

Musique et codage du monde : entre formalisation mathématique et calcul informatique

PAR **MORENO ANDREATA**, DIRECTEUR DE RECHERCHE AU CNRS, IRCAM-STMS-SORBONNE UNIVERSITÉ, CHERCHEUR INVITÉ À L'INSTITUT DE RECHERCHE MATHÉMATIQUE AVANCÉE (IRMA) AINSI QUE FELLOW DE L'INSTITUT D'ÉTUDES AVANCÉES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG (USIAS)

Quels sont les paradigmes qui ont accompagné l'émergence de l'idée de «codage» en musique? Quel rôle ont joué les mathématiques dans ce processus? Cet article retrace les grandes lignes des rapports entre théorisation musicale, formalisation mathématique et calcul informatique à partir de la vision combinatoire du monde du XVII^e siècle jusqu'au développement de la composition algorithmique et des recherches autour du temps réel, de la microinformatique, des langages de programmation, de l'informatique ubiquitaire, du web audio et des nouvelles frontières de la créativité artificielle.



FORUM VERTIGO:

CODER-DÉCODER LE MONDE

DU MERCREDI 13 AU SAMEDI 16 JUIN
CENTRE POMPIDOU, PETITE SALLE

CODER LE MONDE

EXPOSITION

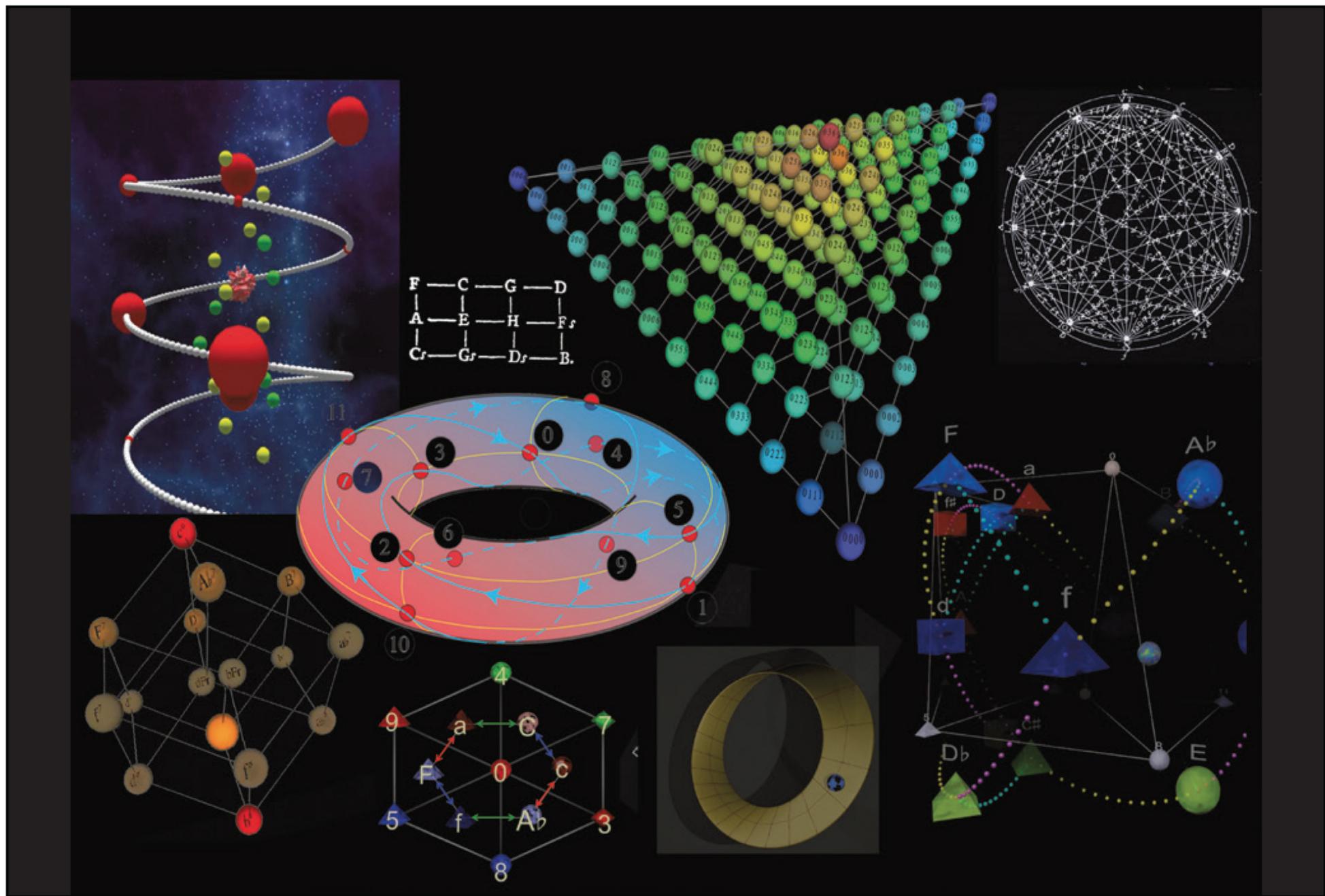
DU VENDREDI 15 JUIN
AU LUNDI 27 AOÛT

CENTRE POMPIDOU, GALERIE 4

S'il est vrai que tout est nombre, comme l'affirmaient les pythagoriciens, la musique occupe une place tout à fait singulière au sein des disciplines à l'aide desquelles l'homme a essayé de mathématiser le monde. Art du temps, mais aussi de l'espace, inspiration mais également «calcul secret qui l'âme fait à son insu», comme l'écrivait Leibniz à son collègue mathématicien Christian Goldbach, la musique accompagne depuis toujours la quête vers une meilleure compréhension du cosmos. Sa place tout à fait singulière parmi les autres disciplines (arts plastiques, littérature, architecture et danse) autour desquelles s'articule l'exposition «Coder le monde» suggère la possibilité d'organiser une *timeline* consacrée à la musique à l'aide d'une typologie permettant au visiteur de mieux cerner les rapports entre théorisation musicale, formalisation mathématique et calcul informatique.

Cette typologie montre l'évolution au cours des siècles de quelques idées majeures ayant favorisé et ensuite accompagné jusqu'à nos jours l'émergence de l'idée

