Aspects théoriques et computationnels de l'analyse transformationelle

Yun-Kang Ahn

Directeurs de stage : M. Moreno Andreatta, *Chercheur CNRS*
M. Carlos Augusto Agon, *Professeur des universités*

Lieu du stage : IRCAM
Equipe REPRESENTATIONS MUSICALES
4 place Stravinsky
75004 Paris

Résumé

Une nouvelle théorie d'analyse musicale, a vu le jour au cours du XX^e siècle, sous l'impulsion de musicologues ayant recours aux sciences mathématiques et informatiques. Le logiciel *OpenMusic*, développé au sein de l'équipe Représentations Musicales de l'IRCAM et destiné avant tout aux compositeurs, offre de nouvelles possibilités aux analystes qui pourraient alors l'utiliser dans le cadre de leur travail. Le but du stage est de poser les bases d'une implémentation de la théorie transformationnelle sous *OpenMusic* qui permettrait à tout utilisateur de produire des analyses suivant cette nouvelle démarche.

Table des matières

Table des figures

Chapitre 1

Introduction

"Ce qu'il y a de meilleur dans la musique ne se trouve pas dans les notes."
Gustav Mahler

"After silence, that which comes nearest to expressing the inexpressible is music."
Aldous Huxley

Le développement des sciences mathématiques et informatiques a modifié la perspective des compositeurs et analystes qui désormais s'appuient sur les nouvelles technologies dans leur travail. L'IRCAM occupe une place fondamentale dans cette voie et l'équipe Représentations Musicales en particulier en ce qui concerne les problèmes relatifs à la théorie musicale.

Sommaire

1.1 Environnement du stage

1.1.1 Présentation de l'IRCAM

Fondé en 1970 par Pierre Boulez, l'Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique est associé au Centre Pompidou et dispose d'un statut d'association à but non lucratif reconnue d'utilité publique. L'IRCAM est le plus gros centre de recherche scientifique au monde entièrement dédié aux technologies pour la création musicale et accueille une importante population de chercheurs, près de 90 scientifiques. Le propre de l'IRCAM est de susciter l'accueil et la coordination de points de vue scientifiques variés sur le phénomène musical, issus de la physique (acoustique, mécanique), du traitement de signal, de l'informatique, de la psychologie cognitive, de la musicologie. Le mode d'organisation mis en oeuvre à cet effet repose sur une répartition thématique des activités entre équipes spécialisées, chacune d'elles intégrant l'ensemble de la chaîne de travaux correspondant à son domaine : recherche, développement logiciel, contrats et projets extérieurs, diffusion. Ces équipes, qui demeurent en relation étroite et permanente avec le monde des compositeurs en participant directement aux projets de création menés chaque année (375 oeuvres produites depuis 1977), mènent des recherches fondamentales sur les apports des mathématiques, de l'acoustique, de l'informatique et de la physique, appliqués à la création musicale. Certaines d'entre elles, selon la nature de leurs activités, sont intégrées à l'UMR STMS (Sciences et Technologies de la Musique et du Son) Ircam-CNRS. Leurs travaux autour de l'acoustique instrumentale, de l'analyse et de la synthèse des sons, des représentations numériques des structures musicales, du temps réel, de l'acoustique des salles, du design sonore, de la musicologie, des métadonnées musicales et du génie logiciel appliqué au traitement du son suscitent des échanges suivis avec la communauté scientifique internationale. Parallèlement à ces nouveaux éléments d'écriture et de lutherie mis à disposition des créateurs à travers ces recherches, et en étroite synergie avec eux, les terrains d'application sont nombreux. Par ailleurs L'IRCAM propose plusieurs programmes pédagogiques, dont le M2 ATIAM, un cursus d'informatique musicale pour compositeurs, et de nombreux ateliers, conférences, débats. L'IRCAM diffuse également ses activités sous forme de livres et revues, de disques compacts et de CD-Roms.

1.1.2 L'équipe Représentations Musicales

L'équipe Représentations Musicales est spécialisée dans l'étude des représentations symboliques de structures musicales et leurs applications en composition assistée par ordinateur (CAO) et en musicologie computationnelle (théories et analyses musicales à support informatique). Elle mène des recherches et développements sur la représentation symbolique des structures musicales et les langages et paradigmes informatiques adaptés à la musique. Ces travaux mènent à des applications dans les domaines de la composition assistée par ordinateur (CAO) et de la musicologie computationnelle. La réflexion sur les représentations de haut niveau des concepts et des structures musicales, appuyée sur les langages informatiques originaux développés par l'équipe débouche sur l'implantation de modèles qui peuvent se tourner vers la création comme vers l'analyse musicale. Sur le versant création, on a pu constater, depuis que les logiciels en question ont pu être diffusés vers une communauté importante de musiciens, des formes de pensée originales liées à cette caractéristique particulière des supports informatiques qu'ils peuvent représenter (et exécuter) à la fois la partition finale, ses divers niveaux d'élaboration formelle, et ses générateurs algorithmiques. Il est à noter que les oeuvres ainsi élaborées contiennent pour une part leur propre analyse structurelle. Sur le versant musicologique, les outils de représentations et de modélisation permettent une approche véritablement expérimentale qui dynamise de manière significative cette discipline qui recense encore peu de représentants en France.

1.2 Présentation du stage

1.2.1 Cadre théorique

L'évolution de la musicologie lors du siècle dernier a donné naissance à la musicologie systématique, par opposition à la musicologie historique [Adler 1885], reposant avant tout sur une étude de l'évolution de la musique (i.e. le cadre historique de la composition, le genre musical, la vie du compositeur . . .). La musicologie systématique quant à elle s'oriente vers une objectivation de la démarche de l'analyste et fait intervenir des disciplines auxiliaires telles que la psychologie ou bien encore les mathématiques. Elle se pose désormais en tant que science en tentant de formaliser et objectiver les méthodes mises en œvre [Seeger 1977]. Dans ce souci de formalisation, plusieurs théoriciens ont introduit des concepts mathématiques afin de proposer une autre perspective de l'analyse musicale, qui a mené aujourd'hui jusqu'à la théorie transformationnelle.

1.2.2 Travail à réaliser

L'analyse musicale est une discipline qui consiste à étudier une œuvre musicale (traditionnellement une partition) et à produire une réduction de cette partition en une structure significative en vue d'une interprétation de l'oeuvre[1]. Elle fait appel à la notion de segmentation : l'analyste procède à un découpage de la partition en éléments (appelés unités) sur lesquels va se porter son travail. Différentes théories musicales existent afin d'étudier une œuvre et ces différentes théories impliquent également différentes manières de segmenter a priori une partition. Il s'agit de tirer parti du langage de programmation visuelle OpenMusic afin de proposer à l'utilisateur de réaliser sa propre segmentation pour ensuite produire une analyse correspondant à cette segmentation.

Le travail se décompose essentiellement en 3 étapes :

I – Dans un premier temps, il s'agit de se documenter sur la théorie transformationnelle, ses fondements et ses enjeux, avec en parallèle une revue de l'état de l'art des outils d'analyse musicale existants

II – Ensuite la réalisation du module d'analyse transformationnelle se divisera en 2 sections : la partie correspondant à la segmentation de la partition et celle correspondant à la production du résultat.

III – Enfin dans le cadre de l'évaluation, après avoir testé le fonctionnement d'une segmentation et de la production d'une analyse, nous verrons dans quelle mesure nous pourrons reproduire des analyses existantes.

La progression du mémoire suivra donc cet ordre : nous présenterons en premier lieu le contexte préliminaire, en commenant par les fondements de l'analyse transformationnelle. Pour cette section nous allons nous appuyer sur une étude qui offre une analyse détaillée du rôle des modèles mathématiques en musique et musicologie du XX^e siècle[2]. Dans un second temps nous poserons quelques repères en effectuant un état de l'art de la musicologie computationnelle, et plus précisément des outils d'analyse. Une attention particulière sera donnée au logiciel sur lequel le stage sera effectué, OpenMusic. A partir de cette revue, nous nous intéresserons à la démarche de notre travail avant l'évaluation et une ébauche des perspectives de ce travail à court et long terme.

[1] Une autre définition, plus globale, nous est donnée par Ian Bent [Bent 1987] : *L'analyse musicale est la résolution d'une structure musicale en éléments constitutifs relativement plus simples, et la recherche des fonctions de ces éléments à l'intérieur de cette structure.*

[2] Voir [Andreatta 2003].

Chapitre 2

Contexte théorique

"Ce qui joue le rôle primordial dans une théorie, ce sont les relations entre les objets mathématiques qui y figurent, plutôt que la nature de ces objets, et que dans deux théories très différentes, il se peut que les relations s'expriment de la même manière."
Jean Dieudonné

"Moi, j'écris de la musique en LISP."
Marcel Mesnage

Cette partie se divise en 2 sections distinctes : le contexte musicologique et le contexte informatique. La première sera donc consacrée à une revue des bases de l'analyse transformationnelle, nécessaire afin d'assimiler les concepts que nous aurons à implémenter par la suite. La seconde offrira ensuite un état de l'art des outils informatiques d'analyse musicale.

Sommaire

2.1 L'analyse transformationnelle

Cette théorie trouve ses bases dans les travaux antérieurs d'Allen Forte sur la Set Theory [Forte 1973]. David Lewin est la figure de proue de cette nouvelle conception analytique qui étend les possibilités algébriques et le pouvoir d'abstraction dans l'analyse musicale.

2.1.1 La Set Theory

Les règles de base

La Set Theory (littéralement théorie des ensembles mais à ne pas confondre avec la théorie ensembliste des mathématiques) propose un protocole d'écriture sous forme symbolique des collections de notes (accords, agrégats, profils mélodiques, etc.) que l'analyste définit comme ses unités pertinentes au sein de l'oeuvre étudiée. Cette écriture facilite par la suite la mise en relation de ces collections via des concepts ensemblistes (comme l'inclusion et la complémentarité) et algébriques (en particulier autour de la notion de transformation qui apparaîtra encore plus clairement chez Lewin). La notion de « classe de hauteurs »(pitch class) telle que Milton Babbitt l'a introduite en musique à partir de la notion mathématique de « congruence »[Babbitt 1946/1992] est à la base de toute analyse appliquant les principes de la Set Theory. Les classes de hauteurs permettent de représenter les hauteurs de la gamme chromatique via une double simplification : d'une part l'identification enharmonique, qui permet de réduire à douze le nombre d'éléments distincts à l'intérieur d'une octave (Do dièse = Ré bémol, Ré dièse = Mi bémol ,etc . . .), et d'autre part la réduction à l'octave, permettant d'identifier des notes ayant entre elles un rapport d'octave ou de multiple d'octaves (par exemple tous les Do sont équivalents, quelle que soit son octave). Cette notation numérique introduite par Milton Babbitt permet de représenter l'espace tempéré avec les douze entiers des classes de hauteurs, sans établir de relation privilégiée entre la note Do et l'entier 0. Autrement dit, le choix de l'emplacement de l'origine est tout à fait arbitraire. Bien que d'autres théoriciens que Milton Babbitt, en particulier George Perle et David Lewin, ont traité cet aspect et proposé des systèmes à origine variable [movable-DO systems], les analyses basées sur la Set Theory identifient de fa̧on conventionnelle le Do avec l'entier de classe de hauteurs 0.

