

Chapitre 1

Modélisation et simulation du système complexe de perception de structures musicales.

Olivier LARTILLOT¹ & Gérard ASSAYAG²

Résumé :

Nos recherches visent la compréhension des mécanismes de découverte de structures musicales par un auditeur, dans un cadre pluri-disciplinaire articulant étroitement la modélisation computationnelle et les formulations musicologiques, éthnomusicologiques et cognitives. Ces travaux se sont concentrés sur une des opérations les plus élémentaires de l'analyse musicale : la recherche de répétition de séquences musicales, ou motifs. Les tentatives de formalisation explicite des principes d'analyse motivique initiées au cours du vingtième siècle, notamment sous l'impulsion des recherches éthnomusicologiques, n'ont pas abouti à de véritables méthodologies opérationnelles, en raison notamment de la complexité des problématiques en jeu. Le développement de l'informatique, qui offre de nouveaux outils d'objectivation et d'automatisation, rend possible une reprise de cette problématique de recherche sous un jour nouveau. La méthodologie proposée dans notre travaux se fonde sur une modélisation, par un ensemble de programmes informatiques, des processus d'induction automatique de configurations musicales. Est mise en évidence l'existence d'une problématique de redondance combinatoire, qui provient de la définition-même de la tâche de recherche de répétitions motiviques. On pose alors pour hypothèse qu'une telle redondance est implicitement gérée au sein du système cognitif qui fonde aussi bien l'écoute musicale que l'intuition du musicologue. La modélisation tente de reconstituer ces mécanismes de gestion de la redondance, afin d'assurer une convergence de la modélisation informatique avec

¹Université de Jyväskylä, PL 35(A), 40014, Finlande

²Ircam – CNRS, UMR Sciences et Technologie de l'Information Musicale 9912, 01 place Igor Stravinsky 75004 Paris.

les analyses musicologiques. La mise en œuvre informatique d'une telle modélisation d'inspiration cognitive donne lieu à des résultats surpassant, à certains égards, les approches informatiques contemporaines, en raison de la capacité à offrir une description assez claire et pertinente de structures motiviques. Les travaux actuels concernent en particulier l'extension du domaine d'étude aux musiques polyphoniques, ainsi que l'intégration de schémas cognitifs culturels, relatifs notamment à la musique modale arabe improvisée, en interaction étroite avec l'expertise ethnomusicologique cognitive dans le cadre de notre collaboration avec Mondher Ayari et Stephen McAdams.

1.1 Préambule

Le projet de modélisation informatique présenté dans ce chapitre a pour objectif principal d'offrir à la musicologie – et notamment à l'éthnomusicologie – de nouveaux outils permettant une description approfondie des configurations structurelles présentes au sein de chaque œuvre musicale. L'apport de l'informatique est multiple : l'automatisation du processus d'analyse permet en particulier un approfondissement de l'analyse. Cette automatisation implique en outre une formalisation totalement explicite des mécanismes mis en œuvre lors de ces procédures d'analyse, formalisation qui pose de nombreuses difficultés, comme nous allons le constater, et qui, en dépit des nombreuses recherches sur ce sujet (*cf.* par exemple [3][7][26][33][35][37]), n'a pas encore été véritablement achevée. Les processus de découverte de structures musicales présentent en effet une grande complexité, qui nécessite une modélisation la plus soignée et détaillée possible des stratégies cognitives mises en œuvre lors de l'écoute musicale. Il convient en outre de distinguer, au sein de ces stratégies, ce qui relève d'une acculturation à un milieu culturel particulier, de ce qui se fonde au contraire sur des mécanismes de perception élémentaires et innés. La perception de structures musicales est ainsi régie par un certain nombre de stratégies indépendantes en interaction : certaines de ces stratégies sont directement issues de schémas cognitifs culturels, d'autres proviennent de mécanismes élémentaires de détection de groupements de notes. D'où l'intérêt de mener cette tâche de modélisation en collaboration étroite avec les sciences cognitives et l'éthnomusicologie, collaboration qui a pu être initiée dans le cadre de l'A.C.I. « Systèmes complexes en sciences humaines et sociales » financée par le CNRS.

Parmi les mécanismes de découverte qui ne relèvent pas directement de schémas cognitifs culturels peuvent être distinguées deux heuristiques particulières. D'une part, une séquence musicale peut être décomposée en une succession de segments, chaque segmentation étant provoquée par une discontinuité suivant un ou plusieurs attributs auditifs, telle qu'un saut brusque de hauteur, une longue durée ou un silence, etc. (*cf.* par exemple [38][23][37][30][3]). D'autres structures musicales, par contre, émergent en raison de leur répétition au sein de la pièce musicale

[36]. Dans notre approche, nous nous limiterons dans un premier temps à cette simple recherche de répétition, car, comme nous allons le mettre en évidence dans ce chapitre, une telle problématique, malgré son apparente simplicité, soulève de nombreuses difficultés. En effet, les tentatives musicologiques de description motivique détaillée (*cf.* par exemple [32][28][36][31]) ont rencontré des difficultés à démontrer la pertinence des motifs découverts, et se voient également dans l'incapacité d'assurer une exhaustivité de l'analyse, loin s'en faut. C'est ici que la modélisation informatique peut apporter une aide précieuse, en permettant une description précise de l'ensemble des heuristiques de découverte mises en œuvre, et en assurant une mise en application exhaustive de ces mécanismes [22].

Nous allons justifier dans un premier temps la nécessité d'une modélisation informatique de stratégies d'écoute à travers une brève revue critique des réflexions épistémologiques concernant l'analyse motivique. Nous montrerons ensuite pourquoi les tentatives informatiques d'automatisation de cette recherche de répétitions ne parviennent pas à offrir des résultats qui concordent avec les attentes musicologiques. Nous mettrons en évidence en particulier l'existence d'une problématique de redondance combinatoire, qui provient de la définition-même de la tâche de recherche de répétitions motiviques. On pose pour hypothèse qu'une telle redondance est implicitement gérée au sein du système cognitif qui fonde aussi bien l'écoute musicale que l'intuition du musicologue. Une reconstitution de ces mécanismes de gestion de la redondance permettrait alors d'améliorer la pertinence perceptive des résultats.

La mise en œuvre informatique d'une telle modélisation d'inspiration cognitive donne lieu effectivement à des résultats surpassant, à certains égards, les approches informatiques contemporaines, notamment en raison de la capacité à offrir une description assez claire et pertinente de structures motiviques. Ce modèle n'est toutefois qu'une première ébauche d'un système complet d'analyse motivique digne de ce nom, car il ne peut analyser actuellement que des oeuvres musicales suffisamment simples, et ne peut assurer non plus une pertinence totale des résultats. De nombreux mécanismes doivent être pris en compte afin d'intégrer l'ensemble des transformations possibles et d'envisager l'expression musicale dans toute sa généralité polyphonique. Nous prévoyons en particulier d'intégrer par la suite le mécanisme de segmentation par discontinuité auditive ainsi que la modélisation de schémas culturels, notamment issus de la musique improvisée modale arabe, en collaboration avec Mondher Ayari.

1.2 Enjeux et difficultés d'une modélisation informatique.

1.2.1 Automatiser afin d'approfondir l'analyse musicale.

La musique, domaine d'expression aux potentiels de créativité infinis, se décline en une multitude de productions singulières. Il se constitue ainsi un corpus en perpétuel accroissement, dont il n'est pas aisé de produire une vision synthétique. De plus, chaque oeuvre musicale offre une structuration d'une grande richesse. Une telle complexité structurelle résulte d'un acte de création, qui n'est en général pas contrôlé de manière totalement explicite par le compositeur, et encore moins par l'improvisateur : les multiples processus mis en jeu lors du geste créateur jaillissent de manière intuitive et spontanée, sans réelle possibilité de contrôle rationnel total et de formalisation explicite. De même, l'auditeur ne perçoit généralement d'une oeuvre musicale qu'une partie de sa grande complexité structurelle, et ne peut rendre compte de manière explicite qu'une fraction encore plus réduite. C'est une des tâches essentielles de la musicologie d'entreprendre une compréhension et une explicitation de la complexité du phénomène musical par l'intermédiaire de formalisations et de schématisations. La théorie musicale peut guider la démarche analytique, qui se divise ainsi en autant de composantes que de dimensions offertes par la théorie. Malgré tout, l'oeuvre musicale, ne se réduit pas à une simple adéquation à la théorie musicale, mais conserve une part de singularité propre, qui constitue sa richesse essentielle.

Nous nous intéresserons en particulier à l'analyse motivique, qui met en évidence, au sein de chaque oeuvre musicale, un dense réseau de motifs musicaux en étroite interrelation. Rudolf Reti [32] proposa une démarche d'analyse thématique permettant de dépasser les approches musicales traditionnelles généralement réductionnistes en mettant en évidence la richesse des développements thématiques élaborés au cours d'une oeuvre musicale. Ses analyses étaient cependant focalisées sur un seul aspect de ce développement, car elles étaient fondées sur une vision particulière de l'oeuvre musicale, empreinte de l'esthétique propre à son maître Arnold Schönberg, comme entièrement bâtie à partir d'un seul motif germinal. Et même dans le cadre d'un champ d'étude aussi limité, l'analyse peut être difficilement effectuée de manière exhaustive, en raison de la grande complexité structurelle des développements motiviques. Les méthodes d'analyses musicologiques ont pour principal intérêt de rendre explicites les structurations perçues ainsi que les stratégies d'écoute mises en oeuvre. Mais la réalisation manuelle de ces techniques analytiques nécessite un travail fastidieux et rébarbatif, qui peut parfois faire oublier les enjeux perceptifs sous-tendant initialement une telle tâche. Ainsi l'analyse thématique de Rudolf Reti, selon Nicholas Cook [6], « dégénère en un exercice purement mécanique suivant lequel la partition est analysée sans être véritablement

lue »¹. L’informatique peut ici répondre à une telle limitation, car l’automatisation des outils de découverte automatique de structures musicales rend possible une étude exhaustive du problème. Là où les approches manuelles doivent limiter, pour des raisons pratiques, la complexité des mécanismes étudiés², le support informatique permet une étude approfondie de la complexité musicale. Ainsi, l’informatique permet de radicaliser la créativité des procédures de découverte, d’élargir le champ des analyses, aussi bien au niveau intensif du détail des analyses, que celui extensif de la taille du corpus à analyser.

1.2.2 Modéliser afin d’explicitier les mécanismes de découverte.

Une autre difficulté de l’analyse motivique, et de l’analyse thématique de Rudolf Reti en particulier, concerne la justification des heuristiques adoptées. Nicholas Cook, par exemple, a mis en évidence la part importante de subjectivité des analyses de Reti, et a remis en cause en particulier la pertinence objective des stratégies choisies. Dans le sillon de la formalisation linguistique ont été proposées des tentatives de modélisation explicite des stratégies de découverte de structures musicales. La proposition qui a vraisemblablement le plus marqué la musicologie du vingtième siècle s’intègre dans un projet de sémiologie musicale [31] et se fonde sur une méthode dite d’analyse paradigmatique, initiée par les travaux musicologiques du linguiste Nicolas Ruwet [36], lesquels prolongent et systématisent certains principes élaborés par l’éthnomusicologue Gilbert Rouget [34] et reprend une technique d’alignement de séquence proposée par Claude Lévi-Strauss [24]. Ruwet a manifesté la nécessité d’une formalisation rigoureuse et explicite des procédures de découverte de structures musicales, procédures relevant alors d’une approche dite *analytique*. À cette approche s’oppose la démarche *synthétique*, qui consiste en une re-découverte, ou reconnaissance, de schémas musicaux déjà connus. L’auteur défend donc l’urgente nécessité d’une méthodologie analytique entièrement formalisée :

Les analyses musicales, même les meilleures — par exemple celle donnée par Pierre Boulez du *Sacre du Printemps* — ne formulent pas les critères de découverte sur lesquels elles reposent. D’une manière générale, la plupart des traités d’harmonie, de fugue, etc., présentent une situation analogue à celle offerte par les grammaires traditionnelles :

¹[6], p. 114.

