

Rapport du groupe de travail « Mathématiques/Musique & Cognition »

2007-2009

Préambule sur les difficultés d'un dialogue interdisciplinaire

Ce document détaille les activités réalisées dans le cadre du groupe de travail « Mathématiques/Musique et Cognition » ainsi que les perspectives futures qui s'en dégagent. Né d'une volonté de ressembler deux communautés qui n'ont pas l'habitude de dialoguer (telles les théoriciens mathématiciens de la musique d'un côté et les chercheurs en psychologie expérimentale et en neurosciences de l'autre côté), ce groupe de travail a eu quelques difficultés à se mettre en place. Ceci explique également la durée des activités, initialement prévues dans l'espace d'une année et qui se sont, en réalité, déployées de fin 2007 à fin 2009. En effet, bien que peu des activités fixées dans le calendrier prévisionnel n'aient été réalisées, d'autres axes de recherche et collaborations ont émergé ouvrant de perspectives nouvelles pour la suite de ce groupe de travail. Par exemple, plusieurs des activités menées dans ce groupe ont été réalisées en collaboration avec l'ESCOM (Association européenne pour les sciences cognitives de la musique) qui a témoigné ainsi d'un véritable intérêt pour cette nouvelle orientation pluridisciplinaire dont nous analyserons maintenant quelques enjeux majeurs avant de présenter en détail les activités réalisées.

Quelques enjeux d'une recherche sur les rapports entre mathématique, musique et cognition

L'étude des relations entre mathématique et musique est un domaine de recherche qui a connu depuis une dizaine d'années des développements tout à fait remarquables. La prolifération des colloques, séminaires d'études, ainsi que le nombre important d'ouvrages sur le sujet, y compris la création de la première revue à comité de lecture consacrée à la recherche « mathémusicale¹ », témoignent d'un intérêt croissant pour ce sujet de la part des deux communautés, celle des mathématiciens et informaticiens d'un côté et celle des musicologues et musiciens de l'autre. Comme exemples de ce domaine de recherche, on citera en particulier les activités qui se déroulent depuis une dizaine d'années à l'Ircam, à partir du Forum Diderot (Assayag et al., 2001)

¹ *Journal of Mathematics and Music. Mathematical and Computational Approaches to Music Theory, Analysis, Composition and Performance* (Taylor & Francis, 2007). Voir à l'adresse : <http://www.tandf.co.uk/journals>. Le *Journal of Mathematics and Music* est la revue officielle d'une société savante qui a été créée récemment, à savoir la *Society of Mathematics and Computation in Music (SMCM)*. Pour plus d'information sur les activités de la SMCM, voir : <http://www.smcm-net.info/>.

jusqu'aux séminaires MaMuX (Mathématiques/Musique et relations avec d'autres disciplines²). Ce nouveau champ de recherche, dont l'informatique a été le catalyseur principal, a accompagné et parfois accéléré la transformation de la musicologie en une discipline systématique, avec une accentuation progressive de sa composante formelle, donnant ainsi naissance à un nouveau champ d'études : la « musicologie computationnelle ».

Cependant, dans cette orientation computationnelle qui caractérise la recherche musicologique assistée par ordinateur, une scission s'est produite avec d'autres démarches systématiques, en particulier celles plus orientées vers la cognition et la perception musicales³. L'un des objectifs de ce projet, comme nous l'avons précisé au préambule de ce rapport, était de renouer le dialogue entre « musicologie computationnelle » et « musicologie cognitive » à partir des enjeux théoriques posés par la recherche « mathémusicale » et du rôle central joué par l'informatique dans le processus de modélisation (figure 1).

