

**PROJET DE RECHERCHE DE**

Moreno ANDREATTA

présenté pour le concours DR2 (07/01)

**Modèles algébriques et catégoriels en informatique musicale  
et leurs interactions avec d'autres disciplines**

IRCAM/CNRS/UPMC

UMR 9912 (STMS)

Sciences et Technologies de la Musique et du Son

1, place I. Stravinsky

75004 Paris

<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/moreno/>



## Table de matières

<b>1</b>	<b>Référents</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Résumé du programme de recherche et mots clés</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Descriptif et objectifs du programme de recherche proposé</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>Objectifs à court terme</b> .....	<b>10</b>
3.1.1	Intégration de la DFT dans la formalisation des problèmes théoriques .....	10
3.1.2	Utilisation de la programmation spatiale pour la modélisation informatique d'analyses transformationnelles .....	10
3.1.3	Aspects perceptifs des modèles algébriques en informatique musicale.....	12
3.1.3.1	Transformée de Fourier discrète et perception musicale .....	13
3.1.3.2	Retombées perceptives de l'analyse transformationnelle.....	13
<b>3.2</b>	<b>Objectifs à moyen terme</b> .....	<b>15</b>
3.2.1	Des structures algébriques fortes aux langages formels.....	15
3.2.2	Programmation spatiale, contraintes concurrentes, calcul parallèle et massif.....	16
3.2.3	Systèmes évolutifs à mémoire (MENS) et perception/cognition musicales.....	17
<b>3.3</b>	<b>Objectifs à long terme</b> .....	<b>18</b>
3.3.1	Logique mathématique vs logique musicale .....	18
3.3.2	Quelle logique pour l'informatique musicale ? .....	19
3.3.3	Logique de l'interaction, géométrie de la cognition et perception musicale.....	20
<b>3.4</b>	<b>Coda : aspects philosophiques de la recherche mathémusicale</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Activités pédagogiques et transmission des connaissances</b> .....	<b>23</b>
4.1	Actions visant un public scientifique .....	23
4.2	Actions visant la communauté musicale.....	23
4.3	Actions visant le grand public .....	24
<b>5</b>	<b>Vers une institutionnalisation de la recherche « mathémusicale »</b> .....	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Références</b> .....	<b>25</b>

# 1 Référents

Les personnes suivantes ont accepté d’être mes référents et peuvent être directement contactées afin d’obtenir un avis sur ma candidature<sup>1</sup>.

*Pour l’intégration du projet de recherche au sein des activités de l’UMR 9912 (STMS) :*

- Gérard ASSAYAG, responsable équipe Représentations musicales IRCAM et directeur de l’UMR 9912 (STMS). Lettre de recommandation jointe au dossier<sup>2</sup>.  
*Contact : Gerard.Assayag@ircam.fr*
- Hugues VINET, directeur scientifique de l’IRCAM. Lettre de recommandation jointe au dossier<sup>3</sup>.  
*Contact : Hugues.Vinet@ircam.fr*
- Henri MAÎTRE, directeur de la recherche de Télécom ParisTech et directeur adjoint de l’école doctorale EDITE de Paris.  
*Contact : henri.maitre@Telecom-ParisTech.fr*

*Pour les aspects informatiques :*

- Jean-Paul ALLOUCHE, directeur de recherche CNRS, Équipe Combinatoire et optimisation, université de Paris 6.  
*Contact : allouche@math.jussieu.fr*
- Marc CHEMILLIER, directeur d’études au CAMS/CNRS (EHESS) et rapporteur pour ma thèse de doctorat en musicologie computationnelle.  
*Contact : chemilli@free.fr*
- Jean-Louis GIAVITTO, directeur de recherche CNRS, équipe Représentations Musicales de l’IRCAM.  
*Contact : giavitto@ibisc.univ-evry.fr*

*Pour les aspects mathématiques :*

- Athanase PAPADOPOULOS, directeur de recherche CNRS, Institut de Recherche Mathématique Avancée, Université de Strasbourg. Garant de mon habilitation à diriger des recherches.  
*Contact : athanase.papadopoulos@math.unistra.fr*
- José-Francisco RODRIGUES, Professeur, CMAF/FC Université de Lisbonne, Portugal.  
*Contact : rodrigue@ptmat.fc.ul.pt*
- Fabrizio BROGLIA, Professeur, département de mathématique, Université de Pise, Italie. Rapporteur de mon habilitation à diriger des recherches.  
*Contact : broglia@dm.unipi.it*

*Pour les aspects musicologiques :*

- Guerino MAZZOLA, Professeur, département de musique, Université de Minnesota, Etats-Unis, co-directeur de la collection « Computational Music Sciences » (Springer). Président du jury de ma thèse de doctorat en musicologie computationnelle.  
*Contact : mazzola@umn.edu*

---

<sup>1</sup> Les différents rapports concernant mes recherches passées (rapport de soutenance de thèse de doctorat, rapport du garant soumis au conseil scientifique de l’Université de Strasbourg en vue de l’acceptation du dossier de candidature pour mon habilitation à diriger des recherches et les trois rapports sur le dossier d’habilitation à diriger des recherches) sont disponibles à l’adresse :

<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/moreno/MorenoANDREATTA-prod2011.html>

<sup>2</sup> LettreRecANDREATTA\_Assayag\_STMS.pdf

<sup>3</sup> LettreRecANDREATTA\_Vinet\_STMS.pdf

- Xavier HASCHER, professeur, département de musique, Université de Strasbourg. Rapporteur de mon habilitation à diriger des recherches.  
*Contact : xhascher@unistra.fr*
- John RAHN, Professeur, Université de Washington à Seattle et rédacteur en chef de la revue *Perspectives of New Music*. Rapporteur de ma thèse de doctorat en musicologie computationnelle.  
*Contact : jrahn@u.washington.edu*

*Pour les aspects cognitifs, épistémologiques et philosophiques :*

- Andrée C. EHRESMANN, professeur émérite à l'Université de Picardie-Jules Verne et conceptrice du modèle catégoriel des systèmes évolutifs à mémoire.  
*Contact : andree.ehresmann@u-picardie.fr*
- Frédéric PATRAS, directeur de recherche CNRS, Laboratoire J. A. Dieudonné, Université de Nice Sophia-Antipolis. Rapporteur de mon habilitation à diriger des recherches.  
*Contact : Frederic.Patras@unice.fr*
- Hugues DUFOURT, directeur de recherche CNRS, philosophe, compositeur.  
*Contact : hugues.dufourt@gmail.com*



## 2 Résumé du programme de recherche et mots clés

L'application de l'informatique à la musique pose des problèmes mathématiques difficiles, en particulier pour leur formalisation constructive et leur résolution algorithmique. Ce projet, dans la continuité de mon projet de recherche **MISA** (Modélisation Informatique des Structures Algébriques)<sup>4</sup>, retenu par le CNRS, poursuit l'étude des problèmes musicaux encore ouverts en mathématiques (comme la construction des canons rythmiques mosaïques et ses liens avec la conjecture spectrale, la relation  $Z$  en théorie des ensembles de classes des hauteurs et ses liens avec l'homométrie et le problème de la reconstruction de la phase)<sup>5</sup> et aborde les problèmes nouveaux soulevés par la formalisation algébrique et catégorielle des structures et processus musicaux. Nous souhaitons pour cela utiliser des outils mathématiques et informatiques bien connus dans le domaine des relations entre mathématiques et musique (transformée de Fourier discrète, catégorie des graphes dirigés, théorie des langages formels, ...) mais aussi des outils dont l'application au domaine est encore embryonnaire (programmation spatiale, calcul parallèle, contraintes concurrentes, calcul massif, ...).

La modélisation informatique des problèmes théoriques posés par la musique ouvre également de questions nouvelles concernant les interactions entre recherche « mathémusicale » et les autres disciplines, en particulier les sciences cognitives et la philosophie.

Parallèlement à la dimension de recherche académique, le projet vise à renforcer les activités pédagogiques liées à la transmission des connaissances, en direction aussi bien la communauté des scientifiques que de celle des musiciens et du grand public.

Le projet proposé s'inscrit de façon naturelle au sein des activités de recherche de l'UMR 9912 STMS (Sciences et Technologies de la Musique et du Son), laboratoire dans lequel j'aimerais poursuivre mes recherches futures.

**Mots clés :** modèles algébriques, théorie des catégories, programmation spatiale, systèmes évolutifs à mémoire, structuralisme phénoménologique.

## 3 Descriptif et objectifs du programme de recherche proposé

Le projet que je propose pour les années à venir s'inscrit dans le prolongement des activités de recherche que je mène depuis 1998 au sein de l'équipe Représentations Musicales de l'IRCAM (UMR STMS), mais dont l'origine, comme je l'ai montré dans mon rapport d'activités, remonte au début des années 1990. L'une des préoccupations qui animent mon activité de recherche, est de renverser la perspective traditionnelle de l'application des mathématiques à la musique. Il s'agit de partir de certains problèmes théoriques posés par la musique susceptibles d'intéresser les mathématiciens et de donner lieu à de nouveaux résultats en mathématiques notamment via un processus de généralisation. Ces résultats ont, à leur tour, des applications tout à fait nouvelles dans le domaine de la musique, en particulier grâce à l'intégration systématique des résultats théoriques obtenus dans des environnements informatiques innovants pour la théorie musicale, l'analyse et la composition. Ce double mouvement, de la musique à la formalisation mathématique et des généralisations mathématiques aux applications musicales via la modélisation informatique, constitue l'essence de ce que j'ai proposé d'appeler une dynamique « mathémusicale » (Andreatta, 1996 ; 2003). La Fig.1 décrit de façon schématique le double mouvement d'une dynamique mathémusicale et le rôle de la modélisation informatique dans l'application des résultats mathématiques au domaine musical.

---

<sup>4</sup> Voir la **section 3.1.3** du rapport d'activités.

<sup>5</sup> Voir les **sections 3.2.2** et **3.2.4** du rapport d'activités.

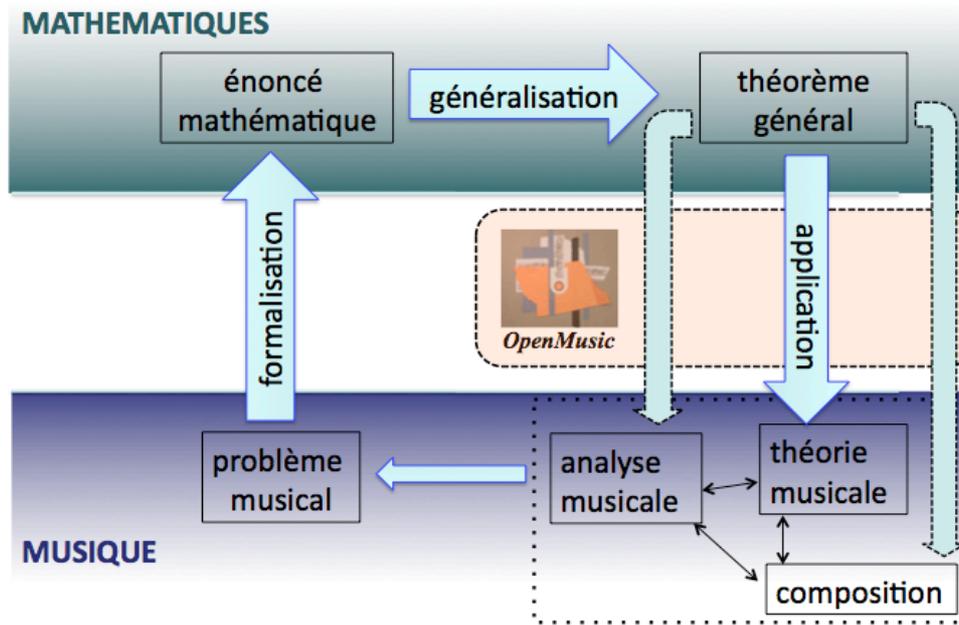


Fig. 1 : Schéma détaillant le double mouvement d'une dynamique mathématique dans le cas d'un problème musical formalisé et ensuite généralisé en vue d'une application au domaine de la théorie musicale, de l'analyse et de la composition assistées par ordinateur. Les applications de tous nos résultats ont été intégrées dans l'environnement *OpenMusic*, un langage de programmation visuelle pour la musique développé par l'équipe Représentations musicales de l'IRCAM et diffusé auprès de plus d'un millier d'utilisateurs (compositeurs, musiciens, chercheurs, enseignants, ...).