²Par exemple, la structure de groupement proposée par Lerdahl et Jackendoff [23], qui a certes donné lieu à une implémentation informatique [37], se fonde cependant sur un nombre limité de règles simples, et sur une structuration strictement hiérarchique des motifs musicaux, ce qui limite la compréhension de la structure musicale.

le modèle est synthétique, partiellement explicite seulement, et entaché de normativisme.¹

L'approche de Ruwet se concentre sur la recherche de répétitions de motifs. Elle se fonde sur un certain nombre d'hypothèses concernant la structure musicale : en particulier, il est supposé que la structure de chaque œuvre musicale est de nature taxinomique : elle se compose d'une hiérarchie stricte de structures à plusieurs niveaux emboîtés les uns dans les autres. Mais la généralité d'une telle hypothèse peut être discutée, notamment dans un contexte ethnomusicologique, car elle ne semble pas pouvoir être vérifiée de manière universelle. Quoi qu'il en soit, si une telle hypothèse est valable, la découverte effective de cette structuration hiérarchique s'effectuerait en prolongement des préceptes de la linguistique structuraliste [16], de deux manières :

- soit « de bas en haut » , par une détermination des unités élémentaires puis un assemblage récursif en unités de niveau supérieur,
- soit « de haut en bas » , par *division* du texte total en grands segments, puis de manière récursive de chaque segment en sous-segments.

L'analyse doit-elle être menée en allant « de haut en bas » ou au contraire « de bas en haut » ? [...] Les résultats des deux types d'analyse, appliqués aux mêmes matériaux, se recouvrent partiellement, mais, comme de toute façon une procédure unique ne peut jamais suffire, l'alternative de deux procédures cesse d'être cruciale : dans la pratique, les deux se mêlent constamment. Bien entendu, il est très utile d'avoir envisagé de façon précise les conséquences de l'emploi de telle ou telle procédure particulière.²

Ainsi, selon Ruwet, *l'organisation intrinsèque de l'œuvre*, supposée exister de manière immanente, *prime sur la procédure de découverte de cette organisation*. La procédure de découverte ne jouerait donc ici qu'un rôle secondaire qui n'influerait pas directement sur les conditions d'existence des structures découvertes. Notre approche, développée dans ce chapitre, soutient la thèse contraire, suivant laquelle c'est la manière d'appréhender la partition qui détermine la structure découverte, laquelle est *produite* de toute pièce durant l'analyse. La manière la plus naturelle et universelle de déterminer cette structure revient alors à appréhender la musique de la même manière que l'écoute, qui procède « de bas en haut » , par découverte progressive des structures élémentaires puis de leur inclusion au sein de structures de niveau supérieur. La démarche de Ruwet procède, au contraire, principalement « de haut en bas » : des répétitions de longueur maximale sont d'abord déterminés, formant un niveau I ; puis, des répétitions de tailles plus petites forment des niveaux inférieurs II, III, etc. Or la mise en œuvre d'une telle méthodologie s'avère

¹[36], p. 104.

²*Ibid.*, p. 103.

problématique. D'ailleurs, l'analyse pratique des exemples musicaux destinés initialement à l'illustration de ses principes, par exemple un *Geisslerlied* médiéval¹, ne semble pas suivre précisément les préceptes formalisés au préalable, mais se fonder au contraire sur des stratégies intuitives non-explicitées. En fait, il peut être montré qu'une mise en application rigoureuse de la méthodologie proposée par Ruwet donne lieu à des résultats curieux qui ne correspondent pas aux intuitions des auditeurs, ce qui invalide le modèle [21]. L'informatique peut, ici aussi, offrir un secours précieux. En effet, une *modélisation* informatique – c'est-à-dire la construction, par l'intermédiaire de programmes informatiques et d'algorithmes, de stratégie de découverte de structures musicales – met explicitement et immédiatement en évidence ses capacités et sa pertinence, et peut être aisément validée – ou invalidée – en fonction de son efficacité.

1.2.3 Comment appréhender les structures musicales.

Nous proposons de répondre tout à la fois aux exigences de description précise et exhaustive des structures musicales, d'une part, et de corroboration étroite avec les stratégies d'écoute effectives, d'autre part, par l'intermédiaire d'une automatisation informatique de l'analyse musicale suivant une modélisation des stratégies d'écoute. Cette modélisation sera élaborée sous la forme d'un ensemble complexe de procédures soigneusement déterminées, lesquelles seront appliquées sur chaque œuvre musicale de manière exhaustive. La grande complexité des opérations mises en jeu, que l'on suppose présente au sein du système cognitif gérant l'écoute musicale, pourra être gérée à l'aide de l'automatisation informatique.

On pourrait alors objecter qu'une modélisation des mécanismes de découverte de structures musicales doit pouvoir être fondée sur des critères objectifs, basés sur la structure même des œuvres musicales, et non sur de simples critères subjectifs fondés sur les possibilités d'appréhension des auditeurs, lesquelles s'avèrent d'ailleurs limitées et peu fiables. L'« analyse du niveau neutre » en particulier, clef de voute méthodologique de la sémiologie musicale de Jean-Jacques Nattiez [31], se penche sur les configurations « immanentes » des œuvres musicales, qui, suivant la tripartition élaborée dans le cadre de cette sémiologie, sont supposées exister indépendamment des niveaux *poïétiques* des intentions du compositeur, et du niveau *esthétique* de la réception de l'œuvre par les auditeurs.

Le niveau neutre est un niveau d'analyse où on ne décide pas *a priori* si les résultats obtenus par une démarche explicite sont pertinents du point de vue de l'esthétique et/ou de la poïétique. Ce qui rend neutre ce niveau descriptif, c'est que les outils utilisés pour le découpage des phénomènes [...] sont exploités systématiquement jusqu'à leurs ultimes conséquences, et ne sont remplacés que lorsque de

¹Nous proposerons d'ailleurs une analyse informatique de cette pièce, au chapitre 1.5.3.

nouvelles hypothèses ou de nouvelles difficultés conduisent à en proposer de nouveaux. « Neutre » signifie ici que l'on va jusqu'au bout de l'application d'une procédure donnée, indépendamment des résultats obtenus.¹

Or, dans l'approche de Nattiez, l'analyse du niveau neutre est réalisée sous la forme d'une analyse dite paradigmatique, qui reprend en fait les principes de la méthodologie de Ruwet. Or nous avons montré que cette méthodologie n'est en rien explicite et systématique, mais au contraire fondée en contrebande sur les intuitions du musicologue. En pratique, l'analyse du niveau neutre consiste donc en une segmentation préalable et intuitive du discours musical en unités distinctes, auxquelles seront associées ultérieurement des fonctions. L'absence de critères *a priori* est justifiée par le constat sceptique d'une incapacité de fonder de manière générale une notion de pertinence universelle. Toute spécification *a priori* de la segmentation aurait pour fâcheuse conséquence, selon l'auteur, de restreindre le champ de découverte :

Rappelons seulement que l'écueil du fonctionnalisme linguistique a été de déterminer *a priori* les fonctions, et ainsi, de passer à côté d'un certain nombre de phénomènes qui, pour ne pas répondre à ces fonctions-là, n'en sont pas moins constitutifs de l'objet analysé. Aussi convient-il de ne pas mettre la charrue avant les boeufs et de bien séparer les opérations par lesquelles on identifie les unités et celles par lesquelles on détermine leurs fonctions.²

Là où le fonctionnalisme tente, dans une démarche scientifique, de définir un ensemble de *fonctions constitutives* et de tester leur pertinence par rapport à l'expérience, la méthodologie de Nattiez s'oppose à la modélisation scientifique – qui ne peut, par essence, rendre compte que d'une partie de la réalité – et renonce donc au projet même d'explicitation des critères de découverte.

Il peut être remarqué en fait que la simple définition du concept de motif en tant que séquence de notes contiguës – et non en tant qu'ensemble de notes dispersées çà et là au sein de la partition – provient implicitement de propriétés caractéristiques de l'écoute musicale, fondée sur la mémoire à court terme et sur le mécanisme de rétention [19]. Par exemple, une répétition exacte d'un motif (Figure 1.1a) pourrait être considérée de manière duale sous la forme d'un ensemble de couples de notes (Figure 1.1b), seconde représentation implicitement rejetée par l'intuition de l'auditeur – et du musicologue – en raison de sa non-prégnance auditive. Ceci soutient l'hypothèse suivant laquelle les structures pertinentes d'une œuvre musicale sont reconstruites suivant une stratégie d'appréhension, et non en vertu de propriétés purement mathématiques.

¹[31], p. 54-55.

²*Ibid.*, p. 408.

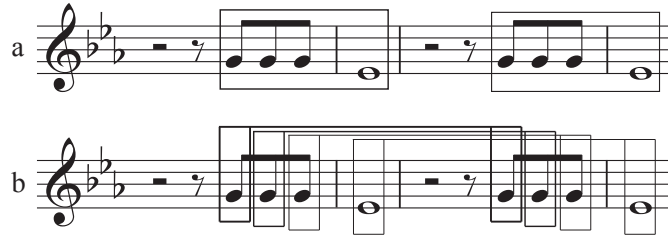


FIG. 1.1 – L'extrait musical présenté est composé d'un motif de quatre notes répété deux fois de manière exactement identique (ligne *a*). Ce même extrait peut tout aussi bien être décrit sous la forme de quatre répétitions d'un motif composé de deux mêmes notes distantes de deux mesures (ligne *b*). Ces deux descriptions sont exactement équivalentes d'un point de vue purement structurel. Cependant, l'intuition musicale, conditionnée par les contraintes cognitives de l'écoute musicale, tend à préférer la description *a*, et à rejeter la description *b*, laquelle ne peut pas être perçue en tant que telle.

Le problème se complique une fois posée la question de la découverte de répétitions approximatives. Comme l'explique Emiliós CAMBOUROPOULOS [2] :

Si la similarité (c'est-à-dire la répétition non simplement exacte) doit être prise en compte, alors l'analyse du niveau neutre devient difficilement maniable car une séquence musicale peut être considérée comme similaire de toute autre séquence musicale pour une raison ou une autre. L'analyse du niveau neutre est utile seulement si elle est guidée par une quelconque heuristique – par exemple, fondée sur des principes d'ordre cognitif.¹

ce qui questionne donc la notion même de « neutralité » , et soutiendrait au contraire l'hypothèse d'une étroite interdépendance entre structure musicale et stratégies de composition et d'audition.