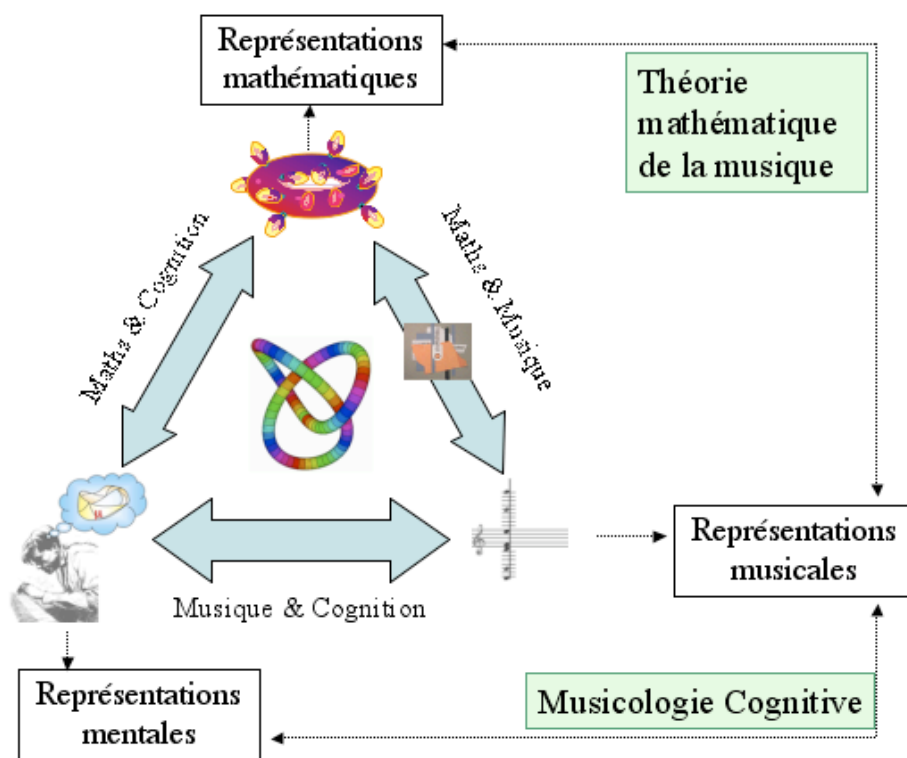


Fig 1. Le domaine des rapports entre mathématique, musique et cognition comme un nœud exprimant la relation étroite entre sciences cognitives de la musique, théorie mathématique de la musique et théorie mathématique de la cognition. Musicologie cognitive et théorie mathématique de la musique se rejoignent autour de la notion de représentations musicales.

² <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/>. C'est dans la dynamique propre au Séminaire MaMuX que le projet « Mathématique/Musique & Cognition » a trouvé finalement sa place naturelle, comme le montrent les diverses activités que l'on a réalisées et qui seront détaillées dans la deuxième partie de ce document.

³ Ce n'est donc pas surprenant de constater que l'un des textes de référence sur la « musicologie cognitive », (Leman, 1997), ne fait aucune référence aux approches computationnelles en analyse musicale alliant les modèles formels issus des mathématiques et la musique.

Initialement, nous avons prévu de concentrer notre réflexion sur deux paradigmes analytiques majeurs en musicologie computationnelle : les approches « set-théoriques » d'un côté (à partir de la *Set Theory* d'Allen Forte⁴ jusqu'à la théorie transformationnelle de David Lewin et Henri Klumpenhouwer⁵), et les théories génératives et grammaticales de la musique (en particulier la théorie générative de Fred Lerdahl et Ray Jackendoff⁶). Ces deux approches analytiques, qui d'un point de vue mathématique peuvent être formalisées de façon extrêmement élégante à l'aide des méthodes algébriques telles la théorie des groupes (structures algébriques dites « fortes ») et les grammaires formelles (ou structures « faibles »), soulèvent en effet une série de questions qui nous semblaient tout à fait centrales dans une activité de recherche telle que nous l'envisagions dans notre groupe de travail. Compte tenu de leur portée générale, qui ne se limite pas aux deux approches analytiques initialement envisagées, nous allons reprendre ces questions en les replaçant dans le contexte des sujets qui ont été traités par le groupe de travail.

- Quels sont les rapports entre des théories mathématiques sous-jacentes à des approches analytiques et les langages de programmation qui implémentent ces approches théoriques ? Autrement dit, quelles conséquences peut-on en tirer dans le domaine de la cognition et perception musicales des rapports que l'on peut mettre en évidence entre le calcul algébrique et le calcul en informatique ?
- Quelle place pourrait occuper une recherche « mathémusicale » dans l'espace des disciplines qui constituent les sciences cognitives ? Quels modèles cognitifs s'adaptent le mieux pour rendre compte de l'approche algébrique en musique ?
- Quelles études comportementales relevant de la psychoacoustique et de la psychologie cognitive pourraient permettre de tester la « perceptibilité » des modèles algébriques et des grammaires artificielles en analyse et composition musicale ? Peut-on envisager d'étudier le problème des émotions en musique contemporaine à partir de théories comme celles des groupes, des grammaires formelles, des catégories ou des topoï ?