**Objectifs à court terme.** L'un des objectifs principaux de mon projet de recherche est celui de poursuivre l'exploration de cette dynamique à la fois d'un point de vue théorique mais aussi en ce qui concerne le rôle de l'informatique dans le processus de modélisation des structures algébriques et catégorielles en musique et leur application dans d'autres disciplines, en particulier dans l'étude de la cognition et de la perception musicales.

D'un point de vue théorique, il s'agit tout d'abord de trouver les outils mathématiques les plus appropriés pour formaliser les différents problèmes posés par la musique dans l'espoir de contribuer ainsi à la solution de quelques conjectures ouvertes en recherche mathématique (conjecture spectrale, problème de la reconstruction de la phase, ...). Pour cela, nous proposons initialement d'élargir les formalisations algébriques réalisées jusqu'à présent à l'aide de la transformée de Fourier discrète (DFT), un outil dont nous avons commencé à mettre en évidence la puissance de généralisation en particulier pour la démarche transformationnelle<sup>6</sup> en analyse musicale (Andreatta et Agon, 2010 ; Mandereau et al. 2011a, 2011b).

Parallèlement à la dimension théorique, nous proposons d'aborder l'étude computationnelle de l'analyse transformationnelle à travers l'utilisation d'un nouveau paradigme pour l'informatique musicale : la programmation spatiale (Bigo 2010 ; Andreatta et al. 2011). Les premières tentatives d'application de la programmation spatiale en informatique musicale, par exemple, montrent la pertinence de ce paradigme de programmation qui permet de résoudre des problèmes classiques en théorie musicale (comme, par exemple, la recherche des séries tous-intervalles, i.e. séries dodécaphoniques dont les douze notes musicales sont séparées par onze intervalles différents) en changeant complètement le point de vue, et cela en définissant de manière constructive l'espace dont les points sont les solutions du problème étudié (Bigo et al. 2010).

L'utilisation de la DFT en théorie musicale ainsi que la modélisation informatique des processus analytiques à travers la programmation spatiale ont des retombées intéressantes pour l'étude de la perception et cognition musicales, comme le montrent deux actions en cours dont la finalisation fait partie des objectifs à court terme de mon programme de recherche.

<sup>6</sup> Pour une présentation succincte des travaux de recherche menés autour de la *Set Theory* et de l'approche transformationnelle en analyse musicale, voir en particulier la **section 3.2.1** du rapport d'activités.

**Objectifs à moyen terme.** Dans un deuxième temps, l'extension du cadre théorique pourra s'appuyer sur une utilisation des structures algébriques faibles (tels les semi-groupes), dont les langages formels représentent une composante informatique ayant déjà montré sa pertinence dans la modélisation algébrique des structures musicales (Chemillier 1987). Plusieurs travaux autour de la combinatoire des mots en musique montrent l'utilité de poursuivre dans cette voie pour obtenir des modèles informatiques des nouveaux problèmes théoriques étudiés. En effet cette démarche a connu récemment un regain d'intérêt dans la communauté des théoriciens de la musique à la fois comme un outil de formalisation de résultats connus dans la tradition diatonique américaine<sup>7</sup> mais également comme une approche nouvelle en théorie mathématique de la musique<sup>8</sup>.

Nous voulons également étudier les relations entre la théorie des langages formels et d'autres paradigmes de programmation pour la musique (à savoir la programmation spatiale, le calcul parallèle, les contraintes concurrentes et le calcul massif, ...). En effet, il est désormais clair qu'une piste privilégiée pour résoudre plusieurs problèmes ouverts est celle du recours à des modèles computationnels capables de limiter l'explosion combinatoire. C'est, par exemple, le cas du lien entre les canons de Vuza, dont le problème d'établir un catalogue exhaustif demeure ouvert précisément à cause de la nature combinatoire du problème, et la conjecture spectrale. Nous savons maintenant<sup>9</sup> qu'un éventuel contre-exemple de la conjecture spectrale en dimension  $n=1$  ne peut qu'appartenir à la classe des factorisations d'un groupe cyclique en deux sous-ensembles non-périodiques, factorisations qui permettent précisément d'obtenir des canons de Vuza. On peut ainsi espérer que le recours à tous ces paradigmes de programmation dont l'application au domaine musical reste embryonnaire ainsi qu'à des architectures innovantes pourra permettre d'aborder de façon nouvelle des problèmes mathémusicaux ouverts ainsi que d'autres problèmes théoriques qui se seront entretemps posés dans notre activité de recherche.

Ces paradigmes de programmation pourront permettre également d'établir des modèles computationnels des multiples formalisations catégorielles qui ont été proposées jusqu'à présent pour la musique. Le formalisme catégoriel sera en effet également un outil essentiel dans le processus de généralisation du cadre théorique, notamment en ce qui concerne la théorie des graphes dirigés à la base de l'approche transformationnelle en musique, dont la théorie des catégories et des topoï permet une présentation à la fois élégante et puissante (Mazzola et Andreatta 2006, 2007). La modélisation catégorielle ouvre également des perspectives nouvelles concernant l'interaction entre la recherche mathémusicale et les sciences cognitives. Parmi les recherches que nous proposons de mener dans le domaine de la perception et cognition musicales, il y a l'étude des aspects computationnels du modèle catégoriel des neurones proposé récemment par A. Ehrensmann et J.-P. Vanbremeersch (2007) et ses applications possibles au domaine de la cognition musicale (Mandereau, 2012).

**Objectifs à long terme.** Dans une perspective plus à long terme, ce programme de recherche vise également à aborder des nouveaux problèmes théoriques posés par la modélisation algébrique et catégorielle, en particulier dans ses rapports avec la logique. Ces problèmes pourraient en effet émerger à la suite des nouveaux modèles algébriques et catégoriels en musique que nous espérons pouvoir proposer à partir d'une application de la géométrie de l'interaction de Jean-Yves Girard en informatique musicale, poursuivant ainsi notre réflexion sur la dimension logique en musique qui était au cœur de notre projet exploratoire « Interaction Maths/ST2I »<sup>10</sup>. Les travaux menés par le collectif LIGC autour du paradigme interactionniste et de la géométrie du cognitif pourront également trouver des applications tout à fait inédites dans le domaine de la cognition et perception musicale.

<sup>7</sup> Voir la **section 3.2.5** du rapport d'activités pour mes contributions personnelles dans ce domaine.

<sup>8</sup> Une séance « hors programme » du séminaire MaMuX de l'Ircam (4 mai 2010) a été consacrée à une présentation des nouvelles perspectives de la théorie des langages formels pour la recherche mathémusicale, avec la participation de Thomas Noll (ESMuC / University of Berlin), David Clampitt (The Ohio State University, USA), Norman Carey (CUNY Graduate Center, USA) et Jean-Paul Allouche (Équipe Combinatoire et optimisation, université de Paris 6). Le programme de la séance est disponible à l'adresse : <http://www.recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/ProgrWordTheorySessionFinal.pdf>

<sup>9</sup> Voir, en particulier, la **section 3.2.2** du rapport d'activités.

<sup>10</sup> Voir **section 7.2** du rapport d'activités.

L'étude théorique et informatique des problèmes mathémusicaux qui font l'objet de ce programme de recherche, ainsi que ses retombées dans le domaine de la cognition et perception musicales soulèvent également des nouvelles questions épistémologiques et philosophiques que je trouve essentiel d'intégrer formellement dans les activités de recherche futures. Je compte ainsi poursuivre une réflexion personnelle qui a accompagné mon travail théorique depuis mon entrée au CNRS en 2004 et qui m'a permis d'aboutir à une proposition originale en philosophie des mathématiques appliquées à la musique, plus précisément en ce qui concerne la réactivation d'une démarche structurale de type phénoménologique en mathématiques/musique (Andreatta, 2010). Une section à part dans le projet de recherche (**section 3.4**) sera consacrée à montrer l'utilité d'intégrer une réflexion d'ordre épistémologique et philosophique aux recherches menées dans le domaine théorique, la modélisation informatique et les applications en cognition et perception musicales.

### 3.1 Objectifs à court terme

#### 3.1.1 Intégration de la DFT dans la formalisation des problèmes théoriques

Parmi les objectifs à court terme, nous proposons de nous focaliser sur quelques problèmes mathémusicaux majeurs sur lesquels nous avons travaillé jusqu'à présent en essayant de les étudier à l'aide de la transformée de Fourier discrète. En effet, la transformée de Fourier discrète commence à s'imposer comme un outil extrêmement élégant, aussi bien en ce qui concerne la construction des pavages en musique (canons rythmiques mosaïques), la théorie de l'homométrie, la généralisation des théories diatoniques à toute division de l'octave en un nombre  $n$  de parties égales. Si l'approche paradigmatique, qui nous a guidé implicitement jusqu'à présent dans l'étude de la classification et l'énumération des structures musicales, est basée structurellement sur l'action d'un groupe (cyclique, diédral, affine, symétrique...) sur un ensemble (interprété comme collection de classes de hauteurs ou de pulsations dans le cas du rythme), l'utilisation de la transformée de Fourier discrète s'inscrit dans une approche radicalement différente, de type non paradigmatique. Ce comportement non-paradigmatique est évident dans le cas de la relation Z, une relation d'équivalence entre les structures musicales ayant le même contenu intervallique (voir **section 3.2.4** du rapport d'activités) qui correspond au cas de l'égalité des modulo des transformées de Fourier associées. Aborder l'étude des structures musicales sous l'angle de la DFT pourrait permettre d'établir des rapports entre des problèmes théoriques en apparence très différents mais qui peuvent avoir des intersections profondes (comme c'est le cas pour les rapports entre pavage et homométrie, dont nous avons mentionné quelques aspects dans la **section 3.2.4** du rapport d'activités). D'autres propriétés restent à étudier, en particulier entre, d'une part, les suites périodiques et le calcul des différences finies et, d'autre part, le pavage.

#### Collaborations envisagées :

Emmanuel Amiot (mathématicien, Professeur CPGE), Thomas Noll (ESMuC, Barcelona), Daniele Ghisi (compositeur), Franck Jedrzejewski (CEA-Saclay), Mihalis Kolountzakis (département de mathématiques, université de Crète), Mate Matolcsi (Rényi Institute, Budapest), Dan Vuza (Institut of Mathematics of the Romanian Academy, Roumanie).

#### 3.1.2 Utilisation de la programmation spatiale pour la modélisation informatique d'analyses transformationnelles

Les recherches sur la programmation spatiale en informatique musicale s'inscrivent dans le prolongement du projet exploratoire « Géométrie de l'Interaction et Musique » (dans le cadre des PEPS « Interactions Maths/ST2I ») que je coordonne à présent. En ce qui concerne la musique, comme nous avons pu le constater à l'occasion des nombreuses séances du Séminaire MaMuX que nous avons organisé en 2009 et en 2010 dans le cadre des activités du projet GdIM, il y a plusieurs

approches théoriques qui, avec la Géométrie de l'interaction, suggèrent la pertinence d'une démarche géométrique en informatique musicale. L'une de ces approches est, en effet, la programmation spatiale<sup>11</sup> dont l'application au domaine de l'analyse transformationnelle est l'un des objectifs à court terme de mon projet de recherche.

Nous avons commencé à étudier de près le paradigme de la programmation spatiale initialement dans le cadre d'un stage de Master 2 que nous avons co-dirigé (avec Jean-Louis Giavitto, Olivier Michel, Antoine Spicher et Carlos Agon). Ce domaine est désormais inclus officiellement dans les axes de recherche de l'équipe Représentations musicales, en collaboration avec Jean-Louis Giavitto (CNRS/IBISC), qui a intégré officiellement notre équipe depuis janvier 2011. Les travaux menés par Giavitto et son groupe de recherche s'appuient sur diverses notions spatiales pour repenser la notion de structure des données et développer de nouvelles approches pour la programmation. Ces travaux mettent en avant le slogan « calculer = se déplacer » au lieu de la vision traditionnelle en logique selon laquelle calculer serait synonyme de démontrer. Ce changement de perspective s'apparente au projet de la géométrie de l'interaction car la programmation spatiale partage avec cette dernière la volonté de repenser le calcul de manière intrinsèque, en portant une attention toute particulière à la dynamique et aux représentations mathématiques géométriques. La programmation spatiale cherche ainsi à expliciter la notion d'espace dans les modèles de programmation soit parce que l'espace est vu comme une ressource, soit parce que l'espace est une donnée ou bien un résultat du calcul. Pour cette raison, ce paradigme semble très approprié au cas de la modélisation informatique de l'analyse transformationnelle dans laquelle il s'agit de trouver de bonnes représentations géométriques pour rendre compte de l'espace musical qui est propre à chaque partition analysée.