même de codage, dans sa composante éminemment calculatoire. On passe ainsi de la vision combinatoire du monde du XVII^e siècle portée par le père Marin Mersenne aux premières machines mécaniques pour calculer la musique du XIX^e siècle, véritables prémisses de la conception de la musique comme «art/science». En effet, si l'on doit à Mersenne l'invention de la combinatoire, et cela à partir d'un problème de calcul et énumération exhaustive de toutes les mélodies possibles, d'autres branches de mathématiques, comme la théorie des graphes par exemple, trouvent également leur acte de naissance au sein d'une théorisation musicale. Ce sont en particulier les travaux du mathématicien Leonhard Euler autour de la géométrisation de l'espace des hauteurs à l'aide du *Speculum musicum* (1773) qui ouvrent la voie à l'émergence d'un nouveau champ disciplinaire au sein des mathématiques, une théorie – celle des graphes – qui, de même que le calcul combinatoire fondé par Mersenne, resteront jusqu'à présent des outils privilégiés pour coder le monde musical.



1. La galaxie des espaces «mathémusicaux» au service de la musicologue computationnelle (de haut en bas et de gauche à droite: «Spiral Array» d'Elaine Chew, *Spéculum musicum* de Leonhard Euler, Orbifold de Dmitri Tymoczko, représentation circulaire de Marin Mersenne, espace tridimensionnel des accords de septième, maillage hexagonal ou Tonnetz, ruban de Möbius, hypersphère des accords de Gilles Baroin. Au centre de la figure le «Tore des tierces» de Guerino Mazzola (équivalent en trois dimensions du Tonnetz)...
© Gilles Baroin

La vision combinatoire du monde favorise la conception d'automates et de machines à composer la musique, comme l'atteste le traité *Musurgia universalis* (1650) du théoricien Athanasius Kircher. Ce sont des machines déterministes, à l'image d'un monde cartésien n'ayant pas encore intégré la notion de hasard. Il faudra en effet attendre encore un siècle pour assister à l'introduction de procédés aléatoires en composition musicale. Cela se fera grâce aux innombrables *Musikalische Würfelspiele* ou jeux musicaux de dés, proposant des recettes pour composer des menuets, des valse ou des polonaises en lançant des dés. Et c'est précisément avec le jeu de dés que l'aléa devient un composant musical. On retrouvera ces mêmes procédés aléatoires dans les machines mécaniques du XIX^e siècle, comme le *Componium* conçu en 1821 par Dietrich Nikolaus Winkel et permettant de produire des variations d'une mesure de musique avec un procédé aléatoire.