Une analyse appliquant les principes de la Set Theory commence par la transcription sous forme d'ensemble de classes de hauteurs des groupes de notes considérés comme formant des unités au sein de l'oeuvre étudiée. A la différence d'autres approches analytiques, comme la théorie générative de la musique tonale de Fred Lerdhal et Ray Jackendoff, la Set Theory n'établit pas de critères généraux de « segmentation », qui sont donc laissés au soin de l'analyste. Il s'agit ici d'une des difficultés majeures dans l'application d'outils formels à l'analyse musicale. La généralité des concepts théoriques de la Set Theory contraste avec le caractère « contextuel »d'une démarche analytique qui vise à rendre compte des spécificités de l'oeuvre, un problème qui apporte comme nous le verrons plus loin une distinction entre la Set Theory « classique »et l'approche transformationnelle. Pour mieux visualiser cette approche théorique, nous utiisons les écrits de George D. Halsey et Edwin Hewitt [Halsey Hewitt 1978], deux scientifiques américains, ayant publié lors de la même période que les travaux majeurs d'Allen Forte une étude sur l'énumération d'accords à travers la théorie de l'action des groupes sur les ensembles.. Ils procèdent à une étude systématique des accords dont les propriétés algébriques sont analysées à l'intérieur d'une division généralisée de l'octave musicale en n parties égales, en se pla̧ant donc dans le groupe cyclique Z/nZ, noté également Zn. En prenant n = 12, on se trouve dans le cas illustré sur la figure 2.1 de la gamme tempérée, qui n'est autre qu'une représentation graphique circulaire de la base des conceptions de Babbitt et Forte.

La démarche algébrique par se distingue ici des autres approches formalisées en théorie musicale. En effet traditionnellement, la représentation précède la formalisation,

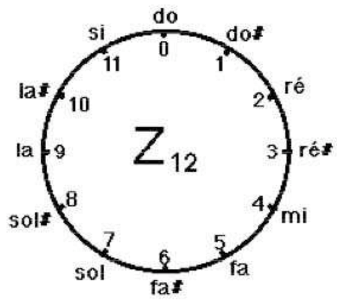

FIG. 2.1 – Le cercle chromatique

au sens qu'on formalise ce qu'on sait déjà représenter. Dans le cas de la démarche algébrique, la représentation circulaire est plutôt le résultat d'une formalisation qui montre la possibilité d'associer de fa̧on naturelle à toute division bien tempérée de l'octave une structure algébrique de groupe cyclique à laquelle on peut appliquer des théorèmes d'algèbre qui permettront d'aboutir à d'autres types de représentations (comme, par exemple, la représentation toroïdale[1]).

Par ailleurs, toujours par une convention inspirée par la réflexion de Babbitt sur le dodécaphonisme, une collection de classes de hauteurs ou pitch-class set, ne tient compte ni de l'ordre ni de la fréquence d'apparition de ses éléments. Ainsi, les diverses écritures du Do majeur 0, 4, 7 (Do Mi Sol sur le cercle), 0, 7, 4, 0, 4, 4, 7 etc. représentent la même organisation de hauteurs, dans ce cas particulier l'accord de Do majeur. Cette représentation permet de formaliser tout accord musical (dans une division de l'octave musicale en un nombre n de parties égales) comme un sous-ensemble d'un groupe cyclique d'ordre n. Tout accord de m notes (distinctes, modulo l'octave) peut donc se représenter d'un point de vue géométrique comme un mpolygone inscrit dans un cercle : la figure 2.2 montre l'accord de Do majeur de 3 notes formant donc un triangle.

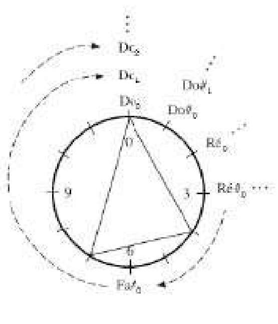

FIG. 2.2 – Un Do majeur dans le cercle chromatique

Cette démarche privilégiant la représentation graphique au simple calcul numérique est entièrement absente des ouvrages de référence de la Set Theory d'Allen Forte (The Structure of Atonal Music), John Rahn (Basic Atonal Theory), Robert Morris (Composition with Pitch-Classes) ou Joseph Straus (Introduction to Post-Tonal Theory), ainsi que des textes plus avancés de théorie de la musique, comme les Class Notes for advanced Atonal Music Theory de Robert Morris. Elle est en revanche couramment employée par

[1]Voir l'article « The group-theoretic description of 12-fold and microtonal pitch systems »[Balzano 1980] et la lecture note « Gruppentheoretische Methoden in der Musik »[Mazzola 1990] .

les théoriciens des systèmes diatoniques [diatonic theory] [Clough Myerson 1985]. En France également, des théoriciens tels qu'André Riotte et Marcel Mesnage ont montré son utilité pour la formalisation des structures musicales ainsi que pour la modélisation informatique de partition [Riotte Mesnage 2006].

La représentation circulaire est aussi utile pour représenter les relations entre hauteurs que les relations entre intervalles. En effet, le concept de « classe d'intervalles »découle directement de la définition de « classe de hauteurs »que nous avons donnée précédemment. Les classes d'intervalles sont les intervalles musicaux classiques représentés numériquement par le nombre de demi-tons qu'ils contiennent. Ainsi, la seconde mineure est représentée par 1, la seconde majeure par 2, la tierce mineure par 3 et ainsi de suite. Comme pour les hauteurs, les intervalles sont exprimés modulo l'octave : le 7 représente donc autant la quinte juste que ce même intervalle augmenté d'un multiple entier d'octaves. C'est pourquoi on parle de « classes »d'intervalles et non simplement d'intervalles et que ces classes sont au nombre restreint de douze, de la seconde mineure à l'octave. Dans la théorie de Forte, une équivalence formelle est établie entre un intervalle et son inverse : les deux font donc partie de la même « classe ». Ainsi, l'intervalle de seconde mineure et son inverse, la septième majeure, sont tous deux représentés par 1, celui de seconde majeure et de septième mineure par 2 et ainsi de suite. Tout ensemble de hauteurs, dès lors qu'il contient au moins deux éléments, délimite un certain nombre d'intervalles auxquels la Set Theory s'intéresse particulièrement.
Il existe plusieurs formes de description des intervalles contenus dans un ensemble. Dans la Set Theory américaine, deux formes de représentations se sont imposées, l'une dans le cadre de l'approche classique, le vecteur d'intervalles de Forte, et l'autre dans celui de la démarche transformationnelle qui est la fonction intervallique IFUNC et que nous verrons plus loin. Nous proposerons également une autre forme, la structure intervallique.

Le vecteur d'intervalle

Le vecteur d'intervalles (ou vecteur intervallique) de Forte permet de décrire les relations d'intervalle. Ce vecteur a six entrées e_i correspondant chacune au nombre d'intervalles de taille i. Prenons un exemple : dans le cas de l'ensemble de classes de hauteurs correspondant à l'accord de Do majeur, le vecteur d'intervalles sera donc [0 0 1 1 1 0] : en effet, on a 0 intervalle d'un demi-ton, 0 intervalle de 2 demi-tons, 1 intervalle de 3 demi-tons (entre le mi et le sol), 1 intervalle de 4 demi-tons (entre le do et le mi), 1 intervalle de 5 demi-tons (entre le sol et le do) et 0 intervalle de 6 demi-tons. On s'arrête à 6 entrées car ce vecteur est défini à une inversion près : dans ce cas (nous reparlerons plus précisément de l'inversion plus loin) un intervalle de 7 demi-tons sera équivalent à un intervalle de 5 (= 12-7) demi-tons. Donc dans le cas où les deux classes d'intervalles sont inverses l'une de l'autre, une seule valeur est recensée.

La figure 2.3 exhibe trois pentacordes présents dans le Klavierstück III de Karlheinz Stockhausen et les vecteurs intervalliques (VI) correpondants. Il s'agit des ensembles de classes de hauteurs suivants : A = 3, 8, 9, 10, 11, B = 5, 8, 9, 10, 11, C = 2, 3, 4, 5, 11.

Les transformations élémentaires d'un ensemble de classes de hauteurs

Les trois formes principales de transformation entre ensembles de classes de hauteurs différents sont la transposition, l'inversion et un dernier que nous n'allons pas décrire (car ne trouvant de pas de ramifications avec la théorie transformationnelle), la multiplication (ou application affine). Deux ensembles de classes de hauteurs sont alors considérés comme apparentés lorsque l'un est le résultat de l'autre par l'une ou plusieurs de ces transformations.

Le concept de transposition utilisé par la Set Theory est le même que pour la plupart des techniques analytiques traditionnelles. Le transposé A' de n demi-tons d'un

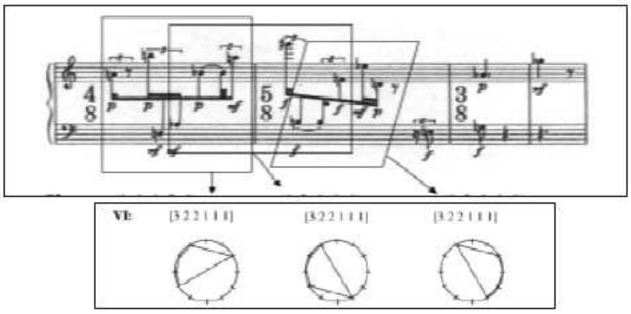

FIG. 2.3 – Trois pentacordes extraits du Klavierstück III de Karlheinz Stockhausen

ensemble de classes de hauteurs A est en effet obtenu en ajoutant n demi-tons à chacune des classes de hauteurs contenues dans A. La transposition est généralement définie en termes de demi-tons ascendants. Cette convention est due au fait que toute transposition d'un ensemble de classes de hauteurs est exprimable, du fait de la réduction à l'octave, en termes d'intervalles ascendants. On peut vérifier aisément que la transposition de n demi-tons descendants d'un ensemble de classes de hauteurs est formellement équivalente à la transposition de (12-n) demi-tons ascendants. Nous pouvons continuer à noter la transposition d'un ensemble de classes de hauteurs avec le symbole Ti, l'indice i indiquant le nombre de demi-tons de l'opération. Géométriquement, cette transformation s'exprime sur la représentation circulaire par une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre (ou anti-trigonométrique) d'un nombre d'unités égal au nombre de demi-tons utilisés pour la transposition. En reprenant l'exemple du Klavierstück III de Stockhausen, on vérifie que le troisième pentacorde n'est rien d'autre que le transposé de six demi-tons du deuxième. On remarque que les trois formes de contenu intervallique sont laissées invariantes sous l'effet de cette opération. Il s'agit d'une propriété générale : la transposition laisse toujours le contenu intervallique d'un ensemble de classes de hauteurs inchangé.

Ce n'est pas le cas de l'opération d'inversion, qui correspond d'un point de vue géométrique à un miroir par rapport à l'un des 12 diamètres du cercle : aux six diamètres différents passant par les couples de classes de hauteurs, il faut ajouter les six diamètres qui représentent des axes de symétries « entre »deux notes. Si l'on note toujours « I »l'inversion par rapport au diamètre passant par les points 0 et 6, toute inversion par rapport à un axe de symétrie sera une combinaison de cette inversion « élémentaire »avec une transposition Tn de n demitons. La figure 2.4 montre comment le premier pentacorde du Klavierstück III peut être transformé en le deuxième via la transformation T7I.

Une combinaison d'inversions et de transpositions laisse toujours le vecteur d'intervalles d'un ensemble de classes de hauteurs inchangé. Forte va pour sa part définir des « familles »via les opérations d'inversion et de transposition. Deux ensembles de classes de hauteurs font partie de la même « famille »lorsqu'ils sont identiques à une transposition ou inversion près : c'est la notion de classe d'équivalence au sens mathématique.

