous-groupe de $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ (pour prendre en compte la réduction habituelle à l'octave) et plus généralement comme l'orbite de l'action d'un tel groupe sur un ensemble de notes. On retrouve aussi ces *Tonnetze* comme 1-squelette d'un complexe simplicial construit par auto-assemblage d'ensembles de notes ou d'intervalles. Des exemples sont donnés à la figure B.1.

La programmation spatiale permet de construire ces objets topologiques par calcul et MGS s'est révélé particulièrement adapté pour construire et énumérer des chemins exhibant une propriété donnée. Dans [BGS11] nous montrons comment une seule règle d'auto-assemblage permet de construire différents espaces et le langage de filtrage de MGS est illustré par l'énumération des séries tous-intervalles (une seule règle suffit à construire ces chemins hamiltoniens). L'approche que nous avons développée a très rapidement diffusé dans la communauté et nous avons été invités au prestigieux colloque international *Mathematical Conversation* organisé cette année par l'université de Singapour, l'Institute for Mathematical Sciences de Singapour et le Yong Siew Toh Conservatory of Music pour présenter notre approche dans la session "Geometry" avec Richard Cohn (Yale) et Dmitri Tymoczko (Princeton), références internationales du domaine.

Un des résultats très nouveaux est d'avoir proposé de nouvelles transformations de séquences d'accords, motivées par la représentation topologique. Ces transformations n'avaient pas été proposées auparavant [BAG⁺13, SBGA14]. La thèse de Louis Bigo a été distinguée par le prix du jeune chercheur en informatique musicale en 2013.

Relation entre Q -analyse et analyse de concepts formels (FCA)

Les représentations topologiques des accords peuvent s'interpréter comme une construction de la Q -analyse, un formalisme développé par Ronald Atkin dans les années 1970 pour l'analyse de relations binaires [Atk77] et appliqué avec succès à plusieurs systèmes sociaux (la référence [Cas92, chap. 8] est une introduction accessible). Lors de mon travail

2. en référence à Hugo Rieman, musicologue de la fin du 19^{ème} siècle qui a étudié une notion de *Tonnetz*

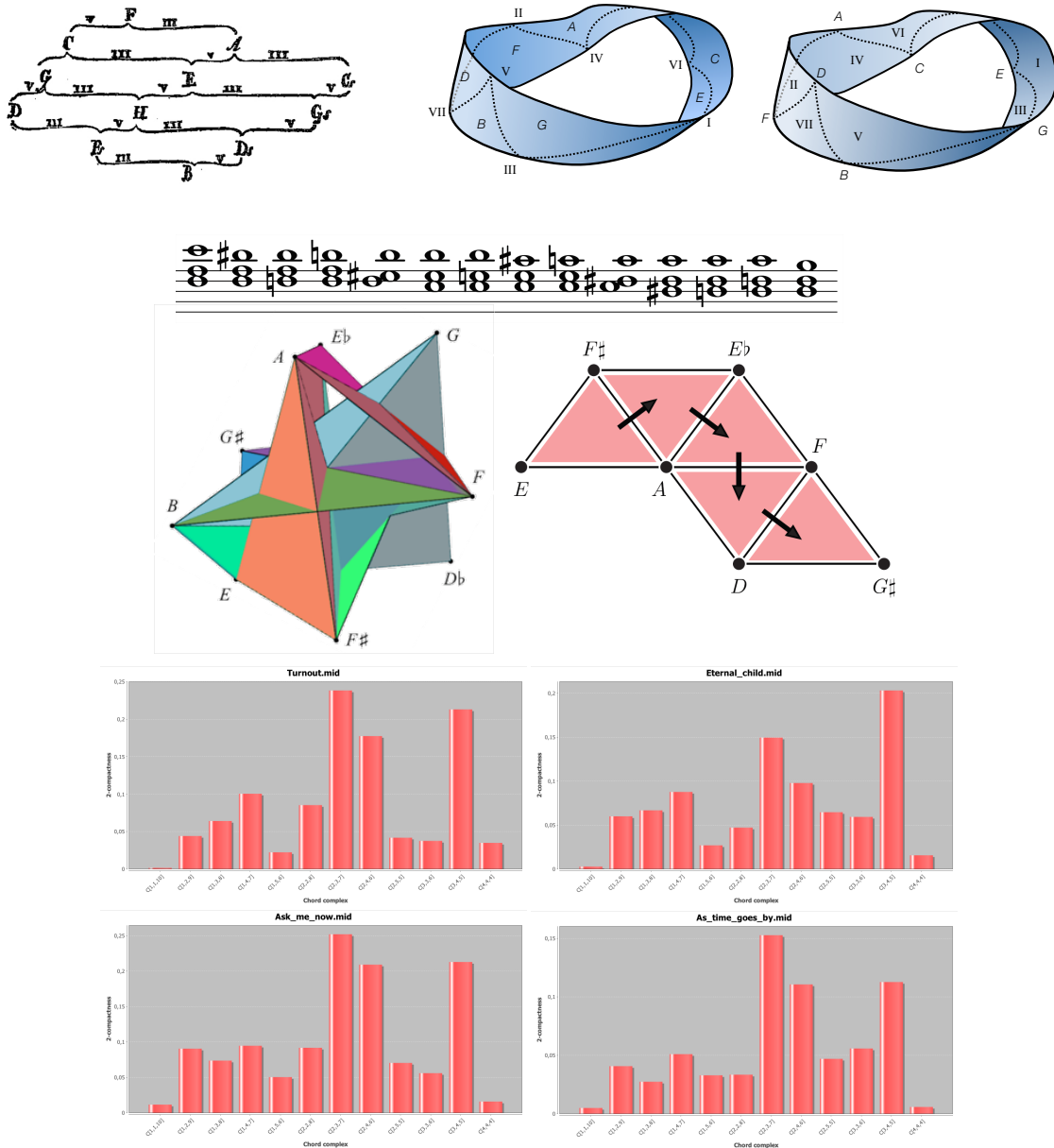


FIGURE B.1 – *En haut, à gauche.* Le Tonnetz de L. Euler (1739). Les deux directions diagonales correspondent à l'intervalle de quinte et de tierce majeure.

En haut, à droite. Représentation sous la forme d'un complexe simplicial des degrés de la tonalité de Do majeur. Dans le premier diagramme chaque face triangulaire correspond à une note, un bord à un accord de deux notes et un point à un accord de 3 note. Dans le second, la représentation dual est utilisée et un accord de n notes correspond à un $(n - 1)$ -simplex. Le résultat est un ruban de Mœbius. Le résultat était connu mais cette construction peut se calculer automatiquement et pour des dimensions arbitraires grâce à MGS [BGS11].

Au centre. L'espace associé aux huit premières mesures du Prélude 4 Op. 28 de Chopin. Cet espace, construit comme le précédent, est beaucoup moins régulier que celui correspondant à un graphe de Cayley. Cependant, la succession des accords suit un principe simple : c'est un $(2,1)$ -chemin hamiltonien (une séquence de simplexes de dimension 2, deux simplexes successifs partageant un simplex de dimension 1 sans auto-intersection et passant par tous les simplexes de dimensions 2 du complexe) où une seule note change à chaque progression.

En bas. La représentation d'une séquence musicale dans un certain espace pose la question de quel espace est le plus à même de représenter cette séquence. Louis Bigo a proposé de quantifier la « compacité » du chemin dans l'espace support. La figure produite par l'outil HExaChord représente les différentes mesures de compacité pour quatre standards de jazz dans différents Tonnetze listés en abscisse. L'objectif est de repérer les espaces caractérisant un style ou bien un compositeur.

sur les représentations diagrammatiques à la fin des années 1990 [GV98], je m'étais posé la question des relations entre ce formalisme et l'analyse des concepts formels initiée en France par Marc Barbut, Bernard Monjardet dans les années 1970 [BM70, BF71], mais popularisée et développée par Rudolph Wille et l'école allemande dans les années 1980 [Wil82].

En 2013, j'ai repris cette question avec Anton Freund, étudiant en mathématiques de l'université de Munich à l'occasion de son stage, et nous avons pu apporter une réponse claire à cette question [FAG15]. Étant donné une relation binaire,

1. il n'est pas possible en général de reconstruire le treillis des concepts formels à partir de la donnée du complexe simplicial associé à la relation ;
2. inversement, il n'est pas possible de reconstruire le complexe simplicial à partir du treillis associé à la relation ;
3. le treillis de concepts formels suffit pour calculer les groupes d'homotopie du complexe simplicial.

Les notions correspondantes sont illustrées à la figure B.2. Ce résultat indique que le formalisme de la FCA permet de retrouver toutes les propriétés invariantes par homotopie.

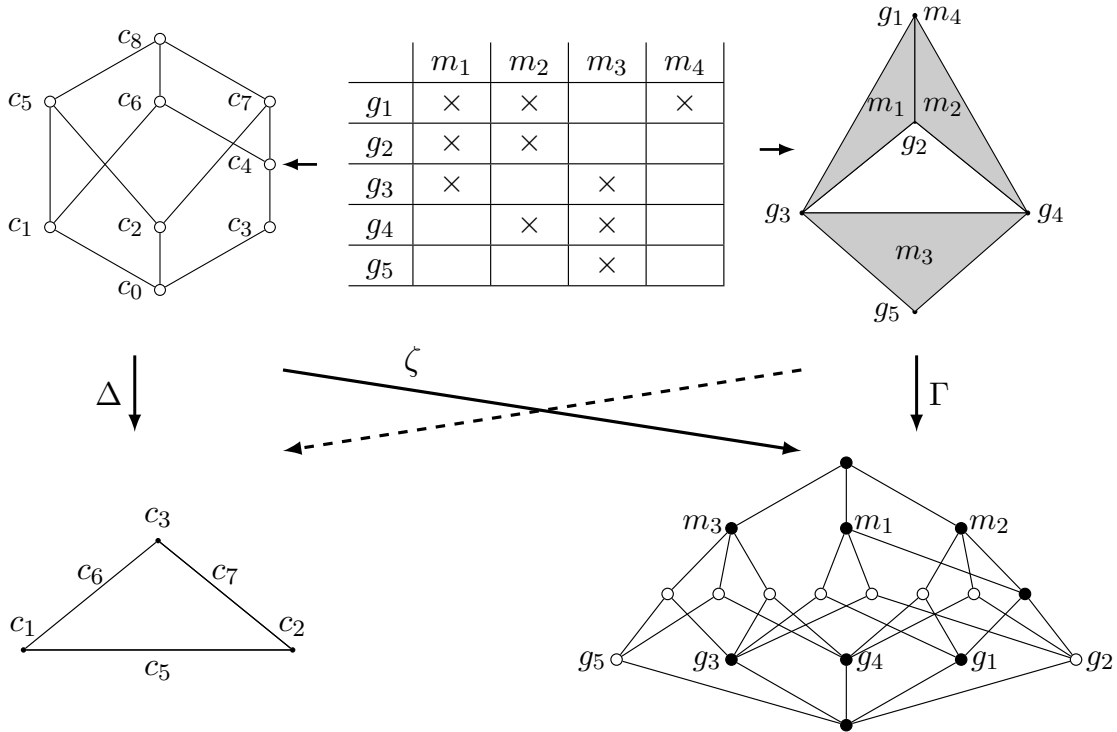


FIGURE B.2 – Une relation binaire peut se représenter par une matrice de 0 et de 1 (au centre). À partir de cette matrice il est possible de dériver un complexe simplicial (les lignes servant de sommets et les colonnes correspondant aux simplexes, cf. le complexe simplicial à droite) : cette représentation est étudiée par la Q -analyse.

Il est possible aussi de rechercher les couples (P, A) où P est un sous-ensemble de lignes qui ont un 1 pour toutes les colonnes de A et inversement, A est l'ensemble des colonnes qui ont un 1 pour chaque ligne de P . Ces couples sont appelés *concept formels* et peuvent être ordonnés partiellement (par inclusion des P). Le treillis obtenu est l'objet étudié par la FCA. Ici, le diagramme de gauche correspond au treillis induit par la relation binaire figurée au centre et correspond aux éléments $c_0 = (\emptyset, \{a_1, \dots, a_4\})$, $c_1 = (\{p_3\}, \{a_1, a_3\})$, $c_2 = (\{p_4\}, \{a_2, a_3\})$, $c_3 = (\{p_1\}, \{a_1, a_2, a_4\})$, $c_4 = (\{p_1, p_2\}, \{a_1, a_2\})$, $c_5 = (\{p_3, p_4, p_5\}, \{a_3\})$, $c_6 = (\{p_1, p_2, p_3\}, \{a_1\})$, $c_7 = (\{p_1, p_2, p_4\}, \{a_2\})$ and $c_8 = (\{p_1, \dots, p_5\}, \emptyset)$.

On peut à présent dériver un complexe simplicial du treillis, en regardant ce treillis comme relation d'incidence d'un complexe (complexe associé par la relation Δ). De manière analogue, on peut associer un treillis au complexe étudié par la Q -analyse : le treillis d'incidence du complexe (relation Γ).

On peut définir une injection ζ qui est un morphisme entre le treillis des concept et le treillis d'incidences du complexe et qui préserve la borne sup et les co-atomes (les éléments dont le successeur immédiat est une borne sup du treillis). Cela permet de déduire que le complexe associé au treillis est une *retraction* du complexe simplicial de départ [FAG15].

Espaces compositionnels

Les espaces cellulaires offrent un moyen effectif de rendre explicite et communicable l'architecture qu'un compositeur utilise pour spécifier et organiser une pièce. Cette représentation spatiale, que nous appellerons *espace compositionnel*, recouvre des acceptions différentes, comme par exemple les structures précompositionnelles de l'analyse Schenkérienne [Mor80], les automates (graphes) utilisés par Thom Johnson dans beaucoup de ses pièces [AJ95] ou les variétés utilisées par Jocelyn Ho [Ho11].

Ces représentations spatiales cependant participent tous d'un même principe : elles correspondent à une structure hors-temps et rendent explicite un système de relations atemporelles dans lequel la composition se déploie. Ainsi, les relations tant structurelles que temporelles d'une pièce dérivent de celles de l'espace compositionnel sous-jacent.

Les "lieux" de l'espace compositionnel peuvent être des littéraux (qui réfèrent à un objet musical spécifique comme un accord) ou bien plus abstraits : ils réfèrent alors à un ensemble de propriétés musicales caractérisant les paramètres variables d'une séquence : ensemble de notes possibles, timbres, rythme, volume, harmonie, tempo... à partir desquels une séquence concrète et temporellement orientée sera instanciée.

Un exemple simple est donné par la pièce *Torus* composé par Jocelyn Ho, figure B.3.

Un exemple simple : l'espace compositionnel de *Torus*. L'espace compositionnel de *Torus* est un tore divisé en trois régions qui correspondent à trois thèmes et qui se recouvrent partiellement. La pièce correspond à un chemin sur ce tore spécifié par la compositrice. Le tore représente donc un ensemble d'œuvres potentielles, tous les chemins qu'on peut tracer dans ce tore, et dans lesquels Jocelyn Ho a choisi un parcours particulier [Ho11]. Quand le chemin entre dans une région spécifique (ou dans l'intersection de plusieurs régions), le matériel musical de la pièce satisfait aux contraintes associées à la région. La topologie globale du tore capture les récurrences présentes dans la pièce : le tore permet deux types de répétition correspondant aux cycles le long de l'axe de révolution ou bien autour de l'axe du cercle générateur du tore. Et de fait, la pièce musicale est conçue pour itérer quatre fois suivant le cercle générateur et une fois suivant l'autre axe.

L'explicitation des relations forme/matériaux. Un espace compositionnel peut être motivé par une théorie musicale (par exemple une gamme). Mais ces espaces peuvent être spécifiquement construits par un compositeur pour servir d'échafaudage à sa composition.

En collaboration avec Julia Blondeau dans le cadre de sa thèse en art³ j'ai développé plusieurs outils pour construire les espaces compositionnels qu'elle conçoit. Une première version, rudimentaire, a été prototypé sous *Mathematica* (la visualisation de la figure B.4 en est issue).

3. Apparue en 2013, le dispositif des « thèses en art » permet de développer une interaction sur un temps long avec un artiste qui poursuit un travail de thèse à plein temps. Ce nouveau format de doctorat permet d'articuler finement pratique artistique et approche théorique d'une part, recherche et création d'autre part. Constatant que pour beaucoup de créateurs la recherche scientifique vient asseoir et nourrir la pratique artistique, il reconnaît que la création des formes peut également produire des savoirs, et que, pour de nombreux compositeurs, la formalisation de la pensée nécessite d'autres outils que les mots.

Le travail de thèse de Julia Blondeau, que j'ai encadré, a donné lieu au développement de plusieurs pièces de musiques mixtes dont *Namenlosen* pour quatre solistes, ensemble et électronique. Le concert de présentation a eu lieu le vendredi 09 juin 2017 à la Salle des concerts de la Philharmonie, à Paris, créée par l'Ensemble InterContemporain sous la direction de Matthias Pintscher, avec Emmanuelle Ophèle, flûte Philippe Grauvogel, hautbois Clément Saunier, trompette John Stulz, alto. Cette production a bénéficié d'une commande de Françoise et Jean-Philippe Bilarant. La pièce peut toujours s'entendre intégralement sur le site de France Musique qui a enregistré le concert : <https://goo.gl/wFBjan>.

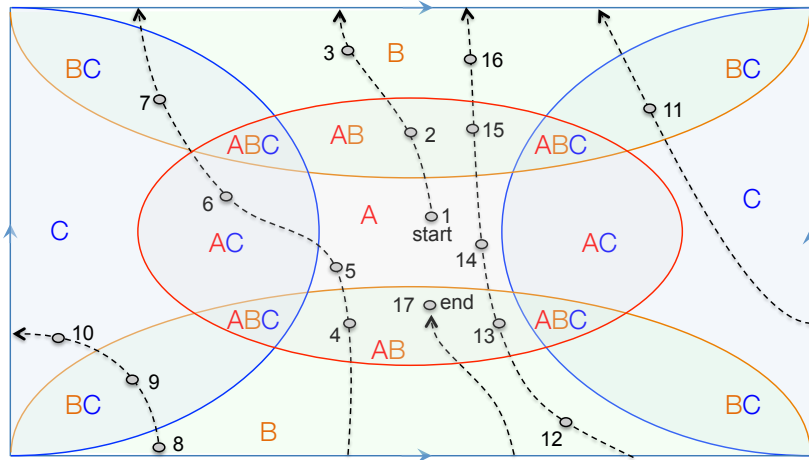


FIGURE B.3 – L’espace compositionnel de *Torus* par Jocelyn Ho (diagramme repris de [Ho11, Fig. 1]). Les bords horizontaux du rectangle doivent être identifiés (dans le même sens) que les bords verticaux, résultant en un tore. Il y a trois régions qui s’intersectent A, B et C qui sont liées à trois thèmes et résultant en 7 domaines disjoints correspondant aux conjonctions A, B, C, AB, AC, BC, ABC rencontrés à travers 17 séquences musicales : 1 : $A, 2 : AB, 3 : B, 4 : AB, 5 : A, 6 : AC, 7 : BC, 8 : B, 9 : BC, 10 : C, 11 : BC, 12 : B, 13 : AB, 14 : A, 15 : AB, 16 : B, 17 : AB$. La trajectoire de la pièce boucle “verticalement” quatre fois et seulement une fois verticalement.