Ces trois questions demandent tout d'abord que l'on puisse identifier les difficultés qui sont propres à chaque discipline afin de pouvoir bâtir un véritable dialogue multidisciplinaire. S'agissant d'une interaction entre trois disciplines⁷, il est tout à fait naturel que certaines passerelles soient plus faciles que d'autres. Le dialogue entre mathématiciens théoriciens de la musique et informaticiens ne pose pas de problèmes particuliers, vu la nature « computationnelle » de l'objet d'étude et des méthodes utilisées. Ce projet s'inscrit, en effet, dans une collaboration déjà bien établie entre des mathématiciens et des informaticiens, en particulier des chercheurs travaillant activement dans le domaine de l'informatique musicale. *OpenMusic*, un langage de programmation fonctionnelle et visuelle conçu par l'Equipe Représentations Musicales de l'Ircam⁸, est à présent l'un des environnements informatiques qui se prête le mieux à l'implémentation des théories mathématiques pour l'analyse musicale assistée

⁴ Forte (1977).

⁵ Lewin (1987, 1990).

⁶ Lerdahl et Jackendoff (1983).

⁷ Mathématiques/musique (ou musicologie computationnelle), informatique musicale et psychologie expérimentale (ou, plus en générale, les sciences cognitives).

⁸ Agon et al. (1999).

par ordinateur. Beaucoup plus délicat et difficile était, a priori, le dialogue avec les sciences cognitives et les neurosciences, ce qui nous a obligé à orienter les activités du groupe de travail vers une direction différente de celle initialement envisagée.

Une analyse des rapports entre recherche musicale et sciences cognitives montre pourtant que la musique est le seul art qui constitue un objet d'étude en soi en neurosciences cognitives⁹. Dans ce champ de recherche, il n'y a, pour l'instant, que très peu d'études sur les approches mathématiques de la musique et l'activité cognitive¹⁰. C'est en s'appuyant sur la modélisation informatique des structures musicales, qu'il s'avère possible, comme nous allons le montrer par la suite, de mettre en évidence un certain nombre de problèmes qui sont des bons candidats pour l'étude des retombées cognitives et perceptives des méthodes algébriques.

Dans l'approche algébrique, et en particulier dans la tradition analytique « set-théorique » (au sens de la *Musical Set Theory*), il y a une articulation permanente entre le processus de formalisation des structures musicales et le choix des possibles représentations géométriques¹¹. À partir de cette articulation opératoire entre formalisation algébrique et représentation géométrique, le problème se pose de la pertinence perceptive des transformations algébriques qui sont à la base des approches qui relèvent de ce qu'on appelle la « tradition américaine », ce terme incluant à la fois la *Set Theory* d'Allen Forte, les théories diatoniques ainsi que la théorie transformationnelle de David Lewin.

Curieusement, depuis les années quatre-vingt, très peu de recherches ont été menées pour étudier les retombées cognitives et perceptives des approches set-théoriques et transformationnelles en analyse musicale¹². De même, les tentatives d'appliquer la théorie des grammaires génératives pour l'analyse des musiques qui ne sont pas basées sur la notion de tonalité (musique sérielle, musique atonale, etc.), sont restées programmatiques¹³.

L'un des enjeux des activités réalisées dans le cadre du groupe de travail a été de faire un état de l'art des avancées récentes dans ces deux domaines de l'analyse musicale, i.e. la *Set Theory* et la théorie générative de la musique (tonale et non-tonale) afin d'en mettre en évidence tout d'abord les aspects formels et computationnels susceptibles d'être ensuite intégrés dans un protocole de recherche expérimentale. Cet état de l'art a été fait dans le cadre de cinq journées dont une partie s'est déroulée sous la forme de Symposia réunissant les meilleurs spécialistes dans le domaine. Nous détaillons dans la section suivante les cinq journées d'étude en essayant de montrer dans quelle mesure les sujets étudiés engagent un dialogue entre les trois disciplines principales de notre groupe de travail. Les pistes de recherche qui se sont ouvertes à la suite de cette analyse constitueront l'objet de la troisième et dernière section, plus prospective.

⁹ Peretz et Zatorre (2003).

¹⁰ Les rares tentatives dans cette direction sont issues des constructions formelles proposées par des théoriciens de la musique travaillant sur les méthodes mathématiques en analyse musicale. Voir Lewin (1986).

¹¹ Chemillier (1990) et Andreatta (2003).

¹² Voir, par exemple, Balzano (1982) et Lewin (1986).