2.1.2 La théorie transformationnelle

Une approche différente consiste à mettre en évidence des relations entre des objets en s'appuyant directement sur la notion de transformation. La place centrale que l'idée de transformation va prendre dans le processus analytique motive l'appellation de « théorie transformationnelle ». à la différence de l'approche de Forte, celle-ci vise à recouvrir entièrement la partition étudiée à travers un enchaînement de transformations d'un ou d'un nombre restreint d'ensembles de classes de hauteurs. Cette forme d'analyse nécessite un outillage formel beaucoup plus abstrait et général. Le grand apport de

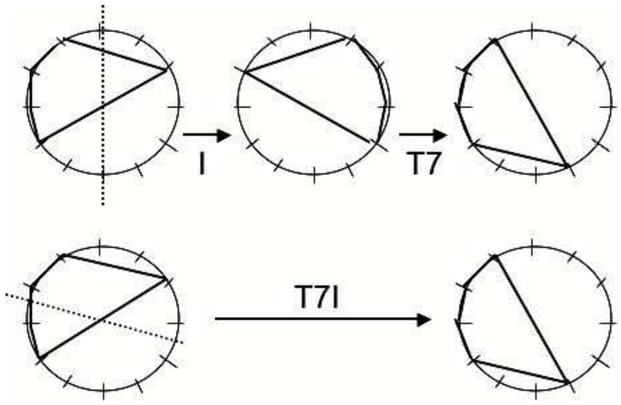

FIG. 2.4 – Composition de 2 transformations

l'approche de Lewin est d'avoir su conjuguer le pouvoir d'abstraction des méthodes algébriques avec la prise en compte du « contexte »à travers lequel émerge la spécificité de l'oeuvre analysée. Parallèlement au vecteur d'intervalle de Forte, la structure désignée pour étudier l'intervalle est ici la fonction intervallique IFUNC.

La fonction intervallique IFUNC

La « fonction intervallique »IFUNC a été proposée par Lewin dans un article paru à la fin des années cinquante [Lewin 1959]. David Lewin est probablement l'un de premiers théoriciens à avoir formalisé le processus de construction d'un système musical indépendant de l'origine, et à avoir analysé ses conséquences sur la notion d'intervalle entre classes de hauteurs. Il s'agit en effet d'un concept antérieur à la parution de l'ouvrage *The Structure of Atonal Music* d'Allen Forte ainsi que de l'article qui fonde la théorie des ensembles (complexes) en musique.

La fonction intervallique peut être définie pour un ensemble de classes de hauteurs ou bien pour des ensembles différents. Dans le premier cas, les classes d'intervalles recensées sont toutes celles définies entre une classe de hauteurs donnée et les autres classes de hauteurs contenues dans l'ensemble. Ainsi, l'ensemble de classes de hauteurs 0, 4, 7, correspondant à l'accord de Do majeur, délimite six classes intervalliques : 4, 7, 3, 8, 5 et 9 (respectivement de 0 à 4, de 0 à 7, de 4 à 7, de 4 à 0, de 7 à 0 et enfin, de 7 à 4). On remarquera que deux classes de hauteurs délimitent entre elles deux classes d'intervalles dont l'une est l'inverse de l'autre. En effet, l'intervalle allant de 0 à 4 correspond à la classe d'intervalle 4, celui entre 4 et 0 à la classe d'intervalle 8. à la différence de l'équivalence formelle introduite par Forte entre une classe d'intervalles et son inverse, la fonction IFUNC recense les deux occurrences séparément. Le résultat de ce « recensement »est ensuite écrit sous la forme d'un vecteur contenant douze entrées. La première, notée IFUNC(0), indique le nombre de classes d'intervalles 0 (c'est-à-dire le nombre d'unissons ; notons que cette valeur correspond à la cardinalité de l'ensemble, c'est-à-dire au nombre de ses éléments). La seconde, IFUNC(1), indique le nombre de secondes mineures et ainsi de suite jusqu'à la dernière entrée, IFUNC(11), qui indique le nombre de classes d'intervalles 11 (septièmes majeures). Dans le cas de l'accord de Do majeur, on aura donc le résultat suivant : IFUNC $= [300111011100]$.

La définition précédente se généralise facilement dans le cas de deux ensemble de classes de hauteurs différentes. Soient A et B deux collections de notes. Pour tout intervalle i entre 0 et 11, IFUNC$(A, B)(i)$ détermine le nombre de couples de notes (a, b), avec a et b respectivement dans A et B, pour lesquelles l'intervalle entre a et b est égal à i. Par exemple, considérons les deux hexacordes mutuellement complémentaires H=0, 1, 2, 5, 6, 8 et H'=3, 4, 7, 9, 10, 11. Si l'on calcule IFUNC dans le cas des deux ensembles de classes de hauteurs précédents H et H', on obtient le résultat suivant : IFUNC$(H, H') = [034433233443]$. Ce vecteur restitue, sous une forme compacte, les douze valeurs obtenues par IFUNC$(H, H')(i)$ pour $i = 0, 1, \ldots 11$. Par exemple, IFUNC$(H, H')(0)$ est égale à 0 car les deux hexacordes n'ont aucune note commune (il n'y a aucun « unisson »entre les éléments des ensembles). Par contre, il est possible de trouver quatre paires d'éléments, le premier élément dans H, le second dans H', qui sont à distance d'une seconde majeure. La valeur apparaissant dans la troisième entrée de la fonction IFUNC est donc de quatre, comme le montre la figure 2.5.

FIG. 2.5 – Une illustration de la fonction IFUNC

Complément : la structure intervallique de Vieru

Une structure intervallique décrit un mode (ou bien un accord)à travers les intervalles consécutifs qui séparent ses différents éléments108. Formellement, une structure d'intervalles permet de représenter tout mode (et donc tout accord d'un système tempéré divisé en 12 parties) avec un m-tuplet (a1, a2, ..., am), tel que a1 soit le nombre de demi-tons entre la première et la deuxième note et ainsi de suite, avec la convention que la somme a1+ a2+. . .+ am soit égale à 12 (plus généralement à n si l'octave est divisée en n partie égales). Par exemple l'accord de do majeur peut être représenté par la structure intervallique (4 3 5), comme le montre la figure suivante (Fig. 2.6) :

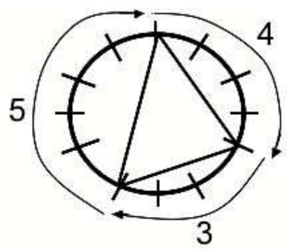

FIG. 2.6 – Représentation circulaire et structure intervallique de l'accord de do majeur

L'approche transformationnelle

Le point de départ adopté par Lewin consiste à définir un cadre conceptuel suffisamment large pour inclure les concepts de base de la Set Theory classique et proposer une généralisation à l'aide d'outils algébriques. Formellement, cette généralisation est obtenue à travers le concept de Système d'Intervalles Généralisés (Generalized Interval System ou GIS), qui peut s'appliquer également comme le souligne Lewin dans des « espaces »musicaux plus généraux, tels que celui des profils mélodiques, des fonctions tonales ou encore des transformations néoriemanniennes. Un GIS est un ensemble d'objets musicaux S, avec un groupe d'intervalles généralisés (que Lewin note IVLS pour InterVaLS) et avec une fonction « intervalle »int qui associe à deux objets a et b dans l'espace S un intervalle int(a,b) dans IVLS vérifiant les deux propriétés suivantes (pour rendre la notation homogène, on indiquera la loi de composition interne du groupe avec le symbole « . ») :

1.Pour tous objets a, b, c dans S : int(a, b).int(b, c) = int(a, c).

2.Pour tout objet a dans S et tout intervalle i dans IVLS, il y a un seul objet b dans S tel que int$(a, b) = i$.

La première partie du principal ouvrage théorique de Lewin [Lewin 1987] est dédiée à l'étude systématique de la structure de GIS. La seconde développe l'analyse transformationnelle en montrant comment des réseaux de transformations construits lors du processus analytique peuvent être formellement ramenés à cette structure abstraite. Une définition introduite par Lewin est la fonction d'injection INJ d'un ensemble de classes de hauteurs A dans un ensemble B par rapport à une transformation f. Elle calcule le nombre d'éléments communs entre B et le transformé de A par f. Formellement, on note la fonction d'injection de l'ECH A dans B (par rapport à une transformation f) de la façon suivante : INJ$(A, B)(f)$. Un exemple d'application de la fonction d'injection dans le cas de trois hexacordes de l'Op. 10 num. 4 d'Anton Webern est montré en figure 2.7. Trivialement la valeur de INJ$(H, H')(T0)$ est égale à zéro. Par contre, quatre éléments sont communs à H' et à la transposition de 2 demi-tons de H. On a donc INJ$(H, H')(T2) = 4$.

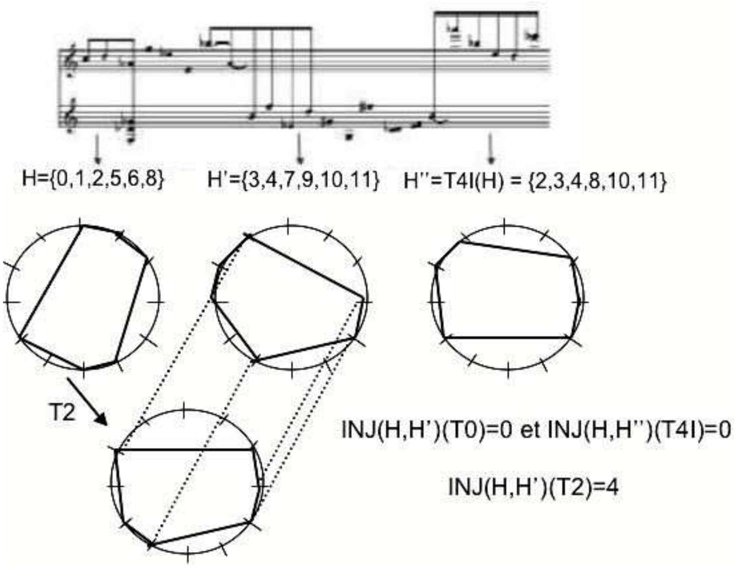

FIG. 2.7 – La fonction d'injection INJ dans le cas des transpositions ou des combinaisons de transpositions et d'inversions

Nous pouvons établir un lien entre la fonction d'injection INJ défini ci-dessus et la fonction intervallique généralisée IFUNC. Nous avions précédemment utilisé les deux hexacordes H et H' pour calculer leur fonction intervallique IFUNC, le résultat étant un vecteur [0 3 4 4 3 3 2 3 3 4 4 3] qui restituait, sous une forme compacte, les douze valeurs obtenues par IFUNC$(H, H')(i)$ pour $i = 0, 1, \ldots 11$. Par exemple, IFUNC$(H, H')(2)$ est égale à 4 car il est possible de trouver quatre paires d'éléments, le premier élément dans H, le second dans H', qui sont à distance d'une seconde majeure (c'est-à-dire en correspondance de la valeur i=2). On observera que la fonction INJ entre les deux hexacordes par rapport à la transposition T2 était également de quatre. Cette observation est vraie dans le cas général. Autrement dit, la fonction d'injection de l'ensemble A dans l'ensemble B pour une transposition Ti est égale à la fonction intervallique généralisée entre A et B pour la valeur i. En suivant la notation proposée par Lewin, on pourra donc écrire : IFUNC$(A, B)(i)$ = INJ$(A, B)(T_i)$.