1.2.4 Modéliser les stratégies d'écoute

De prime abord, l'écoute apparaît comme un acte individuel singulier, qui dépend totalement de l'auditeur, de sa volonté, son état d'esprit, son expérience musicale, et des aléas de la psyché. L'écoute offre en effet des représentations variables, pour un même phénomène entendu, et aussi pour un même auditeur : elle diffère en fonction des compétences développées par l'auditeur et de son degré de concentration. Elle ne semble pas garantir un point de vue fiable et solide sur lequel fonder une quelconque systématisation de l'analyse musicale. Elle présente un ca-

¹[2], traduction personnelle, p. 9.

ractère « dynamique »¹ : évoluant au fil du temps, elle saisit de manière implicite et peu contrôlée le flux musical en perpétuelle fuite. Elle n'offrirait ainsi qu'une vision linéaire de la musique, une représentation difficilement accessible, car mouvante et floue, qui ne peut être décrite et extériorisée que partiellement. Le fruit de l'écoute n'est apprécié de l'auditeur, pour une grande part, que de manière purement implicite et émotionnelle. Un grand nombre de jugements opérés lors de l'écoute ne font pas l'objet d'une réelle explicitation, et contribuent à l'établissement d'une sensation générale, intellectuelle et émotive, à la fois complexe et floue. Enfin, la totalité de la représentation offerte par l'écoute à l'instant même du phénomène sonore est éphémère : elle ne perdure que pendant un temps limité dans l'esprit de l'auditeur.

L'analyse, au contraire, est une opération formelle et explicite s'appuyant sur une objectivation de l'expression musicale. Elle serait en mesure d'apporter une compréhension globale, libérée de la contrainte temporelle. L'analyse a d'ailleurs pour intérêt principal de guider l'écoute, de lui offrir une vision plus riche et plus explicite, moins fragmentaire et moins fuyante, du flux musical, de mettre en évidence explicitement et clairement ce que l'on peut percevoir de manière implicite et partielle. L'analyse offre ainsi à l'écoute une béquille lui permettant de se développer davantage au sein du champ de ses possibilités.

Si l'acte analytique semble « figé dans le temps », c'est parce que l'objet de l'étude, ainsi que son résultat, sont tout deux représentés généralement dans un espace figé, centré autour de la partition. Malgré tout, l'analyse à proprement parler ne considère pas l'objet musical d'un seul tout : il le parcourt, d'une manière ou d'une autre. Or l'écoute, quant à elle, bénéficie d'une mémoire, qui lui permet elle aussi de parcourir à souhait le phénomène dans sa forme mémorisée, ainsi que la structuration qu'elle constitue sur ce phénomène mémorisé. L'écoute et l'analyse diffèrent alors par les caractéristiques nettement divergentes de leur mémoire respective : l'une reste infidèle, imprécise et aléatoire, l'autre est explicite, objective et figée. Remarquons alors que, d'un autre côté, la mémoire vivante de l'écoute, malgré tous ses défauts, peut néanmoins s'enorgueillir d'une compétence qui a toujours manqué aux mémoires matérielles de l'analyse : elle est *associative*, et peut faire jaillir à tout moment des relations pertinentes d'analogie entre ses éléments. Et c'est justement un tel manque qui pose problème à l'analyse musicale². Mais l'associativité de la mémoire n'est effectivement mise en œuvre que de manière imprécise et aléatoire. En effet, le rappel de cette mémoire offre une certaine variabilité, en particulier en raison des capacités variables d'accessibilité et d'identification. Une modélisation informatique de la mémoire associative permettra alors

¹[31], p. 73.

²L'analyste engage lui aussi sa mémoire associative lorsqu'il tente de déterminer les structures motiviques émergentes. La vision d'ensemble de la partition semble pouvoir aiguïser les capacités de rappel de l'analyste, qui restent cependant fatalement limitées.

d'en approfondir les potentiels.

L'écoute est donc considérée, en accord avec les hypothèses cognitivistes (par exemple [12][17]), comme un acte cognitif régi par un ensemble de processus formant un système, et présentant des invariances au-delà de son apparente singularité. L'illusion de l'immanence, qui semble avoir aveuglé l'approche structuraliste, ne prouverait-elle pas l'existence de certains automatismes de l'écoute ? Toutes les formes qui semblent immanentes au sein du discours musical sont des structures conçues par le compositeur et perçues par l'auditeur. La trace auditive ou écrite de tels phénomènes ne présente pas de forme en soi, elle n'est qu'un substrat susceptible de provoquer de tels effets. On suppose donc ici que l'écoute n'est pas fondamentalement irrationnelle et singulière, mais semblerait plutôt régie par des mécanismes généraux. L'apparente singularité de l'écoute peut être expliquée par l'importante marge de variabilité de ces mécanismes généraux, notamment les variabilités des capacités de discrimination auditive, de concentration, de mémorisation, mais aussi le savoir et la culture de chaque individu. La singularité de l'écoute individuelle résulte d'un parcours particulier au sein d'un ensemble plus général de compétences potentielles d'écoute. De même, la fluctuation, la non-stabilité et la fugitivité de la représentation offerte par l'écoute peuvent être considérées comme des défauts d'accession à cette représentation potentielle. Nous avons montré que l'analyse musicale a pour mission de mettre en évidence des stratégies d'écoute que l'écoute réelle entreprend de manière partielle et principalement implicite. En un mot, l'analyse musicale est tendue vers une transcendance de l'écoute. Si l'analyse musicale est capable d'une telle transcendance, c'est parce qu'elle tire profit des avantages de l'écriture par rapport à l'écoute : notamment sa spatialité, sa stabilité et son explicité. Mais l'écriture ne suffit pas, car elle présente également de nombreux défauts. D'une part, elle ne met pas en évidence les stratégies entreprises par l'écoute. D'autre part, elle ne dispose pas, contrairement à la mémoire humaine, d'un potentiel d'associativité. Les vertus de stabilité et d'explicité de l'écriture peuvent être attendus également d'une écoute envisagée dans sa totalité potentielle. Une systématisation du potentiel de l'écoute assure la transcendance de l'écoute qu'offre également l'écriture, mais apporte également une seconde transcendance par la réalisation potentiellement totale des mécanismes d'associativité. La systématisation de l'analyse suscite parfois de grandes craintes, en raison du caractère machinal et aveugle d'une telle opération, qui peut provoquer un « effacement de l'auditeur » [6]. Si toutefois cette systématisation consiste, dans l'idéal, en une modélisation de l'ensemble des stratégies d'écoute potentielles, l'auditeur ne se trouve alors plus nié ici, mais intégré au sein d'un vaste ensemble de possibilités. [21]

1.3 Une identification adaptative au sein d'un espace multi-dimensionnel

La réflexion engagée au cours du précédent paragraphe a permis de mettre en évidence la nécessité et l'utilité d'une modélisation automatique des mécanismes cognitifs de découverte de structures musicales. Dans la suite de ce chapitre sont présentés notre proposition de modélisation, ses principes de base, les stratégies sous-jacentes permettant de contrôler certains phénomènes de redondance combinatoire, et quelques analyses musicales offertes par la version actuelle.

1.3.1 Les dimensions musicales

La complexité de la recherche de répétitions motiviques, dans le cadre musical, résulte en particulier de la multiplicité des dimensions paramétriques suivant lesquelles se construit le discours musical. À chaque note est associée une *hauteur théorique* (*do*, *do#*, *ré*, etc.), qui correspond en fait à un degré sur une échelle tonale ou modale. Les hauteurs doivent également être envisagées de manière relative, en fonction des hauteurs voisines, afin de détecter des configurations de hauteurs transposées. Dans une première approche, ces positionnements relatifs peuvent être modélisés sous la forme d'intervalles entre notes strictement successives. Nous envisagerons trois types d'intervalles (Figure 1.2) :

- l'*intervalle diatonique* (*diat*), distance exprimée en degrés sur une échelle tonale ou modale,
- l'*intervalle chromatique* (*chro*), distance exprimée en nombre de demi-tons,
- le *contour* (*cont*), ou simple sens de variation entre hauteurs successives.

Dans le cadre d'une musique métrique, à chaque note est également associée une *valeur rythmique* (croche, croche pointée, noire, etc.) que l'on notera *ryth*. Cette valeur peut être représentée de manière numérique, sous forme d'un rapport de cette valeur à une unité rythmique pré-définie. Dans l'exemple, le dénominateur (8) de la métrique « 6/8 » indiquant que l'unité rythmique est la croche, une noire, valant 2 croches, sera représentée par la valeur rythmique *ryth* = 2. Comme une valeur rythmique représente la durée d'une note avant l'apparition de la note suivante ou du silence suivant, nous pouvons la représenter sous la forme d'une distance temporelle entre ces deux événements.¹

¹Une musique non métrique, par contre, se prête plus difficilement à une description rythmique symbolique. Par exemple, le *taksim* que nous allons tenter d'analyser au chapitre 1.5.2 ne présente pas de contenu rythmique explicite. La transcription proposée par Mondher Ayari offre une description rythmique hypothétique de cette improvisation. Dans notre modélisation, nous avons tenté de quantifier les différentes durées rythmiques en un ensemble simple de durées. Cette solution provisoire ne permet pas d'identifier toutes les répétitions rythmiques. Nous ten-

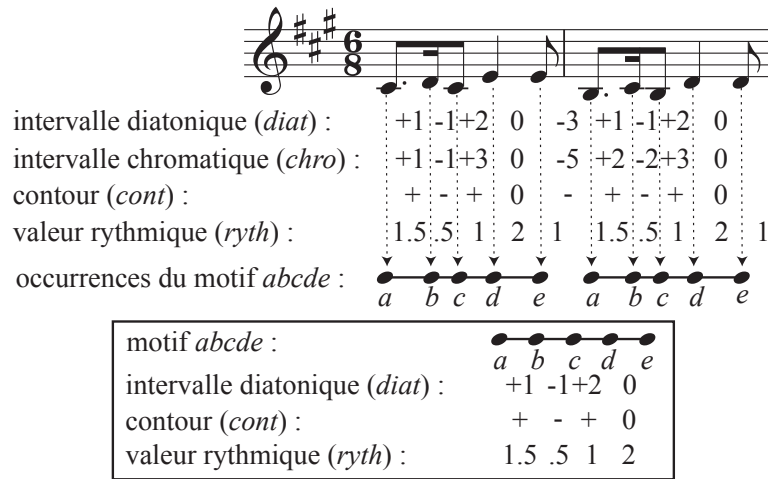


FIG. 1.2 – Description de la partition suivant différentes dimensions musicales. Les deux motifs encadrés sont deux occurrences d’un motif *abcde* de description $diat = (+1, -1, +2, 0)$, $cont = (+, -, +, 0)$ et $ryth = (1.5, 0.5, 1, 2)$.

De cette manière, l’ensemble des paramètres pris en compte dans notre modèle (intervalle de hauteur et valeur rythmique) constituent des distances entre notes successives. Une séquence musicale pourra alors être simplement considérée sous la forme d’une succession d’intervalles, chacun décrit par des paramètres mélodiques et rythmiques. Un motif sera alors défini comme une succession d’intervalles répétée, suivant certains ou l’ensemble des paramètres musicaux, en plusieurs occurrences au sein d’une pièce musicale.