¹³ Voir Lerdahl (1989). Plus récemment (Lerdahl, 2001), l'auteur semble ouvrir des perspectives nouvelles allant bien au-delà du cadre traditionnel de la musique tonale, mais les outils théoriques proposés n'ont jamais fait l'objet d'études perceptives systématiques. Voir également Pineau et Tillmann (2001) pour une réflexion sur les modalités de généralisation au répertoire non-tonal des techniques existantes pour la perception des structures tonales.

Liste des journées d'étude et Symposia organisées dans le cadre des activités du groupe de travail

- Symposium « Autour de la théorie générative de la musique tonale de Fred Lerdahl et Ray Jackendoff » (ENS et Ircam, 11-12 janvier 2008). Avec la participation de Nicolas Meeùs (PLM, Université Paris IV), Costas Tsougras (Aristotle University of Thessaloniki), Ray Jackendoff (Tufts University), Fred Lerdahl (Columbia University), Irène Deliège (ESCOM, Université de Liège), Michael J. Bruderer (Technical University of Eindhoven), Thomas Noll (ESMuC, Barcellona), Emilios Cambouropoulos (Department of Music Studies Aristotle University of Thessaloniki), Rob Seward (artiste et informaticien) Geraint A. Wiggins, Marcus Pearce et Daniel Müllensiefen (Centre for Cognition, Computation & Culture/Department of Computing, Goldsmiths' College, University of London). Programme du Symposium à l'adresse : <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/ProgrammeSympAbstracts.pdf>
- Journée d'étude sur les théories diatoniques (Ircam, 25 avril 2008), avec la participation de Eytan Agmon (Dept. of Music, Bar-Ilan University, Israel), Emmanuel Amiot (mathematician, Perpignan), Thomas Noll (ESMuC, Barcelona), Julien Junod (Ircam/ Université de Paris VI), Pierre Audétat (Conservatoire de Lausanne). Programme de la journée disponible à l'adresse : <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/CognitionDT.pdf>
- Journée d'étude Mathématiques et Cognition, avec la participation de Andrée C. Ehresmann et Jean-Paul Vanbremeersch (Ircam, Vendredi 17 janvier 2009). Le sujet de cette journée d'étude constituera l'un des axes de recherches futures (cf. section suivante)
- Symposium « Musique et Cognition. Autour de l'apport de John Sloboda » (Ircam, 23 janvier 2009). Avec la participation de Jane Ginsborg (Royal Northern College of Music, Manchester, UK), Daniel Müllensiefen and Geraint A. Wiggins (Centre for Cognition, Computation and Culture Goldsmiths, University of London), Mario Baroni, Rossana Dalmonte, Roberto Caterina (Univ. Bologna & Trento, Italy), Michel Imberty (université de Paris X, Nanterre), Nicholas Cook (Royal Holloway, Centre for the History and Analysis of Recorded Music, CHARM), Barbara Tillmann (CNRS, UMR 5020, Lyon), Emmanuel Bigand (LEAD/CNRS UMR 5022, Dijon), Adam Ockelford (Southlands College, Roehampton University, London), Richard Parncutt (Univ. Graz, Austria), John Sloboda (University of Keele and Royal Holloway, University of London). Programme du Symposium à l'adresse : <http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/People-AbstrSympSloboda.html>
- Journée d'étude sur la transformée de Fourier discrète dans l'étude de la perception musicale (Ircam, 3 avril 2009). Avec la participation d'Emmanuel Amiot (mathématicien), Isabelle-Viaud Delmon (neurosciences) et Carlos Agon (informaticien). Le sujet de cette journée d'étude constitue à présent l'un des axes de recherches sur lesquelles nous envisageons de poursuivre notre travail (Cf. section suivante).

Sur un total de cinq journées d'études, nous avons donc consacré deux Symposia à deux sujets relevant de la psychologie de la musique, en vue d'en faire à la fois un état de l'art mais aussi en évaluer la composante computationnelle et formelle (au sens de la logique et des mathématiques abstraites). Les trois journées d'étude restantes ont été consacrées, en revanche, à des sujets issus de la musicologie computationnelle et de la théorie mathématique de la musique, avec l'objectif principal de discuter les aspects qui pourraient s'inscrire dans une démarche expérimentale issue des neurosciences cognitives.