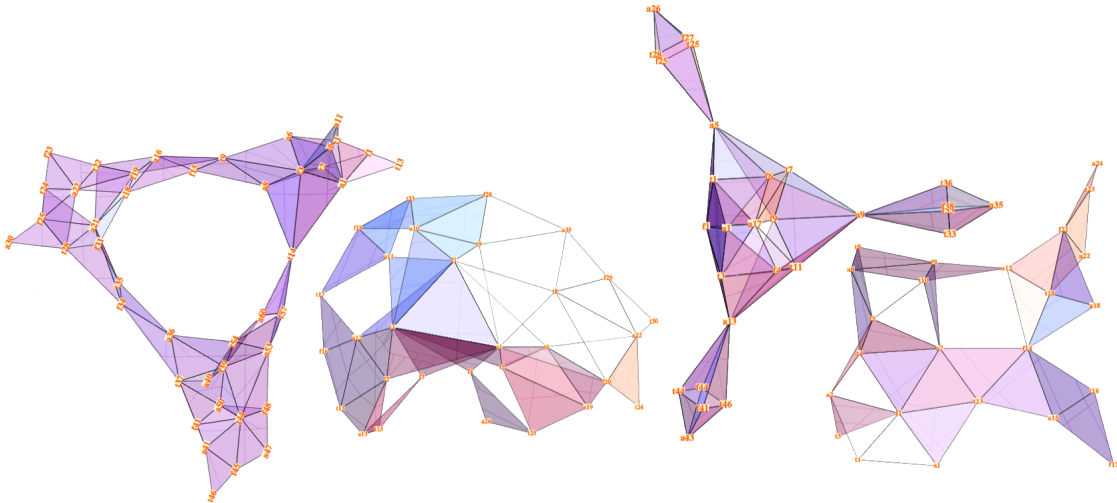


FIGURE B.4 – Architecture de la pièce de Julia Blondeau, *Tesla* (2014). L’évolution des qualités musicales au cours de *Tesla* correspond à un chemin dans cet espace, chemin définit lui-aussi par des propriétés caractéristiques faisant intervenir des contraintes globales (par exemple un chemin de longueur donnée et passant par certaines régions dans un ordre prédéfini).

Les espaces compositionnels développés par Julia Blondeau sont moins littéraux et plus abstraits. Ils visent à concevoir des paradigmes capables de faire appréhender finement les nombreuses composantes qui font l'identité d'un matériau ou d'une forme musicale, et qui explicite les liens qu'elles entretiennent mutuellement.

Ils sont construits comme assemblage de 3-simplexes dans un complexe simplicial abstrait. Chaque simplexe de dimension 3 formalise la co-existence de 4 types de propriétés musicales symboliques et qualitatives. Le choix des 4 éléments est propre au compositeur. Chacune de ces propriétés est décrite par plusieurs paramètres symboliques. Les paramètres utilisés dans le travail de Julia Blondeau sont les suivants :

simplexe fréquentiel porte sur le traitement des hauteurs. Il est spécifié par quatre paramètres :

- matrice d'intervalles (qui définit les successions permises d'un intervalle à l'autre, en différenciant les ascendants et les descendants).
- niveau de polarisation
- profil
- ambitus

simplexe rythmique décrit une métrique (organisation de la pulsation mais aussi évolution du tempo)

- métrique (division de la cellule musicale)
- vitesse
- profil
- régularité

simplexe d'attraction rassemble des paramètres liés à des questions de directivité et de statisme :

- symétrie harmonique
- symétrie rythmique
- tension timbrique
- directivité

simplexe timbrique intègre des notions liées au timbre et à l'articulation :

- enveloppe
- dynamique générale
- timbre principal
- timbre secondaire (complété par un degré d'hétérogénéité)

La construction d'un espace compositionnel à partir de ces simplexes est illustré à la figure B.6.

Ce travail soulève de nombreuses questions musicales qui sont présentées et discutées dans la thèse de Julia Blondeau. Du point de vue des outils informatiques, ce travail pose de nombreuses difficultés techniques : comment spécifier ces espaces de manière constructive ? comment les construire explicitement en évitant l'explosion combinatoire ? comment visualiser des espaces de dimension supérieure à trois ? quels sont les algorithmes efficaces qui permettent d'énumérer des chemins satisfaisant à des contraintes données dans ces espaces ? *Etc.* Cette recherche initiée dans le cadre la thèse de Julia Blondeau doit se poursuivre.

Espace compositionnel, choix et formes. Bien sûr l'espace compositionnel fait l'impasse sur les relations temporelles de la pièce : il n'y a pas de représentation explicite des propriétés qui découleraient par exemple de l'ordre spécifique dans lequel on rencontre les régions (comme les répétitions), hormis la structure des chemins induite par l'espace. Mais, comme on le voit avec les répétitions, l'espace compositionnel contraint une certaine

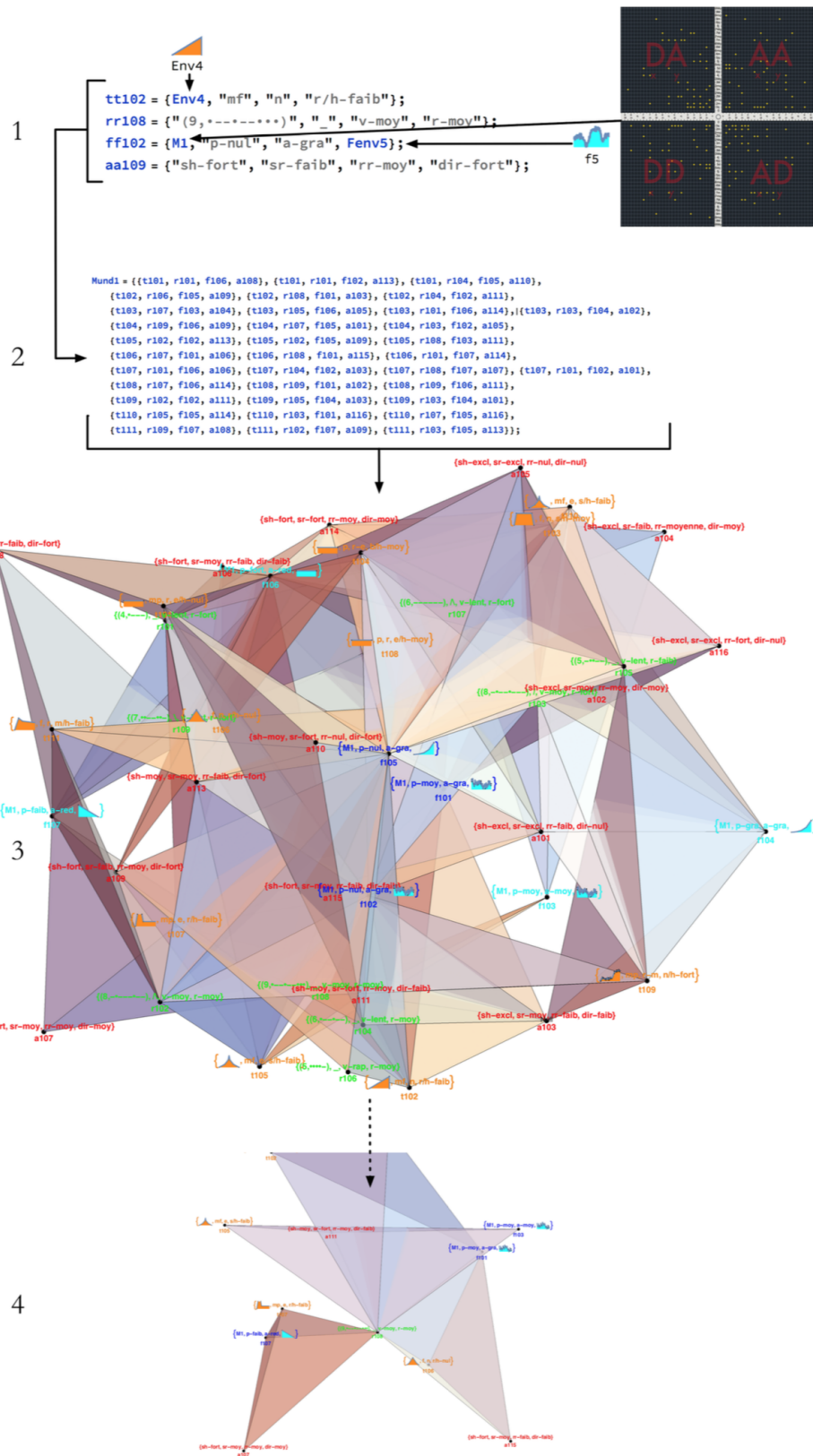


FIGURE B.5 – Construction d'un espace compositionnel (illustration issue de la thèse de Julia Blondeau). Cette figure illustre quelques étapes de construction d'un espace compositionnel dans le travail de Julia Blondeau. Des matrices d'intervalles (matrice à l'étape (1) en haut à droite) sont utilisées dans la construction des 3-simplices fréquentiels. À priori, il s'agit d'entrer l'intégralité du matériau d'une pièce (2). L'assemblage des 3-simplices permet de construire l'espace compositionnel de la pièce en recollant les sommets, les arêtes et les faces communes (3). Pour permettre au compositeur de travailler, l'outil développé sous Mathematica permet de filtrer un complexe par un sommet, une arête, une face ou une cellule entière (4).

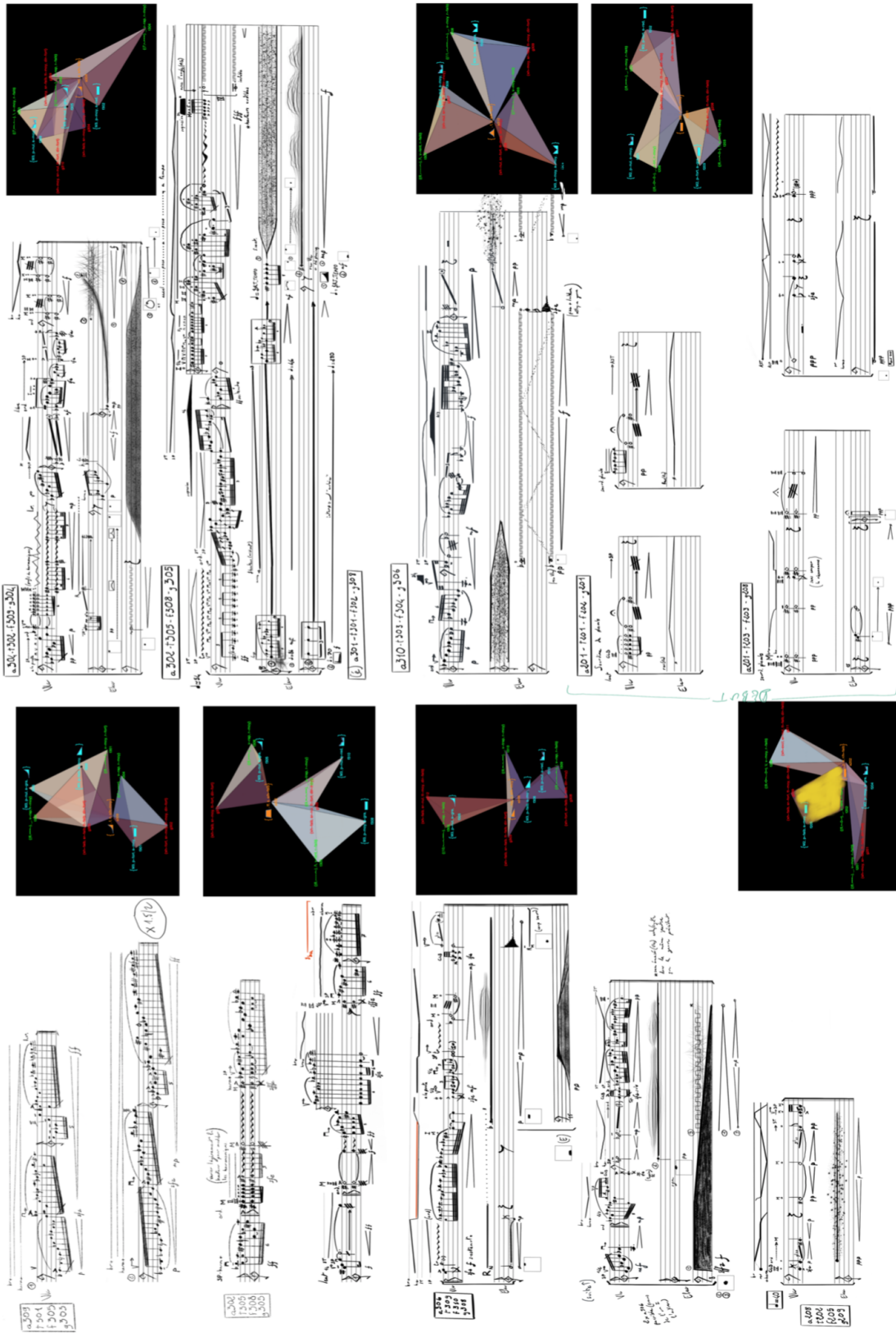


FIGURE B.6 – Réalisation d'un espace compositionnel (illustration issue de la thèse de Julia Blondeau). Le développement musical d'une pièce se traduit par un chemin dans l'espace compositionnel composés de tétraèdre. Un tétraèdre correspond à la spécification des 4 simplexes complémentaires (fréquence, rythme, attraction et timbre). Chaque tétraèdre du chemin doit être réalisé. C'est le compositeur qui effectue cette réalisation en interprétant, comme il l'entend, les paramètres symboliques de chaque simplexe. La figure reproduit une « feuille de travail » dans laquelle il s'agissait de travailler sur une suite de cellules — en préparation de *Sortir du noir* — en faisant éventuellement plusieurs versions d'une même cellule. Chaque cellule a été retravaillée puis remontée par la suite, de manière à trouver le meilleur agencement possible.

potentialité — une virtualité — de la composition en réglant le jeu des contraintes locales et globales. Et de fait, la compositrice a choisi un cheminement particulier dans un espace qui matérialise donc les choix auxquels elle est confrontée.

La notion d'espace compositionnel amène à voir une pièce musicale sous l'angle d'un système dynamique : il peut être compris comme un endroit où attracteurs et bifurcations structurent *a priori* l'évolution musicale de la pièce. Cette vue est particulièrement bien adaptée au processus génératif qui est mis en œuvre dans certaines partitions ouvertes ou dans certaines pièces interactives : le compositeur crée

un champs des possibles dont le contenu actuel sera instantié par d'autres⁴

[Tan05] et où « il est possible de ne plus voir la musique comme un chemin allant d'un point *a* à un point *b* mais comme multiplicité, comme paysage, comme atmosphère, comme champs *n*-dimensionnel de possibilités »⁵ pour reprendre les termes de Marcos Novak quand il décrit le concept de *musique navigable* [Nov97].

B.1.2 Le temps performatif

Les systèmes en informatique musicale se divisent en deux classes : ceux qui adressent le hors-temps de la composition ou bien ceux qui visent le temps-réel de la performance. Les premiers traitent du temps noté symboliquement dans la partition et qui est distinct du temps de la notation et de son traitement. Il s'oppose au temps du concert et de la musique qui est produite “en live”, “en temps-réel”, où le temps de la chose produite est le même que le temps du calcul.

Si mes travaux sur les représentations spatiales visent l'analyse et la composition et relèvent donc du hors-temps, le système *Antescofo*⁶ appartient à la seconde classe. Conçu et développé initialement par Arshia Cont [Con10], *Antescofo* couple un système de suivi de partition en temps réel avec un système réactif permettant de lancer la production de sons électroniques en synchronisme avec les musiciens humains. L'enjeu artistique est la synchronisation musicale entre les instrumentistes et la machine et l'écriture de l'électronique dans les pièces de musique mixte qui entremêlent musicien humain et réponse électronique calculée en temps réel dans le vif du concert. L'enjeu scientifique est double :

- la reconnaissance fiable en temps réel dans un flux audio d'événements musicaux complexes spécifiés symboliquement dans une partition,
- et le développement d'un langage informatique correspondant à une *notation exécutable* de l'électronique.

L'objectif est de redonner une dimension interprétative aux œuvres de musique mixte⁷. Au-delà de la synchronisation, il s'agit de tenir compte, dans la fabrique même des sons digitaux, des variables de l'interprétation comme par exemple le tempo, le mode de jeu, la dynamique, *etc.* L'interprète dès lors joue avec la machine comme avec un partenaire humain et la machine joue avec l'interprète. L'architecture et les relations entre compositeur, musiciens, partition et le système de suivi sont décrites à la figure B.7.

Le suivi de partition. Le suivi de partition est une idée qui remonte à 1983 et sur laquelle l'Ircam a travaillé intensément dès 1994, notamment pour la réalisation d'*Explosante*

4. “*fields of possibility* whose content will be managed by others”

5. “it is possible to stop seeing music as singular, as a street between point *a* and point *b*, and to start seeing music as multiple, as landscape, as atmosphere, as an *n*-dimensional field of opportunities”

6. <http://repmus.ircam.fr/antESCOFO>

7. *i.e.* qui mêlent les sons instrumentaux produit par un humain et les sons et effets électroniques pilotés par un ordinateur

Fixe, une pièce emblématique de Pierre Boulez. Mais à l'époque, l'état de l'art ne permettait pas de développer des systèmes fonctionnels. L'augmentation de la puissance de calcul a rendu possible l'utilisation d'algorithmes plus performants d'alignement du flux audio avec une partition symbolique, mais les résultats sont restés décevants.

En 2008, dans son travail de thèse, Arshia Cont a proposé de combiner les informations spectrales issues du flux audio avec les informations temporelles fournies par la partition et par l'inférence du tempo. Combiner ces deux sources d'informations a permis de développer des systèmes suffisamment performants pour les utiliser en situation de concert. Une illustration très significative des avancées permises par cette approche est que *Explosante Fixe* peut enfin, 24 ans après sa création, s'appuyer entièrement sur cette technologie pour sa réalisation.

Si l'exigence créatrice des musiciens contemporains a motivé les travaux menés dans le projet Antescofo, cette technologie est à présent au service d'un plus large public à travers la création d'une start-up. Cette technologie permet de développer des applications facilitant l'apprentissage d'un instrument en fournissant *un compagnon musical* capable de suivre et de s'adapter aux exercices de l'instrumentiste.