Lorsqu’une suite de descriptions est répétée à divers instants d’une pièce musicale, chacune de ces répétitions sera appelée une *occurrence* du motif que constitue cette suite de descriptions répétée. Le motif pourra être représenté sous la forme d’une chaîne d’états, et les descriptions du motif seront représentées suivant les transitions successives de cette chaîne (Figure 1.2).¹

1.3.2 L’identification de similarités

Les motifs ne sont généralement pas répétés de manière identique mais subissent différentes formes de transformations locales. Pour pouvoir détecter de tels motifs, il est nécessaire de pouvoir identifier leurs différentes occurrences malgré

terons, dans la suite de nos recherches, de modéliser plus finement ce mécanisme d’identification en autorisant des variations rythmiques.

¹L’ensemble des motifs peut ensuite être représenté sous la forme d’un arbre de préfixes, car deux motifs présentant un même préfixe peuvent être considérés comme deux continuations différentes du même motif que constitue ce préfixe.

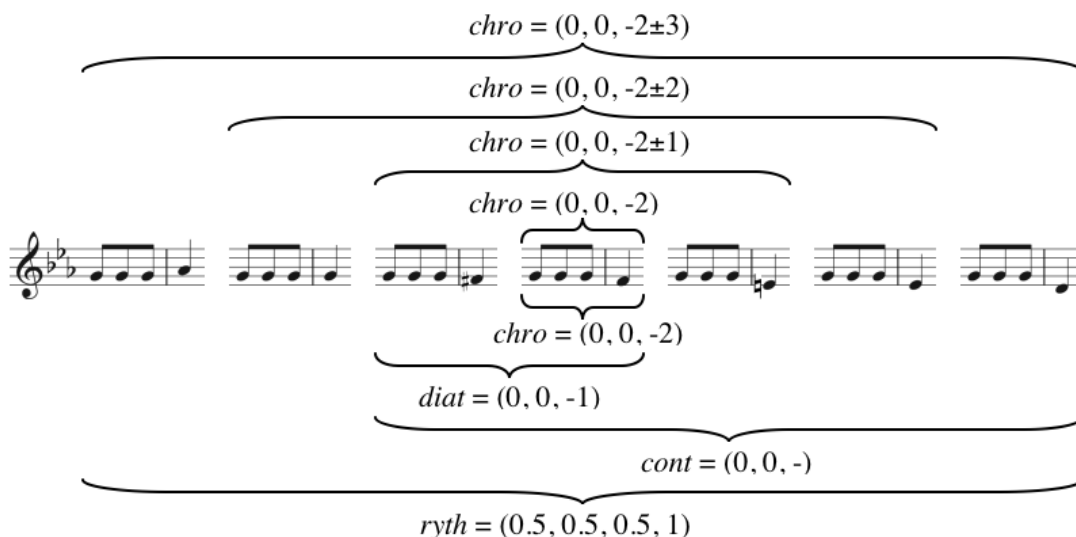


FIG. 1.3 – Deux méthode de classification de motifs : l’une, au-dessus de la partition, basée sur une distance de similarité numérique suivant, par exemple, le paramètre d’intervalle chromatique $chro$; l’autre, en-dessous de la partition, fondée sur une identification exacte le long des différentes dimensions musicales.

l’apparente diversité de chacune d’entre elles. Nous avons mis en évidence au sein des approches contemporaines deux stratégies opposées [20]. Une première méthode, basée sur la notion de *similarité numérique*, consiste à tolérer une certaine marge de dissimilarité entre chacun des paramètres successifs (*cf.* par exemple [7][33]). Toute la difficulté se concentre alors dans la détermination précise de ce seuil de tolérance, question qui ne semble pas pouvoir trouver de réponse générale. Ainsi, dans l’exemple de la Figure 1.3 (partie supérieure), les motifs décrits par la succession d’intervalles chromatiques $chro = (0, 0, -2 \pm 1)$ peuvent être considérés comme similaires au motif décrit par la succession $chro = (0, 0, -2)$, car ils présentent une dissimilarité inférieure ou égale à un degré. Mais les motifs décrits par la succession $chro = (0, 0, -2 \pm 2)$ peuvent eux-aussi, dans un moindre degré, être considérés comme similaires au motif $chro = (0, 0, -2)$, pour une dissimilarité maximale de deux degrés, et ainsi de suite. Il n’existe donc pas de véritable dissimilarité maximale, au delà de laquelle les motifs seraient effectivement *dissimilaires* à $chro = (0, 0, -2)$.

Cette première stratégie est remise en cause par certains travaux de référence en cognition musicale [12], suivant lesquels la similarité ne doit pas être envisagée en terme de minimisation d’une distance numérique, mais fondée au contraire sur une seconde stratégie d’*identification exacte* le long d’une multiplicité de dimensions musicales de divers niveaux de spécificité. Ainsi, dans le précédent exemple



FIG. 1.4 – Répétition d’un motif hétérogène (encadré) : la première moitié de ce motif est mélodico-rythmique (les intervalles diatoniques et valeurs rythmiques sont répétés) et la seconde moitié simplement rythmique (seules les valeurs rythmiques sont répétés).

(partie inférieure de la figure 1.3), le motif $chro = (0, 0, -2)$ peut être inclus au sein de différents groupements suivant les différentes dimensions musicales, tels que $diat = (0, 0, -1)$, $cont = (0, 0, -)$ ou $ryth = (0.5, 0.5, 0.5, 1)$.

Certaines approches informatiques suivent cette seconde stratégie de détection d’identités le long de différents dimensions musicales (*cf.* [5][3][26]), et recherchent des répétitions le long de chaque dimension ou produit de dimensions. Nous avons alors montré l’existence de motifs qui, parce qu’ils sont construits sur une variabilité de dimensions musicales successives, ne peuvent pas être identifiés par de telles approches [20]. Par exemple, chaque ligne de la partition de la figure 1.4 contient une répétition d’un même motif : dans sa première moitié, les paramètres mélodiques et rythmiques sont répétés alors que, dans sa seconde moitié, seuls les paramètres rythmiques sont répétés. La description de ce motif est donc, dans sa première partie, *mélodico-rythmique*, puis, dans sa seconde partie, *rythmique*. Une telle description suivant différents paramètres musicaux successifs sera qualifiée de description *hétérogène*. Notre modèle, contrairement aux approches antérieures, est en mesure de détecter de telles descriptions hétérogènes.

1.3.3 L’algorithme de découverte motivique.

Un motif est découvert de manière incrémentale, par intégration progressive des intervalles successifs le constituant. D’abord est mise en évidence une répétition du premier intervalle du motif (intervalle *ab* sur la figure 1.5). Puis on découvre que certaines (ou l’ensemble) des occurrences de cet intervalle sont suivies d’un même intervalle, qui est alors ajouté au motif (devenant le motif *abc*), et ainsi de suite. Tous les intervalles sont mémorisés au sein de tables de hachage associées aux différents paramètres musicaux. En haut de la figure 1.5 sont ainsi

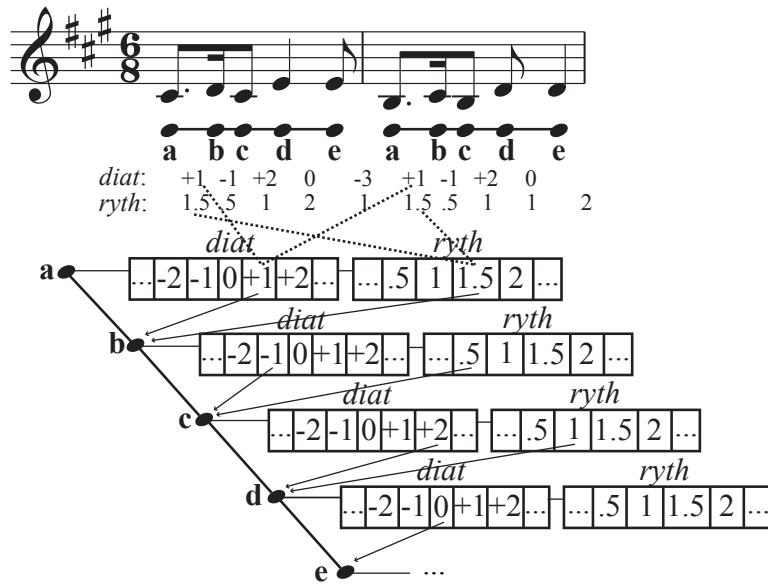


FIG. 1.5 – Construction progressive du motif *abcde* et de ses deux occurrences (sous la partition), par mémorisation des intervalles dans des tables de hachage associées à chaque phase successive du motif.

représentées, à droite du nœud *a*, deux tables mémorisant les paramètres diatoniques (*diat*) et rythmiques (*ryth*) de l'ensemble des intervalles de la partition. Ces tables mettent en évidence par exemple une identité diatonique ($diat = +1$) et rythmique ($ryth = 1.5$) entre le premier intervalle de chaque mesure. Cette identité donne lieu à la création du motif *ab* associé à ces paramètres. Les intervalles succédant les occurrences du motif *ab* sont mémorisés au sein de nouvelles tables de hachage, à droite du nœud *b*. Ces tables mettent en évidence de nouveau une identité diatonique ($diat = -1$) et rythmique ($ryth = 0.5$) entre ces intervalles, laquelle donne lieu à l'extension du motif *ab* en un motif *abc*, et ainsi de suite. Les paramètres musicaux identifiés peuvent différer au fur et à mesure de l'extension progressive du motif. Par exemple, le dernier intervalle de chaque mesure ne s'identifie ici que suivant le paramètre diatonique ($diat = 0$), car la valeur rythmique diffère : noire dans la première mesure ($ryth = 2$), croche dans la seconde ($ryth = 1$). Le dernier intervalle du motif *abcde* est donc associé uniquement à cette description diatonique.

1.4 Le contrôle de la redondance combinatoire

Une mise en œuvre directe de l’algorithme ainsi présenté sur des exemples musicaux, même simples, donne lieu à la découverte d’un grand nombre de motifs, qui ne correspondent pas, pour la plupart d’entre eux, à des structures effectivement perçues, et conduisent à une explosion combinatoire. Cela est dû d’une part au fait que notre approche accepte un nombre important de configurations différentes, notamment une description hétérogène des motifs. Mais il s’avère que les approches algorithmiques actuelles se heurtent elles aussi à de telles difficultés, et proposent de réduire la complexité par l’intermédiaire d’un filtrage des résultats suivant des critères appliqués globalement, tel qu’une sélection des motifs les plus longs ou les plus fréquents (*cf.* [3][4][26]). Toutefois, un tel filtrage ne permet pas d’améliorer la pertinence perceptive des résultats, mais entraîne en revanche leur appauvrissement.

Mes travaux permettent alors de mettre en évidence les causes de ce phénomène d’explosion combinatoire et d’inadéquation perceptive des résultats. En fait, la problématique de recherche de répétition conduit implicitement à certaines formes de redondance, que le système cognitif régissant l’écoute musicale est en mesure de contrôler. Une modélisation informatique de l’écoute musicale se doit alors de reconstruire ces différentes stratégies. Une étude détaillée m’a permis de mettre en évidence une décomposition possible de cette problématique de redondance en un ensemble de sous-problèmes généraux distincts. Sont présentés, dans la suite de cette section, l’ensemble de ces sous-problèmes, et les mécanismes associés que j’ai conçus dans le but de résoudre chaque sous-problème de la manière la plus simple et générale possible.