Dans les cas de deux Symposia, l'un consacré à la théorie générative de la musique tonale de Fred Lerdahl et Ray Jackendoff et l'autre à l'apport de John Sloboda dans le domaine de la psychologie de la musique, on a pu mesurer la distance qui sépare toujours la communauté des théoriciens mathématiciens de la musique et celle des neuroscientifiques et chercheurs en psychologie expérimentale. Organisés en collaboration avec Irène Deliège et donc sous l'égide de l'ESCOM (société européenne des sciences cognitives appliquées à la musique), ces deux Symposia ont néanmoins permis de mettre en évidence quelques aspects qui pourraient renouer le dialogue entre ces deux communautés. En particulier, dans le cadre du Symposium consacré à Lerdahl et Jackendoff nous avons essayé de confronter la théorie générative de la musique tonale à la théorie mathématique de la musique, grâce en particulier à une présentation détaillée de Thomas Noll s'appuyant sur une analyse de la notion de *well formedness* telle qu'on retrouve dans la perspective « générative » de GTTM (*Generative Theory of Tonal Music*) d'abord et de TPS (*Tonal Pitch Space*) ensuite, ainsi que dans l'approche transformationnelle de l'école diatonique de la tradition set- théorique américaine¹⁴.

La théorie diatonique est sans doute l'une des approches dont les liens avec la cognition et perception musicales ont été mis en évidence à la fois d'un point de vue théorique (Balzano, 1980 et 1982 ; Cross et al., 1983), mais aussi de façon expérimentale (Van Egmond R. & Butler D., 1997 ; Cross 1997). Pour cette raison, une des journées d'étude restantes avait été consacrée à une analyse des multiples facettes de la théorie diatonique, y compris dans ses développements récents en relation avec les grammaires formelles (au sens de la combinatoire algébrique des mots¹⁵) et la théorie des *maximally even sets*¹⁶. Grâce aux travaux d'Emmanuel Amiot¹⁷, qui a formalisé une intuition de David Lewin (1959) reprise par Ian Quinn dans sa théorie générale de l'harmonie (Quinn 2006), la propriété de « maximal evenness » peut être désormais définie à partir de la transformée de Fourier discrète (DFT). Il y a donc un lien nouveau entre théorie générative de la musique tonale, grammaires formelles et transformée de Fourier discrète qui pourrait alimenter une discussion qui aurait donc tout à fait sa place dans un travail de recherche sur mathématiques/musique et cognition. En laissant pour l'instant de côté les liens avec la GTTM, nous avons consacré une journée de travail à une réflexion sur les aspects cognitifs et perceptifs de l'utilisation de la transformée de Fourier discrète en théorie mathématique de la musique. En

¹⁴ Voir, en particulier, Carey & Clampitt (1989). La plupart des articles présentés lors du Symposium « Autour de la théorie générative de la musique tonale de Fred Lerdahl et Ray Jackendoff » ont été rassemblés dans un numéro spécial de la revue *Musicae Scientiae* (en préparation). La TGMT a également fait l'objet d'un numéro spécial de la revue *Music Perception* (Bigand et al. 2009), rassemblant les contributions des participants au colloque « Musique, Langage, Cerveau » (Dijon, 17-18 janvier 2008).

¹⁵ Voir, par exemple, Noll (2008).

¹⁶ Voir Clough & Douthett (1991) pour une présentation « classique » de la théorie des *maximally even sets* et Douthett (2008) pour une discussion de cette approche depuis la perspective des systèmes dynamiques.

¹⁷ Voir en particulier Amiot (2007).

plus de donner une caractérisation élégante de la propriété de *maximal evenness*, la DFT s'applique plus en général à l'étude des propriétés structurelles des gammes musicales. À partir d'une nouvelle représentation géométrique appelée « cloche diatonique¹⁸ », conçue par le musicien Pierre Audétat, la DFT permet de donner une description algébrique des 66 échelles heptatoniques et des 462 modes qu'ils y sont associés. Nous avons présenté les premiers résultats de cette formalisation à l'occasion de la dernière Conférence Internationale de la *Society of Mathematics and Computation in Music* (Yale, 19-22 juin 2009)¹⁹. Un projet un cours qui représente la suite naturelle des recherches que nous avons menées dans le domaine des hauteurs vise à étudier les aspects perceptifs de l'utilisation de la DFT dans la description structurelle du rythme.

Perspectives futures : vers un nouveau dialogue entre les neurosciences et la recherche « mathémusicale » ?