Le résultat précédent, ayant valeur de théorème valide pour toute forme de GIS, a des conséquences dans le processus d'abstraction conduisant de l'approche classique à l'approche transformationnelle. Comme le souligne Lewin, « on peut remplacer entièrement le concept d'intervalle [. . .] par celui de transposition dans un espace ». D'une manière générale, on peut remplacer le concept d'intervalle par celui d'espace musical abstrait sur lequel « opèrent »certaines transformations. Cette observation constitue le point de départ d'un véritable changement de paradigme par rapport à la démarche de classification de Forte, dans laquelle l'analyse déploie un réseau de relations ensemblistes entre classes de hauteurs. L'analyse prend un caractère « opérationnel »qui consiste à mettre en évidence des propriétés structurelles (et structurales) entre ensembles de classes de hauteurs uniquement en termes de transformation.

Le changement de perspective par rapport à l'analyse ensembliste de Forte est illustré par deux stratégies qualitativement différentes dans la théorie transformationnelle. Dans une première approche, les transformations sont organisées dans un ordre qui reflète le déroulement temporel de la pièce. Cette vision « chronologique »de l'organisation des transformations est appelée « progression transformationnelle ». Dans une approche plus abstraite, les transformations constituent un réseau relationnel au sein duquel il est possible de définir plusieurs parcours distincts. On parlera alors de « réseau transformationnel ». Une analyse transformationnelle est donc une perspective « dialectique »entre la notion de progression et celle de réseau transformationnel. Précisons tout de suite qu'il ne s'agit pas de deux étapes qui se déroulent dans un ordre préétabli. Au contraire, l'intérêt de la démarche transformationnelle proposée par Lewin réside dans le prise en compte parallèle des deux stratégies dans le processus analytique. Nous allons donc étudier ces deux étapes tout d'abord séparément pour ensuite essayer de comprendre quelles formes d'interactions peuvent avoir lieu pendant l'analyse d'une pièce.

Progressions et réseaux transformationnels

La figure 2.8 se réfère à l'analyse par Lewin du Klavierstück III de Stockhausen et montre sa segmentation. La segmentation est obtenue en considérant les différentes transformations d'un pentacorde de base. Ces transformations ne changent pas la nature « ensembliste »du pentacorde, car les cinq formes sont « équivalentes »par rapport à une transposition ou une inversion (ou une combinaison des deux opérations). La segmentation suit le déroulement temporel de la pièce. On parlera donc de « progression transformationnelle ».

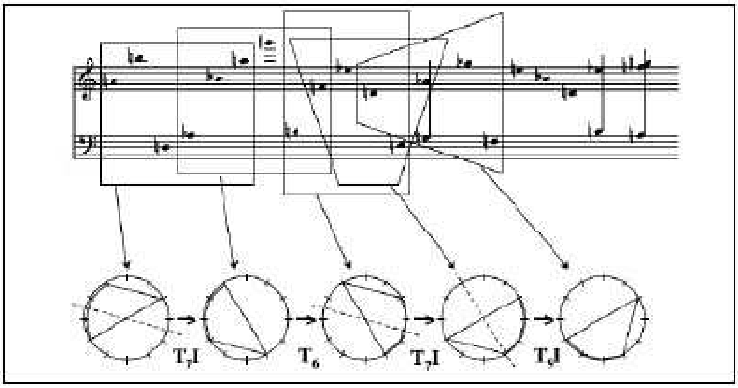

FIG. 2.8 – Segmentation de la pièce par des transformations d'un même pentacorde

Une telle progression donne à chacune des transformations une position bien déterminée dans le déroulement temporel de la pièce. L'analyse reflète ainsi la progression chronologique du pentacorde au cours des premières mesures. à cause des imbrications entre les différentes formes des pentacordes, une telle structuration impose à chacune des transformations un poids (ou « présence », pour utiliser une expression de Lewin) qui semble être contredit par la réception de l'oeuvre (ce sont ici des problèmes d'ordre phénoménologique que Lewin soulève [Lewin 1984]).

Une stratégie différente considère les transformations comme une structuration possible d'un espace abstrait des formes du pentacorde. C'est dans cet espace abstrait qu'on peut envisager d'analyser le déroulement atemporel de la pièce. On désignera un tel espace abstrait avec le terme de « réseau transformationnel ». Pour prendre un cas relativement simple, considérons un réseau dans lequel on cherche à mettre en relation le premier pentacorde de la pièce, qu'on notera P, avec trois de ses transformations : I (P), T6(P) et I (T6(P)). Ce réseau est représenté par le diagramme de la figure 2.9.

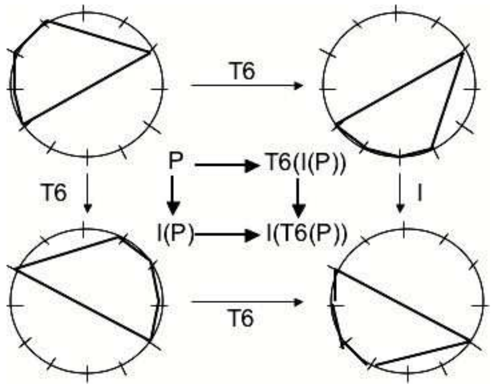

FIG. 2.9 – Un réseau transformationnel entre un pentacorde et trois de ses formes

La cohérence formelle du diagramme provient du fait que les relations entre les deux formes P et T6(P) sont préservées entre leurs inversions respectives. Autrement dit, T6I (P) est à la fois la transposition au triton de l'ensemble I (P) et l'inversion de l'ensemble T6(P). Le lien perceptible entre les différentes formes du pentacorde se reflète ainsi dans la cohérence du réseau. Cependant, l'opération d'inversion, selon sa définition traditionnelle, ne permet pas en général de garantir cette cohérence dans tous les cas. Pour s'en persuader il suffit de considérer la transposition du pentacorde P de 8 demi-tons, c'est-à-dire l'ensemble T8(P) = 4, 5, 6, 7, 10 et son inversion I (T8(P)) = 2, 5, 6, 7, 8. Dans le réseau obtenu, représenté sur la figure 10, les deux inversions I (P) et I (T8(P)) ne conservent pas entre elles la même relation de transposition de 8 demi-tons (Figure 2.10).

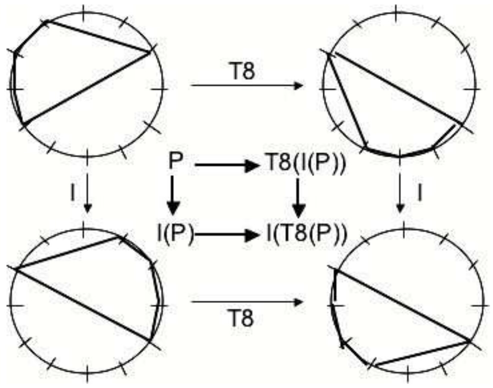

FIG. 2.10 – Un autre réseau transformationnel entre un pentacorde et trois de ses formes

Lewin propose donc d'élargir le concept d'inversion en considérant une famille d'opérations « sensibles »à des aspects spécifiques de l'oeuvre analysée. De telles opérations sont dites contextuelles. Un exemple d'une telle transformation est l'opération d'inversion J transformant un pentacorde (ou ses transpositions) en son inverse tout en gardant inchangées (au sens littéral) les quatre notes qui forment le tétracorde chromatique inclus dans le pentacorde P. La figure 2.11 montre l'effet de l'opération J sur le pentacorde P=2, 8, 9, 10, 11 qui est donc transformé en son « inverse contextuel »p=5, 8, 9, 10, 11, et garde inchangé le tétracorde chromatique 8, 9, 10, 11.

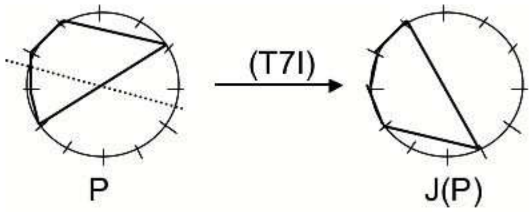

FIG. 2.11 – L'effet de l'opération d'inversion « contextuelle »J

Notons qu'il est toujours possible d'exprimer une occurrence particulière de J en termes de transposition ou d'inversion (ou des combinaisons des deux opérations). L'indice de transposition change cependant selon la position particulière du pentacorde dans le total chromatique. Avec cette nouvelle définition de l'opération d'inversion, un réseau transformationnel du type du réseau précédent est cohérent par rapport à toute opération de transposition du pentacorde de départ. Autrement dit, la relation de transposition entre deux pentacordes P et Tn(P) est conservée entre les deux formes inverses J (P) et J (Tn(P)) pour toute transposition Tn. La figure 2.12 montre le cas pour la transposition de 8 demi-tons.

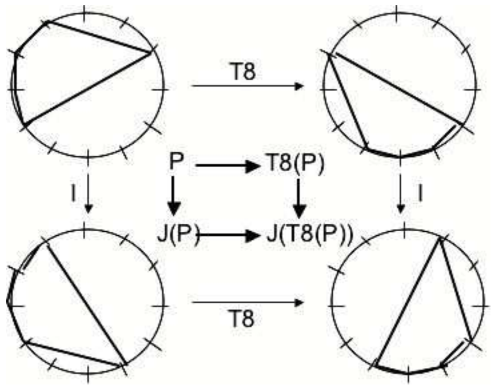

FIG. 2.12 – Exemple de réseau transformationnel cohérent par rapport à l'opération d'inversion contextuelle J

C'est précisément le tétracorde chromatique qui constitue selon Lewin un point d'ancrage pour la perception, un aspect qui n'était pas pris en compte par la série d'inversions utilisée dans le cas d'une progression transformationnelle. Grâce à cette nouvelle inversion, il est donc possible de créer des relations « formelles »entre diverses formes du pentacorde. L'ensemble de ces relations forme un espace de potentialités à l'intérieur duquel la pièce se déroule. à la différence de la « progression transformationnelle », dans un réseau l'organisation des formes du pentacorde n'a aucun lien direct avec leur apparition chronologique. Cette structuration abstraite est néanmoins suggérée et limitée par les transitions effectives dégagées dans la progression temporelle.

La portée du réseau transformationnel

L'analyse transformationnelle du Klavierstück III[2] est sans doute l'étude qui met le mieux en évidence les champs de possibilité envisagés par cette généralisation de la Set Theory d'Allen Forte. Elle implique d'un côté la « construction »d'un réseau d'ensembles de classes de hauteurs mais également, d'un autre côté, l'« utilisation »de cette architecture formelle permettant de dégager de critères de pertinence pour la réception de l'oeuvre et pour son interprétation. Autrement dit, l'intérêt de construire un réseau transformationnel réside dans la possibilité de l'utiliser, à la fois pour « structurer »l'écoute par rapport à la singularité de l'oeuvre analysée mais également pour établir des critères formels qui pourront servir pour aborder le problème de son interprétation.

L'analyse transformationnelle est sujette à discussion dans la communauté de l'analyse musicale. Un point important est cependant à souligner : comme Lewin le montre, les critères de segmentation ne reposent en général pas sur une connaissance préalable des techniques compositionnelles utilisées par le compositeur. En particulier, dans l'analyse du Klavierstück III on aurait pu utiliser une segmentation différente, basée sur des structures de tétracordes au lieu de pentacordes, pourvu qu'on puisse établir un réseau des transformations de ces éléments de base capable de recouvrir intégralement la pièce et d'une faon pertinente par rapport à la perception. Mais toujours selon Lewin, il ne s'agit pas d'établir une théorie de la perception de l'oeuvre à partir de laquelle déduire des critères analytiques adéquats, en ce qui concerne la segmentation et la mise en relation des segments choisis. Cependant, la construction d'un réseau transformationnel est d'autant plus riche de conséquences qu'elle s'appuie sur une volonté de rendre « intelligible »une logique musicale sous-jacente. Dans le cas du Klavierstück III, par exemple, la logique musicale sous-jacente au processus analytique vise à rendre intelligible le réseau relationnel entre les différentes composantes de la pièce.