La musique voit donc s'enrichir sa palette d'outils théoriques, bien que le calcul algébrique reste le paradigme dominant, comme le témoigne l'ouvrage *Technie, ou lois générales du système harmonique* (1855) de Camille Durutte, écrit en collaboration avec le logicien et mathématicien polonais Hoëne Wronski. La musique devient ainsi «corporification de l'intelligence dans les sons», une démarche qui sera revendiquée un siècle plus tard par Edgar Varèse qui reprendra et prolongera cette idée d'une relation étroite entre approche artistique et démarche scientifique, en contribuant ainsi à l'émergence d'un nouveau paradigme disciplinaire: le paradigme de l'art/science.

Le XX^e siècle marque l'intensification des rapports et des compagnonnages entre musique, mathématique et informatique tout d'abord avec l'introduction de procédés mathématiques en composition algorithmique. Les techniques analytiques et composition-

nelles de Joseph Schillinger, auteur notamment des ouvrages *The Mathematical Basis of Art* (1943) et *The Schillinger System of Musical Composition* (1946), constituent un exemple remarquable de préfiguration, de la part d'un compositeur, de concepts et outils informatiques¹.

La musique accompagne ensuite les débuts de cette nouvelle science, l'informatique, dont les développements auront à leur tour une influence directe dans la pensée musicale. La conception, en 1955-1956, du premier synthétiseur programmable (le *RCA Mark II Sound Synthesizer*) au centre de musique électronique de Columbia-Princeton, est suivie par la composition de la première pièce algorithmique, la *Suite Illiac* pour quatuor à cordes, de Lejaren Hiller et Leonard M. Isaacson, composée en 1957 à l'aide de l'*Illinois Automatic Computer*. De la même année date la conception de MUSIC, premier langage modulaire pour la syn-

1. Il s'agit à l'occurrence du format MIDI, une norme qui ne sera créée par John Chowning, concepteur également du synthétiseur Yamaha DX7 basé sur la synthèse FM, qu'une quarantaine d'années plus tard. / 2. Iannis Xenakis, «Vers un métamusique», in *La Nef*, 29, 1967.

thèse sonore par Max Mathews aux Bell Laboratories (voir p.30). Ces mêmes années marquent la naissance de la cybernétique et de la théorie de l'information, deux paradigmes qui constituent le véritable terreau conceptuel d'un grand nombre d'expériences autour de la composition algorithmique. En effet, comme l'affirment C. Shannon et W. Weaver dans leur traité *The Mathematical Theory of Communication* (1949), « cette théorie [la théorie de l'information] est si générale, que l'on n'a pas besoin de dire quelles sortes de symboles sont considérées – que ce soient des mots ou des lettres écrits, ou des notes musicales, ou des mots parlés, ou de la musique symphonique ou des images ».

La prise de distance par rapport au paradigme cybernétique et informationnel de la part de certains compositeurs et, en particulier, Iannis Xenakis, témoigne cependant d'un désir de dépassement du caractère langagier de la musique, qui était le postulat implicite de la théorie de l'information. Comme l'affirmera quelques années plus tard le compositeur, architecte et ingénieur grec dans son essai de théorisation métamusical, « les identifications musique-message, musique-communication, musique-langage sont des schématisations qui entraînent vers des absurdités et des dessèchements. Trop de flou en musique ne peut se plier à trop de précision théorique. Plus tard, avec l'affinement et l'invention de nouvelles théories, peut-être² ». La parution, en 1963, de l'ouvrage *Musiques formelles* permettra de comprendre la place de l'informatique dans l'univers compositionnel de Xenakis grâce, en particulier, à une première typologie d'œuvres obtenues à partir des mathématiques et de l'ordinateur (stochastique générale, stochastique markovienne, stratégique, stochastique à l'ordinateur et symbolique). L'ouvrage signe également le passage de l'informatique à l'âge de la maturité, avec une décennie (1965-1975) marquée par les recherches de Jean-Claude Risset sur les sons paradoxaux aux Bell Laboratories (1965-1968), la création en 1966 par Iannis Xenakis de l'EMAMu (Équipe de mathématique et automatique musicales), qui deviendra ensuite le CEMAMu (Centre d'études de mathématique et automatique musicales) et la publication d'un certain nombre d'ouvrages-manifeste sur les approches mathématiques en analyse et compositions musi-