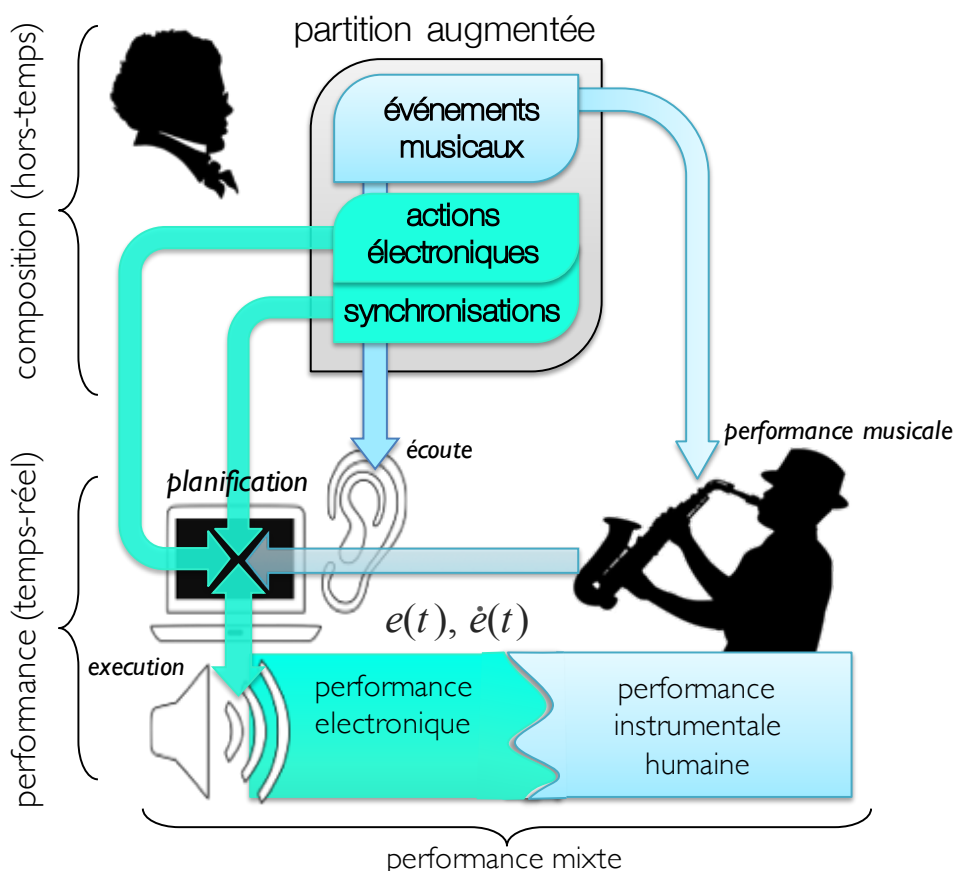


FIGURE B.7 – Schéma général du système Antescofo. La partition augmentée est une donnée d'entrée à la fois de la machine d'écoute et du module réactif. Elle comprend la partition à destination de l'interprète humain, la partition spécifiant les actions électroniques à réaliser et la synchronisation à assurer entre les deux. Les événements qui sont reconnus par la machine d'écoute sont signalés au module réactif. Celui-ci alors ordonnance et effectue des actions électronique dans le temps qui correspondent à la réalisation de la partie électronique de la partition et sa synchronisation.

Une notation exécutable de l'électronique. Ce couplage fort entre les deux sous-systèmes, machine d'écoute et langage réactif, est profondément original, la partie *perception* et la partie *action* du système ne pouvant se concevoir l'une sans l'autre. En particulier, les échanges d'informations entre les deux sous-systèmes sont *bidirectionnels*.

Mon travail dans le projet Antescofo a porté sur la partie *action* et en dotant le système d'un vrai langage temps-réel synchrone et temporisé, adapté aux besoins des compositeurs. Ce travail a été effectué en collaboration avec mon étudiant en thèse, José Echeveste.

Plusieurs constructions originales, comme les itérations temporisées ou bien la notion de *curve* répondent à des besoins musicaux spécifiques et permettent aux compositeurs d'exprimer de manière concise des processus impliquant des relations temporelles complexes.

Un point important est que tout calcul est fait *a priori* « en parallèle avec les autres calculs ». Le parallélisme dont il est question ici est un *parallélisme logique* tel que celui à l'œuvre dans les *langages synchrones* [BG92] : deux actions peuvent s'évaluer en même temps (les actions atomiques sont instantanées) mais quand elles prennent place au même instant, elles sont ordonnées (suivant un modèle de temps super-dense [MP93, LML06]).

La documentation actuelle sur le DSL Antescofo représente plus de 450 pages web que j'ai écrites à destination des compositeurs, cf. <http://support.ircam.fr/docs/Antescofo/manuals>.

Un modèle temporel original. Une des difficultés de conception du langage réactif est que le temps performatif repose à la fois sur des événements que l'on peut considérer comme atomiques (par exemple une attaque de note) et de durées qui proviennent d'un écoulement continu du temps, réglé par un tempo qui va fluctuer intentionnellement (par exemple un *rubato*). Ces deux dimensions temporelles, la dimension événementielle et la dimension chronométrique (ou *durative*), peuvent se contredire, par exemple quand l'occurrence d'une note viole les contraintes spécifiées par la durée de la note précédente (durée notée dans la partition mais relative au tempo du musicien qui n'est connu que lors de l'interprétation).

J'ai introduit la notion de *scope temporel* pour expliciter la gestion événementielle et temporisée du temps d'un processus. Un scope temporel détermine l'avancement du temps lors de l'évaluation des actions d'un processus. La date d'une action peut être absolue ou relative à une action précédente. L'expression de cette date peut être en temps relatif (3 ms après telle autre action) ou bien relative à un tempo (3 pulsation après l'occurrence d'un événement musical) qui varie au cours du temps. Cette date peut aussi être exprimé de manière logique (par exemple quand une expression logique arbitraire sera vérifiée, expression logique qui peut faire intervenir des opérateurs modaux [GE14a]) et peut impliquer des informations en provenance de l'environnement (réception d'un message arbitraire, machine d'écoute qui observe le musicien).

Les problématiques temporelles dans Antescofo sont en particulier exposées dans les publications [ECGJ13, GE14a, Ech15, DBG⁺16, GECC17].

Stratégies de synchronisation. Le langage Antescofo introduit des *stratégies de synchronisation* qui permettent aux compositeurs de synchroniser de manière fine les contraintes temporelles relatives à chaque dimension temporelle. Un scope temporel est défini par une référence et une stratégie de synchronisation qui définit comment faire avancer le temps⁸ en fonction de l'avancement du temps dans la référence. On peut par exemple se synchroniser uniquement avec le tempo, ou bien uniquement avec les événements, ou encore par

8. à savoir une date caractérisée par une position et une fluxion entre deux événements datés définie par un tempo

diverses stratégies mixtes correspondant à des stratégies compositionnelles plus complexes (point d’articulation, cibles, *etc.*).

Les stratégies de synchronisation sont principalement utilisées pour répondre au *problème de l’interprétation* en musique mixte, cf. figure B.8, en décrivant la synchronisation avec le musicien. Quelques exemples de stratégie de synchronisation et des notions nécessaires à ces mécanismes sont illustrées à la figure B.9. Il est aussi possible de spécifier des stratégies de rattrapage d’erreurs⁹ [ECGJ11, GC12, CEGJ12].

Ce modèle de temps hybride doit aussi tenir compte des différentes échelles temporelles qui interviennent dans un système d’informatique musicale temps-réel : du temps audio (avec une fréquence d’échantillonnage typique de 44kHz) à différentes échelles de contrôle (de la milliseconde à la minute). **Antescofo** offre plusieurs constructions permettant d’articuler ces contraintes à diverses échelles.

Utilisation d’Antescofo. Le couplage unique au monde d’une machine d’écoute et d’un langage temps-réel hybride dédié à la musique est la raison du succès d’Antescofo, qui a été utilisé dans plus d’une centaine de concerts depuis 2011 et qui est enseigné indépendamment de l’IRCAM, à Shanghai, en Corée ou à Stuttgart. Par ailleurs, je collabore de manière étroite avec des compositeurs afin de comprendre leurs besoins et développer plus avant le langage, avec par exemple le développement d’une notion de pattern temporel [GE14b].

L’implémentation d’Antescofo représente un gros effort avec des contraintes lourdes (“le concert a lieu ce soir”). Cependant il permet d’adresser à travers une application pratique des questions d’une nature fondamentale : quelle sont les relations temporelles dans une interaction homme-machine ? Pouvons-nous partager une notion commune de temps avec nos machines afin de permettre une coordination fluide de nos activités ? Comment articuler un temps événementiel et un temps duratif ? Ce développement se heurte aussi à des verrous techniques qu’il faut adresser : quelles sont les architectures logicielles permettant d’assurer des contraintes temporelles dures ? comment vérifier ces contraintes et valider un système réactif ? *etc.*

Ces problèmes scientifiques et techniques ont un intérêt qui va au-delà de la musique contemporaine, ce qui explique l’intérêt de la communauté informatique¹⁰ pour Antescofo et a motivé la création d’une équipe-projet INRIA avec mon arrivé à L’IRCAM et porté par Arshia Cont. Initialement dénommé MuSync, le projet a été validé à l’automne 2011 et l’équipe-projet qui en a découlé a été créée sous le nom de MuTant au 1er janvier 2013.

Résultats. Parmi les résultats scientifiques et techniques obtenus pendant ce quinquennal, on peut citer :

- Une sémantique d’un fragment statique du langage en terme d’automate temporisé [ECGJ13].
- Une sémantique dénotationnelle du langage complet [Ech15] reposant sur un domaine permettant de représenter des événements atomiques et des durées.
- Le développement de stratégies pertinentes de synchronisation musicale. Voir par exemple l’utilisation qui en est faite par la compositrice Julia Blondeau <http://www.juliablondeau.fr/electronics-and-temporal-writing.html> ou le compositeur Christopher Trapani [TE14].

9. que l’erreur proviennent de la machine d’écoute ou d’une erreur de l’instrumentiste suivi

10. Par exemple j’ai présenté le projet aux journées scientifiques INRIA en 2015. Nous participons au réseau ANR Chronos piloté par Gérard Berry. J’ai présenté le projet aux réunion du groupe de travail temps réel CISEC à Toulouse en 2014. *Etc.*

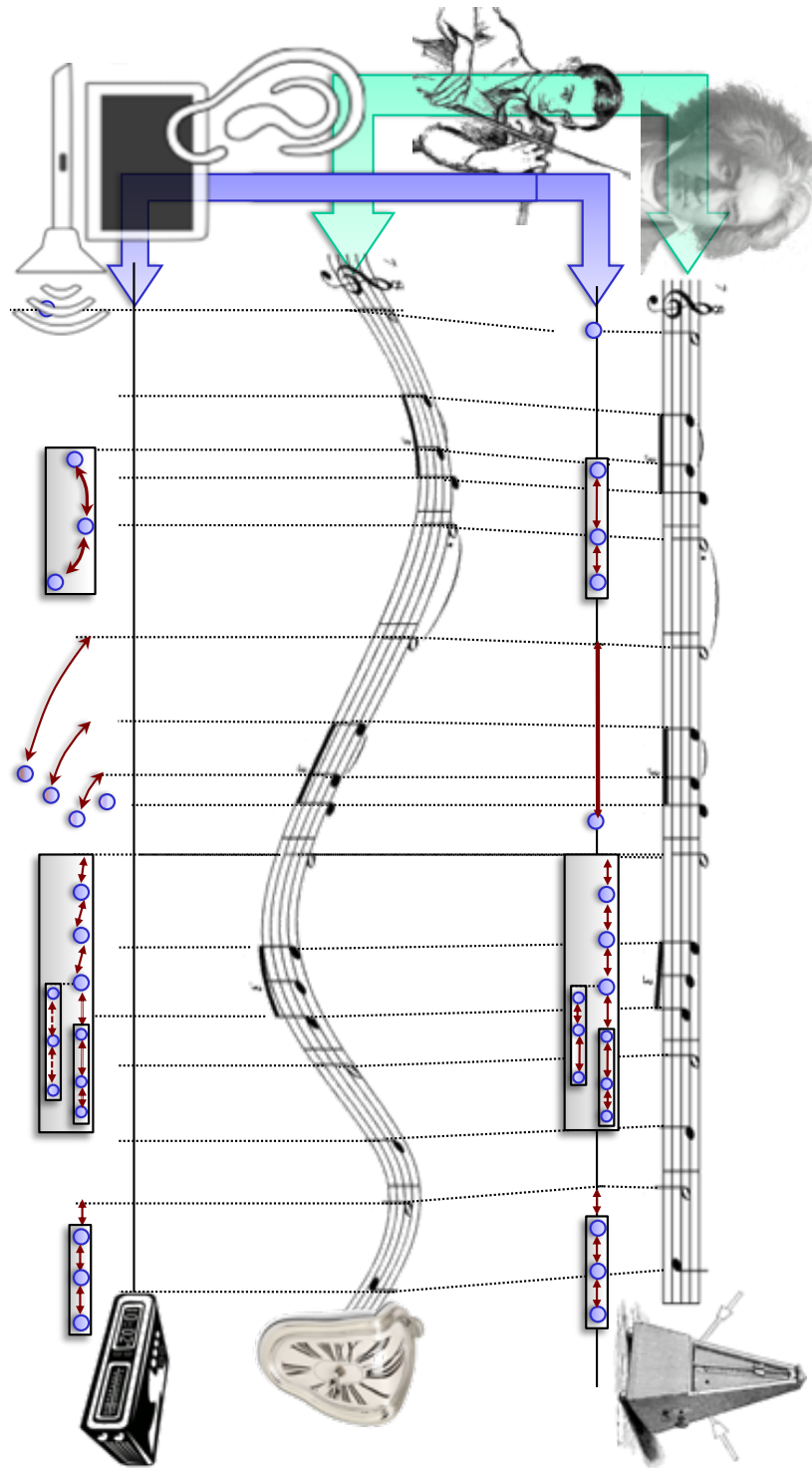


FIGURE B.8 – Le problème de l’interprétation en musique mixte. Afin de retrouver la dimension interprétative de la performance musicale, il est nécessaire que la partie électronique s’adapte aux variations des relations temporelles que l’instrumentiste humain impose aux relations idéelles exprimées dans la partition. Ces variations ne doivent pas être conçues comme une approximation ou une erreur par rapport à une “participation-spécification”, mais comme un espace de liberté laissé par le compositeur à l’instrumentiste. Cet espace de liberté peut provenir d’une sous-spécification explicite de la partition (absence d’indication de tempo par exemple, ou à travers l’expression qualitative des relations temporelles comme un “accelerando” qui ne précise pas la courbe d’accélération). Cette sous-spécification peut aussi être implicite. Par exemple les relations de simultanéité apparentes entre voix indépendantes ne doivent pas être comprises “note à note”, mais ne sont valides que pour certains événements musicaux particuliers (début ou fin de phrase musicale, événement pivot, etc.). La conséquence est qu’il est nécessaire d’ajuster les relations temporelles entre actions réalisant la partie électronique de la partition en fonction de la variation constatée de l’interprète vis-à-vis de la partition. Cet ajustement dépend fortement du contexte musical, de l’objectif du compositeur et il ne peut être déduit automatiquement de la partition. Il doit être spécifié explicitement par le compositeur dans la partition augmentée, à l’aide d’une *stratégie de synchronisation*.

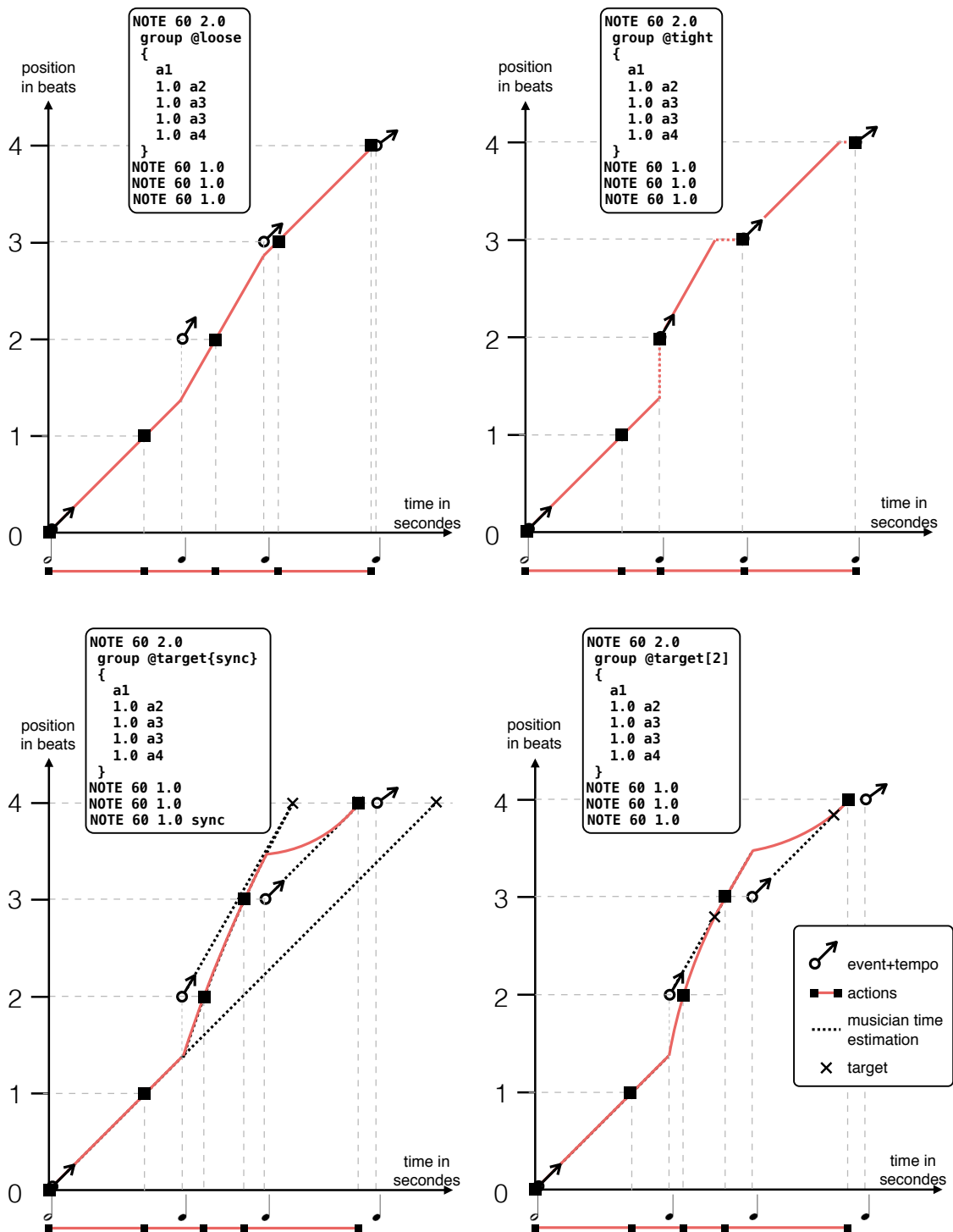


FIGURE B.9 – Ces diagrammes temps-temps représentent l'évolution du temps propre d'une phrase électronique (en beats) avec le passage du temps d'un processus avec lequel elle est synchronisée (on peut simplement penser à l'écoulement du temps physique en secondes dans lequel prennent place des événements atomiques). Un vecteur correspond à l'occurrence d'un événement (point de base du vecteur) et au tempo courant à ce moment là (*i.e.*, la vitesse d'écoulement du temps propre de la phrase mesuré dans le temps du processus de référence). Les actions à synchroniser sont représentées par des carrés et la courbe représente la relation entre les beats et les secondes.

Dans le diagramme en haut à gauche, seul le tempo est pris en compte pour calculer la date des actions à effectuer. Dans le diagramme en haut à droite, l'occurrence du dernier événement sert de repère pour calculer les actions qui suivent avec la connaissance du tempo le plus récent. Quand un événement attendu n'arrive pas à la date prévue, l'horloge est tout simplement stoppée. Quand un événement arrive plus tôt que prévu, l'horloge est remise à l'heure de manière discontinue.