Dans son analyse consacrée aux liens entre mathématiques et neurosciences (Berthoz, 2005), Alain Berthoz²⁰ propose une vision des mathématiques qui s'applique tout à fait à la problématique de notre groupe de travail. Si c'est indéniable que les mathématiques ont souvent été les protagonistes des tournants scientifiques en contribuant au même temps à des changements de paradigmes dans la connaissance (de l'invention du calcul infinitésimal à la géométrisation de la physique²¹), on peut imaginer 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 y 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 » (Berthoz, 2005, 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 pu constater, grâce à l'activité de notre groupe de travail, dans quelle mesure les mathématiques constituent un cadre privilégié pour l'étude de certaines fonctions cérébrales intégrées. Nous avons en effet consacré

¹⁸ <http://www.cloche-diatonique.ch/>

¹⁹ Junod et al (2009). Voir également Junod (2008) pour une première étude combinatoire et informatique du caractère diatonique des échelles heptatoniques.

²⁰ Avec la complicité de Daniel Andler, Daniel Bennequin, Jacques Droulez, Olivier Faugeras, Giuseppe Ilongo, Stéphane Mallat et Jean Petitot.

²¹ 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. Voir à ce propos notre projet exploratoire « Géométrie de l'Interaction et musique », retenu dans le cadre des interactions MathsST2I :

<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/PEPS-GdIM.html>

une journée d'étude à un sujet n'ayant pour l'instant aucune application directe dans la musique à savoir la modélisation de l'activité neuronale à l'aide de la théorie mathématique des catégories (Eilenberg & Mac Lane, 1945). Ce modèle appelé « Systèmes Evolutifs à Mémoire » (ou SEM), est le fruit d'une collaboration entre une mathématicienne et un médecin. Andrée C. Ehresmann et Jean-Paul Vanbreemeersch ont développé ensemble à partir des années 1980 ce modèle théorique initialement pour des systèmes naturels complexes tels les systèmes biologiques, sociaux ou culturels, et ensuite pour les systèmes cognitifs (modèle MENS pour *Memory Evolutive Neural Systems*). C'est ce dernier modèle qui a fait l'objet d'une journée d'étude qui a montré, de façon plus générale, la pertinence de la théorie des catégories pour l'étude des systèmes dynamiques. C'est un point qui mérite d'être souligné, car on reproche souvent à cette théorie de négliger l'aspect temporel en privilégiant la notion de structure sur l'idée de processus²². La question sous-jacente au modèle MEMS 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). Le modèle MENS montre 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 Edelman, 1989; Edelman & Gally, 2001) est vérifié.

Comme les auteurs l'ont souligné dans leur présentation détaillée du modèle MENS, ceci conduit à une « algèbre des objets mentaux » (au sens de Changeux, 1983), ce qui mène à la formation d'un invariant global, le noyau archétypal, confirmé par la découverte récente, dans le cerveau, du *neural connection core* (Hagmann & al., 2008). Ce noyau archétypal intègre les expériences saillantes et/ou régulièrement ré-enforcées, à la fois sensibles, motrices, émotionnelles, procédurales et sémantiques. Ce sont des questions qui 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 du modèle MENS appliqué à la musique. Ceci touche à la fois à la notion de représentation géométrique et catégorielle des structures musicales mais aussi au concept même d'espace musical dont nous proposons d'étudier les rapports avec les neurosciences en s'appuyant sur les recherches les plus récentes autour de la réalité virtuelle²³.

On aurait ainsi une piste nouvelle pour aborder un des axes de recherche initialement prévu dans les activités de ce groupe de travail, à savoir les retombées cognitives et perceptives du paradigme transformationnel en analyse musicale, à la fois dans la version de David Lewin mais aussi dans la démarche inaugurée par Henry Klumpenhouwer avec les *K*-réseaux (ou *K*-nets). En effet, si le paradigme « set-théorique » classique en analyse musicale repose finalement sur l'idée

²² 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 (Mazzola 2007 ; Mazzola et Andreatta, 2007) s'appuie sur une paramétrisation temporelle des structures catégorielles, ce qui pourrait avoir à son tour des retombées intéressantes en sciences cognitives.

²³ Viaud-Delmon (2006).

d'un catalogage de l'espace combinatoire des structures de hauteurs (ou rythmiques) présentes dans une partition analysée²⁴, 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 ou bien d'un *K*-réseau s'appuie, en effet, sur une volonté implicite de l'analyste de rendre « intelligible » une logique musicale à l'œuvre dans la pièce analysée.

Cette démarche analytique 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 (1980) et ceux qu'Olivier Houdé appelle les « derniers ajustements piagétiens » dans une approche catégorielle de l'épistémologie génétique (Houdé, 1993)²⁵.