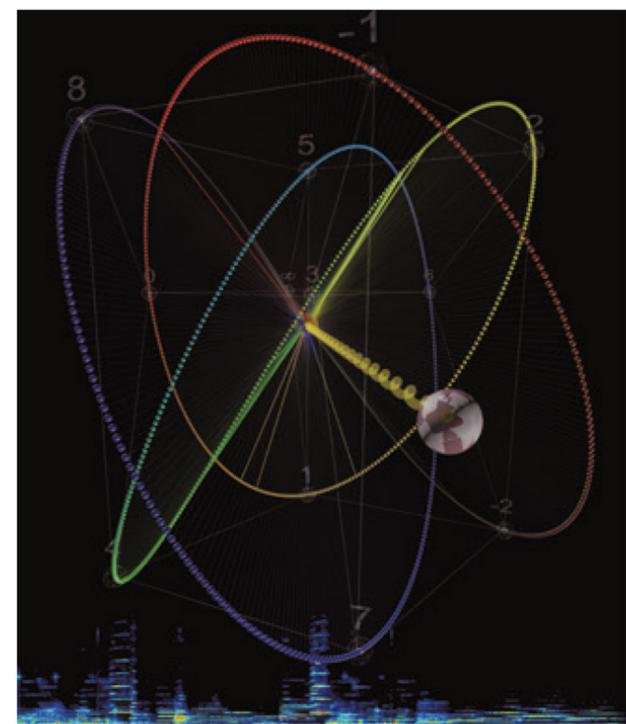
cales. On citera les deux ouvrages de Pierre Barbaud, *Initiation à la composition musicale automatique* (1966) et *La musique discipline scientifique* (1968), et le traité *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition* (1971) de Iannis Xenakis, dont le sous-titre montre la place désormais incontournable de la théorisation mathématique dans le codage du monde de la musique.

Sous l'impulsion, entre autres, des mathématiques, l'informatique évolue de façon incessante à partir des années 1975, une période qui marque l'émergence de la micro-informatique et des premiers systèmes de traitement temps réel de l'information musicale. Ces synthétiseurs numériques temps réel, parmi lesquels on peut mentionner les séries des synthétiseurs 4A, 4B, 4C et 4X de l'Ircam (1976-1984), l'UPIC du CEMAMu (1977) et les environnements SYTER (1984) et GRM Tools (1993) du Groupe de recherches musicales, auront désormais une influence directe sur les œuvres des compositeurs. Cela sera notamment le cas de *Mycènes alpha* (1978) de Xenakis (pour système UPIC), *Répons* (1981-1984) de Boulez (pour six solistes, ensemble de chambre, sons électroniques et électronique en direct, système 4X) ou *Jupiter* de Philippe Manoury, pour flûte et électronique, première pièce utilisant le Synthetic Performer (Score Follower) conçu par Barry Vercoe à l'Ircam et le synthétiseur 4X. Les années 1980 signent également la date de naissance des premiers environnements d'écriture assistée par ordinateur de l'Ircam (C.R.I.M.E., par Gérard Assayag et Claudy Malherbe) et d'autres environnements pour la synthèse sonore (tels FORMES par Pierre Cointe, Xavier Rodet et Yves Potard à l'Ircam et CSound par Barry Vercoe au MIT) ou le temps réel (tel *The Patcher*, environnement graphique temps réel conçu à l'Ircam par Miller Puckette et Philippe Manoury et renommé ensuite Max, en l'honneur de Max Mathews).

Les années 1990 ont marqué l'émergence et la cristallisation de nouvelles tendances de la musicologie, dont la composante computationnelle favorise la réflexion autour de la créativité artificielle et tire bénéfice du développement incessant des langages de programmation assistée par ordinateur. C'est notamment le cas de PatchWork, initialement conçu à l'Ircam par Mikael Laurson, Jacques Duthen et Camilo Rueda ainsi qu'OpenMusic, également

conçu à l'Ircam par Gérard Assayag et Carlos Agon et dont les musicologues computationnels ne vont pas tarder à se servir à des fins analytiques. C'est une tendance qui continue voire s'accroît, de nos jours, avec des environnements pour l'improvisation assistée par ordinateur (tel OMax) et dont la double perspective analytico/synthétique dépasse le cadre des approches symboliques et intègre également des techniques issues du traitement audio dans une articulation permanente entre signe et signal. Des mathématiques de plus en plus sophistiquées, proposant une panoplie d'outils algébriques, topologiques et issus de la théorie des catégories, sont désormais au service du musicologue computationnel, dans des environnements pédagogiques – tel Hexachord par exemple – facilitant de façon considérable la transmission d'idées et de concepts parfois très techniques auprès du grand public.