D'un point de vue informatique, plusieurs outils mathématiques liés à la théorie des classes de hauteurs et à la théorie transformationnelle ont été progressivement intégrés à *OpenMusic* (Andreatta et Agon, 2003) et sont désormais disponibles dans le package « MathTools ». Cependant, comme nous l'avons pu montrer dans une thèse que nous avons dirigée et qui était consacrée à l'implémentation des approches transformationnelles en vue d'une modélisation analytique d'œuvres musicales (Ahn, 2009), l'analyse pose beaucoup plus de problèmes que la théorie musicale. Nous proposons de nous attaquer à quelques analyses emblématiques de la tradition transformationnelle américaine (Lewin 1993, Andreatta et al. 2008) afin d'étudier la possibilité d'en établir un modèle computationnel à partir précisément du paradigme de la programmation spatiale.

Dans le cas de l'approche transformationnelle en analyse musicale<sup>12</sup>, il s'agira d'étudier la pertinence pour la musique de la notion de « champs de données fondés sur un groupe », ou GBF (*Group Based data Field*), que Giavitto et son équipe ont développée pour la programmation spatiale à partir des années 1995 et en relation avec le calcul parallèle<sup>13</sup>. En ce qui concerne les complexes simpliciaux, il s'agit d'objets topologiques de nature à la fois combinatoire et algébrique qui sont largement présents en informatique (géométrie computationnelle, analyse de données, formalisation des algèbres de processus, ...).

Cependant, si la pertinence de l'utilisation de ces structures algébrico-topologiques a été démontrée pour la formalisation des structures musicales<sup>14</sup>, la question de leur application en informatique musicale reste ouverte. Afin d'être pertinent d'un point de vue musical, ce travail de modélisation nécessite, outre la collaboration avec les informaticiens, une collaboration étroite avec des musicologues et des analystes, aussi bien à l'Ircam qu'ailleurs en France et aux Etats-Unis. En particulier, nous aimerions solliciter les membres de la *Society of Mathematics and Computation in Music*, dont une partie a une expertise des approches analytiques transformationnelles reconnue au niveau international, afin de sélectionner les pièces musicales dont les analyses sont susceptibles d'une modélisation informatique.

<sup>11</sup> <http://www.spatial-computing.org>

<sup>12</sup> Voir le rapport d'activités pour une description de la démarche transformationnelle en analyse musicale et des problèmes théoriques qui restent ouverts.

<sup>13</sup> Voir, en particulier, Giavitto *et al.* (1996).

<sup>14</sup> Voir, en particulier, la construction du Ruban de Moebius en tant que complexe simplicial associé au recouvrement de la gamme diatonique traditionnelle par des accords majeurs et mineurs proposée par Guerino Mazzola dans *Topos of Music* (Mazzola, 2002, ch. 13 « Global compositions »).

### Collaborations envisagées :

Jean-Louis Giavitto (IRCAM/CNRS/UPMC), Olivier Michel (LACL, université Paris 12), Antoine Spicher (LACL, université de Paris 12), divers membres du groupe LIGC (Logique, Interaction, Géométrie de la Cognition), Jean-Marc Chouvel (université de Reims), Richard Cohn (Yale University), Equipe « Analyse des pratiques musicales » de l'Ircam (resp. Nicolas Donin), Xavier Hascher (université de Strasbourg), John Rahn (université de Washington à Seattle), Dmitri Tymoczko (Princeton University), Robert Peck (Louisiana State University).

### 3.1.3 Aspects perceptifs des modèles algébriques en informatique musicale

En particulier, en ce qui concerne les retombées cognitives et perceptives du rapport mathématiques/musique, nous allons reprendre les objectifs du projet « Mathématiques/Musique & Cognition<sup>15</sup> » qui est désormais intégré formellement au sein des activités de recherche de l'UMR Sciences et Technologies de la Musique et du Son. La Fig. 2 décrit les rapports possibles entre « Théorie mathématique de la musique » et « Musicologie Cognitive » au sein d'une articulation plus générale concernant les mathématiques, l'informatique, la musique et la cognition.

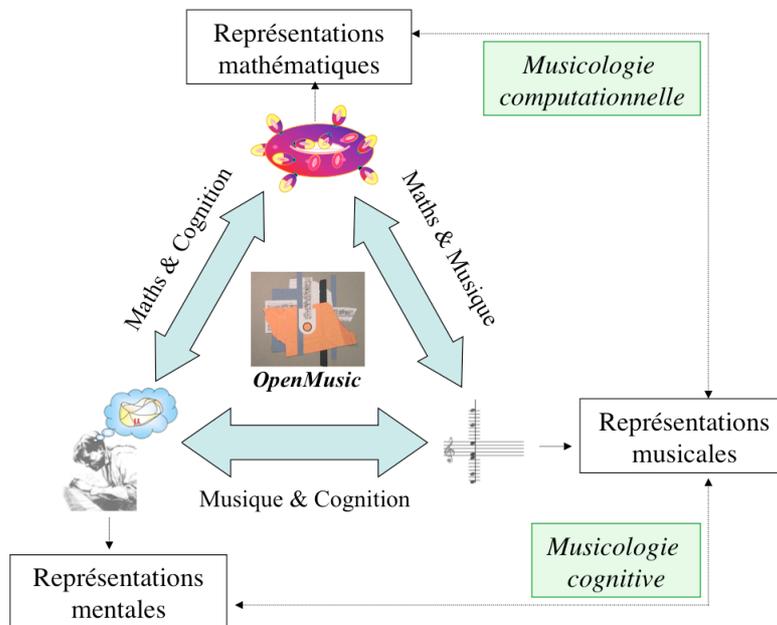


Fig. 2 : Schéma détaillant les rapports possibles entre « Théorie mathématique de la musique » et « Musicologie Cognitive » au sein d'une articulation plus générale concernant les mathématiques, la musique et la cognition.

Comme nous l'avons observé dans notre rapport final du projet « Mathématiques/Musique & Cognition », force est de constater que la communauté des « musicologues computationnels » et celle des « musicologues cognitifs » n'ont jamais véritablement essayé de réfléchir aux enjeux communs de leur activité de recherche. Nous avons pour objectif principal à court terme de mener à bien deux projets en cours qui pourraient créer des conditions favorables pour ouvrir un véritable dialogue multidisciplinaire entre ces deux orientations majeures de la musicologie systématique d'aujourd'hui. Notre objectif est de réaliser des tests perceptifs en vue d'une étude de la pertinence de la transformée de Fourier discrète pour la perception des structures musicales et des théories transformationnelles pour la perception de la forme d'une pièce musicale. Je vais décrire brièvement ces deux projets.

<sup>15</sup> Projet que j'ai coordonné pendant la période 2007-2009 financé par l'AFIM (Association Française d'Informatique Musicale). Voir la section 7.1 du rapport d'activités.

### 3.1.3.1 Transformée de Fourier discrète et perception musicale

L'utilisation de la DFT dans la formalisation des structures musicales ouvre également des questions intéressantes pour la cognition musicale, en particulier dans le cas de la perception du caractère plus ou moins régulier de certains accords ou de certains patterns rythmiques. Perçoit-on les différents coefficients de Fourier quand on écoute une structure musicale ? Cette question fait l'objet actuellement d'un travail théorique accompagné d'un protocole expérimental pour l'évaluation de la pertinence perceptive de la DFT dans l'étude à la fois des hauteurs et du rythme. Nous avons avancé l'hypothèse que la transformée de Fourier discrète, outre un outil privilégié dans le domaine de l'analyse et synthèse du son, peut également être utilisée pour caractériser de façon perceptive certaines propriétés des structures musicales dans le domaine symbolique. A partir du catalogue des 80 hexacordes à une transposition près et leur équivalent dans le domaine du rythme, on analyse pour chaque structure musicale le degré de platitude de ses coefficients de Fourier. La Fig. 3 montre une sélection de quatre représentations circulaire associées à des accords et à des patterns rythmiques parmi les 80 possibilités du catalogue des orbites (à une transposition près). Une analyse des valeurs des coefficients de Fourier pour chaque structure montre que les structures (a), (b) et (c) ont un comportement similaire en ce qui concerne la distribution des coefficients de Fourier (représentés dans la série des BPF en dernière colonne), à la différence de la structure (d) pour lequel les coefficients de Fourier se distribuent de façon différente, avec un point de maximum global correspondant à la valeur 6. Cette distribution des coefficients de Fourier est-elle pertinente d'un point de vue de la perception musicale ? Cette perception est-elle similaire pour les hauteurs et les rythmes ? Il s'agit pour le moment d'une hypothèse théorique qui ne pourra être validée qu'à travers la mise en place d'une série de tests d'écoute associés à de tâches de catégorisation, selon les protocoles traditionnels en psychologie expérimentale.

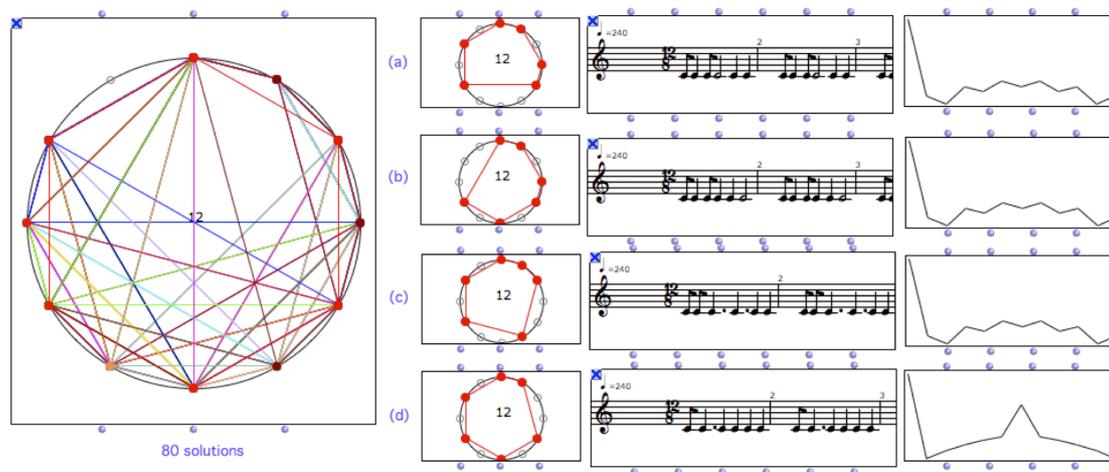


Fig. 3 : Matériau de base pour un test de psychologie expérimentale essayant de dégager la pertinence perceptive de l'utilisation de la DFT dans une tâche de catégorisation des structures musicales.

#### Collaborations en cours :

Isabelle Viaud-Delmon (CNRS, équipe Espaces acoustiques et cognitifs de l'Ircam), Emmanuel Amiot (mathématicien, Professeur CPGE), Carlos Agon (équipe Représentations musicales de l'Ircam), Karim Haddad (compositeur), Pierre Beauguitte (doctorant, école des Mines).

### 3.1.3.2. Retombées perceptives de l'analyse transformationnelle

Ce projet se propose d'aborder les retombées cognitives et perceptives du paradigme transformationnel en analyse musicale en ce concentrant sur l'analyse proposée par le théoricien américain David Lewin du *Klavierstück III* de Karlheinz Stockhausen (Lewin 1993). L'application du paradigme de la programmation spatiale dans l'étude des aspects perceptifs de la démarche transformationnelle semble pouvoir apporter une nouvelle perspective. En effet, si le paradigme « set-

théorique » classique en analyse musicale repose finalement sur l'idée d'un catalogage de l'espace combinatoire des structures de hauteurs (ou rythmiques) présentes dans une partition analysée<sup>16</sup>, l'analyse transformationnelle implique un double mouvement. D'un côté on vise la « construction » d'une configuration abstraite d'objets musicaux (appelée « réseau transformationnel ») mais également, d'un autre côté, l'« utilisation » de cette architecture formelle permettant de dégager des critères de pertinence pour la réception de l'œuvre et pour son interprétation. Autrement dit, l'intérêt de *construire* un réseau réside dans la possibilité de l'*utiliser*, à la fois pour « structurer » l'écoute par rapport à la singularité de l'œuvre analysée mais également pour établir des critères formels qui pourront servir pour aborder le problème de son interprétation. La construction d'un réseau transformationnel s'appuie, en effet, sur une volonté implicite de l'analyste de rendre « intelligible » une logique musicale à l'œuvre dans la pièce analysée (cf. Fig. 4).