En outre Lewin discute également la portée « cognitive »de cette approche analytique en se référant aux études de Jeanne Bamberger sur la définition de la notion d'espace musical chez l'enfant [Bamberger 1986]. Lors d'une expérience, les différentes stratégies employées pour arranger des cloches afin d'obtenir une mélodie donnée mettent en évidence deux logiques différentes à la base de la constitution d'un espace musical chez l'enfant. Dans un premier cas, les cloches sont disposées dans l'espace dans un ordre linéaire qui respecte la séquence mélodique. Une telle disposition s'apparente à la progression transformationnelle, approche analytique qui suit le déroulement chronologique de la pièce. Une deuxième stratégie mise en évidence consiste à ne disposer dans l'espace que les cloches qui correspondent à des notes différentes en rétablissant la « logique »de la mélodie à travers un parcours bien défini à l'intérieur de l'espace. C'est une démarche qui s'apparente, évidemment, au deuxième type d'analyse transformationnelle, basée sur les réseaux abstraits[3]. 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. Dans un réseau spatial, les différents événements musicaux « se déroulent à l'intérieur d'un univers bien défini de relations possibles tout en rendant l'espace abstrait de cet univers accessible à nos sensibilités.

2.2 Etat de l'art de l'analyse musicale informatique

L'informatique semble désormais au coeur des préoccupations des musicologues en général et des analystes en particulier. Sans compter les travaux inspirés de théories

[2] Voir [Lewin 1993] pp. 16-67.

[3] Cette articulation entre la notion de progression et celle de réseau transformationnel apparaît notamment dans la pensée logico-mathématique par l'intermédiaire de Jean Piaget ou encore par la lecture de l'approche catégorique par le psychologue Olivier Houdé [Houdé Miéville 1994]

informatiques telles les théories du langage [Chemillier 1987] [Chemillier Truchet 2003] ou les réseaux de Pétri, cette science qui, par définition veut « automatiser l'information »est problématique dans le cadre de l'analyse où interviennent des étapes de choix a priori et de processus subjectifs telles que la segmentation de l'oeuvre. C'est en se référant à ce critère déterminant d'interactivité et de décision laissée à l'utilisateur que nous allons effectuer un état de l'art de l'analyse musicale en informatique et des logiciels d'Analyse Assistée par Ordinateur (AAO), guidant le musicologue qui devra effectuer son choix final (un logiciel d'AAO n'a qu'un but prospectif, c'est à dire qu'il permet de réaliser des formalisations ou des calculs fastidieux), où nous excluons d'emblée les outils de type non-symbolique, c'est-à-dire ne s'intéressant qu'au signal physique (comme le logiciel Audiosculpt développé par l'équipe Analyse/Synthèse de l'IRCAM, analysant les propriétés physiques du signal).

Notre parcours décrira donc les logiciels selon le degré de décision propre à l'homme ; la présence d'une interface graphique représente pour nous le plus haut de degré de liberté vis-àvis de la représentation musicale. Au final, nous décrirons la structure du logiciel OpenMusic sur lequel sera produit notre travail.

L'apprentissage et l'induction

Nous pourrions apparenter cette catégorie au degré le plus bas d'interactivité. L'apprentissage et a fortiori l'induction génèrent une automatisation et limitent l'interactivité puisque seule la machine prendra les décisions de sélection et d'induction des motifs au fur et à mesure du déroulement de la pièce. Seul le programmeur et non l'utilisateur peut avoir un a priori sur le résultat de l'analyse, ce qui classeraient plus ce type d'outil dans les outils d'analyse automatique et non pas d'AAO. Cependant l'apprentissage couplé à l'interactivité peut permettre par exemple, d'améliorer la reconnaissance de motifs similaires. L'apprentissage a été utilisé par David Cope [Cope 1991] [Cope 1997] pour la conception du logiciel EMI. Ce logiciel se propose d'apprendre le style d'un compositeur, en vue de composer une oeuvre dans le même style : il existe donc une phase d'analyse préalable afin de reprendre les oeuvres du compositeur et de les reproduire, utilisant des fonctions d'apprentissage de similarités.
Cypher est un logiciel développé par Robert Rowe (Sound and Music Computing '04 Improvisation With Computer Workshop) dont le principe d'interagir avec un musicien, via le format MIDI, dans le but d'improviser ou composer de la musique. Son architecture s'inspire des travaux de M. Minsky [Minsky 1986]. Les événements musicaux sont captés et analysés à l'aide d'agents spécifiques (registre, dynamique, densité, vitesse, etc. . .), connectés entre eux. Le résultat de l'analyse, fondée sur une approche connexionniste est la tonalité (le cadre harmonique) du morceau qui vient d'être joué, que ne peut influencer l'utilisateur (Figure 2.13).

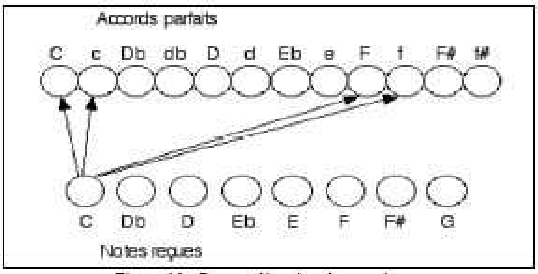

FIG. 2.13 – Réseau d'analyse harmonique

En outre le programme Kanthume développé par Olivier Lartillot dans le cadre de sa thèse se concentre sur un système d'analyse suivant un modèle cognitif d'induction

[Lartillot 2002]. Ce modèle, développé sous OpenMusic (que nous présenterons plus loin), se base sur l'analyse motivique, telle que Reti l'avait proposée [Reti 1951/1978]. L'application de contraintes cognitives, telles que la taille de la mémoire à court terme ou la sélection des motifs (afin de limiter la combinatoire) est couplée à un mécanisme d'induction permettant de reconnaître et de faire des liens avec les motifs entendus. Ainsi à partir d'une partition, (une représentation symbolique donc) le logiciel devrait, en l'examinant dans l'ordre chronologique, découvrir des motifs musicaux et tisser des liens entre ces motifs. Cette analyse en outre a lieu dans l'ordre chronologique de la pièce puisque se basant sur le modèle de l'écoute humaine. Kanthume contourne l'écueil d'une analyse sur laquelle l'utilisateur n'a aucune emprise en proposant une modification des paramètres d'induction, qui débouchera sur des analyses différentes. L'interprétation du résultat est alors laissée à la charge de l'utilisateur qui peut s'appuyer sur différentes analyses de la même pièce musicale.

L'interactivité utilisateur-logiciel

Certains logiciels se proposent de laisser libre choix à l'utilisateur afin qu'il puisse produire sa propre segmentation, ou un type de résultat d'analyse particulier. Le programme Tonalities[4] se base sur les fonctionnalités d'Excel pour représenter la partition sous la forme d'un tableur. L'utilisateur peut ensuite effectuer sa segmentation et le logiciel se charge de trouver les accords qui composent la structure de l'oeuvre. Il est à noter qu'une grande part de décision, mis à part la segmentation, est laissée à l'utilisateur qui peut décider la tonalité de base de l'oeuvre ou insérer ses propres accords, ce qui laisse une marge de décision plus importante que dans le cas de l'apprentissage/induction.
Humdrum[5] est un logiciel d'aide à la recherche en musique, crée par David Huron en 1994. C'est un outil destiné à la musicologie systématique, permettant de tester et vérifier des hypothèses formalisables en musique (mais aussi tout type d'objet pouvant être représenté dans le format Humdrum, avec une syntaxe particulière). En effet, Humdrum, de par son niveau d'abstraction élevé, peut manipuler un nombre de représentations illimité, et peut transformer, classer, rechercher, restructurer, comparer. L'analyse s'effectue à partir de fonctions qui vont des fonctions de manipulation des données au pattern matching en passant par l'analyse tonale ou sérielle. Ces fonctions s'implémentent directement sans aucune méthode heuristique, inductive ou encore d'apprentissage. On atteint ici un niveau d'abstraction élevé puisque par exemple la fonction de détection de motifs se base sur les expressions régulières. Cette présence de fonctions génériques prolonge notre remarque antérieure sur le fait que ce logiciel peut s'appliquer à une autre structure que la musique, pourvu que la syntaxe Humdrum soit respectée. Le logiciel souffre d'un défaut majeur pour le rendre accessible aux musicologues qui est l'absence d'interface graphique. Tout doit être effectué en mode console Unix.

Vers l'interface graphique

Une interface graphique reste le meilleur moyen de visualiser la segmentation ainsi que ses effets produits. Du reste la création musicale assistée par ordinateur également place la représentation graphique au coeur des problèmes de processus compositionnels [Dahan 2005].

1. Le Musicoscope : Le Musicoscope (non disponible au public) est un logiciel d'analyse musicale écrit en Macintosh Common Lisp par Marcel Mesnage. Il résulte de l'intégration des anciens programmes Musinote et Morphoscope. Musinote permet à l'utilisateur de créer et modifier une partition via une interface graphique. Ensuite, Morphoscope récupère le fichier au format de Musinote et l'utilise pour construire sa structure de données interne, le muage, néologisme basé sur musique et nuage, liste de tuples comprise comme une relation n-aire au sens des bases de données relationnelles et qui va représenter les éléments de la partition

[4]http ://www.nottingham.ac.uk/music/research/project_tonalities.php
[5]http ://www.musiccog.ohio-state.edu/Humdrum

comme la hauteur, la durée, l'intensité etc. C'est sur cette structure que va opérer l'utilisateur. Lors d'une analyse, l'utilisateur peut utiliser les paramètres pré-programmés dans le Musicoscope (comme les fonctions dans le même genre que Humdrum), ou définir les siens. Le Musicoscope comporte une interface graphique qui permet à l'utilisateur de visualiser plus facilement la partition, de choisir les fonctionnalités qu'il souhaite utiliser pour son analyse et surtout de pouvoir segmenter lui-même la partition directement (Figure 2.14). Les résultats des analyses sont sous forme de graphes en mode texte, qui offrent une meilleure lisibilité qu'un résultat numérique. Ces graphes divers peuvent représenter circulairement les ensembles de classes de hauteur ou encore les occurrences des ensembles de classes de hauteur tout au long de la pièce.

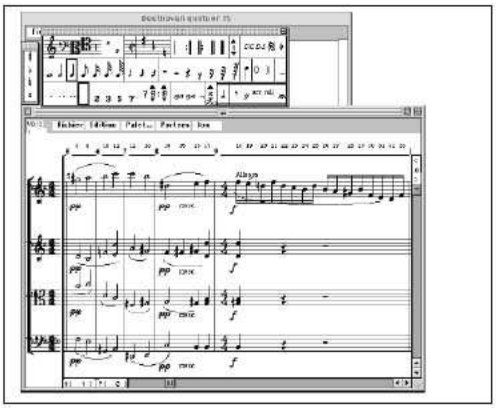

FIG. 2.14 – Interface graphique du Musicoscope

2. OpenMusic : OpenMusic [Agon 1998], à la base outil de Composition Assistée par Ordinateur (CAO), est un environnement de programmation visuelle basé sur le langage de programmation LISP et est adapté à la génération de pièces musicales et de partitions. Plus précisément, a été écrit en CLOS (Common Lisp Object System) et avec Digitool Macintosh Common Lisp. Cet environnement se base sur Patchwork, langage de programmation musicale dont l'absence d'interface graphique a été comblée par OpenMusic. OpenMusic est très répandu parmi les compositeurs du fait de son ergonomie et de son fonctionnement. Le principe de base est que tous les éléments (des fonctions ou des objets) sont représentés par des icônes que l'on manipule graphiquement et que l'on relie entre elles. Le type d'objets musicaux comprend les partitions, les fichiers audio sous format AIFF et les fichiers MIDI. Se basant sur le langage LISP, OpenMusic offre un paradigme fonctionnel : sur la figure 2.15, on voit plusieurs types de fonction sur lesquels les entrées sont symbolisées par les cercles en haut du patch et les sorties en bas. Les 2 fonctions de gauche sont des fonctions vides ; la fonction « random »a 2 entrées et une sortie. En effet, cette fonction prend en entrées 2 nombres et renvoie un nombre au hasard compris entre les 2 données entrées en paramètre.