1.4.1 Une description maximale spécifiquement.

Les suffixes d’un motif ne doivent pas, de manière générale, être représentés explicitement en tant que motifs autonomes, car cela introduirait une importante redondance aboutissant en une complexité exponentielle de la taille de l’arbre des motifs. Un suffixe d’un motif peut être représenté explicitement, par contre, s’il apparaît sous une ou plusieurs occurrences qui ne sont pas des suffixes d’occurrences du motif. Par exemple, le motif aij (Figure 1.6) est un suffixe du motif $abcde$, qui, dans la partie haute de la figure, n’existe qu’en tant que simple suffixe, alors qu’il présente, dans la partie basse, des occurrences qui ne sont pas suffixes d’occurrences de $abcde$. Dans ce deuxième cas, le motif aij peut désormais être représenté explicitement. Ce principe peut être formalisé de manière plus précise en définissant d’une part, la classe d’un motif m , comme l’ensemble de ses occurrences, et en introduisant ensuite la notion de relation d’inclusion entre classe de motifs. La classe du motif $abcde$ et celle de son suffixe aij sont considérées, dans

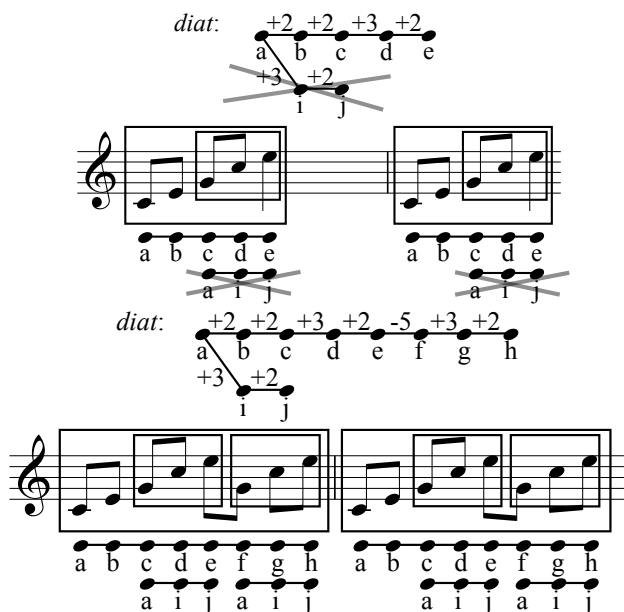


FIG. 1.6 – En haut, le motif aij , de description $diat = (+3, +2)$, n'existe qu'en tant que simple suffixe de $abcde$ de description $diat = (+2, +2, +3, +2)$, car les classes des deux motifs sont égales. Le motif aij n'est donc pas représenté explicitement. En bas, en revanche, le motif aij n'est pas un simple suffixe, ni de $abcde$, ni de $abcdefgh$, car leur classe est strictement incluse dans celle de aij .

l'exemple de gauche, comme égales car chaque occurrence de aij est un suffixe d'une occurrence de $abcde$. À droite, au contraire, il existe une occurrence de aij qui n'est pas un suffixe d'une occurrence de $abcde$. La classe du motif $abcde$ est alors dite strictement incluse dans celle du motif aij . Pour que le suffixe aij d'un motif $abcde$ puisse être considéré comme un motif autonome, sa classe ne doit alors pas être égale à celle de $abcde$.

Une telle heuristique peut être appliquée à une relation plus générale de spécificité entre descriptions. Le motif $abcde$ (Figure 1.7) présente une description mélodico-rythmique $ryth = (0.5, 0.5, 0.5, 4)$ et $diat = (0, 0, -2)$, alors que le motif $afghi$ présente la partie strictement rythmique de cette même description $ryth = (0.5, 0.5, 0.5, 4)$. Le motif $abcde$ peut donc être considéré comme plus spécifique que le motif $afghi$, car sa description contient plus d'information. Le motif moins spécifique $afghi$ ne doit généralement pas être explicitement représenté si sa classe est égale à celle du motif plus spécifique $abcde$. Si par contre il existe une occurrence du motif $afghi$ qui ne soit pas occurrence du motif $abcde$, comme on peut l'observer dans la partie droite de la figure, alors le motif $afghi$ peut être explicitement représenté. En incluant la relation de suffixe au sein de la relation

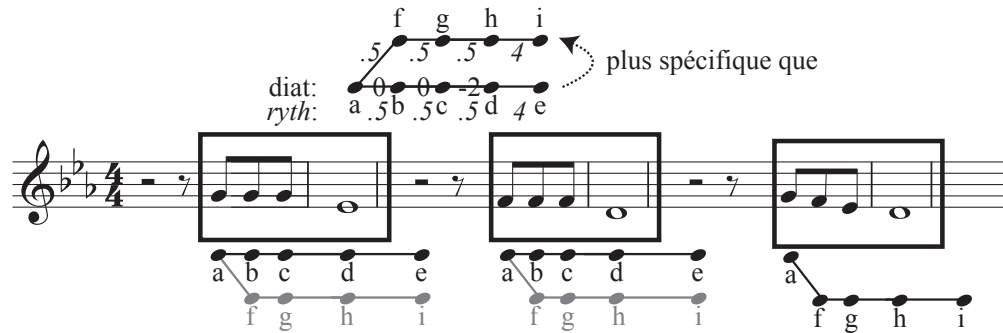


FIG. 1.7 – Le motif *afghi* de description $ryth = (0.5, 0.5, 0.5, 4)$ est moins spécifique que le motif *abcde*, qui contient en plus la description $diat = (0, 0, -2)$. Au terme des deux premières occurrences, les deux motifs étant de même classe, seule le motif le plus spécifique *abcde* doit être explicitement représenté. Mais une fois découverte la troisième occurrence de *afghi*, qui n'est pas une occurrence de *abcde*, le motif moins spécifique peut lui-aussi être explicitement représenté.

de spécificité – en posant qu'un suffixe d'un motif lui est moins spécifique – alors cette nouvelle heuristique englobe également le filtrage des suffixes décrit dans le précédent paragraphe.

J'ai prolongé cet effort d'optimisation de la description motivique en ajoutant un principe de description maximale spécifique des occurrences de motifs : lorsque une occurrence d'un motif est découverte (par exemple, le motif *abcde*), toutes les occurrences de motif considérées comme moins spécifiques (par exemple, le motif *afghi*) n'y seront pas superposées, car elles n'apportent aucune information nouvelle, et peuvent être directement déduites à partir de l'occurrence du motif plus spécifique (*abcde*) et de la relation de spécificité (entre *abcde* et *afghi*). Les descriptions moins spécifiques doivent toutefois être prises en compte implicitement car leur extension peut parfois mener à des descriptions spécifiques.

Par exemple (Figure 8), les trois groupements 1, 3 et 4 forment des occurrences du motif *afghi*. Les groupements 3 et 4 forment, quant à eux, des occurrences du motif *abcde*. Puisque ce motif est plus spécifique, le motif moins spécifique *afghi* n'a pas besoin d'être explicitement associé au groupement 4 (il est donc représenté en grisé dans la figure). Toutefois, afin de pouvoir détecter que les groupements 2 et 5 forment des occurrences du motif *afghijk*, il est nécessaire de considérer implicitement le motif *afghi* comme occurrence du groupement 4. Cette reconstitution de l'information implicite est effectuée suivant un parcours du réseau des motifs le long de la relation de spécificité.

La mise en œuvre de tels principes nécessite une gestion soignée du réseau des motifs, et notamment un parcours de l'ensemble des motifs et de l'ensemble

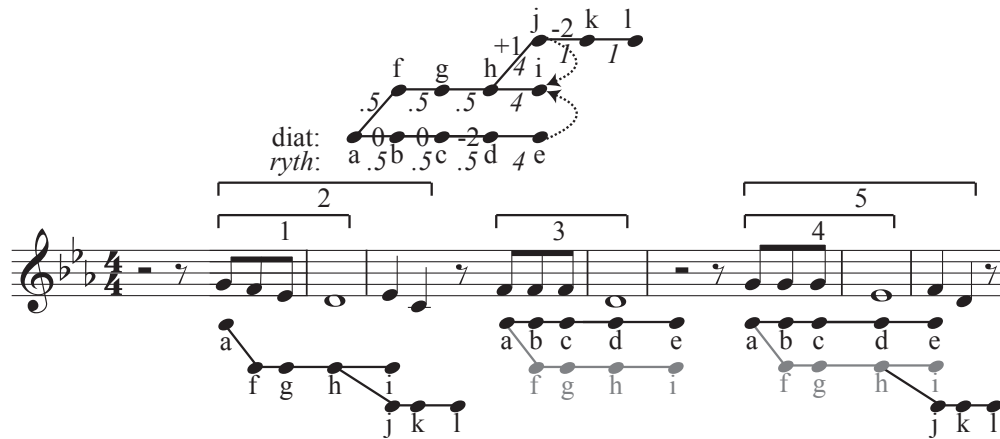


FIG. 1.8 – Le groupement 4 peut être simplement considéré comme occurrence du motif $abcde$. Toutefois, pour pouvoir découvrir que le groupement 5 est occurrence du motif $afghijk$, il est nécessaire d’inférer implicitement que le groupement 4 est également occurrence du motif $afghi$.

des extensions possibles orienté des plus spécifiques vers les plus généraux. Un tel mécanisme permet ainsi d’assurer une description motivique optimale, par compression sans perte de la taille de la description, suivant un filtrage de la redondance. Une telle optimisation est nécessaire afin, d’une part, d’assurer la clarté des résultats, et d’autre part, de limiter la complexité combinatoire des calculs.

1.4.2 Une modélisation par cycles des répétitions successives de motifs.

Une autre explosion combinatoire survient lors de la répétition successive d’un même motif (par exemple le motif rythmique abc à la figure 1.9, de description $ryth = (1, 2)$). Comme chaque occurrence est poursuivie par le début d’une nouvelle occurrence, chaque motif peut être étendu (aboutissant au motif $abcd$) par un intervalle dont la description $ryth = (1)$ est identique à celle du début de ce même motif (c’est-à-dire ab). Une telle extension peut alors être prolongée de manière récursive (en $abcde$, $abcdef$, etc.), et l’on obtient alors une explosion combinatoire de motifs qui ne sont pas perçus en tant que tels en raison de leur enchevêtrement complexe [2].

Suivant notre représentation (Figure 1.9), nous constatons que le dernier état de chaque occurrence du motif abc se superpose au premier état de l’occurrence suivante. Intuitivement, il semblerait que l’écoute soit encline à fusionner ces deux états, et à opérer un rebouclage du dernier état (c) du motif vers le premier (a) (Figure 1.10). Se constitue ainsi un motif cyclique oscillant entre deux états a' et

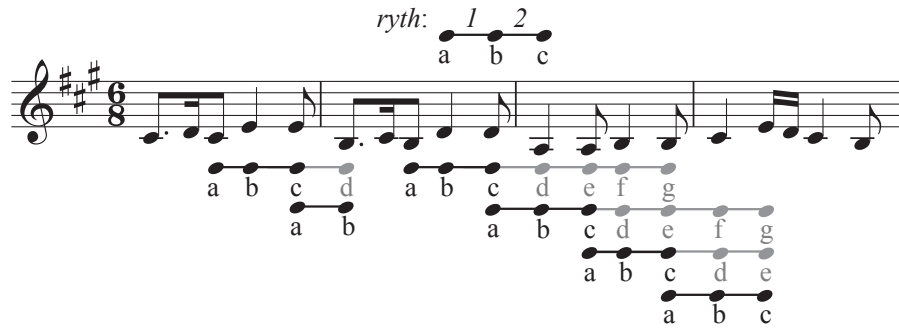


FIG. 1.9 – La répétition successive multiple du motif abc entraîne en toute logique une extension de ce motif en $abcd$, $abcde$, etc., formant un enchevêtrement complexe de structures qui ne sont pas perceptibles en tant que telles.