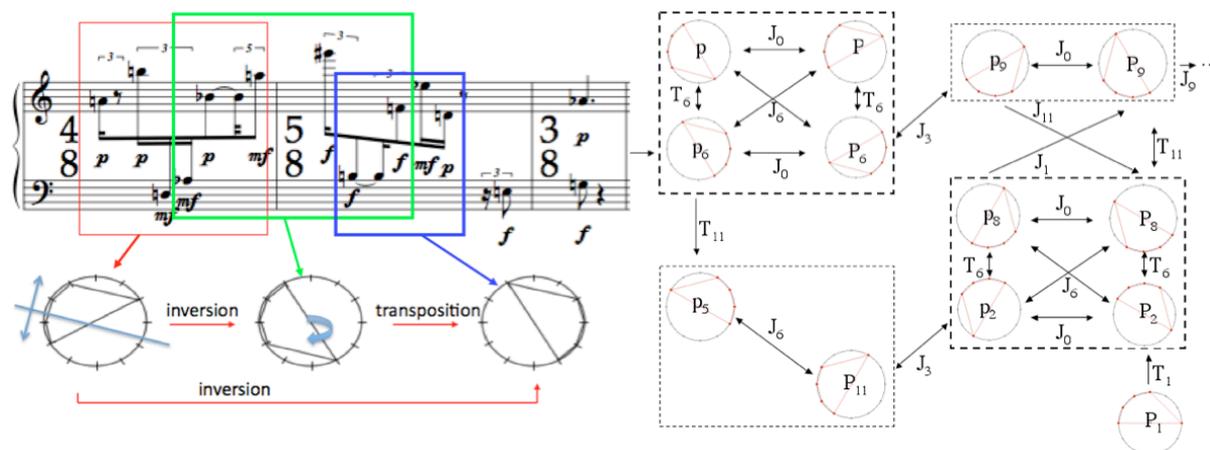


Fig. 4 : Exemple de modélisation informatique et construction d'un réseau transformationnel pour le *Klavierstück III* de Karlheinz Stockhausen (en suivant l'analyse de David Lewin).

Cette logique musicale est d'ordre géométrique, l'analyse visant la création d'un espace dans lequel une pièce peut être décrite et appréhendée par l'auditeur. D'où l'intérêt d'envisager la modélisation informatique à partir de la programmation spatiale. Cette démarche de modélisation possède à notre avis des implications théoriques tout à fait nouvelles pour les sciences cognitives, comme le suggère un rapprochement direct entre la théorie transformationnelle en analyse musicale et des nouveaux courants de la psychologie du développement, en particulier le néostructuralisme de Halford et Wilson<sup>17</sup> et ceux qu'Olivier Houdé appelle les « derniers ajustements piagétiens<sup>18</sup> » dans une approche catégorielle de l'épistémologie génétique. L'exploration des aspects computationnels d'un modèle cognitifs basé sur la théorie des catégories ainsi que ses applications au domaine de la perception musicale, font partie des objectifs à moyen terme (cf. **section 3.2.3**).

### Collaborations en cours :

Stephen McAdams (Canada Research Chair in Music Perception and Cognition, Department of Music Theory Schulich School of Music, Université de McGill, Canada), Jon Wild (théoricien de la musique et compositeur, Université de McGill, Canada), Christoph Neidhofer (musicologue et pianiste, Université de McGill, Canada).

<sup>16</sup> Et donc, *in fine*, à l'idée de *symétrie* et au concept d'*invariance*. Symétrie et invariance sont intimement liées à la structure mathématique de groupe, si bien qu'étudier la perceptibilité de la notion de *symétrie* et d'*invariance* en musique revient à étudier les effets cognitifs de l'*action* d'un groupe de transformation sur une structure musicale donnée.

<sup>17</sup> Halford et Wilson (1980).

<sup>18</sup> Houdé et Miéville (1993). Voir aussi Acotto et Andreatta (2011).

## 3.2 Objectifs à moyen terme

### 3.2.1 Des structures algébriques fortes aux langages formels

Depuis une dizaine d'années, on assiste à un renouveau des formalismes liés aux langages formels au sein de la communauté des chercheurs travaillant sur les relations entre mathématique, informatique et musique. L'enjeu principal consiste dans le fait de généraliser l'approche basée sur la théorie des groupes à l'aide de structures algébriques plus générales, les semi-groupes. Cela pourrait permettre d'intégrer de problèmes « mathémusicaux » existants et de nouvelles conjectures mathématiques posées par la musique à l'intérieur de la théorie des langages formels, en établissant ainsi des théorèmes de structure ayant une validité plus générale. La théorie des mots (*word theory*) a déjà fait l'objet d'une journée d'étude que nous avons organisée à l'Ircam dans le cadre du séminaire MaMuX, et qui a donné de nouvelles pistes de recherches dans l'application des grammaires formelles à la formalisation des structures musicales<sup>19</sup>. En effet, après une première utilisation des grammaires formelles dans l'informatique musicale dans les années quatre-vingt<sup>20</sup>, cette démarche a connu récemment un regain d'intérêt dans la communauté des théoriciens de la musique à la fois comme un outil de formalisation de résultats connus dans la tradition diatonique américaine mais également comme une approche nouvelle en théorie mathématique de la musique<sup>21</sup>.

L'une des approches nouvelles qui pourra constituer un bon cas d'étude pour comprendre la portée de la théorie des mots en musique est celui de l'*inconstance* (Allouche et Maillard-Teyssier, 2011), qui offre une mesure de la complexité d'une suite (finie ou infinie). Bien que les origines du concept d'inconstance remontent à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (Cauchy, 1841 ; Crofton, 1868), cette n'approche n'a jamais été appliquée jusqu'à présent à des structures musicales. Les applications musicales que nous envisageons, dont quelques aspects font actuellement l'objet d'un papier en préparation, suggèrent la pertinence de cette approche dans l'étude de la complexité en musique en tant qu'outil pour l'analyse du style musical, sujet qui a accompagné historiquement l'application du paradigme de la théorie de l'information en musique (Andreatta, 1997a).

D'un point de vue théorique, la généralisation algébrique de certains problèmes musicaux dans un cadre formalisable à l'aide des structures « faibles », telles les semi-groupes, pourrait jouer un rôle majeur dans l'individuation de nouveaux problèmes « mathémusicaux », comme nous allons le décrire dans la section suivante. Il est difficile de prévoir quels problèmes théoriques nouveaux pourront émerger et qui soient susceptibles de s'inscrire dans la dynamique « mathémusicale » que nous avons décrite au début de ce projet de recherche. Cependant, comme l'expérience nous l'a montré, le dialogue étroit entre scientifiques et musiciens qu'une structure comme l'Ircam rend possible, est source constante de nouveaux problèmes théoriques, dont une partie peut constituer un point de départ pour des formalisations et des généralisations intéressantes d'un point de vue mathématique. Le programme de composition de l'Ircam (Cursus) ainsi que le nouveau programme « Résidences de recherche musicale », ouverts aux artistes internationaux qui souhaitent conduire un projet de recherche musicale d'une durée de trois ou six mois en bénéficiant d'un accès privilégié aux travaux de recherche menés à l'Ircam, pourront sans doute représenter des catalyseurs importants dans ce processus d'émergence de nouveaux problèmes « mathémusicaux ».

#### Collaborations envisagées :

Jean-Paul Allouche (équipe Combinatoire et optimisation, université Paris 6), Thomas Noll (ESMuC, Barcelona), Marc Chemillier (CAMS-EHESS), David Clampitt (The Ohio State University, USA), Norman Carey (CUNY Graduate Center, USA), Compositeurs du Cursus d'informatique de l'Ircam et du programme « Résidences de recherche musicale ».

<sup>19</sup> Avec la participation de Jean-Paul Allouche (équipe Combinatoire et optimisation, université Paris 6), Thomas Noll (ESMuC, Barcelona), David Clampitt (The Ohio State University, USA), Norman Carey (CUNY Graduate Center, USA). Le programme de la séance est disponible à l'adresse :

<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/ProgrWordTheorySession.html>

<sup>20</sup> Chemillier (1987)

<sup>21</sup> Noll (2008).

### 3.2.2 Programmation spatiale, contraintes concurrentes, calcul parallèle et massif

Parmi les objectifs à moyen terme, nous aimerions étudier plus en détail les rapports entre programmation spatiale et autres paradigmes de programmation, en particulier le calcul concurrent et la programmation par contraintes. En ce qui concerne le lien entre les constructions topologiques à la base de la programmation spatiale et le calcul concurrent, une piste qui mérite à notre avis d'être explorée et celle du lien avec les espaces de Chu, des constructions ayant non seulement de multiples applications informatiques mais aussi en logique, ces espaces étant, par exemple, un modèle de la logique linéaire de J.-Y. Girard (Pratt, 2010). D'un point de vue mathématique, un espace de Chu n'est qu'une simple matrice de transformations, ses lignes ayant la propriété de transformer « en avant » [*forwards*] et ses colonnes celle de transformer « en arrière » [*backwards*]. Il s'agit d'un concept très profond car il joue un rôle d'unificateur par rapport à plusieurs structures mathématiques, telles les structures de relations (ensembles, graphes dirigés, ensembles partiellement ordonnés, ...), les structures algébriques (groupes, anneaux, modules, espaces vectoriels, ...) et les structures topologiques (espaces topologiques, groupes abéliens localement compact, ...)<sup>22</sup>. Un des domaines dans lequel nous avons déjà pu observer la pertinence du concept d'espace de Chu en informatique musicale est celui de la programmation par contraintes (Rueda, 2008). Il s'agit d'un aspect de l'informatique musicale qui touche à plusieurs projets dans lesquels je suis impliqué, tels le projet REACT financé par le Colciencias (l'équivalent du CNRS en Colombie), en collaboration avec le LIX (école polytechnique), et le projet INEDIT (INteractivité dans l'écriture De l'Interaction et du Temps), dans le cadre de l'appel ANR CONTINT. Dans le cadre de dernier projet en particulier, porté par l'équipe Représentations musicales de l'Ircam, en collaboration avec le LaBRI de Bordeaux et le GRAME de Lyon, il s'agira également d'étudier la pertinence du formalisme algébrique et catégoriel par rapport aux recherches menées par la nouvelle EPC CNRS/INRIA « MuSync » (Synchronous and Realtime Programming and Processing of Music Signals), en cours de constitution, autour de l'écriture de l'interaction et de l'articulation signal/symbole (intégrant l'articulation calculs synchrones, relevant de la synthèse, et calculs asynchrones, relevant de l'organisation temporelle des structures de haut niveau).

Par ailleurs, les problèmes combinatoires que nous traitons actuellement commencent à arriver au bout de ce que l'on peut traiter de manière raisonnable sur une machine séquentielle. Les outils que nous envisageons à la section précédente (**section 3.1**) nécessitent de passer sur des machines parallèles tant pour traiter la masse de données que pour l'exploration de la combinatoire. Une piste privilégiée pourrait être l'intensification des relations institutionnelles entre notre UMR STMS et le Laboratoire d'Informatique Franco-Japonais (JFLI), codirigé par Philippe Codognet (CNRS/UPMC/Université de Tokyo), avec qui nous avons déjà des collaborations dans le domaine des architectures hybrides combinant programmation par contraintes et recherche locale<sup>23</sup>.