Les deux diagrammes du bas correspondent à des remises à l'heure continues et qui ne dépendent que de la différence entre la date anticipée et la date actuelle de la survenue d'un événement.

- Une notion originale de *patterns temporels* qui intègre durée et événement [GE14b]. On peut ainsi définir des événements logiques comme : “une note suivie par la même note transposée de deux octaves dans un intervalle de trois pulsations” et les filtrer en temps réel.
- Une interface graphique pour l’édition et le contrôle en temps réel d’un suivi Antescofo [CAG14].
- Des mécanismes de définition de tableau en compréhension, de spécification de fonctions symboliques, d’échantillonnage temporel de celles-ci, des fonctions curryfiées et des processus d’ordre supérieur de première classe, *etc.* Cf. le manuel de référence du langage [GCE15].
- Une architecture temporelle et des méthodes d’implémentation permettant la mise en œuvre de la notion de scope temporel de manière causale, efficace et compatible avec un contexte temps-réel.

On trouvera à la page 32 des éléments factuels quant à la diffusion du système.

B.1.3 Concepts et outils pour les œuvres interactives

La distinction entre temps performatif et hors-temps de la composition s’estompe dans le cas des musiques improvisées et des œuvres ouvertes. Dans cet axe de recherche, nous visons à développer des outils permettant d’adresser simultanément les deux problématiques¹¹. Nos travaux dans ce domaine se sont déroulés suivant trois directions.

L’extension de l’environnement OpenMusic par des mécanismes réactifs. L’environnement OpenMusic¹² est un outil de composition assisté par ordinateur. Il repose sur un langage fonctionnel graphique qui correspond à un modèle d’évaluation *demand-driven*.

L’extension étudiée avec Jean Bresson repose sur la conception d’une stratégie d’évaluation mixte : certaines parties d’un programme OpenMusic sont évaluées par une stratégie *data-driven* (parties réactives) et d’autres avec la stratégie d’évaluation *demand-driven* classique. Ce modèle mixte prend en compte la construction incrémentale d’un programme OpenMusic. Il simplifie grandement l’interaction d’un processus OpenMusic avec l’environnement. L’article [BG14a] présente une sémantique et des mécanismes d’implémentation permettant de préserver en grande partie la base de codes existants.

Coordonner des scénarios d’improvisation. Cette étude, portée par les travaux de thèse de Jérôme Nika, prend place dans les recherches menées autour des systèmes OMax et Improtek. Ces systèmes écoutent l’improvisation en temps-réel d’un musicien et tentent de l’accompagner. Si initialement ces systèmes étaient agnostiques, il s’agit ici de guider la réponse de la machine par des scénarios et des stratégies d’accompagnement et d’improvisation.

La réalisation de scénarios d’improvisation pose des problèmes difficiles car ceux-ci articulent différentes échelles de temps et doivent permettre d’anticiper plusieurs réponses qui doivent être révisées au fur et à mesure du déroulement de l’improvisation.

Nous avons utilisé Antescofo pour coupler les processus compositionnels implémentés en OpenMusic avec des bibliothèques d’écoute et de navigation dans une mémoire musicale construite en temps-réel. Ces travaux ont été présentés dans l’article [NECG14].

11. On peut d’ailleurs remarquer qu’Antescofo est à cheval entre ces deux catégories puisque c’est un outil d’écriture pour le compositeur, qui est cependant utilisé lors de la performance.

12. <http://repmus.ircam.fr/openmusic/home>

Projet ANR inedit. À mon arrivé à l'IRCAM, j'ai rédigé le projet ANR inedit, qui vise à fonder scientifiquement l'interopérabilité des outils de création sonore et musicale, afin d'ouvrir la voie à de nouvelles dimensions créatives couplant écriture du temps et écriture de l'interaction, en particulier pour développer des œuvres interactives ou ouvertes.

L'approche développée dans inedit repose sur une vision "langage" : une œuvre interactive est vue comme un interprète au sens informatique qui doit articuler des flux temporels bas niveaux localement synchrones (le signal audio) dans un temps événementiel globalement asynchrone (les événements pertinents pour le processus de composition). Le calcul effectué consiste à répondre aux signaux et aux événements en provenance de l'environnement par des actions diverses coordonnées dans le temps. Cette coordination est spécifiée par un compositeur qui doit pouvoir exprimer et visualiser simplement des contraintes temporelles et des interactions complexes à travers différents outils dédiés. Voir la figure B.10.

Le projet inedit, qui s'achève en octobre 2015, a été mis en avant par l'ANR <http://goo.gl/GMJFTK>.

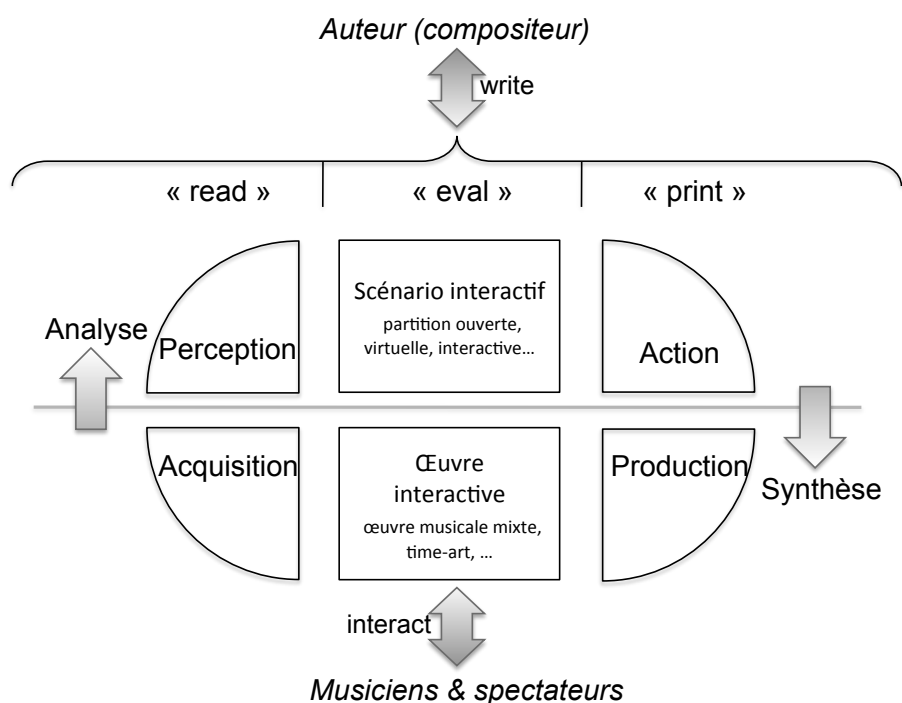


FIGURE B.10 – Architecture d'une œuvre interactive vue comme un interprète (au sens informatique) articulant le traitement périodique des signaux audio (en temps réel dur) et les événements issus des interactions prévues par le compositeur.

B.2 Collaborations

Institut des systèmes complexes – Paris, Île-de-France, RNSC. Ce groupe de travail CLASYCO (DSL pour les systèmes complexes) du réseau national des systèmes complexes (RNSC); séminaire MaMux (financé en partie par RNSC); participation à la feuille de route du RNSC.

Gérard Berry. Je participe au réseau CHRONOS financé par l’ANR porté par Gérard Berry au Collège de France depuis novembre 2012 sur les notions de temps et d’événement en informatique. Mon doctorant, José Echeveste, va effectuer un post-doc au Collège de France et nous voulons développer dans ce cadre les approches synchrones sur le web pour des applications musicales.

Hanna Kludel, Franck Pommereau, Franck Delaplace. Cette collaboration avec des enseignants-chercheurs du laboratoire IBISC à Evry se déroule dans le cadre du projet ANR blanc SynBioTIC. Le travail effectué porte sur le développement de formalismes de modélisation pour la biologie synthétique et les techniques de vérification associées.

Olivier Michel et Antoine Spicher. La collaboration de longue date avec Olivier Michel et Antoine Spicher (LACL, université de Paris-Est) porte sur MGS. Nous avons étudié l’application de la programmation spatiale à la représentation de notions musicales, en particulier avec la thèse de Louis Bigo.

Avec Antoine Spicher nous poursuivons un travail à long terme sur le calcul discret. À partir des résultats exposés dans notre article à *Physica D* (2008), nous voulons développer un calcul sur les espaces discrets similaire au calcul à plusieurs variables en analyse. L’objectif est d’obtenir un calcul formellement similaire, opérant dans un espace cellulaire, sans références à un processus continu sous-jacent.

Avec Antoine Spicher, nous avons été sollicités pour plusieurs soumissions de projet européen qui n’ont malheureusement pas abouti :

- projet GroCyPhy “Growing Cyber-Physical Machines Adapted to Complex Environments” : projet avec Susan Stepney (York), Ada Diaconescu (Mines-Telecom), Giuseppe Nicosia (Catania), Ottoline Leyser (Cambridge). Soumission auprès de CHISTERA en 2014.
- projet “Computer Augmented Vertical Ecosystem” : développement d’un mur végétal augmenté, avec Peter Dittrich (Jena) Klaus Peter Zauner (Southampton), Rachel Armstrong (Greenwich). Deux soumissions en 2014 auprès de FET.

Par ailleurs, Olivier Michel et Antoine Spicher participent au projet blanc SynBioTIC.

Camillo Rueda. Camilo Rueda est professeur à l’université de Cali en Colombie. Je travaille avec lui dans le cadre du réseau AVISPA (échange franco-colombien) sur la programmation par contrainte concurrente et ses variantes temporisées. J’ai effectué un séjour de recherche de deux semaines en Colombie en juin 2013 et Camilo est venu plusieurs fois en France, en particulier sur un mois de professeur invité de l’UPMC.

Collaborations à l’IRCAM

Arshia Cont, José Echeveste et Florent Jacquemard. Ma collaboration avec Arshia Cont et Florent Jacquemard s’inscrit dans le cadre de l’équipe-projet INRIA MuTant. J’ai encadré la thèse de José Echeveste qui s’est déroulée dans ce contexte et qui visait à étendre le langage réactif d’Antescofo afin de fournir à un compositeur des constructions

expressives et adaptées à l'écriture du temps et de l'interaction dans les pièces de musiques mixtes.

Avec Arshia Cont, j'ai aussi proposé le projet ANR/ContInt inedit (démarrage du projet à l'automne 2012) dont l'objectif est de développer des approches permettant de coordonner finement les couches événementielles et audio-numériques des outils d'authoring et de performances dans un contexte distribué.

Avec Florent Jacquemard, j'ai travaillé sur l'adaptation de méthodes d'analyses statiques et de tests au contexte particulier du système Antescofo.

Jean Bresson. Je travaille avec Jean Bresson, maître d'œuvre du système OpenMusic, à étendre le modèle de calcul de ce langage. OpenMusic est un langage visuel reposant sur une évaluation *demand-driven* des programmes graphiques. Initialement destiné à la phase de composition pour le calcul hors-temps de structures musicales, de nouvelles applications nécessitent un modèle d'évaluation mixte permettant d'évaluer certaines parties d'un programme avec une stratégie *data-driven*. Nous avons récemment proposé une sémantique et des mécanismes d'implémentation permettant de préserver en grande partie la base de code existante.

Moreno Andreatta. Ma collaboration avec Moreno Andreatta porte sur la formalisation des objets musicaux à partir de notions topologiques et des approches développées dans le domaine des systèmes dynamiques (orbites, action d'un groupe, etc.). Nous avons aussi développé l'application musicale du travail réalisé avec Anton Freund.

Julia Blondeau. Julia Blondeau est compositrice et a effectué entre 2013 et 2017 une thèse en art, dont je suis le directeur et qui est financée par Sorbonne Universités. Je travaille avec elle sur des représentations spatiales des structures d'intervalles utilisées dans des stratégies compositionnelles et l'application de la Q-analyse à la musique. Ce travail étend le domaine de recherche exploré avec la thèse de Louis Bigo en passant de l'analyse à l'écriture musicale.

Gilbert Nouno, Christopher Trapani. Gilbert Nouno (lauréat de la Villa Medici) et Christopher Trapani (University of Colombia) sont tous deux compositeurs et utilisent Antescofo de manière très avancée. José Echeveste et moi-même travaillons avec eux sur la mise en œuvre du langage pour la réalisation de pièce complexes [TE14].

Gilbert Nouno a en particulier utilisé Antescofo pour la pièce d'Olga Neuwirth *Le Encantadas o le avventure nel mare delle meraviglie*¹³ (Le Encantadas ou les aventures en mer des merveilles d'après Herman Melville). Antescofo est utilisé de manière essentielle pour contrôler la spatialisation. Cette pièce remarquable (qui recrée l'acoustique de l'église de San Lorenzo à Venise) a donné lieu à une installation au Centre Pompidou¹⁴, installation qui utilisait aussi Antescofo et qui a été vue par plus de 10 000 visiteurs.

Thomas Goepfer. Thomas Goepfer est réalisateur en informatique musicale (RIM). il a utilisé Antescofo pour recoder la *Polyrhythmic Machine*, dispositif génératif utilisé par le compositeur Yann Maresz dans de nombreuses compositions pour contrôler la synthèse sonore. L'implémentation précédente devenait trop limitée (on ne pouvait pas gérer plus d'une centaine d'oscillateurs simultanément). L'implémentation en Antescofo ne présente pas ces limitations, est bien plus expressive, offre de nouvelles possibilités de contrôle et permet une définition modulaire et incrémentale des fonctions de transition des oscillateurs.

13. <https://goo.gl/HAiGpi>

14. <http://brahms.ircam.fr/works/work/40624/>

Thomas Goepfer a aussi utilisé Antescofo pour la réalisation de *Voces Nómadas*¹⁵ de Alberto Posadas : le problème abordé est le contrôle très dynamique des effets appliqués sur les voix de 14 chanteurs, effets qui peuvent changer d’un phonème à un autre.

Dans ces deux applications, le suivi n’est pas utilisé : c’est le DSL d’Antescofo qui est utilisé en tant que séquenceur programmable et très expressif.

Augustin Muller. Augustin Muller est réalisateur en informatique musicale et a utilisé Antescofo pour la recreation de *Explosante Fixe*¹⁶, pièce emblématique de Pierre Boulez. Ce recodage de l’électronique avait pour objectif d’assurer la pérennité de l’œuvre, mais aussi de mettre en œuvre plusieurs dispositifs prévus dans la partition mais qui n’ont jamais pu être réalisés pour des raisons technologiques.

La réalisation de la partie électronique en Antescofo a permis d’expliciter certains mécanismes communs aux différents mouvements électroniques, grâce à l’ordre supérieur permis par le DSL.

José Miguel Fernandez. José Miguel Fernandez est compositeur mais aussi RIM : il assure la réalisation des parties électroniques pour de nombreux compositeurs. Pour répondre à ses besoins, j’ai introduit dans Antescofo une notion de tableaux et leur manipulation déclarative en compréhension. J’ai aussi étendu les structures de données du langage avec une notion de fonction vectorielle symbolique. Ces deux structures sont utilisées intensivement dans le contrôle fin de processus de synthèse.

José Miguel Fernandez a obtenu une bourse pour effectuer un doctorat en composition sous ma supervision. Ce travail de thèse a débuté en décembre 2017.

B.3 Positionnement dans l’unité

Je fais partie à la fois de l’équipe *RepMus* (représentations musicales) et de l’équipe-projet INRIA MuTant qui a pris place dans le contexte de l’équipe IRCAM (cf. section suivante).

Au sein de *RepMus*, mes travaux s’insèrent dans les quatre thèmes de recherche développés par l’équipe : (A1) paradigme de programmation pour la musique, (A2) musicologie computationnelle, (A3) système d’interaction symbolique, (A4) articulation symbole–signal. Plus précisément, mes recherches portent sur les représentations topologiques de données musicales symboliques. Elles se coordonnent avec le projet “math & musique” de Moreno Andreatta (chercheur CNRS dans l’équipe). Je travaille aussi les modèles temporisés de la programmation par contraintes concurrentes (G. Assayag et C. Rueada qui a été plusieurs fois professeur-invité dans *RepMus*). Je développe aussi avec Julia Blondeau des représentations spatiales de la forme symbolique d’une pièce musicale.

Mes activités dans MuTant sont complémentaires et se concentrent sur Antescofo et le temps performatif. Cela dit, à l’intersection de MuTant et *RepMus*, nous avons développé avec Jean Bresson, qui est le porteur du système OpenMusic, un modèle d’exécution réactif.

Antescofo représente un gros effort de développement logiciel, ce qui m’a amené à participer aux “réunions développeurs” de l’IRCAM. J’interagis aussi avec les RIM (réalisateur en informatique musicale) qui assistent les compositeurs lors de la phase de production d’une œuvre de musique mixte et qui sont les utilisateurs en première ligne du système, et avec l’équipe pédagogique qui a organisé plusieurs formations sur Antescofo (à destination

15. <https://goo.gl/61ottE>

16. <https://goo.gl/nhXdpM>

de compositeur mais aussi d’artistes-plasticiens, de régisseurs de plateaux, ingénieurs du son, *etc.*).

B.4 L’équipe-projet INRIAT MuTant

L’équipe-projet INRIA MuTant a été créée en janvier 2013 après une année de pré-projet (équipe MuSync). Au sein de cette équipe, j’ai pris en charge la conception et le développement du langage dédié d’Antescofo (interprétation, analyse statique et compilation, gestion mémoire, ordonnancement temps-réel, systèmes réactifs). Arshia Cont, créateur de l’équipe, a concentré son travail sur la machine d’écoute du système (mobilisant des techniques d’apprentissage et de traitement du signal) et Florent Jaquemard a développé ses recherches sur le test de systèmes temporisés (automates temporisés) et les problèmes de quantifications rythmiques (réécriture, XML).

À mon arrivé en janvier 2011, le DSL d’Antescofo se réduisait à permettre l’envoi de messages sur la notification d’un événement musical par un module d’écoute.

Aujourd’hui, le langage intègre au sein d’un modèle cohérent des approches synchrones (issues de langages pour les systèmes temps-réels embarqués comme Esterel ou Lucid Synchrone) et des approches temporisées. Il est possible au compositeur de définir des scopes temporels qui permettent de décrire l’avancement d’une séquence d’actions discrètes et continues, relativement à l’avancement d’un autre scope temporel, en suivant des stratégies de synchronisations sophistiquées permettant un “recalage musical” suivant le contexte applicatif. Le langage a été utilisé dans des applications artistiques en dehors du contexte de suivi de partition (installation, suivi de geste, coordination de musiciens en concert, improvisation automatique dans le contexte du projet ANR ImproTek).

Évaluation de l’équipe. L’équipe MuTant a été évaluée en mars 2016. Notre rapport d’évaluation est accessible sur la page <http://repmus.ircam.fr/giavitto/cnrs>. En particulier, je suis le rédacteur des parties 2.5, 3.2, 5.1 et 5.4 qui portent spécifiquement sur mon travail.

Les retours d’évaluation sont particulièrement élogieux et soulignent la recherche remarquable autour du développement logiciel du système, qui allie développement théoriques et pratiques. Je cite trois extraits de ce rapport qu’on trouvera aussi à l’adresse ci-dessus :

[...]