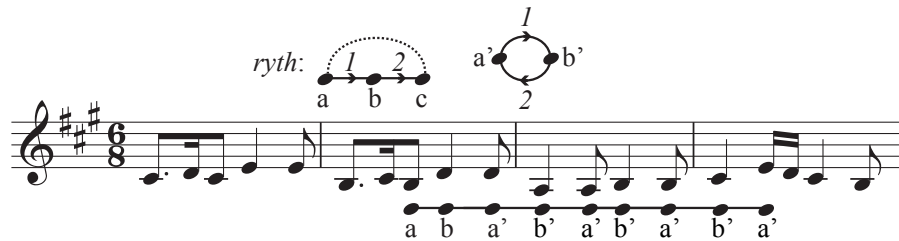


FIG. 1.10 – L’écoute d’une répétition successive du motif abc induit la perception d’une cyclicité de ce motif, aboutissant à une oscillation entre deux états a' et b' .

b' , à partir du motif acyclique initial abc . Et en effet, lorsque l’on entend la suite de cette séquence, on perçoit effectivement cette progressive oscillation entre ces deux états a' et b' , correspondant aux deux valeurs rythmiques $ryth = 1$ et $ryth = 2$. Une telle modélisation à l’aide de cycles semble ainsi intuitivement être mise en œuvre lors de l’écoute, et résout de surcroît le problème de redondance combinatoire.

Ce phénomène de répétition successive, bien que très fréquent dans l’expression musicale, a été auparavant considéré uniquement dans l’approche de Cambouropoulos [2]. Il propose de réduire la redondance combinatoire provoquée par ce phénomène par sélection, après l’analyse proprement dite, des motifs présentant un minimum de recouvrement temporel d’occurrences. Mais une telle sélection, effectuée sur les motifs de manière globale, provoque une excessive suppression de motifs pertinents, alors que notre approche fondée sur les configurations locales entre occurrences de motifs permet un filtrage plus précis. En outre, la redondance combinatoire reste problématique lors de la mise en œuvre du processus de recherche de motifs, car le filtrage s’effectue une fois ce processus terminé.

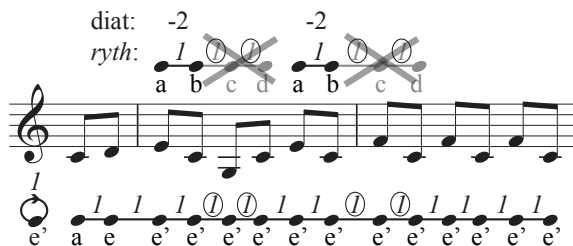


FIG. 1.11 – Le motif ab est une figure spécifique au-dessus du fond constitué par le motif cyclique, représenté en-dessous de la partition. Suivant la règle de *Gestalt* figure/fond, la figure ne peut être prolongée par une extension (abc) qui s’identifie au fond.

1.4.3 La règle de *Gestalt* figure / fond.

Un autre phénomène de redondance combinatoire survient lorsqu’un motif spécifique se superpose plusieurs fois à un motif cyclique. Un motif spécifique (par exemple, le motif ab , Figure 1.11, associé à la description mélodico-rythmique $ryth = 1$ et $diat = -1$), se superpose plusieurs fois sur un motif cyclique (par exemple, le motif simplement rythmique $ryth = 1$ en bas de la figure 1.11). En toute logique, le motif spécifique peut être étendu suivant les extensions successives du motif cyclique (aboutissant aux motifs abc , $abcd$, etc.). Un tel phénomène peut être rencontré fréquemment au sein de la partition, ce qui entraîne une prolifération combinatoire de structures redondantes. Or il s’avère qu’une telle extension n’est pas réellement perçue par l’auditeur en raison de la règle de *Gestalt* figure/fond : le motif spécifique (ab) forme une figure, au-dessus du fond que constitue le motif cyclique. Suivant cette règle, la figure ne peut être prolongée (en abc) par une description $ryth = 1$ qui s’identifie au simple prolongement du fond. Cette règle permet ainsi de gérer de manière sélective les extensions redondantes.

1.5 Des résultats sensiblement congruents avec les structures effectivement perçues

Cette modélisation a été initialement développée sous la forme d’un système d’analyse motivique automatisée écrit en *Common Lisp* et intitulé *OMkanthus*, intégrée au sein du logiciel *OpenMusic* de programmation graphique de structures musicales [1]. Une autre version est intégrée au sein de la panoplie d’outils informatiques dédiés à l’analyse musicale, intitulée *MIDItoolbox* [13], conçue en tant qu’extension du logiciel de calculs mathématiques *Matlab*. Notre modélisation est en mesure d’analyser des pièces musicales monodiques – c’est-à-dire constituées

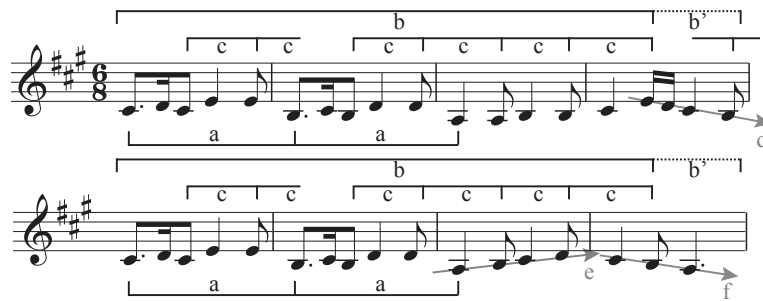


FIG. 1.12 – Analyse automatisée du premier thème de la *Sonate en la majeur* K 331 de Mozart.

d'une suite de notes temporellement non superposées – et de mettre en évidence sous forme graphique les structures découvertes sur une partition.

1.5.1 Une analyse d'un exemple simple issu du répertoire classique occidental.

Grâce à une telle modélisation complexe des stratégies d'écoute, le système d'analyse automatique offre une description claire de structures motiviques présentes au sein d'œuvres musicales classiques simples, qui correspondent pour une grande part aux structures effectivement perçues. Ainsi, l'analyse du premier thème de la *Sonate en la majeur* K 331 de Mozart (Figure 1.12) met en évidence le motif élémentaire de base (*a*) répété et transposé, ainsi que la phrase de 4 mesures (*b*) répétée deux fois. Toutefois, en raison d'une légère transformation rythmique à la fin de la première occurrence, il n'est pas possible pour l'instant de détecter cette phrase dans sa totalité (*b'*). Est mis également en évidence la répétition successive d'un simple motif rythmique constitué d'une croche et d'une noire, formant ainsi une structure cyclique (*c*). Il est également intéressant de constater que le même algorithme capable de découvrir une répétition de phrase de 4 mesure détecte également des successions d'intervalles de seconde ascendantes $diat = +1$ (*e*) ou descendantes $diat = -1$ (*d* et *f*). Les approches informatiques actuelles ne sont pas en mesure d'offrir une analyse motivique d'un tel degré de précision, ni d'assurer la pertinence perceptive de leurs découvertes. Ces analyses sont toutefois encore particulièrement restreintes, car de nombreuses composantes de l'expression musicale n'ont pas encore été prises en compte.

1.5.2 Une analyse d'une pièce d'improvisation arabe modale.

Nous avons tenté d'analyser, à l'aide de cette modélisation informatique, des productions musicales de styles variés, et notamment une improvisation modale arabe : *Istikhbar Mhayyer Sika*, jouée à la flûte *Nay* par Mohamed Saada (Figure 1.13) et transcrite par Mondher Ayari. Le modèle met tout d'abord en évidence le motif mélodique *a* répété trois fois. Toutefois, la première occurrence de ce motif n'est pas découverte en tant que telle, en raison de l'absence de la seconde note, *sol*, présente par contre dans les deux autres occurrences. Dans l'idéal, le modèle devrait être en mesure de considérer cette note comme simple note de passage, dont l'absence ne remet pas en cause la perception de l'identité motivique. Nous envisageons d'intégrer un tel mécanisme ultérieurement. Le motif *b* consiste en une formule mélodique répétée deux fois de suite, ce qui crée une cyclicité motivique et induit une attente – non satisfaite – d'une troisième occurrence. Le motif mélodico-rythmique *c*, composé uniquement de quatre notes, est répété fréquemment au sein de cet extrait. Le motif *d*, quant à lui, est simplement rythmique, composé de deux valeurs brèves et d'une valeur longue, et est répété de manière successive. Le motif *e* forme une phrase complète, lors de sa première occurrence, mais qui, dans sa seconde occurrence, se prolonge d'une note supplémentaire. Mais il n'est pas encore possible de détecter la totalité de ce motif *e*, en raison de la présence d'ornementations à des positions différentes au sein de chaque occurrence. L'intégration d'un mécanisme d'abstraction des occurrences permettra de résoudre ce problème. Le motif *f* consiste en une séquence de notes (*fa, mi, ré, mi, ré, fa, sol*) dont la répétition ne semble pas être détectée à l'audition, car chaque note successive de cette séquence se situe à un niveau hiérarchique très différent dans les deux différentes occurrences. Par exemple, la quatrième note (*mi*) forme une note pivot longue dans la première occurrence, alors qu'elle n'est qu'une simple ornementation très courte dans la seconde. Au contraire, un auditeur acculturé à ce style de musique perçoit aisément les lignes descendantes de notes conjointes (*la, sol, fa, mi, ré*), représentées par des flèches grises. Ces lignes ne sont pas encore détectées par notre modèle, en raison de l'incapacité actuelle de prendre en compte l'ensemble des transformations musicales qui modifient la surface apparente de chacune d'entre elles.

La modélisation permet de mettre en évidence des structurations motiviques intéressantes, mais elles divergent assez sensiblement de celles perçues par les auditeurs, et en particulier par les ceux acculturés à ce genre de musique. Ceci montre d'une part la nécessité d'ajouter des mécanismes permettant la prise en compte de transformations musicales plus complexes, telles que l'ajout de notes de passages ou d'ornementations, fréquentes dans la musique modale. D'autre part, nous allons tenter d'intégrer au sein de la modélisation des mécanismes issus des schémas cog-

Nāy

The figure shows a musical score for Nāy, consisting of five staves of music. The notation includes various rhythmic values, rests, and accidentals. The score is annotated with letters 'a' through 'f' and brackets, indicating specific structural elements or phrases. The annotations are as follows:

- Staff 1: Two brackets labeled 'a' under the first and second measures.
- Staff 2: A bracket labeled 'b' under the first three measures, and three brackets labeled 'c' under the fourth, fifth, and sixth measures.
- Staff 3: Two brackets labeled 'd' under the first and second measures, and a bracket labeled 'c' under the third measure. A dotted line labeled 'e' is above the third measure.
- Staff 4: A bracket labeled 'e' under the first three measures, and a bracket labeled 'd' under the fourth measure. A bracket labeled 'e' is above the fifth and sixth measures, and a bracket labeled 'f' is below the sixth measure.
- Staff 5: A bracket labeled 'c' under the first two measures, and a bracket labeled 'e' above the third measure. Brackets labeled 'd' are under the fourth and fifth measures, and a bracket labeled 'f' is below the fourth and fifth measures.