   L'utilisateur configure ensuite, toujours graphiquement, le traitement que doit opérer le patch, qui représente l'objet fondamental de la structure d'OpenMusic (Figure 2.16). Un patch englobe des fonctions et permet de créer des objets complexes pour structurer la musique.

   OpenMusic fournit également un éditeur de partitions très ergonomique. Jusqu'ici les logiciels d'aide à la composition n'avaient jamais proposé d'interface puissante (Figure 2.17). Initialement conu̧ pour l'aide à la composition, OpenMusic permet d'envisager l'analyse sous l'angle de la reconstitution partielle ou totale d'une oeuvre. La reconstitution d'une oeuvre participe de l'analyse dans la mesure où elle engage la proposition d'un processus formel ou d'un programme informatique à partir de paramètres donnés. Ce type d'approche a été entrepris en premier par

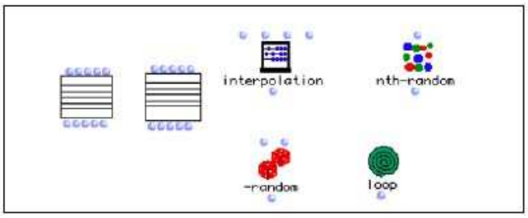

FIG. 2.15 – Différents types de fonctions sous OpenMusic

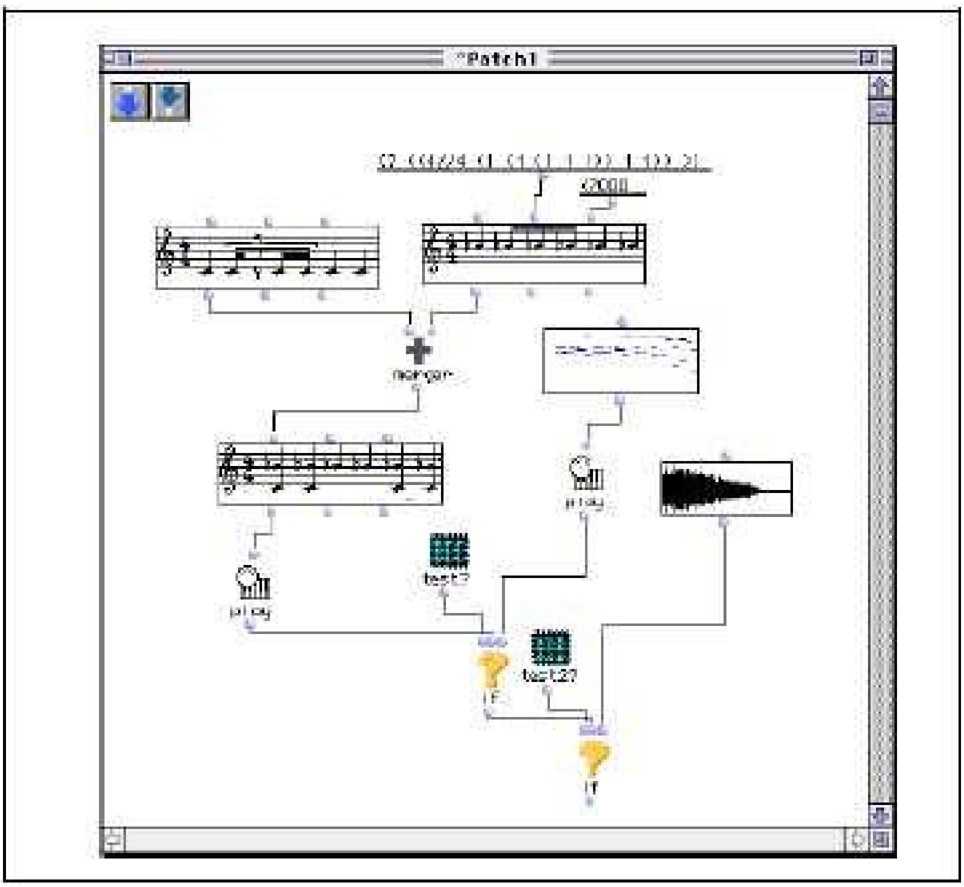

FIG. 2.16 – La programmation d'un patch

Marcel Mesnage et André Riotte [Mesnage Riotte 2003] [Riotte Mesnage 2006] et a été rendu possible par les formalisations explicites effectuées par le compositeur. Xenakis a détaillé le processus de composition d'oeuvres telles que Herma ou Acchorripsis, ou encore des fichiers informatiques conservant le travail de compositeurs, comme Magnus Lindberg et Gérard Grisey ayant travaillé sous Patchwork. Cette reconstruction d'oeuvres sous OpenMusic est parfaitement illustrée par le modélisation de Nomos Alpha de Xenakis[Agon Andreatta Assayag Schaub 2004].

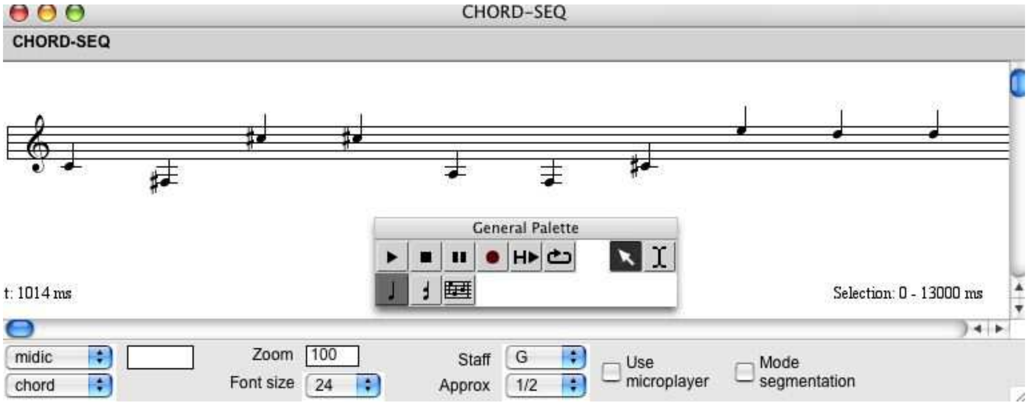

FIG. 2.17 – L'éditeur de partitions sous OpenMusic

En outre, certains paradigmes algébriques de la Set Theory ont été implémentés sous OpenMusic par Moreno Andreatta dans le cadre de sa thèse [Andreatta 2003]. La figure 2.18 montre comment la representation circulaire a été implémentée au moyen de l'objet « circle »qui permet de choisir un groupe cyclique (pour les notes de la gamme traditionnelle Z/12Z mais on peut très bien changer la division du cercle) et de passer de la representation géométrique d'un accord à l'accord lui-même et vice-versa.

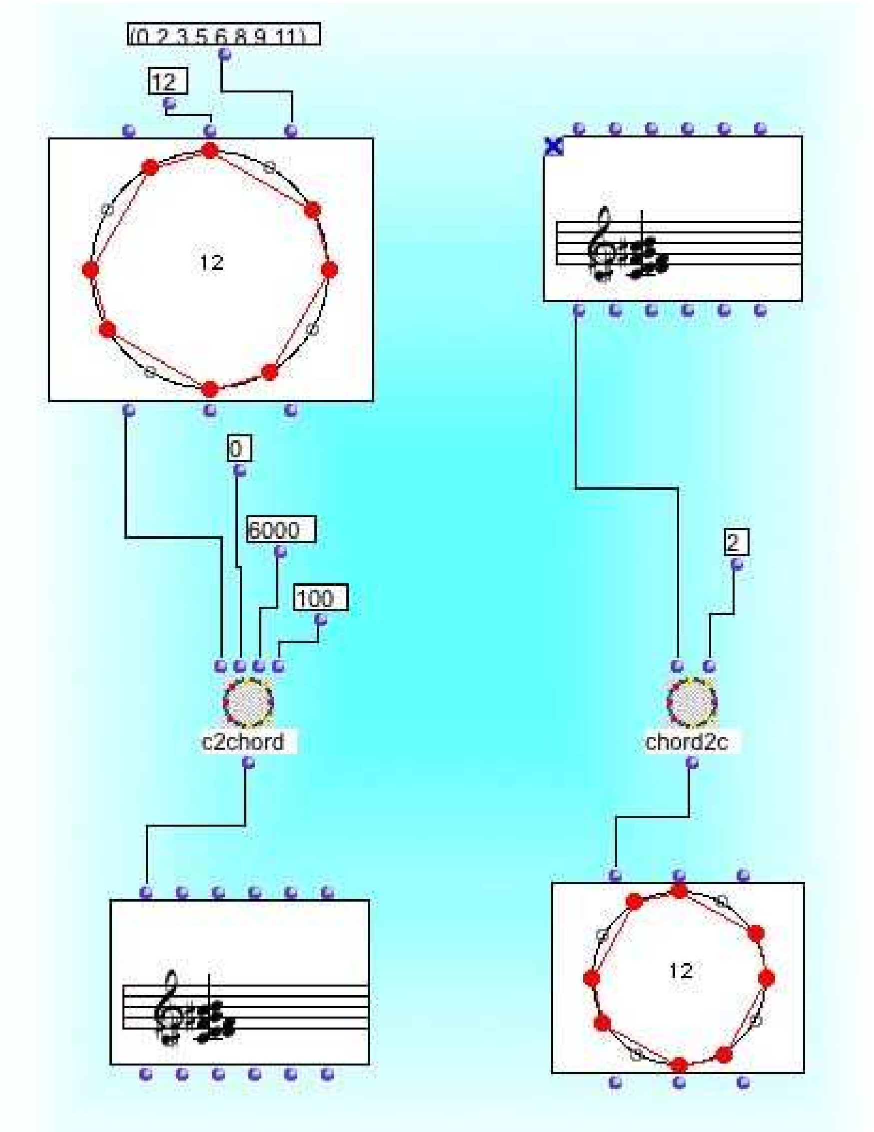

FIG. 2.18 – De la représentation circulaire à l'accord et vice-versa

Chapitre 3

Realisations

"Computer science is no more about computers than astronomy is about telescopes."
Edsger W. Dijkstra

"[Les ordinateurs] sont inutiles. Ils ne donnent que des réponses."
Pablo Picasso

Nous montrons ici les implémentations effectuées sous OpenMusic qui se séparent en 2 parties distinctes : la partie relative à la segmentation et celle concernant les opérations en jeu dans la théorie transformationnelle. Etant donné que nous travaillons sur un logiciel existant sur lequel viendra se greffer notre travail, ces implémentations feront l'objet de contraintes parmi lesquelles l'architecture du programme occupe une place prépondérante.