#### Collaborations envisagées :

Vaughan Pratt (Stanford University), Camilo Rueda (Professeur et directeur du Department of Science and Engineering of Computing l'université Pontifical Javeriana de Cali de l'université Pontifical Javeriana de Cali, Colombie), Myriam Desainte-Catherine (LABRI, université de Bordeaux), David Janin (LaBRI, IPB, Université de Bordeaux), Frank Valencia (LIX, école polytechnique), Jean-Louis Giavitto (CNRS, équipe MuSync, IRCAM), Arshia Cont (équipe MuSync, IRCAM/CNRS/INRIA), Philippe Codognet (Laboratoire d'Informatique Franco-Japonais, CNRS / UPMC / Université de Tokyo).

<sup>22</sup> Pour une discussion détaillée sur le lien entre espaces de Chu et complexes simpliciaux, voir Gratus et Porter (2006). Une séance du Séminaire MaMuX a été consacrée aux espaces de Chu et à leurs applications possibles en informatique musicale. Voir à l'adresse :

<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/ProgrAvril2010.pdf>

<sup>23</sup> Pour un état de l'art sur la programmation par contraintes en informatique musicale, voir Truchet et Assayag (2011).

### 3.2.3 Systèmes évolutifs à mémoire (MENS) et perception/cognition musicales

Cette partie du projet de recherche constitue une étape ultérieure dans le processus de création des conditions favorables pour l'établissement d'un dialogue multidisciplinaire entre la communauté des « musicologues computationnels » et celle des « musicologues cognitifs ». Dans son analyse consacrée aux liens entre mathématiques et neurosciences<sup>24</sup>, Alain Berthoz propose une vision des mathématiques qui s'applique tout à fait à la problématique que nous souhaiterions développer. S'il est indéniable que les mathématiques ont souvent été les protagonistes des tournants scientifiques en contribuant en même temps à des changements de paradigmes dans la connaissance (de l'invention du calcul infinitésimal à la géométrisation de la physique<sup>25</sup>), nous pouvons dire que « dans les rapports des mathématiques aux sciences du vivant et de la cognition, nous sommes face à la possibilité d'un tournant comparable. Les neurosciences en sont au centre. Les enjeux sont si importants et originaux qu'il faut s'attendre à des changements de paradigme de grande envergure » (Berthoz 2005, p. 178). On peut donc renverser la perspective traditionnelle, bien résumée par le mot du physicien Eugène Wigner quand il souligne « la déraisonnable efficacité des mathématiques » et partir des sciences cognitives, et en particulier des neurosciences intégratives, pour voir quels types de problèmes nouveaux se posent aux mathématiques, notamment via la musique. En effet, si d'un côté les mathématiques ont trouvé de plus en plus d'applications dans les neurosciences intégratives et cognitives dans les dernières décennies, pour reprendre l'analyse de Berthoz, « les progrès dans ces disciplines sont en train d'enrichir les conceptions classiques de l'origine, des fondements et de la nature des mathématiques et de susciter des avancées nouvelles en mathématiques » (*ibid.*, p. 177).

Bien que nous soyons encore loin de pouvoir imaginer un tel renversement de perspective à partir des problèmes posés par la cognition et perception musicale, nous avons déjà pu constater dans quelle mesure les mathématiques constituent un cadre privilégié pour l'étude de certaines fonctions cérébrales intégrées. Pour cela, après avoir consacré une journée d'étude à l'Ircam à la présentation du modèle mathématique MENS (*Memory Evolutive Neural Systems*) pour les systèmes cognitifs (17 janvier 2009), nous avons décidé de consacrer plusieurs séances de la onzième saison du séminaire MaMuX à une présentation détaillée, par les auteurs, du modèle plus général conçu par Andrée C. Ehresmann et Jean-Paul Vanbreemsch, à savoir le modèle SEM (Systèmes Evolutifs à Mémoire). Ce modèle théorique, ainsi que le modèle MENS, montre clairement la pertinence de la théorie des catégories pour l'étude des systèmes dynamiques. C'est un point qui mérite d'être souligné, car il est reproché souvent à cette théorie de négliger l'aspect temporel en privilégiant la notion de structure sur l'idée de processus<sup>26</sup>. La question sous-jacente aux deux modèles catégoriels est celle de l'émergence des processus d'ordre supérieur du fonctionnement du cerveau, ce qui découle de la modélisation des objets mentaux par des cat-neurones (neurones de catégorie), liant une multiplicité d'hyper-assemblées de neurones. Grâce à la modélisation catégorielle, il est possible de donner une formalisation du concept d'émergence, étroitement liée au processus de « complexification » par liage et classification (via colimites et limites projectives). Les auteurs montrent ainsi comment des objets de complexité croissante peuvent émerger par une suite de complexifications, dès lors qu'un certain « principe de multiplicité » (ou *degeneracy* dans le sens de G. E. Edelman) est vérifié. Cela conduit à une « algèbre des objets mentaux » (au sens de Changeux), ce qui mène à la formation d'un invariant global, le

<sup>24</sup> A. Berthoz (2005). Avec la complicité de Daniel Andler, Daniel Bennequin, Jacques Droulez, Olivier Faugeras, Giuseppe Longo, Stéphane Mallat et Jean Petitot.

<sup>25</sup> Et, on ajoutera, également de la logique et de l'informatique, un sujet qui a eu une forte expansion dans les dernières années et dont les retombées dans le domaine de la cognition constituent un terrain très riche pour la recherche interdisciplinaire, comme nous l'avons montré dans la section précédente.

<sup>26</sup> Notons également que cette orientation « dynamique » propre à l'approche catégorielle a ouvert une nouvelle perspective dans la théorie mathématique de la musique de Guerino Mazzola. Si *Topos of Music* (Mazzola, 2002) est la *summa* de ce qu'on peut théoriser des aspects « hors temps » de la musique, pour reprendre la terminologie de Iannis Xenakis, d'autres constructions mathématiques se sont avérées nécessaires pour rendre compte du caractère continu de la notion de « geste » en musique. Comme dans le cas des systèmes évolutifs à mémoire, la théorie mathématique des gestes s'appuie sur une paramétrisation temporelle des structures catégorielles, ce qui pourrait avoir à son tour des retombées intéressantes en sciences cognitives.

noyau archétypal, confirmé par la découverte récente, dans le cerveau, du *neural connection core*<sup>27</sup>. Ce noyau archétypal intègre les expériences saillantes et/ou régulièrement ré-enforcées, à la fois sensibles, motrices, émotionnelles, procédurales et sémantiques.

Toutes ces questions nous semblent pouvoir ouvrir des perspectives nouvelles dans l'étude de la cognition et perception musicales. Nous envisageons dans la suite des activités de ce groupe de travail la mise en place d'un protocole de recherche étudiant les processus cognitifs ainsi que les corrélats neuronaux des deux modèles SEM et MENS appliqué à la musique. Ceci touche à la fois à la notion de représentation géométrique et catégorielle des structures musicales et aussi au concept même d'espace musical dont nous proposons d'étudier les rapports avec les neurosciences en nous appuyant sur les recherches les plus récentes autour de la réalité virtuelle<sup>28</sup>. D'autre part, la géométrisation de l'informatique musicale, dans sa dimension liée à la théorie des signaux, constitue un axe de recherche très actif à l'Ircam, en particulier autour de la géométrie de l'information<sup>29</sup>. Basée sur la notion des descripteurs perceptifs du son, la géométrie de l'information appliquée à la musique est une véritable géométrie de la perception musicale, visant à définir des espaces abstraits où les structures musicales sont mises en relation à travers des critères de similarité perceptive. Comme nous l'avons déjà souligné (cf. **section 3.2.2**. Programmation spatiale, contraintes concurrentes, calcul parallèle et massif), un travail de formalisation algébrique et catégorielle pourrait permettre de mieux étudier la composante « symbolique » de ces espaces de descripteurs de signaux musicaux, en contribuant ainsi à une meilleure définition de la dualité signe/signal.

D'autres questions ouvertes, que nous nous proposons d'aborder dans les travaux futurs, concernent la pertinence des algèbres de dimension supérieure comme outils descriptifs et opérationnels, tout d'abord en neurosciences<sup>30</sup> et ensuite dans le domaine de la cognition et perception musicales. On pourra également étudier la pertinence du transfert vers la musique d'une théorie générale du sens qui a été développée par René Guitart<sup>31</sup> à la suite des travaux d'Ehresmann et Vanbremeersch sur les systèmes évolutifs à mémoire. Ceci permettrait, plus à long terme, d'arriver à constituer un cadre conceptuel pour l'étude des relations entre mathématique/musique et cognition dans lequel on pourra aborder des notions qui ont été traditionnellement associées à une démarche sémiotique, telle la notion du « sens » en musique, mais cette fois de façon indépendante de toute considération sur le langage et son rapport avec la musique.

### Collaborations envisagées :

Andrée C. Ehresmann (professeur émérite à l'Université de Picardie-Jules Verne), René Guitart (Institut de Mathématiques de Jussieu, Université Paris 7 Denis Diderot), John Mandereau (université de Pise / UPMC), Emmanuel Amiot (mathématicien), Isabelle Viaud-Delmon (CNRS, équipe Espaces Acoustiques et cognitifs, Ircam), Arshia Cont (équipe MuSync, IRCAM/CNRS/INRIA), Frédéric Barbaresco (Thales), Frank Nielsen (école Polytechnique/LIX, Sony CSL).

## 3.3 Objectifs à long terme

### 3.3.1 Logique mathématique vs logique musicale

Cette recherche s'inscrit dans le prolongement des activités menées au sein du projet exploratoire « Géométrie de l'Interaction et Musique (GdIM) », dont la programmation spatiale, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, constitue l'une des possibles débouchés. L'utilisation de la programmation spatiale en informatique musicale ne résout cependant pas les questions d'ordre

<sup>27</sup> Voir Hagmann et al. (2008). Online : [www.plosbiology.org](http://www.plosbiology.org)

<sup>28</sup> Viaud-Delmon (2006).

<sup>29</sup> Ces recherches sont menées à l'IRCAM par Arshia Cont qui anime également le Séminaire Léon Brillouin en collaboration avec Frédéric Barbaresco (Thales) et Frank Nielsen (école Polytechnique/LIX, Sony CSL). Pour plus de renseignements, voir à l'adresse :

<http://www.informationgeometry.org/Seminar/seminarBrillouin.html>

<sup>30</sup> Brown et Porter (2008).

<sup>31</sup> Voir, en particulier, les deux interventions de René Guitart aux séminaires *mamuphi* de l'école normale supérieure (Guitart 2009 ; 2012).

logique que nous avons posées dans notre projet exploratoire. Le projet GdIM est né en effet du constat qu'une dizaine d'années après le Forum Diderot 1999 « Mathématiques et Musique<sup>32</sup> », un événement qui a donné une impulsion majeure au domaine des relations entre musique et mathématique, les questions autour desquelles les organisateurs de la partie parisienne avaient centré le débat restent d'actualité, à savoir :

- Quel est le rapport entre les logiques mathématiques et les logiques musicales ?
- Les formalismes bâtis sur le « raisonnement » musical ont-ils quelque chose à voir avec tel ou tel formalisme de la logique ?
- La logique mathématisée peut-elle aider les musiciens à clarifier la spécificité de leur mode de raisonnement ?

Grâce au projet « Géométrie de l'interaction et musique » (GdIM) nous avons pu reprendre ces questions en explorant une nouvelle hypothèse en ce qui concerne la relation entre logique et musique, à savoir celle d'un lien étroit entre constructions mathématiques, dimension logique et calcul informatique. Parmi les objectifs à long terme il s'agira de comprendre si le « tournant géométrique », proposé par la logique de l'interaction de Jean-Yves Girard, offre une nouvelle clé d'accès à la dimension proprement logique de l'activité musicale. Quelques réflexions des compositeurs engagés dans l'« intellectualité musicale » semblent suggérer la pertinence du paradigme interactionniste pour une analyse de la dimension logique de l'acte compositionnel. L'aspect procédural de la géométrie de l'interaction, une fois transféré dans le domaine musical, pourrait ainsi amener à concevoir le *sens* en musique comme une dynamique (Guitart, 2009), à la différence des approches traditionnelles dans lesquelles la dimension sémantique de la musique serait indissociable du paradigme langagier sous-jacent, ce qui donne lieu à des discussions souvent stériles sur le rapport entre musique et langage. On serait ainsi face à un véritable « tournant géométrique » dans la logique musicale (Nicolas, 2009), dont il s'agira d'en mieux saisir la spécificité, notamment avec ses applications informatiques et ses retombées nouvelles dans le domaine de la cognition et perception musicales.