FIG. 1.13 – Analyse, à l’aide de *OMkanthus*, du début de l’improvisation de *Istikhbar Mhayyer Sika* jouée par Mohamed Saada.

The figure displays a musical score analysis of a medieval song. It consists of two systems of staves. Each system has two staves: the top staff is labeled 'A' and the bottom staff is labeled 'B'. The music is written in a single melodic line on a five-line staff with a treble clef and a key signature of one flat (B-flat). The time signature is common time (C). The melody is composed of quarter and eighth notes. In the first system, the top staff (A) shows a melodic line with two phrases marked 'e'. The bottom staff (B) shows a melodic line with two phrases marked 'd' and 'c'. The second system is identical to the first. Below the second system, there are two more staves, both labeled 'B', which show the same melodic line as the bottom staff of the second system, but with the phrases marked 'd' and 'c' repeated. This indicates a cyclical structure where the motif 'B' is repeated multiple times.

FIG. 1.14 – Analyse du *Geisslerlied* « *Maria muoter reinu mait* », légèrement simplifiée par rapport à la version proposée dans [36].

nitifs propres à cette culture, en tirant partie de l’expertise ethnomusicologique et cognitive offerte par Mondher Ayari.

1.5.3 Une analyse d’une chanson médiévale

Notre modèle est également en mesure de proposer une analyse simple et assez pertinente d’un chant médiéval du XIV^{ème} siècle, un *Geisslerlied* intitulé « *Maria muoter reinu mait* »(figure 1.14). Il s’agit en fait du premier exemple d’application de la méthode d’analyse proposée par Nicolas Ruwet dans son article historique [36]. Nous avons dû, dans notre analyse, opérer à une petite simplification du texte original qui présente de petites variations mélodiques que notre modèle ne peut encore prendre en compte actuellement. Il est à noter également qu’en raison de la présence d’un suffixe du motif *B*, précédant immédiatement les deux occurrences successives du motif entier, notre modèle unifie ces trois occurrences sous la forme d’un seul motif cyclique et ne peut donc pas, pour cette raison, délimiter une occurrence de *B* par portée, contrairement à ce qui est indiqué en grisé sur la figure.

1.6 Travaux futurs.

1.6.1 Modéliser la segmentation par discontinuité auditive.

La modélisation de l'induction de structures musicales est fondée, jusqu'à présent, sur un mécanisme particulier : celui de recherche de répétitions. Doivent être par la suite ajoutés au modèle d'autres mécanismes, qui apportent une information complémentaire sur la structure musicale : l'un d'entre eux, en particulier, procède par agglomération de notes successives temporellement ou paramétriquement proches et, de manière duale, par disjonction de notes successives éloignées, suivant les principes *Gestalt* de proximité et similarité¹. Des phénomènes d'interdépendance peuvent, être mis en évidence entre ces différents mécanismes : le mécanisme d'agglomération / disjonction, par exemple, peut imposer des contraintes relatives à la découverte de répétitions. L'ensemble de ces interactions doit donc être formalisé et modélisé avec soin.

Les tentatives de formalisation du mécanisme d'agglomération / disjonction (*cf.*, par exemple, [38][23][37][30][3]) dépendent fortement du paramétrage choisi : une analyse suivant un niveau de détail élevé, en particulier, fait appel à une certaine part de subjectivité [9]. C'est pourquoi ce mécanisme ne sera pas envisagé tel quel, mais plutôt dans son interaction avec le mécanisme de recherche de répétitions en particulier. Il s'agira de définir les conditions d'un possible masquage de certaines répétitions de motifs par des disjonctions importantes au niveau local.

La description précise de ces seuils de masquage est un problème qui, à première vue, ne pourra pas être résolu par l'intermédiaire d'un simple protocole d'expérimentations au sein de la modélisation informatique. Il semblerait ici qu'une collaboration soutenue avec la psychologie expérimentale soit nécessaire, afin de déterminer si de tels mécanismes sont mis en œuvre par une collectivité d'auditeurs de manière régulière. Des tâches de segmentation pourront être proposées à des sujets, sur des exemples musicaux engendrés suivant un protocole systématique permettant l'évaluation de chaque facteur en jeu dans ce problème.

1.6.2 Modéliser les transformations musicales.

Un motif, formé d'une suite de descriptions le long de divers paramètres musicaux, est découvert lorsque une telle suite est explicitement présente à divers instants d'une séquence musicale. Or une caractéristique essentielle du discours musical est l'existence de mécanismes de transformation musicale, suivant lesquels une suite de descriptions, sous une forme originaire simple, se modifie en une suite

¹Ce mécanisme de segmentation suivant des critères de discontinuité auditive correspond au premier mécanisme mis en évidence par Mondher Ayari.

de descriptions plus complexe.¹ Certaines de ces transformations sont en quelque sorte réversibles. C'est-à-dire que l'auditeur peut effectuer l'opération inverse : à partir du niveau de surface que constitue la suite de descriptions ornementée, il peut retrouver la structure profonde que constitue la suite de descriptions originale. Il est nécessaire d'incorporer de telles classes de transformations musicales au sein de la modélisation, afin de rendre possible la détection de motifs exprimés au niveau de la structure profonde, à partir d'une description de l'œuvre au niveau de la surface.

Des solutions à cette problématique de recherche de motifs de notes non immédiatement successives ont été proposées (*cf.* [29][33][8]). Elles se basent principalement sur des techniques de programmation dynamique, qui permettent un alignement optimal entre notes similaires de chaque occurrence et se fondent sur une distance d'édition entre séquences musicales. Or les transformations musicales que les auditeurs sont en mesure de percevoir sont d'une bien plus grande complexité que celles effectivement prises en compte par une simple distance d'édition, et nécessitent une modélisation complexe de mécanisme de perception musicale, prenant en compte de multiples paramètres musicaux, telle que celle entreprise dans mes recherches.

Certaines des transformations consistent en l'adjonction d'une ou plusieurs notes dans un voisinage temporel et paramétrique d'une ou plusieurs notes de la structure originale. Le problème, ici, revient alors à fixer les seuils au-delà desquels une telle transformation devient irréversible. Ces seuils semblent dépendre de divers paramètres. De telles transformations musicales semblent influencer différemment dans le cas d'une découverte d'un nouveau motif et dans celui de la reconnaissance d'un motif déjà connu. Dans le premier cas, il s'agit de détecter la répétition d'une séquence de descriptions *a priori* inconnue au sein d'une surface musicale. Une telle tâche à l'aveugle, en raison de la taille importante de l'espace de recherche, nécessite une ressemblance suffisante entre les différentes occurrences à identifier. Au contraire, dans le second cas, une identification d'une séquence musicale donnée avec un motif déjà connu peut être effectuée aisément, notamment lorsque son préfixe a déjà été identifié, ce qui institue l'attente des extensions suivantes du motif, et tolère donc de plus amples transformations.

Il s'agit ainsi de clarifier l'ensemble de facteurs en jeu dans la détection de transformations musicales, formaliser les principes et intégrer les mécanismes ainsi mis en évidence au sein de la modélisation. La validation et l'affinage du modèle – notamment de sa paramétrisation – s'effectuera par l'intermédiaire d'une collaboration avec la psychologie expérimentale.

¹Parmi les différentes études sur ce sujet, l'approche de Schenker en offre un panorama large (voir par exemple [25]).

1.6.3 Généraliser vers la polyphonie.

La musique a été considérée, dans notre approche ainsi que dans la plupart des approches actuelles, sous la forme d'une séquence de notes successives, ou monodies. Mais de manière générale, la musique doit être envisagée en terme d'un flux de notes, une polyphonie, pouvant contenir en particulier des superpositions de notes, ou accords. Dans un tel flux peut être perçue, d'une part, une multiplicité de monodies simultanées. En empruntant un formalisme issu de la théorie des graphes, on pourra dire qu'à partir du réseau initial que constitue le flux polyphonique émerge un graphe de chaînes monodiques, lequel pouvant présenter des configurations complexes telles que des embranchements et des entrelacements de chaînes. Suivant ces diverses chaînes monodiques peuvent alors être opérée la recherche de répétitions de motifs assurée par notre modélisation. Une généralisation de l'approche au cadre polyphonique nécessitera donc une formalisation et une modélisation de ce processus d'émergence du réseau monodique à partir du flux polyphonique.

La difficulté dans cette problématique d'émergence de chaînes monodiques au sein d'un flux polyphonique – comme nous l'avons rencontré également dans le mécanisme d'accumulation/disjonction (paragraphe 1.6.1) – est que, pour des exemples musicaux complexes, il peut parfois exister une grande combinatoire de solutions possibles, la préférence d'une solution particulière se fondant sur des critères subjectifs. Comme une étude de ce mécanisme isolé peut s'avérer problématique, on l'étudiera plutôt dans son interaction avec le mécanisme de recherche de répétitions motiviques. La tâche consistera alors à détecter des chaînes motiviques au sein du flux polyphonique. La recherche de répétition, qui, dans un cadre monodique, était opérée sur une simple chaîne monodique, doit ici être envisagée suivant un parcours d'un réseau monodique construit de manière adaptative sur le flux polyphonique. La construction du réseau monodique s'effectuera en étroit couplage avec la recherche de répétition : lorsqu'une répétition motivique est en cours de découverte, les extensions successives du motif pourront être recherchées sur de plus nombreuses chaînes monodiques puisque des descriptions spécifiques sont ici attendues.

Au sein d'un flux polyphonique émergent non seulement des chaînes monodiques, mais également des groupements de notes qui s'agglomèrent en raison de leur proximité temporelle, que l'on pourra appeler des agrégats, et qui forme diverses constructions musicales telles que les accords, les degrés ou les modes. La problématique d'émergence d'agrégats, qui s'apparente à celle d'émergence de chaînes monodiques, devra être modélisée. On pourra alors tester l'hypothèse d'une influence de cette segmentation en terme d'agrégats sur la recherche de répétitions de motifs. La modélisation de cette hypothèse, laquelle est susceptible de jouer un rôle important dans l'analyse motivique, pourra être envisagée rapidement, avant même la construction du mécanisme d'émergence d'agrégats, par une simple

intégration manuelle au sein de la description d'une séquence musicale de celle de ses agrégats.

En outre, de même que les motifs résultent de répétitions de chaînes monodiques, la répétition d'agrégats induit la formation de classes d'agrégats. Il sera souhaitable de rendre possible, dans cette modélisation, une détection de classes d'agrégats à partir de répétitions approximatives d'agrégats, présentant des notes supplémentaires ou manquantes. D'autre part, les agrégats se succédant forment eux-mêmes des chaînes d'agrégats. Là où la description de chaînes monodiques consistait simplement en une suite de distances entre notes successives, la description de chaînes d'agrégats consiste en un réseau complexe de distances entre notes d'agrégats successifs, ainsi que de distances entre classes d'agrégats, qu'il faudra formaliser et modéliser. Il s'agira par la suite de généraliser la problématique de recherche de répétition de chaînes monodiques aux chaînes d'agrégats, aboutissant ainsi à des motifs constitués d'agrégats. La résolution de l'ensemble de ces problèmes permettra d'assurer une modélisation complète des mécanismes en jeu dans l'analyse motivique.