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 (Brown & Porter, 2008 ; Brown & Porter, 2009) 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 développé par René Guitart (2009) à la suite des travaux d'Ehresmann et Vanbremeersch sur les systèmes évolutifs à mémoire, dont nous avons indiqué les liens conjecturaux avec la musique. 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 pouvoir 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.

²⁴ 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. Il s'agit d'une question qui touche directement aux questions philosophiques et esthétiques du rapport mathématique/musique. Voir, par exemple, Amiot (1991) et Hautbois (2006).

²⁵ Voir Acotto et Andreatta (2008).

Références bibliographiques

- E. Acotto et M. Andreatta (2009), « Représentations mentales musicales et représentations mathématiques de la musique », à paraître dans *InCognito, Cahiers Romains de Sciences Cognitives*.
- Agon C., Assayag G., Laurson, M. et Rueda, C. (1999), « Computer Assisted Composition at Ircam : PatchWork & OpenMusic », *Computer Music Journal*, 23(5).
- Amiot, E. (1991), « Pour en finir avec *le Désir* : la notion de symétrie en Analyse Musicale », *Revue d'Analyse Musicale*, N° 22.
- Amiot, E. (2007), « David Lewin and Maximally Even Sets », *Journal of Mathematics and Music* 1 (3), 157-172.
- Andreatta M. (2003), *Méthodes algébriques en musique et musicologie du XX^e siècle : aspects théoriques, analytiques et compositionnels*, thèse de doctorat, EHESS/Ircam.
- Assayag G., H.G. Feichtinger, J.F. Rodrigues eds (2002), *Mathematics and Music, Diderot Forum*, European Mathematical Society, Berlin, Springer Verlag.
- Balzano, G. (1980), « The group-theoretic representation of 12-fold and microtonal pitch systems », *Computer Music Journal*, 4.
- Balzano G. (1982), « The Pitch Set as a Level of Description for Studying Musical Pitch Perception », in *Music, Mind, and Brain*, Manfred Clynes, ed., Plenum Press.
- Bamberger J. et DiSessa A. (2004), « Music as embodied mathematics: A study of a mutually informing affinity », *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 8, 123-160.
- 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.
- Bigand E., Lalitte P & Dowling W. J. (eds) (2009), « Special Issue Music and Language : 25 years after Lerdahl & Jackendoff's DTTM », *Music Perception*, 26 (3).
- Brown R. & Porter T. (2008), « Category Theory and Higher Dimensional Algebra : potential descriptive tools in neurosciences » (online : <http://arxiv.org/pdf/math/0306223v2>)
- Brown R. & Porter T. (2009), « The intuitions of higher dimensional algebra for the study of structured space » (online : <http://www.springerlink.com/content/a280w10813411982/>)
- Carey, N. & Clampitt D. (1989). « Aspects of Well-Formed Scales », *Music Theory Spectrum* 11/2: 187-206.
- Changeux, J.-P., (1983), *L'homme neuronal*, Fayard, Paris.
- Chemillier M. (1990), *Structure et méthode algébriques en informatique musicale*, thèse, Université Paris 7, LITP.
- Chouvel J.-M. (2006), *Analyse musicale. Sémiologie et cognition des formes temporelles*, Collection « Art&Sciences de l'Art », L'Harmattan.
- Cross I., P. Howell & R. West (1983), « Preferences for scale structure in melodic sequences », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9(3).
- Cross I. (1997), « Pitch Schemata », in I. Deliège & J. Sloboda (éd.), *Perception and Cognition of Music*.
- Douthett, Jack (2008), « Filtered Point-Symmetry and Dynamical Voice-Leading ». In: Jack Douthett et al. (eds.) *Music Theory and Mathematics: Chords, Collections, and Transformations*, University of Rochester Press.