The panel thinks that teams should not only do research of the highest caliber but the research should also have impact on industrial practice. We think this view is consistent with INRIA’s stated goals. The panelists were of unanimous opinion that the project MuTant represented the biggest success, if “industry” is interpreted broadly. MuTant, under the leadership of Arshia Cont, has produced a world-class interactive computer music system that is able to assist both in music composition and in performance (for accompaniment). It has released Antescofo software system, which is actively used by hundreds if not thousands of users. What is impressive is that Antescofo embodies the group’s scientific results that span a wide gamut of disciplines including machine learning, signal processing, and real-time languages.

[...]

The MuTant group is remarkable in that it has both an excellent reputation within its scientific community, as witnessed by many publications in top-notch journals and conferences, as well as with non-technical users of its Antescofo

software. To the committee, this is perfect: their work is appreciated by both those who appreciate the nuances of its technical underpinnings as well as those who merely want to use it to accomplish an end goal.

[...]

The committee has essentially no criticism of what the MuTant group has been doing and how it has been doing it. If anything, we encourage other project groups to examine and attempt to emulate the MuTant group's success to the extent possible.

Direction et devenir de l'équipe-projet MuTant. Arshia Cont et José Echeveste se sont lancés au début 2016 dans la création d'une start-up reposant sur la technologie issue du projet Antescofo pour développer des applications à destination du grand public. La direction de l'INRIA m'a alors demandé d'assurer la direction de l'équipe jusqu'à la fin 2016, date de renouvellement du projet MuTant, et de proposer une continuation.

Si j'ai accepté d'assurer la direction de l'équipe jusqu'à la fin de l'année, j'ai cependant informé l'INRIA que je ne souhaitais pas proposer dans l'immédiat de projet de recherche visant à poursuivre l'activité de MuTant, pour plusieurs raisons. Le succès des travaux de recherche menés par MuTant réside en grande partie dans le couplage très fort entre traitement du signal et langage de programmation. Cette alliance s'est concrétisée par ma collaboration étroite avec Arshia. Les travaux à l'intersection avec Florent Jaquemard sont moins centraux, moins porteurs, et les travaux que je développe en propre sur les représentations topologiques sont des recherches plus spéculatives, à long terme, et qui ne cadrent pas avec les attentes de l'INRIA. Le futur de l'équipe pose donc un problème de masse critique (chercheurs) et d'orientation scientifique. Par ailleurs, je souhaite que les transferts de propriétés intellectuelles entre les tutelles et la start-up, transfert en cours de finalisation, soient réglés avant de poursuivre des activités de recherche dans cette thématique. En conséquence de quoi, l'équipe-projet s'est achevée à la fin 2016.

B.5 Distinctions

- Le système *Antescofo* est lauréat de la 3^{ème} édition des Objets de la nouvelle France Industrielle du ministère du redressement productif (2013).
- Louis Bigo que j'ai co-encadré en thèse, soutenue en 2013, a obtenu le prix Jeune Chercheur Science et Musique la même année.
- Avec José Echeveste et Arshia Cont, mes co-auteurs, nous avons obtenu le Best Paper Award (Musical Acoustics category) of the 167th Acoustical Society of America Meeting (2014).
- Avec Iris Ren et René Doursat, Best student paper award pour l'article "Synchronization in Musical Group Playing" à la conférence internationale SCMMR 2015.



C

Publications depuis janvier 2013

C.1 Revue à comité de lecture

- [RC-1] S. Dulman, J.-L. Giavitto, A. Spicher and M. Viroli. *Spatial Computing : introduction to the special issue*, 31 :4 *The Knowledge Engineering Review*, pp 323–324, September 2016, Cambridge University Press.
- [RC-2]] A. Freund, M. Andreatta and J.-L. Giavitto. Lattice-based and Topological Representations of Binary Relations with an Application to Music. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, April 2015, Volume 73, Issue 3-4, pp 311–334, Springer Verlag (Germany). DOI 10.1007/s10472-014-9445-3
- [RC-3] J. Echeveste, A. Cont, J.-L. Giavitto and F. Jacquemard. Operational semantics of a domain specific language for real time musician–computer interaction *Discrete Event Dynamic Systems*, 23 (4) :343–383, 2013.
- [RC-4] F. Delaplace, C. Di Giusto, J.-L. Giavitto, H. Klaudel. Activity Networks with Delays An application to toxicity analysis. *Fundamenta Informaticae* IOS Press (en cours de publication).
- [RC-5] J. Bresson and J.-L. Giavitto. A reactive extension of the OpenMusic visual programming language. *Journal of Visual Languages and Computing*, 25 (4) :363–375, Elsevier, 2014. DOI : 10.1016/j.jvlc.2014.03.003
- [RC-6] J.-L. Giavitto, O. Michel, and A. Spicher. Unconventional and Nested Computations in Spatial Computing. *Int. J. of Unconventional Computing*, 9(1–2) :71 – 95, 2013.
- [RC-7] J. Pascalie, M. Potier, T. Kowaliw, J.-L. Giavitto, O. Michel, A. Spicher, R. Doursat. Developmental Design of Synthetic Bacterial Architectures by Morphogenetic Engineering *ACS Synthetic Biology*, American Chemical Society, 2016, 5 (8), pp.842-861.
- [RC-8] N. Schmidt Gubbins, A. Cont and J.-L. Giavitto. First step towards embedding real-time audio computing in Antescofo. *Investigación, Interdisciplina, Innovación* (I3 Journal de Investigación de Pregrado). Chili July 2015.

C.1.1 Conférences invitées dans des congrès

- [Inv-1] Jean-Louis Giavitto. *Les stratégies d’écriture du temps dans Antescofo* Colloque « État de l’art / état d’alerte », Collège de France, 06 juin 2017.
- [Inv-2] Sharing (musical) time between machines and humans : simultaneity, succession and duration in real-time computer-human musical interaction. *Beyond Logic*, Cerisy-la-Salle, 22–27 May 2017.

- [Inv-3] Jean-Louis Giavitto. *Constructive Topology, Compositional Space and Temporal Relationships* Mathemusical Conversations – Mathematics and Computation in Music Performance and Composition. Joint International Workshop of National University of Singapore Institute for Mathematical Sciences and Yong Siew Toh Conservatory of Music. 13–15 February 2015, Singapour.
- [Inv-4] Jean-Louis Giavitto. *Accorder le temps de l’homme et le temps de la machine*. Journées scientifiques INRIA. Nancy, juin 2015.
- [Inv-5] Jean-Louis Giavitto. *Accorder le temps de l’homme et le temps de la machine en Informatique musicale*. Colloque “Le calcul et le Temps” organisé par J.-B. Joinet, Université Jean Moulin (philosophie) Lyon 3, 6–7 novembre 2014.
- [Inv-6] Jean-Louis Giavitto. *Présentation Introductive*. Rencontres interdisciplinaires de Rochebrune, “La preuve et ses moyens”, 13 au 19 janvier 2013.
- [Inv-7] Jean-Louis Giavitto. *Non-Standard Multiset*. Journées “Let’s Imagine the Futur” en l’honneur de Jean-Pierre Banâtre, 7-8 Novembre 2012, Rennes.

C.2 Actes de colloques à comité de lecture

- [CI-1] L. Bigo, J.-L. Giavitto, and A. Spicher. Spatial Programming for Musical Transformations and Harmonization In *Spatial Computing Workshop (SCW 2013)*, volume W09 IFAAMAS, Saint-Paul Minnesota, USA, Mau 2013.
- [CI-2] L. Bigo, A. Moreno, J.-L. Giavitto, O. Michel and A. Spicher. Computation and Visualization of Musical Structures in Chord-Based Simplicial Complexes In *Mathematics and Computation in Music*, volume 7937 of *LNCS*, pp. 38-51. Montreal, Canada, June 2013. Springer.
- [CI-3] J.-L. Giavitto and J. Echeveste. Real-Time Matching of Antescofo Temporal Patterns. In Proc. of the 16th *International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP’14)*. September 2014, Canterbury, United Kingdom. ACM press.
- [CI-4] A. Cont, J. Echeveste and J.-L. Giavitto. The Cyber-Physical System Approach for Automatic Music Accompaniment in Antescofo. In *167th Acoustical Society of America meeting.*, Automatic Musical Accompaniment Systems track. Providence, 5-9 May, 2014. **Best Paper Award** in the Musical Acoustics category.
- [CI-5] J. Nika, J. Echeveste, M. Chemillier and J.-L. Giavitto. Planning Human-Computer Improvisation. In Proc. of the *40th International Computer Music Conference (ICMC)* joint with the 11th Sound & Music Computing conference (SMC) (ICMC+SMC anniversary), 14–20 September Athens, Greece, 2014.
- [CI-6] T. Coffy, J.-L. Giavitto and A. Cont. AscoGraph : A User Interface for Sequencing and Score Following for Interactive Music. In Proc. of the *40th International Computer Music Conference (ICMC)* joint with the 11th Sound & Music Computing conference (SMC) (ICMC+SMC anniversary), 14–20 September Athens, Greece, 2014.
- [CI-7] J. Pascalie, R. Doursat, M. Potier, A. Spicher, T. Kowaliw, J.-L. Giavitto and O. Michel Soft to Wet : Morphogenetic Engineering in Synthetic Biology In *EVO’Bliss International Workshop (ALIFE workshop)*. 30th July, 2014. SUNY Global Center.

- [CI-8] I. Ren, J.-L. Giavitto and R. Doursat. Synchronization in Musical Group Playing. In Proc. of the *11th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research* (Music, Mind, and Embodiment). Plymouth, UK, 16–19 June 2015. Best student paper awards.
- [CI-9] J. Pascalie, M. Potier, T. Kowaliw, J.-L. Giavitto, O. Michel, A. Spicher and R. Doursat. Spatial computing in synthetic bioware : Creating bacterial architectures. In *Advances in Artificial Life : Proceedings of the 13th European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems ECAL’15*. University of York 2015, UK, July 20–24, MIT Press.
- [CI-10] P. Donat-Bouillud, J.-L. Giavitto, A. Cont, N. Schmidt, Y. Orlarey. Embedding native audio-processing in a score following system with quasi sample accuracy In *42th International Computer Music Conference ICMC 2016*, Sep 2016, Utrecht, Netherlands.
- [CI-11] P. Donat-Bouillud, J.-L. Giavitto. Typing heterogeneous dataflow graphs for static buffering and scheduling *43rd International Computer Music Conference ICMC 2017*, Oct 2017, Shanghai, China.
- [CI-12] J.-L. Giavitto, J. Echeveste, A. Cont, P. Cuvillier. Time, Timelines and Temporal Scopes in the Antescofo DSL v1.0 *43rd International Computer Music Conference ICMC 2017*, Oct 2017, Shanghai, China.

C.3 Séminaires, workshops

- [Sem-1] Jean-Louis Giavitto. *Analyse formelle des concepts, Q-analyse et programmation spatiale : quelques aspects philosophiques du nœud mathématique/musique/informatique*. Séminaire MaMuPhi, Ecole Normale, 2 février 2013.
- [Sem-2] Jean-Louis Giavitto. *Écriture du temps et de l’interaction en informatique musicale*. séminaire Philosophie de l’informatique, de la logique et de leurs interfaces, Centre Cavailles, École Normale, 18 mars 2013.
- [Sem-3] Jean-Louis Giavitto, Arshia Cont. *From Authored to Produced Time in Computer-Musician Interactions*. Workshop Avec le Temps! Time, Tempo, and Turns in Human-Computer Interaction, colocated with CHI 2013, 27 April 2013.
- [Sem-4] Jean-Louis Giavitto, Jean Bresson. *Compte-rendu des séminaires MaMux, modélisation spatiale et approche géométrique en musique*. Journées nationales du RNSC, 14-18 octobre 2013. Evian.
- [Sem-5] Jean-Louis Giavitto. *Simultanéité, succession et durée dans l’interaction musicale en temps-réel*. Séminaire MaMux Temps, rythme et arithmétique, 6 décembre 2013.
- [Sem-6] Jean-Louis Giavitto. *Q analyse et représentation spatiale de structures musicales*. Journée d’étude “Apport de la musique à la carte et réciproquement”, projet CartoMuse de la Structure Fédérative de Recherche Agor@ntic, Université d’Avignon, 28 janvier 2014.
- [Sem-7] Jean-Louis Giavitto. *Morphogenèse informatique*. Conférence donnée à l’EPFL ArchiZoom, dans le cadre de l’exposition *Animal ?* sur le travail de l’architecte Patrick Berger. 9 avril 2014, Lausanne.

- [Sem-8] Jean-Louis Giavitto. *L'espace et son utilisation dans la formalisation de processus musicaux*. Conférence (1h30) donnée à l'école d'art *e|m|a|fructidor*, Chalon-sur-Saône, 17 avril 2014.
- [Sem-9] Jean-Louis Giavitto et Julia Blondeau. *Du temps écrit au temps produit*. Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse (CNSMD), Mardi de la Recherche, École Normale Supérieure de Lyon, 24 avril 2014.
- [Sem-10] Jean-Louis Giavitto. *Temps Réel en musique : Antescofo*. Conférence du CI-SEC (Club Inter-associations – AAAF, SEE, SIA – des Systèmes Embarqués Critiques). Mardi 10 Juin 2014, Toulouse (à l'IRIT).
- [Sem-11] Jean-Louis Giavitto et José Echeveste. *Reconciling continuous time and discrete event-based time in musical applications*. Séminaire Chronos. Collège de France, novembre 2014.
- [Sem-12] Jean-Louis Giavitto. *Le temps compagnon de l'espace*. Journée Spatial Computing, LIAFA 15 avril 2015.
- [Sem-13] Jean-Louis Giavitto. *Topology and Music*. Séminaire inaugural annuel du Décanat des Sciences de l'Université de Namur. Belgique, mai 2015.
- [Sem-14] Jean-Louis Giavitto et Gérard Berry. *Musique et Informatique*, séance *Intersection* de l'Académie des Sciences. Mai 2015.
- [Sem-15] Jean-Louis Giavitto. *Emergence de la biologie synthétique du point de vue d'un informaticien*. Interview de travail par Gaetan Flotto et Mélanie Guyonvar, sociologues, dans le cadre de leur groupe de travail sur la sociologie des sciences. Juin 2015.
- [Sem-16] Jean-Louis Giavitto. *Accorder le temps de l'homme et de la machine dans les systèmes multimedia interactifs*, IRT SystemX, Séminaire SystemX, 29 avril 2016.
- [Sem-17] Jean-Louis Giavitto et Dimitri Bouche. *Programming (cyber-) temporal musical systems*. Conseil Scientifique de l'IRCAM, 14 mars 2016.
- [Sem-18] Jean-Louis Giavitto et Moreno Andreatta. *Mathemusical Morphologies*. Conseil Scientifique de l'IRCAM, 14 mars 2016.
- [Sem-19] Jean-Louis Giavitto. *Project's slides technical focus : cyber-temporal systems*. INRIA Evaluation MuTant project, 24-25 march 2016.
- [Sem-20] Jean-Louis Giavitto. *Antescofo tutorial* at the summer school of the 13th Sound and Music Computing Conference SMC 2016. 26/08 - 3/09, Hamburg, Germany.
- [Sem-21] Jean-Louis Giavitto. *Hors-temps et temps-réel : l'écriture informatique du temps et de l'interaction en musique mixte*. Séminaire de philosophie et mathématiques, Centre Cavallès, École normale supérieure, 20 février 2017.
- [Sem-22] Jean-Louis Giavitto. *Auto-organisation du temps musical*, atelier organisé par la mission pour l'interdisciplinarité du CNRS, 1er décembre 2017 (Organisateurs : Annick Lesne, Clotilde Policar et Dominique Dunon-Bluteau).

C.4 Livres et ouvrages

- [Ed-1] J.-L. Giavitto, S. Dulman, A. Spicher and M. Viroli editors. *Proceedings of the Spatial Computing Workshop (SCW)*, volume W09 of *AAMAS Satellite Workshop Proc.*, May 6, St-Paul, Minnesota USA, May 2013. IFAMAAS (International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems).
- [Ed-2] S. Dulman, J.-L. Giavitto, A. Spicher and M. Viroli editors. *Spatial Computing*, Special Issue of the *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 31, Issue 4. September 2016, Cambridge University Press.

C.5 Chapitres d'ouvrages

- [Chap-1] J.-L. Giavitto. Du temps écrit au temps produit en informatique musicale. In *Produire le temps*, H. Vinet (Ed.), Hermann, Avril 2014. pages 73–106. ISBN 9782705688189. Contributeurs : Yves André, Gérard Berry, Antoine Bonnet, Nicolas Donin, Laurent Feneyrou, Patrick Flandrin, Jean-Louis Giavitto, Philippe Manoury, François Nicolas, Thierry Paul, François Regnault, Pierre-André Valade, Hugues Vinet.
- [Chap-2] J.-L. Giavitto, A. Spicher, and O. Michel. Interaction-Based Modeling of Morphogenesis in MGS. In *Morphogenetic Engineering*, R. Doursat (Ed.), Understanding Complex Systems. Springer, January 2013. pages 409–440. ISBN 978-3-642-33901-1.
- [Chap-3] J.-L. Giavitto and A. Spicher. A Topological Approach of Musical Relationships. In *Mathemusical Conversations*, E. Chew (Ed.), World Press. Under press, publication planned in 2016. Contributeurs : Moreno Andreatta, Gérard Assayag, Jeanne Bamberger, Margaret Boden, Jean-Paul Bourguignon, Clifton Callender, Richard Cohn, Eran Egozy, Noam Elkies, Stephen Emmerson, Jean-Louis Giavitto, Don McLean, Christopher Raphael, John Rink, Ruth Rodrigues, Paul Schoenfield, Dmitri Tymoczko.
- [Chap-4] A. Spicher and J.-L. Giavitto. Interaction-based Programming in MGS. In *Advances in Unconventional Computing*, A. Adamatzky (Ed.), Springer, pp.305–342, 2017, Series : Emergence, Complexity and Computation, 978-3-319-33923-8.
- [Chap-5] J.-L. Giavitto. Sharing (musical) time between machines and humans : simultaneity, succession and duration in real-time computer-human musical interaction. In *Beyond Logic* proceedings of the conference held in Cerisy-la-Salle, 22–27 May 2017 (pp 3–5 and 41–74). DOI 10.15496/publikation-18676.

C.6 Logiciels¹ : le système Antescofo

1. Je ne décrirai pas ici les outils réalisés (principalement en Mathematica) dans le cadre de la thèse de Julia Blondeau pour la définition d'espaces compositionnels, leur représentation graphique et la navigation dans ces structures. En effet, ces outils restent spécifique à la démarche compositionnelle de Julia et demandent à être développés avant de pouvoir être utilisés par d'autres compositeurs ou par des musico-logues.

Je ne décrirai pas non plus le moteur réactif d'OpenMusic [BG14b] à la conception duquel j'ai participé. L'implémentation a en effet été totalement réalisées par Jean Bresson.

Antescofo couple un système de suivi polyphonique avec un langage réactif temporisé dans un environnement Max/MSP ou PureData, sur systèmes Mac, Windows et Linux, en 32 ou 64 bits.