#### **Collaborations envisagées :**

Jean-Yves Girard (CNRS, Institut de mathématiques de Luminy), René Guitart (Institut de Mathématiques de Jussieu / Université Paris 7 Denis Diderot), François Nicolas (compositeur, Ircam).

### **3.3.2 Quelle logique pour l'informatique musicale ?**

L'objectif le plus ambitieux concernant l'intégration d'outils logiques issus de la géométrie de l'interaction en musique est finalement celui de contribuer ainsi à l'émergence de nouveaux paradigmes de programmation pour la musique, une recherche qui est au cœur des préoccupations de notre UMR STMS (Assayag et Gerzso, 2009). Deux colloques récents auxquels nous avons assisté<sup>33</sup> nous ont convaincu de l'intérêt à poursuivre notre réflexion sur le rapport entre le paradigme interactionniste et l'informatique musicale.

Une première piste que nous envisageons concerne l'application des réseaux d'interaction d'Yves Lafont à l'informatique musicale, une démarche qui semble possible sur la base de ce que l'auteur nous avait présenté lors de la séance de lancement du groupe de travail « Géométrie de l'Interaction et Musique » (Lafont (2009)). Ces réseaux sont en effet à la fois un modèle de calcul mais aussi un paradigme de programmation qui s'inspire de la logique linéaire de Jean-Yves Girard (Lippi, 2002).

Une autre piste possible de recherche, qui reste pour le moment assez conjecturale, est celle qui explore le mariage entre la mécanique quantique et les algèbres d'opérateurs proposé par la géométrie de l'interaction<sup>34</sup>, une démarche qui commence à soulever des questions qui touchent directement à la recherche mathémusicale (Paul, 2012). En effet, à travers des travaux sur la mécanique quantique, la géométrie de l'interaction et la formalisation de la concurrence, on a vu émerger une approche qui met

<sup>32</sup> Assayag *et al.* (2002).

<sup>33</sup> « Logique, catégories, sémantiques » (Labri, Bordeaux, 12-13 novembre 2010) et la dernière rencontre du groupe LIGC intitulée « La question des fondements à l'ère post-fondationnelle » (IHP, 18-20 novembre 2010)

<sup>34</sup> Voir, en particulier, le deuxième chapitre du manuscrit d'Yves André, rédigé dans le cadre de l'« Ecole de mathématique pour musiciens et autres non-mathématiciens » de l'Ircam (André 2006-2009).

l'accent sur l'interaction objet/opération en remplaçant la vision idéaliste (voir « essentialiste », dans la terminologie de Jean-Yves Girard) d'un objet indépendant du sujet par une vision « existentialiste ». Dans le paradigme interactionnel, « le progrès de la pensée logique s'identifie à une libération progressive de la gangue essentialiste » (Girard, 2010), ce qui accompagne la genèse de l'interprétation catégorielle, dont nous avons montré l'intérêt en musique dans le cas de la démarche transformationnelle (Mazzola et Andreatta, 2007). La sémantique d'un objet est ainsi étroitement liée à l'interaction que celle-ci a avec le sujet, ce qui pourra avoir également un impact sur les outils informatiques pour la musique. Nous envisageons déjà quelques pistes pour établir des relations entre le paradigme interactionniste en logique et les recherches menées par l'UMR STMS autour des environnements informatiques pour l'improvisation assistée par ordinateur, pour lesquels une autre approche géométrique, basée cette fois sur la théorie de l'information, a déjà montré sa pertinence et sa puissance de formalisation (Cont *et al.*, 2011).

#### **Collaborations envisagées :**

Yves Lafont (Faculté des Sciences de Luminy & Institut de Mathématiques de Luminy), Thierry Paul (Centre de mathématiques Laurent Schwartz, Ecole polytechnique), Arshia Cont (équipe Représentations musicales, IRCAM/CNRS), Shlomo Dubnov (Professeur en informatique musicale, Département de musique, Université de Californie, San Diego).

### **3.3.3 Logique de l'interaction, géométrie de la cognition et perception musicale**

Parallèlement à l'étude théorique et informatique des rapports entre la géométrie de l'interaction de Jean-Yves Girard et la musique, nous proposons d'inclure parmi les objectifs à long terme l'application de ce cadre conceptuel au domaine de la cognition et perception musicales. Cette entreprise demande une collaboration étroite entre l'équipe Représentations Musicales de l'Ircam et d'autres chercheurs, en particulier autour du groupe de travail LIGC rassemblant le projet interactionniste en logique et celui d'une géométrie du cognitif. En ce qui concerne le projet interactionniste en logique, les objets logiques (les preuves et les opérations permettant leurs constructions) sont regardés à travers leurs interactions, de manière purement interne, sans faire de référence à un modèle. Les interactions sont formalisées à travers des algèbres de Von Neumann, une notion à la fois algébrique et géométrique. Les questions cognitives qui s'ouvrent à partir du paradigme interactionniste ont de multiples intersections avec les travaux menés depuis 1999 par Giuseppe Longo, Jean Petitot et Bernard Teissier sur la géométrie et la cognition<sup>35</sup>, une démarche dont les conséquences pour l'étude de la cognition et perception musicales restent une question ouverte.

#### **Collaborations envisagées :**

Giuseppe Longo (CNRS / Département d'Informatique, ENS), Bernard Teissier (Equipe Géométrie et Dynamique / Institut Mathématique de Jussieu), Jean Petitot (CAMS / EHESS), Pierre Livet (Université de Provence).

## **3.4 Coda : aspects philosophiques de la recherche mathémusicale**

Bien que secondaire par rapport aux deux interactions entre la recherche « mathémusicale » et les autres disciplines (informatique et sciences cognitives), nous aimerions poursuivre la réflexion philosophique sur le rapport mathématiques/musique que nous menons principalement dans le cadre des activités du séminaire *mamuphi*, dont nous allons assurer la codirection dans les années qui viennent. En particulier, la réflexion épistémologique sur la démarche algébrique et catégorielle en informatique musicale nous semble riche de ramifications philosophiques nouvelles. Cette approche s'inscrit tout naturellement dans la réflexion sur l'articulation entre l'*objectal* et l'*opérateur*, que

<sup>35</sup> Voir, en particulier, le numéro monographique de la *Revue de Synthèse* intitulé « Géométrie et Cognition », Tome 124 (Longo et al 2003).

l'épistémologue français Gilles-Gaston Granger avait indiqué à partir de la fin des années 1940 comme le fondement de la notion de « concept » en philosophie<sup>36</sup>.

**Approches transformationnelles.** Un candidat idéal pour une telle réflexion est la démarche transformationnelle en analyse et composition assistée par ordinateur. Nous avons déjà proposé une lecture des diagrammes utilisés par les théoriciens de la musique dans leur approche transformationnelle en analyse musicale à partir d'un examen détaillé de certaines approches développementales récentes de la pensée logico-mathématique (Andreatta, 2010). Parmi les trois problématiques qui, selon le psychologue Olivier Houdé, marquent le renouveau de la pensée piagétienne, la théorie mathématique des catégories occupe une place tout à fait centrale. À la différence de l'approche structurale que Piaget a développée à partir de son *Essai de logistique opératoire* (1949), approche qui constitue également le cadre conceptuel de ses recherches sur l'abstraction réfléchissante et sur la généralisation à partir de la fin des années 1970, la théorie des catégories introduit, selon Houdé, un élément nouveau dans la pensée opératoire. Les morphismes permettent « la prise en compte d'un aspect de la cognition logico-mathématique qui ne procède pas de la transformation du réel (opérations et groupements d'opérations) mais de la simple activité de mise en relation<sup>37</sup> ». Cette lecture de l'approche catégorique éclaire, à notre avis, un aspect fondamental de l'analyse musicale de type transformationnel, à savoir l'articulation entre la notion de progression et celle de réseau transformationnel, que nous avons illustrée dans notre modélisation informatique de l'analyse du *Klavirtück III* de Stockhausen par le théoricien David Lewin<sup>38</sup>. Dans une progression, les transformations s'enchaînent selon un ordre qui respecte le déroulement chronologique de la pièce. La logique opératoire reste ancrée dans une notion de temporalité qui, comme dans le cas de la pièce de Stockhausen, s'avère parfois insuffisante d'un point de vue de la perception de l'œuvre. Dans un réseau transformationnel, la « logique opératoire » est créée par le sujet (qui est dans ce cas l'auditeur et/ou l'analyste) à travers une mise en relation d'objets et de morphismes dans un espace abstrait de potentialités. Pour paraphraser la conclusion de Lewin, dans le cas des progressions transformationnelles, quand nous sommes à un point d'une telle progression nous sommes à un *instant* précis du temps, de la *narration* de la pièce, tandis que dans le cas d'un réseau abstrait nous sommes plutôt à un *point* bien défini à l'intérieur d'un *espace* créé par la pièce<sup>39</sup>.

**Démarche phénoménologique dans la pensée mathématique contemporaine.** Il est probablement trop tôt pour évaluer les conséquences épistémologiques d'un tel changement de paradigme en analyse musicale, la théorie transformationnelle n'étant pas encore un objet d'études pour la psychologie expérimentale et la philosophie de la musique. Nous avons cependant des pistes très intéressantes pour les recherches futures. En ce qui concerne par exemple la nature de l'espace en musique, outre la programmation spatiale dont nous avons souligné les applications récentes en musicologie computationnelle, nous avons trouvé plusieurs éléments qui pourront nourrir ultérieurement notre réflexion sur la nature de l'espace en musique dans un ouvrage consacré à un réexamen critique et prospectif de la phénoménologie husserlienne notamment dans ses rapports avec les idéalisés mathématiques et la réalité physique<sup>40</sup>.

Un certain nombre de questions posées par Luciano Boi dans la présentation de la première partie de cet ouvrage, centrée sur la spatialité et la phénoménologie de la perception, s'appliquent à notre avis non seulement au cas de la perception visuelle mais elles semblent également offrir un nouvel éclairage sur les implications cognitives et perceptives de la modélisation transformationnelle en musique. En particulier, dans le cas de l'organisation spatiale des structures musicales proposée par les approches transformationnelles, la question se pose de la relation entre les formes perçues et l'activité cognitive. Cette relation demande également une analyse de la relation locale/globale au sein d'un réseau transformationnel. Cela rejoint les préoccupations qui animent le projet d'application du modèle MENS à la perception musicale<sup>41</sup>. Cependant, elle ne fait qu'articuler, à un deuxième degré, la dualité

<sup>36</sup> Voir, en particulier, l'écrit « Contenus formels et dualité », repris dans Granger (1994).

<sup>37</sup> Voir Houdé et Miéville (1993).

<sup>38</sup> Voir Andreatta (2010), en particulier p. 17-21.

<sup>39</sup> Lewin (1993).

<sup>40</sup> Voir Luciano Boi *et al.* (2007).

<sup>41</sup> Voir la **section 3.2.3**.

de l'*objectal* et de l'*opérateur* en tant que « catégorie primitive de la pensée », pour reprendre la thèse de Granger. Du point de vue des sciences cognitives, cette approche touche à la question même de la nature de l'espace en musique, un problème dont la richesse en ce qui concerne les possibles retombées perceptives et cognitives reste, à notre avis, à comprendre. Il est évident que ces types de problématiques demandent également une remise en question des « lectures » philosophiques de certaines approches algébriques appliquées à la musique.

**Vers un structuralisme phénoménologique en mathématiques/musique.** La musique, ou plus précisément la recherche mathémusicale, représente ainsi une démarche grâce à laquelle on pourrait arriver à concilier certaines instances structuralistes avec d'autres orientations philosophiques, en particulier la phénoménologie husserlienne. Pour cela, nous avons proposé l'appellation « *structuralisme phénoménologique*<sup>42</sup> » pour une telle orientation philosophique en théorie mathématique de la musique. C'est une hypothèse que l'on peut avancer à partir, par exemple, des écrits d'Ernst Cassirer (1944), dont certaines considérations algébriques sur la mélodie musicale, inspirées directement par le programme de Felix Klein en géométrie (Klein, 1872), semblent bien s'inscrire dans une démarche structurale qui reste cependant ancrée sur le terrain de la phénoménologie.