Sommaire

3.1 OpenMusic et l'architecture Model-View-Controller

OpenMusic est basé sur le modèle MVC (biblio ?), schéma de programmation qui prend en compte toute l'architecture d'un programme et classe les différents types d'objets selon trois catégories :

– Les objets "View", représentation visuelle du " Model " : Les objets "View" sont la vue de l'application, l'interface avec laquelle l'utilisateur communique. Ces objets ne permettent pas la gestion ou le stockage des données puisque aucun traitement ne doit être effectué dans cette partie mais permettent lÕaffichage des résultats provenant des objets "Model" et s'assurent que ces données sont correctement affichées. Les objets "View" n'ayant pas de contact direct avec les objets "Model", ils sont notifiés des changements par l'intermédiaire des objets "Controller".
– Les objets "Model", représentation logique de l'interface utilisateur : Les objets "Model" représentent les données de l'application (les bases de données en faisant partie) et définissent la logique de manipulation de ces données. C'est dans cette partie que vont s'effectuer les traitements, on ne s'occupe absolument pas de la mise en forme mais bien des données seules. Dans une application respectant les règles du modèle MVC, les données les plus importantes seront contenues dans les objets "Model".
– Les objets "Controller", gérant l'interaction avec l'utilisateur : Les objets "Controller" vont gérer l'interaction entre les objets "View" et les objets "Model". Les objets "Controller" re̥oivent les requêtes utilisateur puis détermine quelles parties des objets "View" et "Model" sont requises. Les objets "Controller" constituent donc l'intermédiaire entre les deux autres types d'objets comme représentés ci-dessous.

Ainsi tous les objets musicaux possèdent une défintion structurelle et une définition graphique. Par exemple une note est définie par l'objet *note*, qui contient les informations relatives à sa hauteur, sa durée, son intensité. . .. Il existe en parallèle un objet *grap-note* qui lui est consacré à l'affichage graphique de cette note et qui lui contient son positionnement dans l'espace, sa taille, sa couleur. . .. On sépare donc la note (le modèle) et son représentation graphique (la vue), ces 2 entités étant reliées par des fonctions et méthodes constituant donc le contrôle. A chaque événement se déroulant pendant l'utilisation du logiciel (un clic de l'utilisateur, un zoom, etc.) l'affichage graphique est remis à jour.

3.2 La segmentation

Une segmentation de la pièce correspond à un découpage de la partition en régions, chaque région contenant un ensemble de notes. Nous définissons 2 types de segmentation induits par 2 types de création graphique de la part de l'utilisateur :

– La segmentation temporelle : Cette segmentation est créée par l'utilisateur en créant des rectangles, qui composeront les différentes régions. Cette segmentation est dite temporelle puisqu'elle découpe des portions du temps (Fig. 3.1). Nous permettons le chevauchement de régions, ce qui implique qu'une même note peut appartenir à plusieurs régions de la segmentation.

FIG. 3.1 – Une région dans une segmentation temporelle

– La segmentation par objet : L'utilisateur sélectionne une à une les notes qu'il désire afin de créer sa région. Ainsi il peut très bien sélectionner des notes qui ne se suivent pas dans l'ordre chronologique de la partition. Sur la figure 3.2, sont grisées les notes n'appartenant pas à la région créée par l'utilisateur.

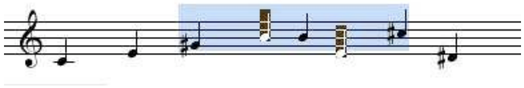

FIG. 3.2 – Une région dans une segmentation par objet

Les régions des 2 segmentations ont la même structure : en effet, elles ne se définissent uniquement que par les notes qu'elles contiennent. Selon l'architecture MVC, cela ne pose pas de problème puisque la partie graphique est indépendante de ce choix structurel. C'est à ce niveau que nous traitons les problèmes de redimensionnement des régions (lors d'un zoom, d'un déplacement de la partition) ou de couleur (dans le cas de la segmentation par objet où nous grisons les notes ne faisant pas partie de la segmentation désirée).

3.3 Les relations opérant sur les ensembles de notes

3.3.1 De la région aux classes de hauteur

Une région contient un ensemble de notes dont il va falloir extraire un format sur lequel nous pourrons travailler. Le paramètre qui nous intéresse ici est la hauteur absolue de la note, au format MIDI. Dans ce format MIDI. Dans ce format, le Do de référence correspond à 6000 et un demi-ton correspond à 100. Ainsi le Do dièse qui suit vaut 6100.

De ce fait, pour obtenir les classes de hauteur il suffit de procéder à une division par 100 de la hauteur puis ensuite de prendre ce résultat modulo 12 pour obtenir la classe de hauteur de la note. Un ensemble de notes sera donc traduit en une liste d'entiers variant de 0 à 11 : par exemple l'ensemble formé des notes Do, Mi et Sol sera donc noté (0 4 7).

Lorsque plusieurs notes sont présentes au même moment (un accord sur une ou plusieurs portées), on crée une sous-liste. Ainsi l'ensemble de notes de la région apparaissant figure 3.3 sera noté (7 (5 9 0) 4).

FIG. 3.3 – Un ensemble de notes : Sol, accord de Fa majeur et Mi

3.3.2 Description des relations

Opérations sur un ensemble

Nous pouvons décrire les 3 opérateurs que sont le vecteur, la structure et la fonction intervallique (en prenant pour ses 2 arguments le même ensemble) à l'aide du format de liste ci-dessus. La figure 3.4 montre le résultat après avoir défini une région contenant les notes Fa dièse, Sol dièse et Si, où nous faisons apparaître le cercle chromatique avec les opérateurs décrivant l'ensemble.

Opérations entre 2 ensembles

Deux ensembles en relation rétrograde sont 2 ensembles avec les mêmes éléments mais dans l'ordre inverse. Le format de liste est donc tout particulièrement adapté à la détection de cette relation.

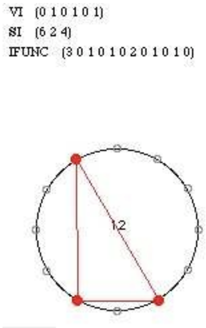

FIG. 3.4 – Une analyse d'une région

Les définitions formelles des opérations de transposition et d'inversion sont les suivantes : Transposer une hauteur x de n demi-tons : $T_n(x) = x + n$
Inverser une hauteur x de n semi-tones : $T_nI(x) = -n + x$

Pour vérifier si 2 ensembles sont en relation de transposition, il faut vérifier que la différence modulo 12 de chaque élément respectif des 2 ensembles soit constante. Cette constante définit alors le numéro de la transposition, i.e. le nombre de demi-tons constituant l'écart de transposition.

Pour l'inversion, il s'agit de la même démarche sauf qu'il ne s'agit plus cette fois de la différence mais de la somme modulo 12.

Nous montrons dans les figures 3.5 et 3.6 la résultat d'un segmentation de deux accords dont l'un est le transposé d'un demi-ton de l'autre. Nous affichons un T1 entre les 2 cercles chromatiques.

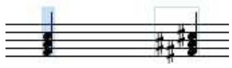

FIG. 3.5 – Deux accords transposés

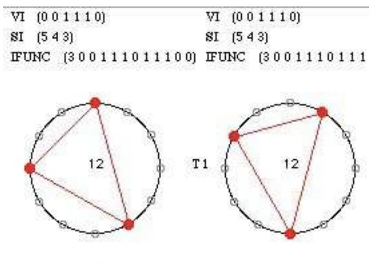

FIG. 3.6 – Le résultat des accords transposés

Chapitre 4

Vers l'implémentation de l'analyse transformationnelle sous *OpenMusic*

"I've never forgotten his advice on the main purpose of any musical analysis : finding out « what the piece is ». No more, no less. The what of the piece, and making sense of it - that seemed to be his goal in analysis. It did not necessarily have to fit some external theory about analysis. I think the composer in David made him that way."
Bruno MacIntyre, à propos des cours dispensés par David Lewin au SUNY Stone Brook

Nous procédons tout d'abord à une évaluation directe de l'implémentation en réalisant une progression transformationnelle, avant de s'orienter vers une analyse semi-automatique du KlavierStück III de Stockhausen à la manière de Lewin. Nous présenterons enfin des esquisses des développements en vue d'un outil complet d'analyse transformationnelle sous OpenMusic.

Sommaire

4.1 Une progression transformationnelle

L'évaluation a déjà été effectuée en partie dans le chapitre précédent où nous montrions le résultat des réalisations. Les figures 4.1 et 4.2 montrent ici une segmentation réalisée sur un exemple et la progression transformationnelle résultante avec les relations entre les régions affichées.

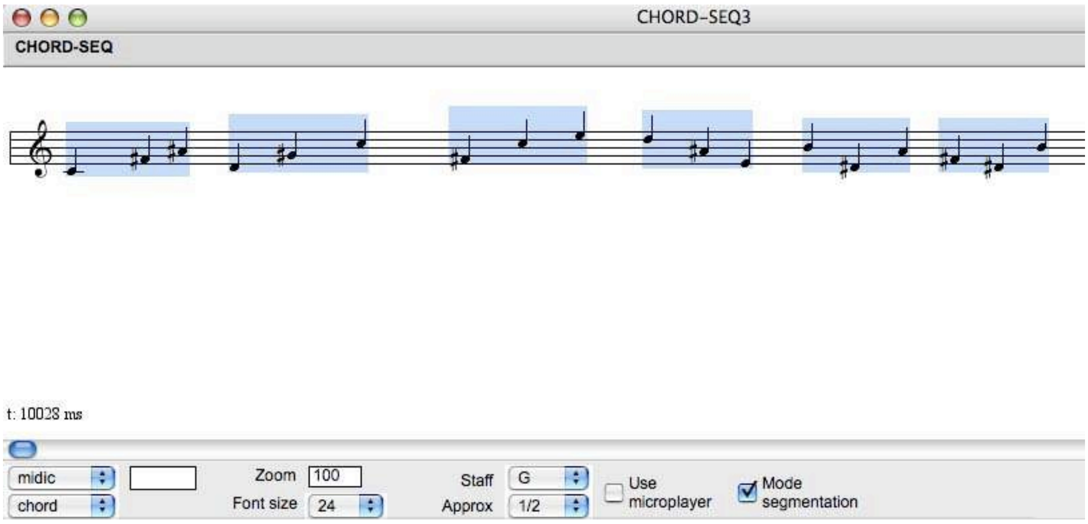

FIG. 4.1 – Une segmentation effectuée

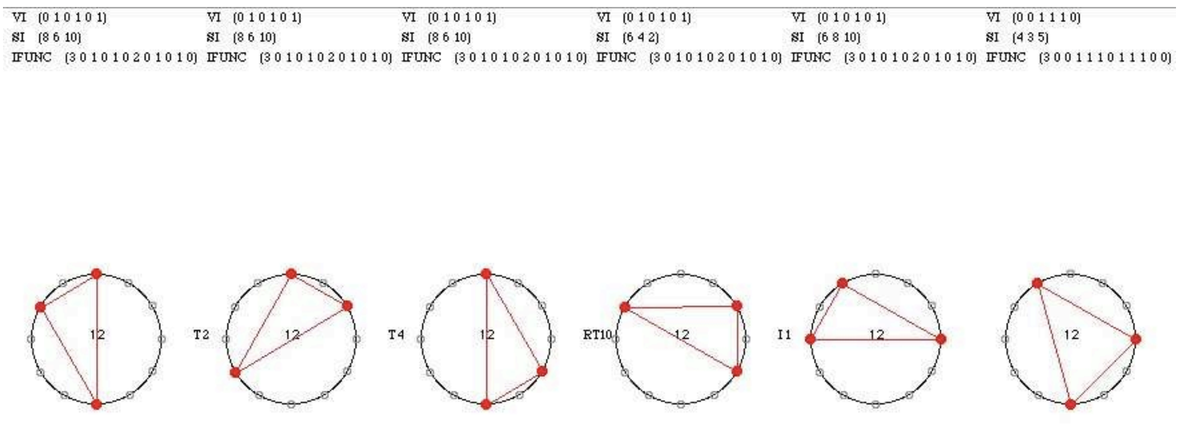

FIG. 4.2 – La progression résultante

4.2 Une segmentation implicite

L'analyse de Lewin du Klavierstücke III met en valeur l'opérateur J qui est une opération contextuelle. Lewin sélectionne un pentacorde et recherche ensuite ses différentes transformations au cours de la pièce. Nous mettons en place une sorte de segmentation qui consiste à sélectionner le premier pentacorde, pour ensuite demander au logiciel de chercher automatiquement ses différentes formes dans la pièce grâce au vecteur intervallique et en vérifiant s'il existe une inversion le pentacorde de base et ceux testés. Nous trouvons une partie du résultat dans la figure 4.3. Nous sommes en plein dans le cadre de l'analyse transformationnelle selon Lewin, qui dépassant le cadre de la Set Theory qui effectue une segmentation et recherche si les régions produites sont en relation les unes avec les autres, s'oriente vers la recherche d'une structure précise se retrouvant dans le reste de la pièce.