Le module de suivi permet le suivi en temps-réels de la position dans une partition et le calcul du tempo à partir d'un flux audio en provenance d'une performance. Le module réactif temporisé permet de synchroniser des actions électroniques avec la performance instrumentale.

Ce travail, à partir du système développé par Arshia Cont lors de sa thèse, s'effectue en collaboration avec Arshia Cont et les doctorants José Echeveste (direction par moi-même, soutenance en mai 2015) et Philippe Cuvillier (direction Arshia Cont, thèse en cours). J'interviens sur la partie langage (design et implémentation).

Je suis l'auteur du manuel de référence Antescofo qui compte 400 pages en-ligne : <https://goo.gl/CmkKQ2>. L'interaction avec la communauté passe aussi par

- des pages dédiées sur le site *ForumNet* de la communauté des utilisateurs des logiciels IRCAM : <http://forumnet.ircam.fr/fr/product/antescofo/>.
- le site du projet : <http://repmus.ircam.fr/antescofo>
- la forge du projet : <http://forge.ircam.fr/p/antescofo/>

Plusieurs compositeurs ont effectués des résidences artistiques à l'IRCAM spécifiquement pour développer un projet utilisant Antescofo : Jason Freeman (Georgia Tech, 2014–2015), Jaroslaw Kapuscinski (Stanford, 2014), Christopher Trapani (Columbia, 2013), Jose Miguel Fernandez (Stuttgart, 2014).

Le logiciel est connu dans les cercles de musiques contemporaines et de musiques électroniques :

- Antescofo a été utilisé dans plus d'une centaine de concerts depuis 2011, par la Philharmonie de Paris, de Berlin, de Los Angeles, l'orchestre de la SudWestFunk... pour des œuvres de Pierre Boulez, Philippe Manoury, Marco Stroppa, Emmanuel Nunes, Jonathan Harvey (pour n'en citer que quelques uns).
- La page <http://repmus.ircam.fr/antescofo/repertoire> liste les pièces qui ont été composées spécialement avec Antescofo jusqu'en 2013. Les utilisations d'Antescofo nous échappent à présent, les utilisateurs ne se faisant pas nécessairement connaître sur le forum.
- Il existe une page Wikipedia (en anglais) sur Antescofo, qui a été rédigée par un utilisateur canadien (inconnu de notre équipe).
- Le système a fait l'objet de plusieurs articles dans la presse grand public (magazine La Recherche, Le Monde), des reportages radios (France Musique, RFI), des blogs (Casa Ricordi, Omni Sound Blog)...
- Antescofo est lauréat de la 3^{ème} édition des Objets de la nouvelle France Industrielle du ministère du redressement productif (mai 2013).
- Quelques vidéos sur Antescofo qui illustrent différentes utilisations du langage :
 - Synchronisation piano/vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=tJKJ8RcN-7Y>
 - karaoke adaptatif : <https://youtu.be/gSYhDp2VXMo>
 - accompagnement automatique : <https://youtu.be/A971FbnqQRo>
 - un autre exemple d'accompagnement automatique où le musicien est Roger Dannenberg, le père du premier système de suivi de partition en 1991 : <https://youtu.be/RVJfh-g27Rw> lors de la session spéciale Automatic Accompaniment du symposium *ASA 2014 Concert* (notre présentation a eu le Best Paper).
 - canon rythmique "à la Nancarrow" en temps-réel : <https://youtu.be/CQ1pQNY5XJk>
 - résultat d'un stage donné par Christoph Kirsch à l'Université de Salzburg (C. Kirsh est un chercheur connu en vérification de logiciel temps-réel) : <https://youtu.be/...>

- `//youtu.be/a_AVsBpvBVo`
- utilisation d'un logiciel de reconnaissance faciale comme machine d'écoute du langage réactif (qui pilote un processus de synthèse) : <https://www.youtube.com/watch?v=HFTw387rJto>
 - <http://repmus.ircam.fr/antescofo/videos>

D

Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique

D.1 Encadrement de thèse

Louis Bigo. Originaire du Master ATIAM de l'Université de Paris 6 - IRCAM, financement MESR. Cette thèse a débuté en 2010 et Olivier Michel en était le directeur formel. Elle a été co-encadrée aussi par Antoine Spicher et Moreno Andreatta. Je suis intervenu pour 20% dans son encadrement.

Titre de la thèse : *Représentations symboliques et analyse topologique de structures musicales à l'aide du calcul spatial*. Soutenu en novembre 2013, Louis Bigo a obtenu le prix Jeune Chercheur Science et Musique. Après un post-doc à l'université de San-Sebastian, il a été recruté comme maître de conférence à l'Université de Lille.

José Echeveste. Originaire du Master ATIAM de l'Université de Paris 6 - IRCAM, financement MESR. Cette thèse a débuté en septembre 2011 et a été soutenue en mai 2015. J'ai encadré les travaux de cette thèse à 70% et Arshia Cont, chercheur à l'IRCAM, l'a co-encadré pour la part restante.

Titre : *Un langage de programmation pour composer l'interaction musicale — La gestion du temps et des événements dans Antescofo*.

José Echeveste a poursuivi un post-doc au Collège de France avec Gérard Berry en septembre 2015. Puis a participé à la création de la start-up Antescofo avec Arshia Cont et Philippe Cuvillier (autre thésard de l'équipe).

Julia Blondeau. Originaire du Conservatoire National Supérieur de Musique de Lyon (CNSM Lyon). Cette thèse, qui a débuté en décembre 2014 avec financement de la COMUE Sorbonne Universités, relève des nouvelles thèses en art.

Ce dispositif étant nouveau, il n'y a pas de directeur de recherche habilité en composition musicale. Je collabore avec Julia Blondeau depuis 2013 à travers des outils pour la composition (représentation topologiques) et la performance (Antescofo). C'est donc tout naturellement qu'elle m'a demandé d'être son directeur. J'encadre son travail à 90% et Dominique Pradelle, Professeur de Philosophie à Paris 4 - Sorbonne, 10%.

Son sujet de recherche porte sur « *Espaces compositionnels et temps multiples : de la relation forme/matériau* ». Cf. la note en page 10.

Pierre Donat-Bouillud. Issu de l'école Normale de Rennes, Pierre Donat-Bouillud effectue sa thèse sur la *modélisation, analyse et exécution de systèmes cyber-temporels*. Sa thèse, qui a débuté en 2016, est encadrée par Florent Jacquemard et moi-même.

Stages étudiants

- Anton Freund *Relationships between Formal Concept Analysis and Q-analysis of binary relationships*, Master University of Munich & École Normale, 2013.
- Diego Diviero *Construction et visualisation de représentations topologiques et algébriques de processus musicaux*, Master 2 Université Joseph Fourier et 3ème année ENSIMAG, 2014.
- Nicolás Schmidt Gubbins *Embedding Antescofo on UDOO*, stage de L3, Universidad Pontifical de Santiago de Chile, programme d'échange INRIA, 2015.
- Samuel Bellbell, *Ordonnancement dynamique de graphe de tâche audio*, stage de M2 ATIAM, septembre 2016.
- Giacomo Martinelli, *Représentation topologique pour la musique*, stage d'initiation à la recherche, École des Mines, septembre-décembre 2017.

D.2 Enseignement

Sur invitation de Camillo Rueda, j'ai donné un module de 16h à l'Université de Cali, Colombie en juin 2013 sur la programmation spatiale.

D.3 Organisation de conférences et workshops, comités de programme

Ces cinq dernières années, j'ai fait partie des 34 comités d'organisation et comités de programme suivants :

1. La preuve et ses moyens, Rencontres interdisciplinaires de **Rochebrune**, 13-19 janvier 2013 (comité scientifique).
2. Journées nationales du GDR **GPL** 2013, mai 2013, Lille. (organisation de la session démo et poster)
3. Digital Entertainment Technologies and Arts (DETA track) at **GECCO**, 6-10 july 2013, Amsterdam. (PC)
4. Generative and developmental systems (GDS) at **GECCO**, 6-10 july 2013, Amsterdam. (PC)
5. **SCW** 2013 Spatial Computing Workshop, AAMAS satellite workshop, 6–10 May 2013, Saint-Paul, Minnesota US. (Co-chair)
6. **MeCBIC** 2013, 7th Workshop on Membrane Computing and Biologically Inspired Process Calculi, 7th July 2013, Riga, Latvia. (PC)
7. **NICSO** 2013, the VI International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, September 2–4, 2013 Canterbury, United Kingdom. (PC)
8. **HaPoC** 2013, 2nd International Conference on the History and Philosophy of Computing 2013. 28–31 October 2013, École Normale Supérieure, Paris. (PC)
9. Journées nationales du GDR **GPL** 2014, 10 au 13 juin 2014, CNAM Paris. (organisation de la session démo et poster)
10. Journée d'Informatique Musicale **JIM**, Bourges, 21–23 mai 2014. (PC)
11. **SCW** 2014, the Spatial COmputing Workshop, AAMAS satellite workshop, 5–9 May 2014, Paris. (PC)

12. **SASO** Eighth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems - London, UK - 8-12 September 2014. (PC)
13. **MeCBIC** 2014, 7th Workshop on Membrane Computing and Biologically Inspired Process Calculi, 16th September 2014, Bucharest, Romania (PC)
14. **BIPC** special track at 8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (formerly BIONETICS) - BICT 2014, 1-3 December, 2014, Boston, MA, USA. (PC)
15. **NICSO**, VII International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2015), February 25–27, 2015 Chamonix, France. (PC)
16. **TENOR** 2015, First International Conference on Technologies for Music Notation and Representation 29–30 May 2015, Paris. (PC)
17. Journées nationales du GDR **GPL** 2015, 9–12 juin 2015, Bordeaux. (organisation de la session démo et poster)
18. **SASO** 2015, Ninth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, Cambridge, MA, 21–25 September 2015. (PC)
19. Digital Entertainment Technologies and Arts (DETA) at **GECCO**-2015, Madrid, July 11–15, 2015. (PC)
20. **MEW** 2015, Morphogenetic Engineering Special Session (5th MEW) at the 13th European Conference on Artificial Life (ECAL), York, UK, July 20–24, 2015. (PC)
21. **IPCAT** 2015, 10th International Conference on Information Processing in Cells and Tissues IPCAT 2015, San Diego, USA, 14–16 September 2015. (PC)
22. **ICMC**'2015, 41st International Computer Music Conference, September 25th to October 1st, 2015, University of North Texas, Denton, TX, USA. (PC)
23. **SASO**'2016, 10th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (part of FAS* - Foundations and Applications of Self* Systems), Augsburg, Germany, 12-16 September 2016. (PC)
24. **ICMC**'2016 : 42nd International Computer Music Conference hosted by HKU University of the Arts Utrecht and Gaudeamus Muziekweek, 12–16 September 2016. (PC)
25. **Faust Award 2016**. The Faust Open-Source Software Competition is intended to promote innovative high-quality free audio software developed with the Faust programming language, as well as development tools build around the Faust compiler itself. (jury member)
26. **Prix de thèse 2015 du GDR GPL** (membre du jury).
27. **GECCO**'2016 Digital Entertainment Technologies and Arts (DETA), Denver Colorado, July 20-24 2016 (PC).
28. **ALIFE XV** (2016) 15th International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, Cancún Mexico, 4-8 July 2016. (PC)
29. **TENOR**'2016 2nd International Conference on Technologies for Music Notation and Representation 27–29 May 2016, Anglia Ruskin University, Cambridge, UK. (PC)
30. **GECCO**'2017, The Genetic and Evolutionary Computation Conference, July 15th-19th 2017 Berlin. Track DETA - Digital Entertainment Technologies and Arts (DETA PC member).
31. **JIM**'2017 Journées d'informatique musicale, Paris 17-20 mai 2017. (PC)
32. **FARM**'2017 Workshop on Functional Art, Music, Modeling and Design. September, 2017, co-located with ICFP 2017 in Oxford, United Kingdom. (PC)

33. **ECAL'2017** European Conference on Artificial Life, Lyon, France, 4 – 8 September 2017. (PC)
34. **Prix de thèse du GDR GPL 2017** (membre du jury).

D.4 Vulgarisation

- [v-1] Bernard Chazelle, Jean-Louis Giavitto, Jean Lassègue, Cédric Villani. *Projection-débat "Codebreaker : Alan Turing"*. Débat organisé par l'IHP et animé par Cédric Villani au cinéma Le Grand Action, 17 décembre 2012, Paris.
- [v-2] Gérard Berry, Pierre-Louis Curien, Jean-Louis Giavitto et Cédric Villani. *Projection-débat "Codebreaker : Alan Turing"*. Débat organisé par l'IHP au cinéma Le Grand Action, 27 février 2013.
- [v-3] MuTAnt team. Présentation de Antescofo, Lauréats de la 3ème édition des Nouveaux Objets de la France Industrielle, Ministère du Redressement Productif, mai 2013.
- [v-4] projet Antescofo au stand du ministère du redressement productif, salon MIF (Made In France), 9-11 novembre 2013.
- [v-5] Porte-ouverte de l'IRCAM. Démonstration du projet MuTant : *accompagnement automatique*. Juin 2014. Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=A971FbnqQRo>
- [v-6] Porte-ouverte de l'IRCAM. Démonstration du projet MuTant : *Anti-Karaoke*. Juin 2015. Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=gsYhDp2VXMo>
- [v-7] Jean-Louis Giavitto. *Interview Antescofo* pour Radio France International et France Musique, à l'occasion des journées Portes Ouvertes de l'IRCAM. Juin 2015.

E

Transfert technologique, relations industrielles et valorisation

Le logiciel Antescofo est distribué à la communauté des utilisateurs des outils IRCAM via le site *ForumNet* (4000 utilisateurs actifs). On trouvera à la page 32 des éléments factuels permettant d'apprécier la valorisation d'Antescofo.

La technologie issue du projet a fait l'objet d'un contrat de cession de logiciel qui a réparti la co-propriété de la manière suivante :

- 25% pour le CNRS (correspondant à mon travail)
- 15% pour l'UPMC (correspondant au travail de thèse de Jsoé Echeveste et Philippe Cuvillier)
- 60% pour l'IRCAM correspondant à l'apport initial et au travail d'Arshia Cont.

F

Encadrement, animation, gestion et direction de la recherche

F.1 Expertises

Expertises de projets. J’ai effectué des expertises pour l’ANR en 2012, 2013 et 2014.

Je suis expert auprès du programme FET pour la commission européenne (suivi des projets NeuNeu et PhyChip de la thématique “unconventional computing”).

Thèses et habilitations Depuis 2013, j’ai été :

- rapporteur sur les thèses de :
 - Hector Fernandez 2012 (Université de Rennes 1),
 - Marco Obrovac 2013 (Université de Rennes 1),
 - Akram Ajouli 2013 (Université de Nantes) ;
 - Jaime Arias 2015 (Université de Nantes) ;
 - Michel Guzman 2017 (École Polytechnique) ;
- rapporteur sur les HDR de :
 - Arnaud Banos 2013 (Université de Paris 1 - La Sorbonne) ;
 - Remi Douence 2015 (École des Mines de Nantes) ;
 - Cédric Tedeschi 2017 (Université de Rennes 1) ;
- et j’ai participé aux jurys de thèse en tant qu’examinateur ou président de jury de :
 - Mariem Miladi 2014 (SupMeca - École Centrale) ;
 - Adrien Basso-Blandin 2014 (Université d’Evry) ;
 - Sergiu Ivanov 2015 (Université de Paris-Est, Créteil) ;
 - Simon Martiel 2015 (Université de Nice, Sophia - Antipolis) ;
 - Martin Potier 2017 (Université de Paris-Est).

Écoles doctorales. J’ai été membre extérieur du conseil de l’école doctorale S&I (Université d’Evry, ENSIIE et Telecom Sud-Paris) de 2012 à 2015. Et je suis membre extérieur du conseil de l’école doctorale STIC Saclay (depuis 2015). À ces titres, j’ai participé au jury d’attribution des bourses de thèse de l’université d’Evry, et depuis 2015, de l’ED STIC à Saclay.

F.2 Gestion de la recherche

GDR GPL

À partir de 2012, j’ai été co-responsable avec Pierre-Etienne Moreau du pôle “programmation” du nouveau GDR GPL (Génie de la Programmation et du Logiciel, dirigé alors par Laurence Duchien). Le pôle compte cinq groupes de travail regroupant environ 250

chercheurs et enseignants-chercheurs. En 2015 Pierre-Etienne est devenu le directeur du GDR et j'ai quant à moi souhaité quitter l'équipe de direction à laquelle je participais depuis 2008. Je fais partie à présent du comité scientifique du GDR.

Pendant la direction du pôle, j'ai participé à la mise en place de bourses de mobilités pour les projets inter-labos, le financement des groupes de travail, à l'enquête qui a précédé la création d'un club associé d'industriels, à l'organisation des posters et démos lors des journées nationales, la publication d'un numéro spécial "doctorants du GDR" dans TSI, la mise en place de l'action "défis" du GDR, aux réunions du comité de direction, *etc.*

F.3 Activités éditoriales

Je suis relecteur pour diverses revues : BioSystems, TCS, ComputerVision, The Computer Journal, The Knowledge Engineering Review, Visual, *etc.*

J'ai été le **rédacteur en chef** de *Technique et Science Informatique* (TSI) de 2002 à fin 2015 <http://tsi.e-revues.com>. TSI est le principal journal scientifique généraliste d'informatique francophone. Cette revue, qui publie dix numéros par an (plus de 1200 pages d'articles de recherche en informatique), assure une large couverture de tous les domaines de l'informatique, grâce notamment à des numéros spéciaux dont la coordination est confiée à des spécialistes du domaine¹. Le processus de révision reste cependant le même et implique le plus souvent trois à quatre rapports à chacune des deux étapes.

Le comité de rédaction comporte 40 membres renouvelés par quart chaque année et essaie de couvrir géographiquement et thématiquement les centres de recherche de la zone francophone. Le comité de publication se réunit tous les mois au siège de l'éditeur.

Je fais aussi partie du comité RSTI qui conseille la direction de Lavoisier pour les revues en informatique (RIA, Documents Numériques, ISI, *etc.*).

Un projet historiographique à TSI

Dans le cadre de TSI, j'avais depuis longtemps le projet d'interviewer des personnalités qui ont marqué et structuré notre communauté et, à partir de leurs parcours, de reconstruire une histoire sensible des étapes de la discipline informatique en France. Ce travail me semble d'autant plus nécessaire que la génération qui a fait émerger la recherche en informatique en France en tant que discipline propre est en train de passer la main.

Les contacts que j'avais noués avec une chercheuse du Centre Alexandre Koyré n'ayant pas abouti, j'ai contacté Valérie Schafer, historienne à l'Institut des sciences de la communication du CNRS. Cette fois-ci, grâce à elle, le projet est bien parti et TSI publie en 2013 un portrait-entretien avec Gérard Berry (à l'occasion de sa chaire au Collège de France), Bernard Chazelle, ainsi qu'une contribution plus thématique sur les relations franco-québécoises avec les regards croisés de Jean-Pierre Verjus, Guy Lapalme et Jacques Malenfant. En 2014, nous avons réalisé un entretien avec Paul Braffort, Gilles Dowek,

1. Voici quelques numéros thématiques qui ont été publiés dans TSI depuis 2000 : Simulation et calcul haute performance ; Parallélisme, distribution et approches objets ; Architectures de machines ; Traitement automatique du langage naturel ; La réutilisation ; Approches formelles pour l'aide au développement de logiciels ; Fractales ; Environnement de développement de systèmes multi-agents ; Agents et codes mobiles ; Test de logiciel ; Méthode B ; Vie artificielle ; Temps réel ; Indexation de bases d'images fixes et/ou animées ; Données numériques et informations symboliques ; Réseaux et protocoles ; Systèmes à composants adaptables et extensibles ; Informatique et Art ; Informatique et SHS ; Ontologie ; *etc.*

Jean-Claude Risset, Jean-Charles Pommerol et un panorama du développement de l'informatique universitaire à Nancy.