Une réflexion philosophique qui nous semble pouvoir s'appliquer directement au cas de l'analyse musicale transformationnelle est celle proposée par Jocelyn Benoist dans son étude sur la pertinence phénoménologique de la théorie des catégories, toujours dans l'ouvrage *Rediscovering Phenomenology*. En effet, si l'un des aspects qui caractérisent la pensée phénoménologique est l'attention envers la dynamique de l'intuition conceptuelle, l'importance que David Lewin accorde au processus de construction au sein d'une analyse transformationnelle souligne la possibilité d'une coexistence entre démarche phénoménologique et approche structurale en musique. De même que « la phénoménologie husserlienne des mathématiques est structurale en ce qu'elle se fixe sur les invariances [...] dont elle fait le cœur de l'objectivité mathématique en tant qu'objectivité formelle<sup>43</sup> » l'analyse transformationnelle est phénoménologique tout en étant structurale, le groupe de transformation qui opère sur l'espace musical étant confronté systématiquement au processus perceptif propre à la subjectivité de l'analyste.

À partir de réflexions de mathématiciens sur la portée phénoménologique de l'activité mathématique contemporaine et en comparant ces auteurs avec d'autres orientations plus épistémologiques sur la portée cognitive de la réflexion phénoménologique<sup>44</sup>, les chercheurs en théorie mathématiques de la musique, musicologie computationnelle et informatique musicale pourraient ainsi arriver à constituer un cadre conceptuel nouveau à l'intérieur duquel certains problèmes mathématiques posés par la musique ont des implications importantes pour la perception et ouvrent des perspectives qui permettent d'enrichir et renouveler le questionnement philosophique.

### **Collaborations envisagées :**

Hugues Dufourt (philosophe et compositeur, directeur de recherche CNRS, IDEAT, UMR 8153 CNRS-Sorbonne), Charles Alunni (laboratoire Pensée des Sciences, ENS), François Nicolas (ENS USR 3308 Cirphles), Frédéric Patras (directeur de recherche CNRS, université de Nice Sophia-Antipolis).

<sup>42</sup> Voir Andreatta (2012). Nous avons récemment découvert que cette appellation a été également proposée dans d'autres approches, en particulier en référence à la démarche de Jakobson en linguistique structurale, concept repris par Petitot dans sa lecture morphologique de la généalogie du structuralisme. Voir, en particulier, Petitot (2004).

<sup>43</sup> Cf. J. Benoist (2007).

<sup>44</sup> Voir, en particulier, l'ouvrage *Naturaliser la phénoménologie* (Petitot et al. 2002).

## 4 Activités pédagogiques et transmission des connaissances

Parallèlement à la dimension de recherche académique, j'aimerais poursuivre, voir intensifier, mes activités pédagogiques, car le projet ouvre également des horizons nouveaux pour l'enseignement des mathématiques et la transmission des connaissances. Pour un public de non-spécialistes, notre expérience montre qu'il est tout à fait possible de rendre plus intuitifs et attrayants des concepts abstraits en les introduisant à l'aide d'idées musicales, en particulier en s'appuyant sur des langages de programmation innovants pour la musique, tel l'environnement *OpenMusic* développé à l'Ircam. L'informatique musicale devient ainsi non seulement un outil fondamental pour résoudre des problèmes ouverts mais également une interface stratégique entre la recherche et la pédagogie.

Bien que souvent considérée comme secondaire par rapport à l'activité de recherche à proprement parler, j'ai personnellement toujours considéré comme fondamental l'investissement dans la transmission du savoir, la direction de travaux d'étudiants et la vulgarisation scientifique. Les étudiants qui commencent à explorer le rapport mathématiques/musique dans le cadre d'un TIPE ou en suivant les séminaires d'étude que nous organisons, très souvent cherchent à approfondir leurs connaissances dans le cadre d'un Master scientifique (tel le Master ATIAM de l'Ircam/Paris VI ou d'autres Masters intégrant la composante mathématiques/musique parmi les unités d'enseignement)<sup>45</sup>.

Parmi les actions pédagogiques il faut différencier celles qui s'adressent à la communauté scientifique (principalement des étudiants de Master et de doctorants), celles qui visent la communauté musicale (celle des compositeurs, théoriciens de la musique, musicologues, interprètes, ...) et, de façon plus générale, celles qui s'adressent au grand public.

### 4.1 Actions visant un public scientifique

Notre objectif principal sera de renforcer la composante « mathémusicale » dans les cours qui font actuellement l'objet d'unités d'enseignement organisées dans le cadre des différents Master, aussi bien en France qu'à l'étranger. Notre effort concernera principalement le Master ATIAM, où nous organisons déjà l'unité d'enseignement MMIM (Modèles Mathématiques en Informatique Musicale), en collaboration avec Marc Chemillier (EHESS). Parallèlement, il s'agira de poursuivre la collaboration avec les autres universités où nous sommes chargés d'un enseignement concernant les rapports maths/musique, voir d'ouvrir de nouvelles unités d'enseignement dans de Master susceptibles d'inclure à l'intérieur de leur programmation des unités sur les modèles mathématiques en informatique musicale. Les séminaires d'étude de l'Ircam (MaMuX) et de l'ENS (*mamuphi*) pourront également constituer des moments particulièrement utiles pour approfondir de nombreuses questions théoriques autour de la recherche « mathémusicale ».

### 4.2 Actions visant la communauté musicale

Ici, nos objectifs à court et moyen terme sont liés directement au spectre d'activités interdisciplinaires qui ont lieu régulièrement à l'Ircam. En particulier, il s'agira de créer des passerelles entre des formations scientifiques, tel le Master ATIAM, et les programmes pédagogiques adressés aux musiciens, tel le Cours de composition accueillant chaque année à l'Ircam une vingtaine de compositeurs venant du monde entier. Notre objectif est d'impliquer les chercheurs travaillant dans le domaine des rapports entre mathématiques et musique dans l'organisation d'activités d'enseignement adressées principalement à des compositeurs. Outre les séminaires MaMuX et *mamuphi*, dont la technicité est parfois décourageante pour un public non-scientifique, nous allons poursuivre l'idée pédagogique qui est à la base de l'école de mathématiques pour musiciens et autre non-mathématiciens que nous co-organisons à l'ENS, dans laquelle il s'agit de rendre compréhensible un ou plusieurs concepts centraux de la mathématique la plus contemporaine à des non-spécialistes, en tentant de les mener au cœur de la pensée mathématique la plus active, et sans économiser la spécificité de l'écriture mathématique.

<sup>45</sup> Voir la **section 5** du rapport d'activités pour mes responsabilités et mes activités d'enseignement dans le cadre de plusieurs formations doctorales intégrant des UE sur mathématique et musique.

### 4.3 Actions visant le grand public

Si l'« école de mathématiques pour musiciens et autres non-mathématiciens » a su attirer, outre les musiciens auxquels elle s'adresse plus particulièrement, également un public plus large, il est nécessaire d'envisager des actions spécifiques idéalement conçues pour le grand public.

Nous avons commencé à envisager des activités de ce type dans le cadre de la troisième conférence internationale « Mathematics and Computation in Music » (MCM) qui s'est déroulée du 11 au 18 juin 2011 à l'IRCAM, au Centre Pompidou et au Palais de la Découverte. MCM 2011 a été intégrée dans l'événement le plus important de la saison artistique de l'IRCAM, le Festival Agora (8-18 juin 2011). Comme pour les deux conférences précédentes (à Berlin en 2007 et à Yale en 2009), la troisième conférence internationale « Mathematics and Computation in Music » a constitué à la fois une plateforme multidisciplinaire dédiée à la communication et aux échanges d'idées entre les acteurs impliqués dans l'application des mathématiques à la musique, l'informatique musicale, la théorie de la musique, la composition, la musicologie et les autres disciplines liées mais aussi un moment précieux pour la transmission des connaissances en direction d'un public plus large.

En particulier, nous avons pensé l'élargissement pluridisciplinaire sous le signe du rapport plus général entre Mathématiques et Arts, en travaillant en relation étroite avec le Centre Pompidou (en particulier autour de l'exposition monographique de François Morellet) ainsi qu'avec le Palais de la Découverte (qui a accueilli une exposition sur mathématiques et art organisée par l'ESMA, l'*European Society for Mathematics and Arts*). La relation avec le Palais de la Découverte a également permis d'envisager des moments privilégiés pour la transmission des connaissances autour du rapport maths/musique, en particulier grâce à une conférence grand public (14 juin) ainsi qu'une table ronde sur la créativité en mathématique et dans les arts qui a clôturé la conférence MCM 2011 (18 juin 2011). La conférence grand public, intitulée « Les mathématiques dans l'univers musical », a été conçue en collaboration étroite avec les médiateurs scientifiques du Palais de la Découverte tandis que la table ronde conclusive, dont j'ai assuré l'animation, a permis d'élargir la question du rapport entre mathématiques et musique à celle, plus générale, du rapport entre les mathématiques et l'art. Avec la participation de Jean-Paul Allouche (mathématicien), Claude Bruter (mathématicien et président de l'ESMA), Tom Johnson (compositeur), Jean-Marc Lévy-Leblond (physicien et essayiste), Jacques Mandelbrojt (peintre et physicien théoricien) et Jean-Claude Risset (physicien et compositeur).

La collaboration avec le Palais de la Découverte se poursuivra dans le cadre d'une exposition consacrée à la symétrie (Palais de la Découverte, septembre 2012) dans laquelle nous organiserons des activités grand public sur la pertinence de la notion de symétrie en musique. D'autres activités en direction du grand public sont prévues dans le cadre de la prochaine édition du Festival Agora de l'Ircam (juin 2012) qui accueillera également un colloque scientifique intitulé « L'intrigue du temps » et coorganisé par l'IRCAM, l'ENS et l'école polytechnique.

## 5 Vers une institutionnalisation de la recherche « mathémusicale »

Le projet de recherche poursuit le processus d'institutionnalisation du domaine de recherche autour des rapports mathématiques/musique auquel nous avons participé activement depuis au moins une dizaine d'années. Les moments principaux de ce processus ont été :

- la mise en place, en 2001, d'un séminaire d'étude mensuel à vocation interdisciplinaire et avec une forte composante internationale (séminaire MaMuX de l'Ircam) ;
- la création en 2007 d'une revue internationale à comité de lecture sur mathématiques/musique (*Journal of Mathematics and Music*) ainsi que d'une société savante (*Society of Mathematics and Computation in Music*) ;
- la création de deux collections d'ouvrages ouvrant la réflexion sur les rapports mathématiques/musique à la dimension plus générale des rapports musique et science (collection « Musique/Sciences » chez Ircam/Delatour France, en 2005, et collection « Computational Music Sciences », chez Springer en 2008) ;

- l'intégration de la discipline, depuis 2004, dans le cadre d'unités d'enseignement au sein de plusieurs formations doctorales (ATIAM, Ircam/UPMC/ParisTech ; Master IC2A, université de Grenoble ; école doctorale en mathématique, université de Pise ; ENST Bretagne... ) ;
- la direction de plusieurs travaux académiques (du niveau master au doctorat).

Toutes ces actions ont contribué à la reconnaissance du statut de la recherche mathémusicale au sein de la communauté des mathématiciens, comme le montre l'intégration, à partir de janvier 2011, de la discipline « mathématiques/musique » (code : 00A65) dans le *Mathematics Subject Classification* (MSC).

L'IRCAM a joué un rôle majeur dans ce processus d'institutionnalisation et a acquis une reconnaissance au niveau international grâce aux multiples activités dont il a été à l'origine, depuis le Forum Diderot « Mathématique et Musique » (1999) jusqu'à la conférence internationale « Mathematics and Computation in Music » (2011), organisée sous l'égide de la Société Mathématique de France. C'est donc au sein de l'UMR 9912 (STMS) que j'aimerais m'investir en tant que directeur de recherche avec, comme objectif principal, celui de poursuivre le processus d'institutionnalisation de la recherche « mathémusicale » tout en consolidant le rôle stratégique joué par la recherche française dans le domaine des rapports entre mathématiques, informatique et musique. Il s'agit à la fois d'envisager des actions spécifiques permettant de continuer à fédérer la communauté des chercheurs travaillant dans ce domaine mais aussi augmenter le nombre de doctorants susceptibles de s'investir dans un travail de thèse aussi bien en informatique qu'en mathématiques et en musicologie computationnelle. Une position de directeur de recherche serait sans doute un atout pour mener à bien ce projet ambitieux.