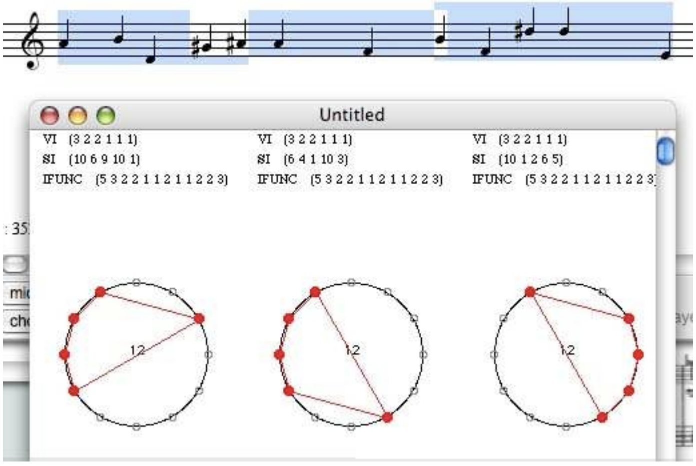

FIG. 4.3 – Une reproduction de l'analyse de Lewin

4.3 Développements futurs

A partir de la progression, il s'agit désormais de construire un réseau. Cependant de nombreuses possibilités existent afin d'articuler une progression autour d'un réseau. Lewin organise un réseau à partir de la progression entière ; nous pourrions également nous intéresser à construire des sous-réseaux à partir de la progression comme le montre la figure 4.4 où nous choisissons 3 cercles précis afin de construire un réseau. Il s'agirait donc de pouvoir déclencher la création de réseaux, ce qui nous conduirait sur les problèmes de graphes. Un contact avec Philippe Gambette, ayant réalisé son stage de Master au LIAFA sur les graphes 2-intervallaires, a notamment été noué dans ce sens en vue de la construction de réseaux transformationnels.

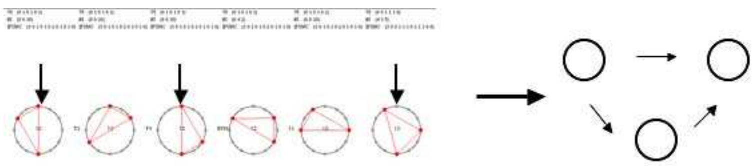

FIG. 4.4 – Une schématisation de la création de réseau

Il reste également à affiner la segmentation vue ci-dessus, où il s'agit de rechercher une structure précise au sein de la partition. Nous nous orienterions vers une analyse croisée à partir de plusieurs structures choisies par l'utilisateur, qui donneraient lieu à différentes segmentations sur lesquelles nous travaillerions en les confrontant.

Chapitre 5

Conclusion

"Là où il n'y a point de musique, il ne saurait y avoir d'âme."
Piotr Ilytch Tchaïkovsky

"The heart is where the music is."
Keith Jarrett

5.1 Remerciements

Mes remerciements iront tout d'abord à mes directeurs de stage : Moreno « Il Bellissimo »Andreatta et Carlos Augusto « El Magnífico »Agon. Pour résumer en une phrase tout ce que je pense d'eux, il suffit de dire qu'ils m'ont donné envie de continuer dans cette aventure humaine qu'est la thèse, que je n'aurais peut-être pas poursuivi sous la houlette d'autres personnes. Merci à Gérard Assayag de m'avoir accueilli au sein de l'équipe Représentations Musicales, dans laquelle je dois remercier en particulier Jean Bresson, qui m'a fait gagner un temps précieux grâce à son aide. Merci donc également aux autres membres de RepMus, et plus spécialement ceux de mon bureau, que je n'ai pas besoin de citer je pense. Merci à mes amis qui ont toujours montré de l'intérêt à mon travail : en premier lieu Philippe Gambette, que je convaincrai un jour d'écouter de la musique qui date de l'après-guerre, le SPIM et en particulier Eric Sadou et Nicolas Rodon, l'IIE et surtout Matthieu Muffato, Ted Hardy, Radouane Laïd et Sylvain Orset sans qui je n'aurais pu suivre le M2 en même temps que l'école d'ingénieur. Merci aux professeurs et aux camarades du M2, merci aux personnes de l'IRCAM qui m'ont donné envie chaque jour de me lever de bon pied pour venir en stage (et donc poursuivre ce travail). Merci aussi aux autres que j'oublie de citer, amis de classes préparatoires, de lycée, etc. . . . Et bien sûr merci à ma famille de me laisser poursuivre ma voie.

5.2 Apports du stage

Ce stage conclut une année marquée par un double cursus, validant à la fois un M2 de recherche et une école d'ingénieurs, le M2 ayant également la particularité d'être pluridiscplinaire. Il s'est parfaitement intégré dans cette double voie, à savoir l'application d'une méthodologie et d'un sens de l'adaptation propre au cursus ingénieur mêlé à une ouverture culturelle et de solides bases théoriques correspondant davantage à une filière universitaire.

5.3 Perspectives

Mis à part les développement futurs cités, nous voudrions souligner les travaux actuels, notamment ceux de Guerino Mazzola en collaboration avec Moreno Andreatta concernant la théorie des catégories, qui représente une direction naturelle pour l'analyse transformationnelle. Ainsi, sans compter le fait que la théorie transformationnelle puisse s'appliquer aux rythmes ou encore aux timbres (par exemple les travaux de Tolga Tüzün, compositeur suivant le Cursus IRCAM), notre outil pourrait à long terme se pencher vers une vision qui ne serait pas uniquement dédiée à la musique et offrir un cadre encore plus abstrait.

Bibliographie

[Adler 1885] G. ADLER. “Umfang, Methode und Ziel der Musikwissenschaft”, *Vierteljahresschrift für Musikwissenschaft*, 1, pp. 5-20, 1885.

[Agon 1998] C. AGON, *OpenMusic : Un langage visuel pour la composition musicale assistée par ordinateur*, PhD thesis, Paris VIII, 1998.

[Agon Andreatta Assayag Schaub 2004] C. AGON, M. ANDREATTA, G. ASSAYAG, S. SCHAUB,”Formal Aspects of Iannis Xenakis' "Symbolic Music": A Computer-Aided Exploration of Compositional Processes“, Journal of New Music Research, vol. 33, n¡ 2, Juin, 2004.

[Andreatta 2003] M. ANDREATTA, *Méthodes algébriques dans la musique et musicologie du XX^e siècle : aspects théoriques, analytiques et compositionnels*, PhD Thesis, EHESS/Ircam., pp 98-108.

[Babbitt 1946/1992] M. BABBITT, *The function of Set Structure in the Twelve-Tone System*, PhD, Princeton University, 1946 (thèse approuvée en 1992).

[Balzano 1980] G. BALZANO, “The group-theoretic description of 12-fold and microtonal pitch systems”, Computer Music Journal, 4, pp. 66-84, 1980.

[Bamberger 1986] J. BAMBERGER, *Cognitive Issues in Development of Musically Gifted Children* (dans [Sternberg Davidon 1986], pp. 388-413).

[Bent 1987] I. BENT, *L'analyse musicale*, Macmillan Press Ltd, 1987.

[Chemillier 1987] M. CHEMILLIER,”Monoïde libre et musique“, RAIRO Inf. Theo., vol. 21, n¡ 3 et 4, pp. 341-371 et pp. 379-417, 1987.

[Chemillier Truchet 2003] M. CHEMILLIER, C. Truchet, “Computation of words satisfying the "rhythmic oddity property" (after Simha Arom's works)”, Information Processing Letters, 86, pp. 255-261, 2003.

[Clough Myerson 1985] J. CLOUGH, G. MYERSON, “Variety and multiplicity in diatonic systems”, Journal of Music Theory, 29, pp. 249-270, 1985.

[Cope 1991] D. COPE, *Computers and musical style*, Oxford University Press, Oxford, 1991.

[Cope 1997] D. COPE, *Techniques of the contemporary composer*, Schirmer Books, New York, London, Singapore, 1997.

[Dahan 2005] K. DAHAN, *Quelques réflexions sur la logique d'interface pour la création musicale assistée par ordinateur*, Université Paris VIII MSH Paris Nord, Actes des Journées d'Informatique Musicales 2005 (JIM 05), Saint Denis, France, 2005.

[Forte 1973] A. FORTE, *The Structure of Atonal Music*, New Haven, Yale University Press, 1973.

[Halsey Hewitt 1978] D. HALSEY, E. HEWITT, “Eine gruppentheoretische Methode in der Musik-theorie”, Jahresber. der Dt. Math.-Vereinigung 80, pp. 151-207, 1978.

[Houdé Miéville 1994] O. HOUDÉ, D. MIÉVILLE, *Pensée Logico-mathématique, nouveaux objets interdisciplinaires*, Presses Universitaires de France, 1994.

[Lartillot 2002] O. LARTILLOT, *Kanthume : un projet d'analyse analogique suivant un modèle cognitif d'induction*, in Actes du 2ème colloque international d'epistémologie musicale, L'Harmattan, ed., 2002.

[Lewin 1959] D. LEWIN, “Re: Intervallic Relations between Two Collections of Notes”, Journal of Music Theory , 3(2), pp. 298-301, 1959.

[Lewin 1984] D. LEWIN,”On Formal Intervals between Time-Spans“, Music Perception, 1(4), pp. 414-423, 1984.

[Lewin 1993] D. LEWIN, *Musical Form and Transformation: 4 Analytic Essays*, New Haven, Yale University Press, 1993

[Mazzola 1990] G. MAZZOLA, *Geometrie der Töne*, Birkhäuser Verlag, 1990.

[Mesnage Riotte 2003] M. MESNAGE, A. RIOTTE, “Modélisation informatique de partitions, analyse et composition assistées”, Les cahiers de l’IRCAM, vol. 3 (1993), pp. 43Ð59.

[Minsky 1986] M. MINSKY, *The Society of Mind.* Simon and Schuster, New York, 1986.

[Reti 1951/1978] R. RETI, *The Thematic Process in Music.* Macmillan Publishing, 1951. Reprinted in 1978 by Greenwood Press.

[Riotte Mesnage 2006] A. RIOTTE, M. MESNAGE, *Formalismes et mod‘eles musicaux*, Collection “Musique/Sciences”(en 2 volumes), Ircam/Delatour France, Paris, 2006.

[Seeger 1977] C. SEEGER, *Studies in Musicology*, University of California Press, 1977.

[Sternberg Davidon 1986] R. J. Sternberg, J. E. Davidson, *Conceptions of Giftedness*, Cambridge University Press, New York, 1986.