F.4 Contrats de recherche

J'ai bénéficié des contrats de recherche suivant ² :

1. bourse de thèse de l'école doctorale EDITE pour José Echeveste (2011–2014) ;
2. soutien du RNSC aux séminaires MaMux en 2013 et 2014 ; et au réseau Clasyco en 2013 ;
3. projet SynBioTIC, programme ANR Blanc qui a démarré en janvier 2011 et s'est terminé en octobre 2015 ;
4. le projet inedit, programme ANR Contint qui a démarré en septembre 2012 et s'achève en octobre 2015 ;
5. bourse de thèse de la COMUE Sorbonne-Universités pour Julia Blondeau (2014–2017) ;
6. le réseau CHRONOS financé par l'ANR (début décembre 2014) ;
7. divers financements spécifique INRIA liés à l'équipe-projet MuTant : financement de 18 mois de développement pour l'outil *Ascograph* permettant d'éditer une partition Antescofo et de contrôler le suivi, gratifications de stage, matériel informatique. . . ;
8. bourse de thèse de Sorbonne Université pour José Miguel Fernandez (thèse qui a débuté en décembre 2017).

F.5 Direction d'unité

Suite à la démission de Gérard Assayag de la direction de l'UMR en avril 2017, j'ai assuré la direction adjointe par interim de l'unité (Carlos Agon Professeur à l'UPMC, étant le directeur par interim). Je me suis plus particulièrement chargé de la rédaction du rapport HCERES. Les différents documents sont disponibles sur la page

```
http://hceres2017.ircam.fr  
login : hceres2017  
password : STMS
```

À sa nomination, Brigitte d'Andréa-Novel, qui assure la direction de l'unité à partir du 1er janvier 2018, m'a demandé de poursuivre ma fonction de directeur-adjoint, ce que j'ai accepté.

Je souhaite ici remercier vivement Gérard Assayag, ancien directeur, pour l'aide qu'il m'a apporté pendant cette année 2017 et pour le rôle important qu'il a eu pendant ce quinquennat à la tête de l'UMR.

Un renouvellement du fonctionnement de l'UMR. L'année 2017 a marqué l'alignement des structures de recherche de l'Ircam sur celles du système académique de recherche. Cette évolution vise à répondre à plusieurs défis : l'intégration de la recherche artistique dans les structures universitaires et la montée en puissance des thématiques art-science (avec par exemple la création des doctorats en arts) ; la restructuration du paysage

2. Bien que n'étant pas porteur de ces projets, j'ai été le rédacteur des projets SynBioTIC et inedit.

parisien de la recherche (avec par exemple la création de Sorbonne Université) ; l'accroissement de l'attractivité de l'unité nécessaire à la diversification des recrutements par des personnels CNRS et universitaires ; l'évolution de l'écosystème d'innovation français ; et le renouvellement, quarante ans après sa concrétisation, de la vision pionnière de Pierre Boulez.

J'ai donc passé beaucoup de temps à discuter avec les différents départements de l'IR-CAM pour expliquer la nouvelle configuration. Il faut cependant souligner que le rattachement de l'UMR à des tutelles non-académiques implique un fonctionnement plus lourd que dans un laboratoire universitaire classique. En particulier :

- les procédures d'accueil (visiteur, stagiaire, doctorant) correspondent à l'accueil d'une personne dans une entreprise privée ce qui engendre un surcroît de formalités ;
- les procédures de sécurité sont alignées avec celle du Centre Pompidou et un correspondent à un lieu qui accueille du public ;
- le budget recherche versé par le Ministère de la Culture est débloqué annuellement sur la réception d'un projet d'activité et finalisé sur la réception d'un rapport d'activité de l'année ;
- le conseil scientifique de l'Ircam et le conseil d'administration demandent un rapport d'activité annuel comportant une description des projets et de la stratégie du laboratoire, demande qui ne se confond pas avec la demande du Ministère de la Culture ;
- le rapport d'activité du Centre Pompidou nécessite une description synthétique et « grand public » des activités de l'UMR.

Ces contraintes, conjugués à la préparation de l'évaluation HCERES, ont rendu l'année particulièrement chargée administrativement.

La mise en place des nouveaux modes de fonctionnement n'est pas achevée et doit se poursuivre avec l'arrivée de la nouvelle directrice.

Un ancrage renouvelé Recherche–Création. Indépendamment des changements de direction, l'année 2017 a été l'occasion de revenir sur les modes de collaboration entre l'UMR et les artistes. L'adossement des thématiques de recherche de l'UMR à la création musicale contemporaine permet dans une interaction féconde de guider judicieusement les thématiques de recherche par les problématiques les plus actuelles de la création contemporaine. Elle permet aussi de diffuser largement les résultats de notre travail.

Cette réflexion a été engagée lors de journées de rencontres et d'échanges réunissant le personnel de l'UMR, les artistes et compositeurs, et les équipes de production. Ces journées « Méridien » vont se tenir annuellement. Elles ont permis de préciser ou de renouveler les dispositifs soutenant cette interaction recherche-création et d'amplifier le dialogue avec le département IRC³. Plusieurs dispositifs permettent de concrétiser cette interaction chercheurs-artistes :

Conseil scientifique à une production artistique. Les équipes de STMS participent aux productions artistiques de l'Ircam, soit directement, soit à travers les réalisateurs en informatique musicale (RIM) qui servent de courroie de transmission entre les artistes et les prototypes et outils élaborés dans le laboratoire. Le rôle des RIM est essentiel pour adapter les temps longs de la recherche au temps nécessairement plus limité des productions artistiques.

3. Le département IRC (Interface Recherche-Création) est notre interlocuteur privilégié pour la mise en place, la logistique et la coordination des interactions chercheurs/artistes. Il dialogue avec les artistes en amont des productions et avec les utilisateurs des logiciels produits à l'Ircam en aval.

Groupe de travail. Plusieurs groupes de travail inter-équipes accueillent des compositeurs et permettent de développer une réflexion sur un sujet transversal. Les groupes de travail existant portent sur : la notation, l'orchestration, les banques de son, la synthèse par échantillon. Un groupe de réflexion sur les licences logicielles doit démarrer en 2018 pour faire évoluer la politique de diffusion et de valorisation de l'unité.

UPI. Les Unités Projet-Innovation sont des financements internes permettant de financer un prototype ou bien permettant de pérenniser une technologie. De tels financements ont permis de soutenir concrètement des projets autour de l'orchestration, de la quantification, ou la capitalisation du savoir faire autour des objets sonores communicants.

Résidence recherche-crédation. Les projets résidence-IRC (Interfaces Recherche-Création) permettent aux équipes d'interagir avec un créateur qui propose un projet de recherche et vient en résidence dans l'équipe pour une durée de trois à six mois. Ces projets, détachés du contexte et des contraintes de production, permettent de développer un travail en amont. Depuis 2012, plus de 30 résidences ont été sélectionnées par un appel international annuel via la plate-forme du réseau Ulysse. La plupart des artistes en résidence sont étrangers et la moitié des projets impliquent deux équipes de STMS. Le dernier appel à résidence (décembre 2017) a attiré une centaine de propositions qui seront évaluées par le laboratoire.

Thèse en art. Apparue en 2013, le dispositif des « thèses en art » permet de développer une interaction sur un temps long avec un artiste qui poursuit un travail de thèse à plein temps. Dans ce cadre, trois bourses de thèse ont été spécifiquement financées pour des doctorats en composition encadrés par des HDR de STMS (deux par Sorbonne Universités en 2014, une par l'UPMC en 2017). PSL (Paris Sciences et Lettres) en finance deux autres, en partenariat avec le CNSMDP. Au total, cinq autres jeunes compositeurs en thèse sont encadrés ou co-encadrés par des chercheurs de STMS sur ce type de doctorat.

Séminaire de recherche. Le laboratoire a une activité très importante de séminaire interne et invité. Pendant le quinquennal passé, on compte : 38 soutenances de thèse, 7 soutenance de HdR, 58 séminaires internes et 69 séminaires invités. Environ 1/3 des séminaires internes et des séminaires invités portent sur des thématiques ou un projet qui impliquent directement un artiste.

Forum. Le Forum est un site web qui permet de diffuser les logiciels produits par le laboratoire et d'animer la communauté des utilisateurs. Un grand projet de renouvellement vise à faire évoluer le Forum afin qu'il joue moins le rôle d'une boutique en ligne et plus celui d'un outil communautaire à destination des utilisateurs des technologies audio-numériques (et en particulier pour le milieu de la musique contemporaine). Cette évolution, qui démarre en 2018, touche directement l'UMR, en tant que fournisseur de contenus et parce que le Forum est un outil privilégié d'interaction avec les utilisateurs des résultats de nos recherche. Une réflexion a été engagée en parallèle pour développer de nouveaux modèles de diffusion et de valorisation, par exemple via un ensemble de services-web et avec un système de double licences.

G

Objectifs / Projet de recherche

Mes objectifs de recherche s'inscrivent dans la continuité des travaux que j'ai initié avec mon arrivée à l'Ircam et s'articulent autour de trois axes :

1. la notation de l'électronique, du temps et de l'interaction,
2. l'extension de l'approche *Antescofo* au traitement de flots temporels et à d'autres formes d'écoute,
3. et la notion de *serveur temporel*.

Ces trois axes sont ancrés dans les applications musicales de mon laboratoire mais contribuent plus largement à l'analyse, la compréhension et la conception d'une classe émergente de systèmes, les *systèmes cyber physique-et-humain*, ou CP&HS (pour cyber – physical and human – systems).

Dans la suite de ce chapitre je décris rapidement cette problématique, la focalisation sur la gestion des interactions temporelles apportés par le contexte musicale, et mes trois axes de recherche.

G.1 Systèmes cyber temporel avec humain dans la boucle

La notion de programme s'exécutant sur un ordinateur centralisé en transformant des données en entrée pour produire le résultat en sortie n'est plus pertinente pour décrire la majorité des nouveaux systèmes informatiques.

De plus en plus ces systèmes interagissent continuellement avec leur environnement. Ils sont intimement liés à des réseaux de capteurs qui analysent le monde physique et sont connectés à d'autres systèmes avec lesquels ils doivent collaborer. Les programmes correspondants tournent sur des systèmes embarqués ou enfouis. Et leur finalité est de contrôler des processus physiques.

Qualifiés de *systèmes cyber-physiques*, ou CPS pour cyber-physical systems [LS16], les recherches dans ce domaine se sont principalement concentrées sur les problèmes de temps-réel, d'architectures embarquées et de sûreté. Afin de garantir la correction des programmes, divers paradigmes de programmation temps-réel ont été utilisés pour prendre en compte les contraintes temporelles (bounded execution time, zero execution time [HCRP91, Ber00], logical execution time, *etc.*). Tous ces paradigmes nécessitent une connaissance précise des temps d'exécution dans le pire des cas d'une tâche pour pouvoir vérifier la correction d'un programme temps-réel. Ils supposent aussi des contraintes temporelles très fortes sur les événements de l'environnement, contraintes qui proviennent souvent des lois physiques qui régissent les processus avec lesquels le système informatique interagit.

Ces paradigmes de programmation temps-réels ne sont pas du tout adaptés aux *systèmes interactifs musicaux* (IMS) [Row92, Row04], qui présentent deux caractéristiques supplémentaires qui amènent des problématiques nouvelles :

- le besoin d’expressivité est plus important que le besoin de sûreté ;
- ils impliquent des humains (*human-in-the-loop*).

En particulier, quand il faut interagir avec l’humain, il n’est plus possible de faire les mêmes suppositions sur les propriétés temporelles de l’environnement. De plus, l’objectif du système informatique n’est pas nécessairement de contrôler un processus physique (maintenir une température, freiner un véhicule) mais de satisfaire des relations temporelles complexes dans le cadre de scénarios d’interaction avec l’humain.

Dans ces scénarios, les événements de l’environnement sont imprévisibles ou incertains. Par exemple, dans le cas de la musique, les musiciens humains proposent une interprétation d’un scénario temporel donné (la partition) et font aussi parfois des erreurs. Contrairement aux CPS traditionnels où la variabilité doit être réduite au minimum, et où la différence entre ce qui est spécifié et ce qui est obtenu doit tendre vers zéro, la variabilité dans les systèmes interactifs musicaux est recherchée et assumée.

Nous avons introduit en 2016 le terme des *systèmes cyber-temporels* pour souligner l’originalité de ces systèmes qui visent à « contrôler du temps » plutôt que des grandeurs physiques matérielles. Le temps est traité comme une entité dénotable et calculable dans le langage, et non une propriété opérationnelle qu’il faut assurer. Ces systèmes ne sont pas spécifiques aux applications musicales et se généralisent au fur et à mesure que les systèmes informatiques s’entremêlent à nos activités humaines et qu’il faut partager le temps entre l’homme et la machine¹.

G.2 Nouvelles approches pour la notation musicale

La notation musicale², et son rôle lors de la performance, sont des exemples paradigmatiques de scénarios d’interactions temporelles complexes qu’il faut réaliser si on veut accorder le temps de la machine à celui de l’homme.

Contrairement à la notion classique de programme, la partition n’a pas pour objectif d’être réalisée parfaitement (cf. la légende de la figure B.8 page 19) : sa réalisation (une interprétation au sens musical) doit rendre compte des variations de l’environnement. Cette notion de partition s’est incarnée dans la *partition augmentée* du DSL Antescofo. Avec ce nouveau quinquennal, nous voulons étendre le travail réalisé afin de permettre la spécification de scénarios plus riches et prendre en compte les nouvelles dimensions de la notation musicale requises par la création contemporaine.

Plus d’expressivité. La notation de l’électronique n’a pas encore reçu de traitement définitif. Les approches existantes, quand elles sont exécutables, relèvent d’un style impératif (notant la manière de construire le résultat) plutôt que déclarative (le résultats souhaité). Au vu de la complexité du phénomène sonore, il n’est sans doute pas possible de se cantonner à une notation purement déclarative (la notation occidentale s’est fixée sur les paramètres de hauteur, de durée, de rythme et d’intensité mais est muette quand au timbre et aux autres paramètres du son). Cependant, une notation plus déclarative de l’électronique est possible, comme le montre l’exemple du langage Faust [OFL04, OFL09] dans le domaine du traitement du signal audio.

1. On peut mentionner par exemple les contrôleurs aériens [LSSS14], qui contrôlent et interagissent avec le système et avec l’environnement dans le cadre de contraintes temporelles complexes et dynamiques.

2. Dans ce document, la notation musicale est distinguée des problèmes de représentation de la partition, de son encodage et des problématiques de gravure (mise en page et typographie). La notation musicale est ici considérée comme le miroir de la pensée musicale et un outil essentiel de son développement.

Nous avons introduit la notion de *pattern temporel* dans [GE14a] qui permet de spécifier un traitement comme une série de réactions à des configurations temporelles. Des notions analogues sont en train d'émerger [UFAM14, UFAM16] dans la communauté temps-réel et pour la vérification de propriétés temporelles. La notion de causalité, essentielle pour la détection en temps-réel de ces patterns, n'est pas encore complètement comprise et doit être étudiée dans un cadre plus large. Enfin ces patterns temporels correspondent à une reconnaissance déterministe dans le sens où un motif est détecté avec certitude ou pas. Cela ne permet pas par exemple de rendre compte de la machine d'écoute d'Antescofo qui est fondée sur des techniques probabilistes. Le développement d'une notion bien fondée de motifs probabilistes, capable d'adresser aussi bien les besoins des représentations bas-niveau du signal que les structures symboliques d'une partition musicale, est un domaine qui reste à défricher.

Une autre expressivité. Confrontée aux nouvelles formes musicales comme les musiques électroniques, les œuvres interactives, le live coding, aux phénomènes de migration de l'instrument musical vers des plates-formes gestuelles et mobiles, aux hybridations avec la danse, le design, le multimédia, la partition contemporaine est souvent étendue, éclatée sur des supports différents, revisitée à travers de nouvelles formes d'écriture. Face à ces besoins, de nouveaux outils pour la notation et la représentation de la musique sont apparus, permettant le développement de nouvelles formes d'écriture et de performance musicale, mais également d'analyse et de musicologie.

Le développement de notations graphiques extensibles et adaptables aux idiosyncrasies d'un compositeur est un enjeu important. De nombreuses notations graphiques ont été développées, mais très peu sont des notations exécutables³. Les espaces compositionnels développés dans la thèse de Julia Blondeau sont une direction totalement nouvelle dans ce domaine. Il est d'ailleurs douteux que la représentation topologique puisse se confondre avec une représentation graphique. Mais elle offre une notation diagrammatique que je veux continuer à développer, en collaboration avec des compositeurs.

La notation des paramètres de l'électronique pose le problème de l'abstraction : comment noter succinctement et symboliquement des données qui seront détaillées ailleurs. Cette abstraction est nécessaire pour que la partition reste un outil de création permettant le développement de nouvelles formes d'écriture et de performance musicale. Dans son travail de thèse, Julia Blondeau a proposé de distinguer les *partitions de travail* et les *partitions de réalisation*. La mise en œuvre de ces notions demande le développement d'outils permettant d'*aligner* ces spécifications. Des notions comme la bisimulation seront utiles ici.

Face aux nouvelles œuvres qui mobilisent de nouveaux media et de nouvelles formes de performance, la notation doit intégrer la prescription de l'espace (spatialisation du son), du geste (omniprésent dans les rapports à l'instrument de musiques) et de l'interaction (œuvre ouverte, re-composable, dynamique).

Enfin, la notation exécutable renouvelle la question des partitions dynamiques ou animées. Le compositeur vise-t-il la trace extensionnelle d'un processus défini intentionnellement ? qu'elle sont alors les moyens de contrôler, à la composition, les diverses traces possibles ?

3. On peut citer Iannix [CF04] si on écarte les notations à base de graphe à flots de données (Max ou PureData) qui sont des notations très opérationnelles et très peu informatives quant aux relations temporelles réalisées par les processus spécifiés.

G.3 Gestion des flots temporels

Le langage Antescofo a la particularité de pouvoir exprimer plusieurs temporalités différentes, le *temps physique* et le *temps musical*. Le temps physique correspond à l'écoulement du temps en *secondes*, le ou les *temps musicaux*, à l'écoulement du temps en *pulsations*, ainsi que décrit dans la partition. Une date ou une durée en *pulsations* dépend du *tempo*, et le tempo n'est connu qu'à l'exécution, en temps réel, en écoutant les musiciens humains. Les processus électroniques doivent adresser plusieurs échelles temporelles différentes, de l'échelle des traitements audio à l'échantillon ($2.10^{-5}s$ à la succession des actes dans un opéra (3.10^3s)).