- Edelman, G.M. (1989), *The remembered Present*, Basic Books, New York.
- Edelman, G.M. and Gally, J.A. (2001), « Degeneracy and complexity in biological systems », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98, 13763-13768.
- Ehresmann, A.C. and Vanbremeersch J.-P. (2007) *Memory Evolutive Systems: Hierarchy, Emergence, Cognition*, Elsevier, Amsterdam.
- Eilenberg, S. and Mac Lane, S. (1945), « General theory of natural equivalences », *Trans. Am. Math. Soc.* 58, 231-294.
- Forte A. (1977), *The Structure of Atonal Music*, Yale University Press.
- Guitart R. (2009), « Théorie du nouveau », intervention dans le séminaire MaMuPhi, école normale supérieure, 9 mai. Argumentaire de la séance et texte préparatoire disponibles à l'adresse :
<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/MamuPhiXMai09.pdf>
- Jedrzejewski F. (2006), *Mathematical Theory of Music*, Collection « Musique/Sciences », Ircam/Delatour France.
- Junod, J. *Étude combinatoire et informatique du caractère diatonique des échelles à sept notes*, 2008, Mémoire de master atiam, IRCAM/Paris VI, Paris. Disponible à l'adresse :
<http://recherche.ircam.fr/equipes/repmus/mamux/RapportATIAMJunod.pdf>
- Junod J, Pierre Audétat, Moreno Andreatta, Carlos Agon (2009), « A Generalisation of Diatonicism and the Discrete Fourier Transform » in E. Chew, A. Childs, and C.-H. Chuan (Eds.), MCM 2009, CCIS 38, pp. 166, Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag.
- Hagmann, P., Cammoun, L., Gigandet, X., Meuli, R., Honey, C.J., Van J. Wedeen & Sporns, O. (2008), « Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex », *PLoS Biology* 6, Issue 7, 1479-1493. Online: www.plosbiology.org
- Halford G. S. et Wilson W .H. (1980), « A category-theory approach to cognitive development », *Cognitive Psychology*, 12, 356-411.
- Hautbois, X. (2006), *L'unité de l'œuvre musicale : recherche d'une esthétique comparée avec les sciences physiques*, Collection « Art&Sciences de l'Art », L'Harmattan.
- Houdé O. et Miéville D. (1993), *Pensée Logico-mathématique, nouveaux objets interdisciplinaires*, Paris : Presses Universitaires de France.
- Leman M. (1997), *Music, Gestalt and Computing. Studies in Cognitive and Systematic Musicology*, Springer.
- Lerdahl F. (1989), « Structure de prolongation dans l'atonalité », in *La musique et les sciences cognitives*, S. McAdams et I. Deliège (éd.), Mardaga.
- Lerdahl, F. (2001), *Tonal Pitch Space*, Oxford University Press.
- Lerdahl F. et Jackendoff, R. (1983), *A Generative Theory of Tonal Music*, MIT Press.
- Lewin D. (1959), « Intervallic Relations between Two Collections of Notes », *Journal of Music Theory*, Vol. 3, No. 2, 298-301.
- Lewin D. (1986), « Music Theory, Phenomenology and Modes of Perception », *Music Perception*, 3(4), 327-392.
- Lewin D. (1987), *Generalized Musical Intervals and Transformations*, Yale University Press.
- Lewin D. (1990), « Klumpenhouwer Networks and Some Isographies That Involve Them », *Music Theory Spectrum*, 12(1), 83-120.
- Mazzola G. (2002), *Topos of Music*, Birkhauser Verlag
- Mazzola G. (en collaboration avec Yun Kang Ahn) (2008), *La vérité du beau dans la musique*, Collection « Musique/Sciences », Ircam–Delatour France.

- Mazzola G. et Andreatta, M. (2008), « Diagrams, gestures and formulae in music », *Journal of Mathematics and Music*, Vol. 1, No. 1, March 2007, p. 23-46.
- Noll Th. (2008), « Sturmian Sequences and Morphisms: A Music-Theoretical Application », in: Yves André: *Mathématique et Musique. Journée Annuelle de la Société Mathématique de France à l'Institut Henri Poincaré, le 21 juin 2008*
- Peretz I. et Zatorre R. J. (2003), *The cognitive neuroscience of music*, Oxford University Press.
- Pineau M. et Tillmann B. (2001), *Percevoir la musique : une activité cognitive*, L'Harmattan.
- Quinn I (2006), « General Equal-Tempered Harmony », *Perspectives of New Music* 44.2 (2006): 6–50 (Introduction and Part 1); *Perspectives of New Music* 45.1 (2007): 6–65 (Parts 2 and 3).
- Tillmann, B., Madurell, F., Lalitte, P. & Bigand, E. (2005), Apprendre la musique : Perspectives sur l'apprentissage implicite de la musique et implications pédagogiques, *Revue Française de Pédagogie*, 152, 63-77.
- Van Egmond R. & Butler D. (1997), « Diatonic Connotations of Pitch-Class Sets », *Music Perception*, 15(1).
- 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.