## 6 Références<sup>46</sup>

- Acotto E. et Andreatta, M. (2010), « Représentations mentales musicales et représentations mathématiques de la musique », à paraître dans *InCognito, Cahiers Romains de Sciences Cognitives*, Vol. 4, n°. 3.
- Ahn Y.-K. (2009), *L'analyse musicale computationnelle*, thèse de doctorat en informatique, Université de Paris 6 / Ircam.
- Allouche J.-P. et L. Maillard-Teyssier (2011), « Inconstancy of finite and infinite sequences », à paraître dans *Theoretical Computer Science*.
- André Y. (2006-2009), *Ecole de mathématique pour musiciens et autres non-mathématiciens*, manuscrit inédit, disponible en ligne à l'adresse : <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/EcoleYA.html>
- Andreatta M. (1996), *Gruppi di Hajós, Canoni e Composizioni*, Tesi di laurea, Département de mathématiques, Université de Pavie.
- Andreatta M. (1997a), *Formalizing musical structure : from Information to Group Theory*, Dissertation in Aesthetics and Sociology of Music, University of Sussex, 1997.
- Andreatta M. (1997b), *Group-theoretical methods applied to music*, Diss., University of Sussex.
- Andreatta M. (2011), « Mathématiques, Musique et Philosophie dans la tradition américaine : la filiation Babbitt/Lewin », à paraître dans « Mathématique/Musique et Philosophie », numéro spécial de la revue PSL (Paris Sciences et Lettres), sous la direction de C. Alunni, M. Andreatta et F. Nicolas.
- Andreatta M. (2010), *Mathematica est exercitium musicae. La recherche 'mathémusicale' et ses interactions avec les autres disciplines*, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Institut de Recherche Mathématique Avancée, université de Strasbourg.
- Andreatta M. et C. Agon (2003), « Implementing algebraic methods in *OpenMusic* », *Proceedings ICMC*, Singapore.
- Andreatta M., J.-M. Bardez, J. Rahn dir. (2008), *Autour de la Set Theory. Rencontre musicologique franco-américaine*.

---

<sup>46</sup> Pour une liste plus exhaustive des références bibliographiques je renvoie à la bibliographie contenue dans mon mémoire d'habilitation à diriger des recherches : <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/moreno/TexteHDR.pdf>

- Andreatta M. et C. Agon eds. (2009), Special Issue « Tiling Problems in Music », *Journal of Mathematics and Music*, Juillet, vol. 3, n° 2.
- Assayag G., H.G. Feichtinger, J.F. Rodrigues eds (2002), *Mathematics and Music, Diderot Forum*, European Mathematical Society, Berlin, Springer Verlag.
- Assayag G., A. Gerzso eds (2009), *Nouveaux Paradigmes pour l'Informatique Musicale*, collection « Musique/Sciences », Ircam/Delatour France.
- Bigo L. (2010), *Utilisation de la programmation spatiale pour l'analyse et la représentation symbolique musicale*, mémoire de Master ATIAM, Ircam/Université de Paris 6, septembre.
- Bigo L., Michel O., Spicher A. (2010), « Spatial Programming for Music Representation and Analysis », Spatial Computing Workshop, Budapest.
- Benoist J. (2007), « Mettre les structures en mouvement : la phénoménologie et la dynamique de l'intuition conceptuelle. Sur la pertinence phénoménologique de la théorie des catégories », in Luciano Boi, Pierre Kerszberg, Frédéric Patras (eds.), *Rediscovering Phenomenology*.
- Berthoz A. (2005), « Les liens entre mathématiques et neurosciences », dans *Les mathématiques dans le monde scientifique contemporain*, Académie des sciences, rst n° 20, 175-211.
- Boi L., P. Kerszberg, F. Patras (eds.) (2007), *Rediscovering Phenomenology: Phenomenological Essays on Mathematical Beings, Physical Reality, Perception and Consciousness*, Springer.
- Brown R. et T. Porter T. (2008), « Category Theory and Higher Dimensional Algebra : potential descriptive tools in neurosciences » (online : <http://arxiv.org/pdf/math/0306223v2>).
- Cassirer R. (1944), « The concept of group and the theory of perception », *Philosophy and Phenomenological Research*, V/1, p. 1-36.
- Cauchy A. (1841), « Notes sur divers théorèmes relatifs à la rectification des courbes, et à la quadrature des surfaces », *C. R. Acad. Sci. Paris* 13, 1060-1063.
- Cauchy A. (1850), « Mémoire sur la rectification des courbes et la quadrature des surfaces courbes », *Mém. Acad. Sci. Paris* 22, 3-15.
- Chemillier M. (1987), « Monoïde libre et musique », *RAIRO Inf. Theo.*, 21(3-4), 341-371 et 379-417.
- Cont A., S. Dubnov S., et G. Assayag (2011), « On the Information Geometry of Audio Streams with Applications to Similarity Computing », *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, Vol. 19, no. 1 (sous presse).
- Crofton M. W. (1868), « On the theory of local probability, applied to straight lines drawn at random in a plane; the methods used being also extended to the proof of certain new theorems in the Integral Calculus », *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 158, 181-199.
- Dowek G. (2005), « Le langage mathématique, les langages de programmation », Séminaire MaMuX, Séance *Logique et calculabilité en informatique et en musique*, IRCAM, 13 mars.
- Dowek G. (2009), « La forme physique de la thèse de Church et la sensibilité aux conditions initiales », dans *Ouvrir la logique au monde, Philosophie et Mathématique de l'interaction* (Jean-Baptiste Joinet et Samuel Tronçon dir.), Hermann, Collection « Visions des sciences ».
- Ehresmann A. C. et J.-P. Vanbreemersch (2007), *Memory Evolutive Systems: Hierarchy, Emergence, Cognition*, Elsevier, Amsterdam.
- Giavitto J.-L., O. Michel et J.-P. Sansonnet (1996), « Group based fields ». In I. Takayasu, R. H. Jr. Halstead et Ch. Queinnec (eds.), *Parallel Symbolic Languages and Systems (International Workshop PSL'S'95)*, LNCS, vol. 1068, Springer, 209-215.
- Girard J.-Y. (2006, 2007), *Le Point Aveugle*, (en deux volumes), Hermann.
- Girard J.-Y. (2010), « Le fantôme de la transparence », article écrit pour les 60 ans de Giuseppe Longo et disponible à l'adresse : <http://iml.univ-mrs.fr/~girard/longo2.pdf>
- Gratus J. et T. Porter (2006), « A spatial view of information », *Theoretical Computer Science*, 365(3), 206-215.
- Guitart R. (2009), « Théorie du nouveau », intervention dans le séminaire *mamuphi*, ENS, 9 mai.
- Guitart R. (2012), « Pour une modélisation qualitative en termes de catégories », à paraître dans *Penser la musique avec les mathématiques (10 ans après)*, Actes du séminaire *mamuphi*, M. Andreatta, Ch. Alunni et F. Nicolas (dir.), collection « Musique/Sciences », Ircam-Delatour France.
- Granger J.-G. (1994), *Formes, opérations, objets*, Paris : Librairie Philosophique J. Vrin.
- Hagmann P., L. Cammoun, X. Gigandet, R. Meuli, C. J. Honey, Van J. Wedeen et O. Sporns (2008), « Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex », *PLoS Biology* 6, Issue 7, 1479-1493. Online: [www.plosbiology.org](http://www.plosbiology.org)

- Hajos G. (1942), « Über einfache und mehrfache Bedeckung des  $n$ -dimensionalen Raumes mit einem Würfelgitter », *Math. Zeit.*, 47, 427-467.
- Halford G. S. et Wilson W. H. (1980), « A category-theory approach to cognitive development », *Cognitive Psychology*, 12, 356-411.
- Houdé O. et Miéville D. (1993), *Pensée Logico-mathématique, nouveaux objets interdisciplinaires*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Klein F. (1872), « Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen », *Mathematische Annalen*, 43 (1893) p. 63-100. Tr. fr. *Le Programme d'Erlangen. Considérations comparatives sur les recherches géométriques modernes*, Paris, Gauthier-Villars, 1974.
- Lafont Y. (1997), « Interaction combinators », *Information and Computation*, vol. 137 n° 1, 69-101.
- Lafont Y. (2009), « Calculs de diagrammes et combinateurs d'interaction », Séminaire MaMuX, séance sur *Géométrie de l'interaction et musique*, IRCAM, 9 mai.
- Lewin D. (1993), « Making and Using a pcset Network for Stockhausen's *Klavierstück III* », *Musical Form and Transformation: 4 Analytic Essays*, New Haven: Yale University Press, p. 16-67.
- Lippi S. (2002), *Théorie et pratique des réseaux d'interaction*, thèse, Université de la méditerranée.
- Longo G. et al (2003), « Géométrie et Cognition », *Revue de Synthèse*, Tome 124.
- Mandereau J., D. Ghisi, E. Amiot, M. Andreatta, C. Agon (2011a), « Discrete phase retrieval in musical structures », *Journal of Mathematics and Music*, vol. 5, n° 2, p. 99-116
- Mandereau J., D. Ghisi, E. Amiot, M. Andreatta, C. Agon, (2011b) « Z-relation and homometry in musical distributions », *Journal of Mathematics and Music*, vol. 5, n° 2, p. 83-98
- Mandereau J. (2012), *Modélisation informatique des processus musicaux : une étude de la Géométrie de l'Interaction et des Systèmes Evolutifs à Mémoire appliqués à l'informatique musicale*, thèse de doctorat, Université de Pisa / Université de Paris 6 (sous la direction de M. Andreatta). Date prévue de soutenance : Octobre 2012.
- Mazzola G. (2002), *Topos of Music*, Birkhäuser Verlag.
- Mazzola G. et Andreatta M. (2006), « From a categorical point of view : K-nets as limit denotators », *Perspectives of New Music*, vol. 44, n° 2, p. 88-113.
- Mazzola G. et Andreatta M. (2007), « Diagrams, gestures and formulae in music », *Journal of Mathematics and Music*, vol. 1, n° 1, p. 23-46.
- Minkowski H. (1907), *Diophantische Approximationen. Eine Einführung in die Zahlentheorie*, Chelsea Publishing Company, New York.
- Nicolas F. (2009), « D'un 'tournant géométrique' dans la logique musicale », dans *Ouvrir la logique au monde, Philosophie et Mathématique de l'interaction* (sous la direction de Jean-Baptiste Joinet et de Samuel Tronçon), Hermann, Collection « Visions des sciences ».
- Noll Th. (2008), « Sturmian sequences and morphisms: a music-theoretical application », *Société Mathématique de France*, Journée annuelle (sous la direction d'Y. André), p. 79-102.
- Noll Th. (2009), « Logics and Mathematical Music Theory », Séminaire *mamuphi*, 5 décembre (<http://www.entretemps.asso.fr/maths/>).
- Paul T. (2012), « Des sons et des Quanta », à paraître dans *Penser la musique avec les mathématiques (10 ans après)*, Actes du séminaire *mamuphi*, M. Andreatta, Ch. Alunni et F. Nicolas (dir.), collection « Musique/Sciences », Ircam-Delatour France.
- Petitot J. (2004), *Morphologie et esthétique*, Paris, Maisonneuve et Larose.
- Petitot J., F. J. Varela, B. Pachoud et J.-M. Roy dir. (2002), *Naturaliser la phénoménologie*, éditions du CNRS.
- Pratt V. (2010), « A Chu space tutorial », conférence donnée à l'occasion de la séance « Espaces de Chu et musique », Ircam, séminaire MaMuX, 9 avril.
- Rosenblatt J. (1984), « Phase Retrieval », *Communications in Mathematical Physics* 95, p. 317-343.
- Rueda C. (2008), « Temporal aspects of a Chu space semantics of CCP », conférence dans le cadre de la séance du séminaire MaMuX de l'Ircam intitulée « Processus concurrents en informatique musicale », 5 décembre.
- Truchet, C., Assayag, G. dir. (2011), *Constraints Programming in Music*, ISTE, Wiley.
- Viaud-Delmon I. (2006), *Réalité virtuelle, intégration multi-sensorielle & espace : de l'outil expérimental au paradigme scientifique*, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Paris VI.