Avec l'informatique ubiquitaire, le Web audio et les nouvelles frontières de l'intelligence artificielle, la quête vers le codage du monde se poursuit, dans une perspective dépassant désormais de façon systématique les frontières entre les genres savant et populaire, miroir d'un village global dans lequel la musique est à nouveau capable de cristalliser la réflexion théorique autour de ses rapports à la fois anciens et nouveaux avec les mathématiques et l'informatique. ■



Version spectrale de l'hypersphère des accords de Gilles Baroin © Gilles Baroin

TABLEAU SYNTHÉTIQUE DES PRINCIPAUX STUDIOS DE MUSIQUE ÉLECTRONIQUE

Fondation au début des années 1950 des premiers studios de musique électronique (Cologne, par Robert Beyer et Herbert Eimert, sous l'influence de Werner Meyer-Eppler), *tape music* (Columbia, par Otto Luening et Vladimir Ussachevski), phonologie (Milan, par Luciano Berio et Bruno Maderna) et communications (Bell Laboratories).

Premier Groupe de recherche de musique concrète – GRMC. Fondation à Tokyo du premier studio de musique expérimentale (Toshiro Mayuzumi et Toru Takemitsu). Experimental Music Center at the University of Illinois (1958), dénomination du Groupe de recherches musicales (GRM) en 1958 et création du Service de la recherche de la Radiodiffusion-télévision française, auquel s'intègre le GRM (1960).

Fondation par Xenakis de l'EMAMu (Équipe de mathématique et automatique musicales), qui deviendra ensuite le CEMAMu (Centre d'études de mathématique et automatique musicales) en 1972, puis Les Ateliers UPIC en 1985, CCMIX (Centre de création musicale Iannis Xenakis) en 2000 et CIX (Centre Iannis Xenakis).

Création en 1977 de l'Ircam, l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique, par Pierre Boulez.



Studio à l'Ircam © Philippe Barbosa

LISTE CHRONOLOGIQUE DES PRINCIPAUX LANGAGES DE PROGRAMMATION POUR LA MUSIQUE

1957–1966

MUSIC-n (de MUSIC I à MUSIC V) par Max Mathews aux Bell Telephone Laboratories.

1978

MUSCMP par John Tovar à Stanford University.

1980

C-Music (en langage C) par F. Richard Moore et Gareth Loy à l'UCSD La Jolla.

1983

Sythetic Performer (Score Follower) par Barry Vercoe à l'Ircam.

1984

Arctic (Real-Time functional language) par Roger Dannenberg à Carnegie-Mellon et C.R.I.M.E (premier environnement d'écriture assistée par ordinateur) par Gérard Assayag et Claudy Malherbe à l'Ircam.

1985–1986

FORMES par Pierre Cointe, Xavier Rodet et Yves Potard à l'Ircam, CSound par Barry Vercoe au MIT et 4XY par Robert Rowe à l'Ircam.

1988

Esquisse par Pierre-François Baisnée, Jacques Duthen et Magnus Lindberg et Max par Miller Puckette et Philippe Manoury à l'Ircam.

1989

Common Music par Rick Taube au CCRMA, Stanford, puis au ZKM, Karlsruhe.

1991

PatchWork par Mikael Laurson, Jacques Duthen et Camilo Rueda, et Modalys par Jean-Marie Adrien, René Caussé et Joseph Morrison à l'Ircam.

1993

Nyquist par Roger Dannenberg à l'université Carnegie-Mellon.

1996

OpenMusic par Gérard Assayag et Carlos Agon à l'Ircam et SuperCollider par James McCartney.

2002

GENESIS par Claude Cadoz et les membres du laboratoire ACROE-ICA de Grenoble, un outil de création musicale qui s'appuie sur le formalisme de modélisation et de simulation des objets physiques CORDIS-ANIMA.

2002

Chuck (Strongly-timed, Concurrent, and On-the-fly Music Programming Language pour le Live coding) à l'université de Princeton et IanniX par Thierry Coduys (La Kitchen), Adrien Lefevre (Adlef), et Gérard Pape (CCMIX).

2004

Faust (Functional Audio Stream) par l'équipe de Yann Orlarey au Grame de Lyon.

2007

Antescofo par Arshia Cont (Ircam, équipe-projet MuTant) en collaboration avec le compositeur Marco Stroppa, système modulaire de suivi de partitions (*Modular Score Follower*) ainsi que langage de programmation synchrone pour la composition musicale.

2013

Hexachord par Louis Bigo (en collaboration avec Jean-Louis Giavitto, Antoine Spicher et Moreno Andreatta) pour l'analyse et la génération topologique de la musique assistée par ordinateur.