Actuellement, Antescofo ne sait pas combiner dans le même modèle temporel les traitements audio et la spécification du contrôle induit par les événements musicaux. La thèse de Pierre Donad-Bouillud s'est attaqué à ce problème [DBGC⁺16, DBG17]. Plus largement, il s'agit d'unifier le traitement des divers flots temporels qui peuvent intervenir dans la création contemporaine : l'audio en musique, mais aussi la vidéo, le geste, des données de capteurs (accéléromètre par exemple, position, etc.). Ces flots sont temporisés, événementiels ou un mélange des deux comme c'est le cas pour les actions électroniques réalisées par Antescofo. L'objectif est de développer une notion de *partition électronique centralisée* permettant le contrôle général de tous les processus électroniques, d'interaction et de synchronisation dans un même environnement, afin de permettre une écriture de l'électronique complètement synchronisée aux événements musicaux, gestuels et visuels. Ce travail débute avec la thèse de José Miguel Fernandez, compositeur qui a déjà réalisé plusieurs pièces impliquant un contrôle gestuel très fin de la synthèse sonore.

Le traitement de ces flots variés demande d'inventer de nouvelles articulations entre les « mécanismes d'écoute » à l'origine de ces flots et la partie langage permettant de spécifier la réaction aux événements perçus. Une des leçons du projet Antescofo est en effet de montrer toute l'utilité d'un couplage bidirectionnel entre perception et action. Cette problématique est bien connue en robotique avec la notion de *perception active* par exemple.

Enfin, un langage couplant perception et action doit permettre à un utilisateur non-expert de définir de manière déclarative des scénarios perceptifs attendus et les actions à effectuer en réponse à leur reconnaissance. Les exemples d'environnement de synthèse ou de traitement en temps réel du signal sonore comme Max/MSP, PureData, SuperCollider... ou de séquenceur visuel comme Cubase, Live, etc., utilisé couramment par des musiciens qui ne sont pas des ingénieurs, montre que cet objectif est atteignable dès lors que les primitives adéquates et les mécanismes de composition pertinents ont été bien identifiées pour le domaine d'application visé. Une des problématiques que nous voulons adresser est de dépasser le modèle à flots de données et sa programmation visuelle qui limitent fortement la spécification de séquence d'événements complexes et l'écriture de scénarios dynamiques, et de se fonder sur une approche hybride permettant de combiner *programmation-par-démonstration* et *programmation-par-règle*, pour définir la réaction à un événement perceptif complexe et la composition d'actions élémentaires en comportements paramétrés et réutilisables.

G.4 Serveur de temps et compilation

Le développement de systèmes CP&HS nécessite la collaboration de nombreuses briques logicielles qui représentent chacune des efforts considérables. Il n'est donc pas possible de construire ces systèmes au sein d'un environnement logiciel unifié.

Par ailleurs, la préservation des œuvres digitales pose un problème encore non résolu : comment rejouer à l'identique une œuvre acousmatique qui a été conçue comme résultat de l'exécution d'un programme ? L'interprète ou le compilateur n'existe plus nécessairement, les caractéristiques opérationnelles des supports d'exécution ont changé du tout au tout, etc.

Nous voulons dans ce troisième axe explorer les architectures logicielles permettant de faciliter la construction de grand systèmes cyber-temporels distribués et de réduire leur obsolescence. L'approche que nous visons s'inscrit dans la démarche *software as a service* et consiste à développer une notion de *bus temporel* permettant de synchroniser les flots temporels des différents sous-systèmes. Ce bus temporel peut s'appuyer sur les protocoles de communications déjà largement utilisés en musique, comme OSC [Wri05]. Il faudra les étendre afin de gérer les aspects temporels et faciliter l'interopérabilité des sous-systèmes.

Enfin, nous voulons étudier les techniques permettant la compilation de la coordination temporelle (analyse statique, génération de code) et appliquer des techniques de « conteneurisation » pour limiter l'obsolescence des fragments compilés [DRK14, Boe15].

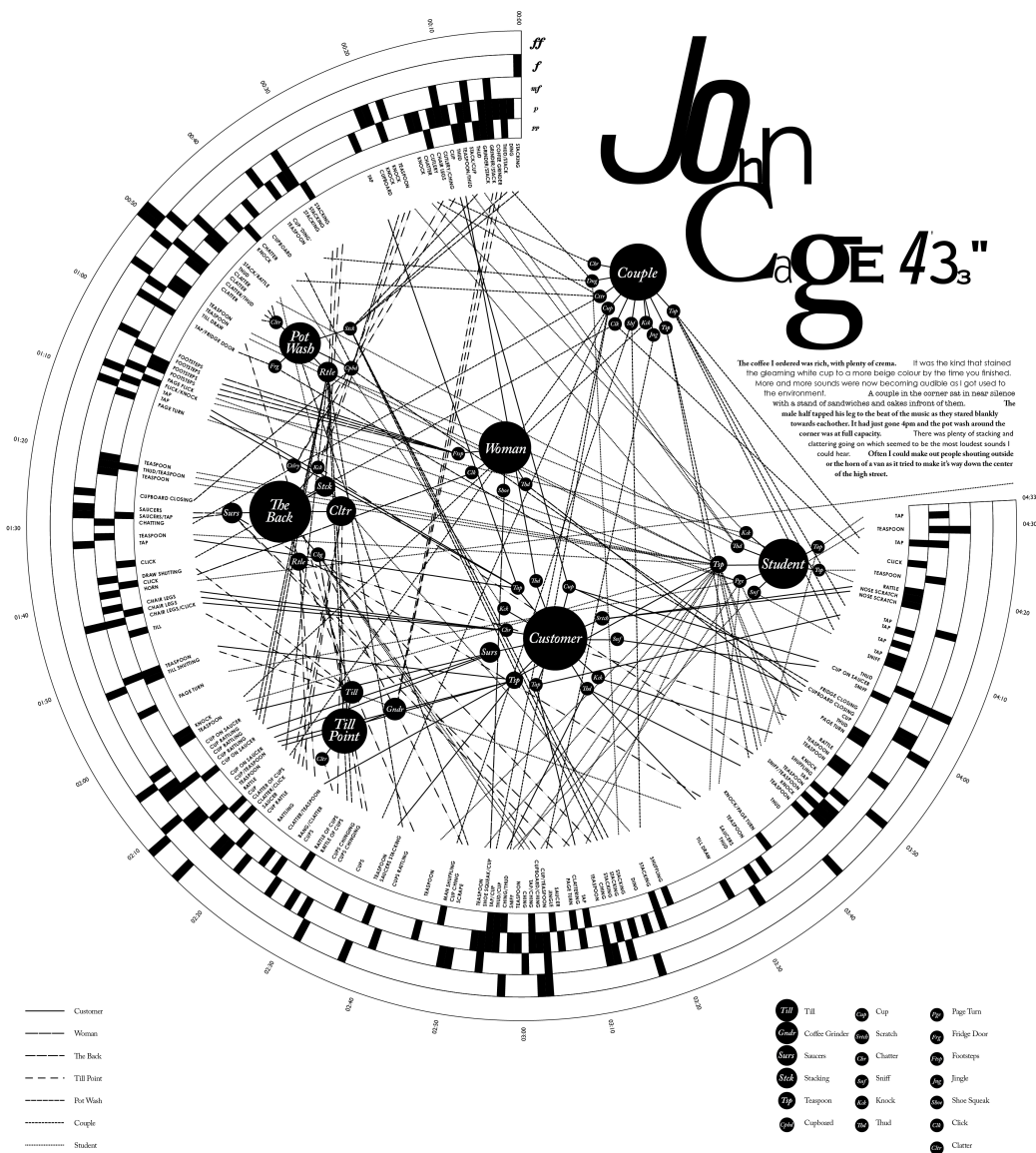


FIGURE G.1 – Une partition graphique de John Cage

Bibliography

- [AJ95] Jean-Paul Allouche and Tom Johnson. Finite automata and morphisms in assisted musical composition. *J. of New Music Research*, 24(2):97–108, 1995.
- [Atk77] Ron Atkin. *Combinatorial Connectivities in Social Systems: an application of simplicial complex structures to the study of large organizations*, volume 34. Birkhauser, 1977.
- [BAG⁺13] Louis Bigo, Moreno Andreatta, Jean-Louis Giavitto, Olivier Michel, and Antoine Spicher. Computation and visualization of musical structures in chord-based simplicial complexes. In *Mathematics and Computation in Music*, pages 38–51. Springer, 2013.
- [Ber00] Gérard Berry. *The Esterel v5 language primer: version v5_91*. Centre de mathématiques appliquées, Ecole des Mines and INRIA, 2000.
- [BF71] Marc Barbut and Louis Frey. *Techniques ordinales en analyse des données*, volume 1. Hachette, 1971.
- [BG92] Gérard Berry and Georges Gonthier. The esterel synchronous programming language: Design, semantics, implementation. *Science of computer programming*, 19(2):87–152, 1992.
- [BG14a] Jean Bresson and Jean-Louis Giavitto. A reactive extension of the openmusic visual programming language. *Journal of Visual Languages & Computing*, 25(4):363–375, 2014.
- [BG14b] Jean Bresson and Jean-Louis Giavitto. A reactive extension of the openmusic visual programming language. *Journal of Visual Languages & Computing*, 25(4):363–375, 2014.
- [BGS11] Louis Bigo, Jean-Louis Giavitto, and Antoine Spicher. Building topological spaces for musical objects. In *Mathematics and Computation in Music*, volume 6726 of *LNCS*, Paris, France, Juin 2011. Springer.
- [BM70] Marc Barbut and Bernard Monjardet. *Ordre et classification : algèbre et combinatoire*. Hachette, 1970.
- [BMS11] Jacob Beal, Olivier Michel, and Ulrik Pagh Schultz. Spatial computing: Distributed systems that take advantage of our geometric world. *TAAS*, 6(2):11–1, 2011.
- [Boe15] Carl Boettiger. An introduction to docker for reproducible research. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 49(1):71–79, 2015.
- [BV15] Jacob Beal and Mirko Viroli. Space–time programming. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2046), 2015.
- [CAG14] Thomas Coffy, Cont Arshia, and Jean-Louis Giavitto. Ascograph: a user interface for sequencing and score following for interactive musical pieces. In *40th International Computer Music Conference*, pages 600–605, 2014.
- [Cas92] John Casti. *Reality Rules: Picturing the world in mathematics. II — The Frontiers*. Wiley, 1992.
- [CEGJ12] Arshia Cont, José Echeveste, Jean-Louis Giavitto, and Florent Jacquemard. Correct automatic accompaniment despite machine listening or human errors in antescofo. In

- Proceedings of International Computer Music Conference (ICMC)*, Ljubljana, Slovenia, September 2012.
- [CF04] Thierry Coduys and Guillaume Ferry. Iannix-aesthetical/symbolic visualisations for hypermedia composition. In *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference*, pages 18–23, 2004.
- [CM17] Frédéric Chazal and Bertrand Michel. An introduction to Topological Data Analysis: fundamental and practical aspects for data scientists. working paper or preprint, October 2017.
- [Coh98] Richard Cohn. Introduction to neo-riemannian theory: a survey and a historical perspective. *Journal of Music Theory*, pages 167–180, 1998.
- [Con10] A. Cont. A coupled duration-focused architecture for real-time music-to-score alignment. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 32(6):974–987, 2010.
- [DBG17] Pierre Donat-Bouillud and Jean-Louis Giavitto. Typing heterogeneous dataflow graphs for static buffering and scheduling. In *ICMC 2017-43rd International Computer Music Conference*, 2017.
- [DBG⁺16] Pierre Donat-Bouillud, Jean-Louis Giavitto, Arshia Cont, Nicolas Schmidt, and Yann Orlarey. Embedding native audio-processing in a score following system with quasi sample accuracy. In *ICMC 2016-42th International Computer Music Conference*, 2016.
- [DHGG06] André De Hon, Jean-Louis Giavitto, and Frédéric Gruau, editors. *Computing Media and Languages for Space-Oriented Computation*, number 06361 in Dagstuhl Seminar Proceedings. Dagstuhl, <http://www.dagstuhl.de/en/program/calendar/semhp/?semnr=2006361>, 3-8 sptember 2006.
- [DRK14] Rajdeep Dua, A Reddy Raja, and Dharmesh Kakadia. Virtualization vs containerization to support paas. In *Cloud Engineering (IC2E), 2014 IEEE International Conference on*, pages 610–614. IEEE, 2014.
- [DSM13] René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel. A review of morphogenetic engineering. *Natural Computing*, 12(4):517–535, 2013.
- [ECGJ11] José Echeveste, Arshia Cont, Jean-Louis Giavitto, and Florent Jacquemard. Formalisation des relations temporelles entre une partition et une performance musicale dans un contexte d’accompagnement automatique : Accompagnement musical automatique. *Journal Européen des Systèmes Automatisés, special issue Proc. of MSR’2011*, 2011.
- [ECGJ13] José Echeveste, Arshia Cont, Jean-Louis Giavitto, and Florent Jacquemard. Operational semantics of a domain specific language for real time musician–computer interaction. *Discrete Event Dynamic Systems*, 23(4):343–383, 2013.
- [Ech15] José Echeveste. *Un langage de programmation pour composer l’interaction musicale — La gestion du temps et des événements dans Antescofo*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, May 2015.
- [FAG15] Anton Freund, Moreno Andreatta, and Jean-Louis Giavitto. Lattice-based and topological representations of binary relations with an application to music. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 73(3-4):311–334, 2015.
- [GC12] Jean-Louis Giavitto and Arshia Cont. Du temps écrit au temps produit. Colloque Produire le temps, ENS - IRCAM - Polytechnique. Intervention visible à la page http://www.dailymotion.com/video/xvfvap_du-temps-ecrit-au-temps-produit-en-informatique-musicale_creation, 14–15 Juin 2012.
- [GCE15] Jean-Louis Giavitto, Arshia Cont, and José Echeveste. *Antescofo: A not-so-short introduction to version 0.5x*. IRCAM, Paris, France, augusst 2015 edition, 2015. 169 pp. Available at <http://support.ircam.fr/docs/Antescofo/AntescofoReference.pdf>.

- [GE14a] Jean-Louis Giavitto and José Echeveste. Real-time matching of antescofo temporal patterns. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming*, pages 93–104. ACM, 2014.
- [GE14b] Jean-Louis Giavitto and José Echeveste. Real-time matching of antescofo temporal patterns. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming*, PPDP '14, pages 93–104, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [GECC17] Jean-Louis Giavitto, José-Manuel Echeveste, Arshia Cont, and Philippe Cuvillier. Time, timelines and temporal scopes in the antescofo dsl v1. 0. In *International Computer Music Conference (ICMC)*, 2017.
- [GV98] Jean-Louis Giavitto and Erika Valencia. Combinatorial algebraic topology for diagrammatic reasoning. Technical Report 1165, Laboratoire de Recherche en Informatique, April 1998.
- [HCRP91] Nicholas Halbwachs, Paul Caspi, Pascal Raymond, and Daniel Pilaud. The synchronous data flow programming language LUSTRE. *Proceedings of the IEEE*, 79(9):1305–1320, 1991.
- [Ho11] Jocelyn Ho. From 2d to 3d: Using geometry and group theory to model motivic structure in musical composition. In Carlos Agon, Moreno Andreatta, Gérard Assayag, Emmanuel Amiot, Jean Bresson, and John Mandereau, editors, *Mathematics and Computation in Music*, volume 6726 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 342–345. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [LML06] Xiaojun Liu, Eleftherios Matsikoudis, and Edward A Lee. Modeling timed concurrent systems using generalized ultrametrics. *Technical Report. UCB/EECS-2006-45*, 2006.
- [LS16] Edward Ashford Lee and Sanjit A Seshia. *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. MIT Press, 2016.
- [LSSS14] Wenchao Li, Dorsa Sadigh, S Shankar Sastry, and Sanjit A Seshia. Synthesis for human-in-the-loop control systems. In *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, pages 470–484. Springer, 2014.
- [Mor80] Robert P. Morgan. Musical time/musical space. *Critical inquiry*, 6(3):527–538, 1980.
- [MP93] Zohar Manna and Amir Pnueli. Verifying hybrid systems. In *Hybrid Systems*, pages 4–35. Springer, 1993.
- [NECG14] Jérôme Nika, José Echeveste, Marc Chemillier, and Jean-Louis Giavitto. Planning human-computer improvisation. In *40th International Computer Music Conference*, page 330, 2014.
- [Nov97] Marcos Novak. Trans terra form: Liquid architectures and the loss of inscription. Available from <http://www.krcf.org/krcfhome/PRINT/nonlocated/nonline/nonMarcos.html>; accessed July 2015, 1997.
- [OFL04] Yann Orlarey, Dominique Fober, and Stéphane Letz. Syntactical and semantical aspects of faust. *Soft Computing*, 8(9):623–632, 2004.
- [OFL09] Yann Orlarey, Dominique Fober, and Stéphane Letz. Faust: an efficient functional approach to dsp programming. *New Computational Paradigms for Computer Music*, 290:14, 2009.
- [Row92] Robert Rowe. *Interactive music systems: machine listening and composing*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992.
- [Row04] Robert Rowe. *Machine Musicianship*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2004.
- [SBGA14] Antoine Spicher, Louis Bigo, Daniele Ghisi, and Moreno Andreatta. Spatial transformations in simplicial chord spaces. In *International Computer Music Conference*, page 207, 2014.
- [Tan05] Dante Tanzi. Musical objects and digital domains. In *Proceedings of EMS-05 Conference. Montreal, Quebec*. Electroacoustic Music Studies Network, 19-22 october 2005. available online at <http://www.ems-network.org/spip.php?article176>; accessed July 2015.

- [TE14] Christopher Trapani and José Echeveste. Real time tempo canons with antescofo. In *International Computer Music Conference*, page 207, 2014.
- [UFAM14] Dogan Ulus, Thomas Ferrère, Eugene Asarin, and Oded Maler. Timed pattern matching. In *International Conference on Formal Modeling and Analysis of Timed Systems*, pages 222–236. Springer, 2014.
- [UFAM16] Dogan Ulus, Thomas Ferrère, Eugene Asarin, and Oded Maler. Online timed pattern matching using derivatives. In *International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, pages 736–751. Springer, 2016.
- [VGS98a] Erika Valencia, Jean-Louis Giavitto, and Jean-Paul Sansonnet. Algebraic topology for knowledge representation in analogy solving. In *ECAI*, pages 88–92, 1998.
- [VGS98b] Erika Valencia, Jean-Louis Giavitto, and Jean-Paul Sansonnet. Esqimo: Modelling analogy with topology. In *Second European Conference on Cognitive Modelling (ECCM2)*, pages 212–213, 1998.
- [Wil82] Rudolf Wille. Restructuring lattice theory: An approach based on the hierarchy of concepts. In Ivan Rival, editor, *Ordered sets: proceedings of the NATO Advanced Study Institute held at Banff, Canada, August 28 to September 12, 1981*. D. Reidel Pub. Co., 1982.
- [Wri05] Matthew Wright. Open sound control: an enabling technology for musical networking. *Organised Sound*, 10(3):193–200, 2005.
- [Zom12] Afra Zomorodian. Topological data analysis. *Advances in applied and computational topology*, 70:1–39, 2012.