La problématique de recherche de motifs polyphoniques a été très rarement considérée (*cf.* [11][5][26][27]). L'approche de Meredith et al., en particulier, consiste en une détection des répétitions exactes de motifs exprimés sous la forme de coordonnées dans l'espace bi-dimensionnel du temps et du paramètre des hauteurs. En conséquence, cette approche ne peut pas découvrir des répétitions de motifs présentant des fluctuations le long de certaines des différentes dimensions musicales – transformation du rythme, ou des hauteurs, etc. –, lesquelles pourtant ne remettent pas en cause, chez les auditeurs, l'identification des motifs. L'approche envisagée ici permettra justement une telle identification adaptative le long des différentes dimensions, car la démarche est fondée sur une modélisation la plus précise possible des stratégies d'écoute, et non sur des critères purement géométriques ou statistiques.

Pourra alors être entreprise une ouverture encore plus large du problème, en envisageant non seulement des motifs composés de notes et des motifs composés d'agrégats, mais également des motifs composés eux-même de motifs, configuration qui joue un rôle également important au sein de l'expression musicale. Certaines recherches cognitives ont proposé des formalisations de structures motiviques complexes [10], mais celles-ci se limitent au cas particulier de motifs composés d'une répétition multiple d'un seul motif, et aucune modélisation des mécanismes de découverte de telles structures n'y est associée. Nous entreprendrons cette modélisation et envisagerons de généraliser le problème, en n'imposant aucune contrainte particulière entre les motifs élémentaires successifs qui composent la structure motivique complexe. Se tissent alors des relations assez complexes, notamment entre les motifs élémentaires successifs, qu'il faudra donc formaliser puis modéliser [22].

1.6.4 Un dialogue avec l'éthnomusicologie cognitive.

Tout au long de ce projet de modélisation est instauré un dialogue constant avec l'éthnomusicologie cognitive. L'application à des styles musicaux de cultures très différentes (telles que la musique classique occidentale, la musique improvisée arabe, le jazz, ou la musique traditionnelle finnoise) permet de questionner l'emprise culturelle de notre formalisation, c'est-à-dire de vérifier si le domaine de validité du modèle se cantonne à la musique occidentale, ou s'il présente certaines généralités d'ordre cognitive le rendant à même d'analyser des musiques de diverses cultures. On pourra ainsi mettre en évidence ce qui relève, dans cette modélisation, du culturel, et ce qui relève au contraire de l'universel. Une fois modélisés les principes de segmentations sur la base de critères de discontinuité auditive ou de répétition de motif, nous nous attaquerons par la suite aux catégories supérieures qui influent sur la reconnaissance des objets d'ordre inférieur, en particulier sur la découverte des motifs élémentaires. Par exemple, les informations de haut niveau, tel que le mode, le degré, ou la tonalité, induisent des attentes de formules mélodiques spécifiques.

Le cadre informatique permet d'expérimenter suivant de multiples alternatives les phases successives de la modélisation, afin de constater l'efficacité et la pertinence de différentes formalisations possibles des mécanismes de découverte. Le modèle computationnel ainsi établi, en vertu des similarités de son comportement avec celui d'auditeurs humains, peut alors être posé comme modélisation hypothétique du système cognitif de l'écoute musicale. En raison de l'extrême difficulté d'un contrôle de l'ensemble des mécanismes permettant d'assurer la pertinence des motifs découverts, on suppose en effet qu'une modélisation capable d'offrir des résultats qui concordent avec les structures effectivement perçues présente un certain degré de véracité cognitive : un modèle analogue pourrait être mis en œuvre au sein du système cognitif humain. Une collaboration étroite avec la psychologie expérimentale permettra de valider, de consolider en d'enrichir le modèle : on testera la pertinence cognitive des mécanismes clefs introduits dans la formalisation ; on déterminera les valeurs effectives de certains paramètres de la modélisation, pour l'instant fixés à des valeurs hypothétiques arbitraires ; enfin, les réflexions élaborées dans le cadre de ces collaborations guideront les phases ultérieures de la modélisation. Seront d'abord testées les hypothèses concernant certains phénomènes émergents de la perception musicale, et qui ont orienté ma modélisation, telles que les concepts de motifs hétérogènes, motifs cycliques, ou le principe de maximisation de la spécificité des descriptions. On envisagera par la suite une validation progressive des divers éléments de la modélisation, partant des caractéristiques les plus générales, pour s'attarder ensuite aux détails les plus fins. Ceci permettra en particulier une détection et correction des erreurs éventuelles au sein de la modélisation.

1.6.5 Les applications de l’outil informatique.

Concernant l’informatique musicale, l’intérêt d’une telle démarche est multiple. Elle permet tout d’abord une analyse minutieuse du langage musical, rendant compte avec précision du foisonnement motivique, décelant les innombrables cellules musicales caractéristiques et leurs développements, et dégageant *in fine* une structure d’une grande complexité, qu’il serait ensuite possible d’appréhender selon diverses échelles d’observation (au niveau global, local, etc.). Les capacités combinatoires de l’informatique permettraient une unification des points de vue macroscopique (analyse de la forme) et microscopique (analyse des motifs) en une seule démarche tissant un vaste réseau de mises en correspondance. Les divers éléments décelés constituent les motifs, le réseau lui-même constitue la forme. De cette forme généralisée, il sera possible d’en effectuer une navigation, un parcours le long des différentes hiérarchies, permettant à l’utilisateur musicien de s’approprier cette structure complexe et au chercheur d’explorer la nature du traitement des informations musicales selon la culture dont les connaissances sont incluses dans le modèle.

Dans un second temps, les mécanismes de découverte automatique de lois régissant le langage musical offriront une vision computationnelle des théories musicales traditionnelles, mais également une formalisation de musiques dont les théories sont partielles voire inexistantes. En effet, un système d’induction automatique suivant un modèle cognitif permettrait l’inférence de la grammaire cachée du langage sous-jacent à l’œuvre musicale. Ceci permettra d’une part de valider les modèles mis en jeu, et d’autre part d’offrir un outil d’analyse musicale automatique de grand intérêt pour la musicologie, pour les sciences cognitives et pour les nouvelles technologies. Enfin, le fruit de ces analyses, rendant compte de l’œuvre musicale avec une infime précision, pourra être utilisé dans un cadre compositionnel. Ce logiciel pourrait à long terme permettre une édition dynamique et interactive des divers objets musicaux et ainsi la conception d’un nouvel outil d’aide à l’élaboration de nouvelles œuvres.

Une telle application des approches cognitives des mécanismes inductifs au domaine musical offrirait un cadre d’expérimentation idéal pour ce type de système complexe. En effet, contrairement aux précédents domaines d’applications tels que le langage, la représentation sémantique de l’environnement ou les théories scientifiques, la musique présente un cadre structurel exempt — du moins dans une première approche — de toute sémantique. La constitution du réseau conceptuel peut ainsi être entreprise uniquement à l’aide d’heuristiques générales régissant les mécanismes cognitifs élémentaires, sans la nécessité d’introduire un réseau conceptuel *a priori*.

1.7 Conclusions

Notre étude permet de mettre en évidence que les motifs musicaux résultent d'un ensemble de mécanismes interdépendants. Une automatisation de l'analyse motivique nécessite alors une modélisation précise de ces mécanismes, au sein d'un réseau conceptuel au sein duquel se tissent divers types de relations (telles que la relation de spécificité). Le mécanisme opératoire de la modélisation se décline sous la forme d'opérateurs de base appliqués à chaque phase successive de chaque structure. Nous avons tenté, petit à petit, de construire une telle modélisation, qui reste encore aujourd'hui sous une forme embryonnaire. Ces travaux ont débuté à partir de certaines hypothèses de base, telles que l'identification de variations motiviques à l'aide de similarités numériques, qui se sont avérées, une fois modélisées, problématiques voire fausses. La mise en place des mécanismes de base de découverte motivique a permis ensuite de mettre en évidence le phénomène de redondance combinatoire, dont il a été nécessaire de déceler les causes. Nous avons tenté alors de modéliser de la manière la plus simple possible les mécanismes permettant de gérer efficacement de telles redondances au sein d'un système cognitif. La stabilité du système total dépend de la bonne définition de chaque opérateur élémentaire : le moindre défaut pouvant engendrer un comportement chaotique et une explosion combinatoire dont il est parfois difficile d'en retrouver la cause. En raison de l'extrême difficulté de contrôler l'ensemble des mécanismes permettant d'assurer la pertinence des motifs découverts, on suppose qu'une modélisation capable d'offrir des résultats qui concordent avec les structures effectivement perçues présente un certain degré de véracité cognitive : un tel modèle pourrait être mis en œuvre de près ou de loin au sein du système cognitif humain. L'expérimentation informatique permet ainsi de réduire le champ des possibilités de la modélisation cognitive. Le modèle qui en résulte devra alors être soumis à une validation et un affinage par le biais de la psychologie expérimentale.

Les résultats actuels permettent de montrer l'intérêt d'une telle approche. D'une part, le système informatique qui résulte de cette étude offre au musicologue une description exhaustive des motifs d'une partition, qu'un auditeur ne peut découvrir seul que de manière partielle et non-explicite. L'intérêt direct de cet outil informatique consiste donc à offrir à l'auditeur le moyen d'approfondir son appréciation de l'œuvre musicale, en lui mettant en évidence l'ensemble de ces structures. Cette technologie donnera en outre à la musicologie les moyens d'ouvrir largement le champ des possibilités de l'analyse musicale, et répond ainsi à de nombreuses attentes (*cf.* par exemple [32][28][36][31][22]). D'autre part, l'expérimentation algorithmique permet de mettre en évidence la non-faisabilité de certaines hypothèses, et de proposer une modélisation qui offre un comportement satisfaisant et est susceptible d'être mis en œuvre, de près ou de loin, au sein du système cognitif humain. Enfin, une telle automatisation peut trou-

ver des applications très intéressantes dans l'étude des bases de données musicales. Cette modélisation complexe introduit de nouvelles représentations et de nouveaux processus, qui enrichissent aussi bien le savoir musicologique que la compréhension cognitive. Une analyse automatique des bases de données musicales, en particulier à l'aide d'une modélisation par système complexe, permettra d'une part une navigation intelligente au sein des bases de données musicales et offrira d'autre part une vision nouvelle des oeuvres musicales. En outre, de telles modélisations, si elles s'effectuent en collaboration avec des musicologues et des psychologues de la perception musicale, pourraient constituer une formalisation des théories musicales et psychologiques et fournir ainsi un outil de réflexion pour les sciences humaines consacrées aux phénomènes artistiques.

Bibliographie

- [1] Assayag, G. et al. : Computer Assisted Composition at Ircam : From Patchwork to Open-music. *Computer Music Journal* **23** (1999) 3 :59–72
- [2] Cambouropoulos, E. : Towards a General Computational Theory of Musical Structure. Thèse de l'Université de Edinbourg (1998)
- [3] Cambouropoulos, E. : Musical Parallelism and Melodic Segmentation : A Computational Approach. *Music Perception* (à paraître)
- [4] Conklin, D., Anagnostopoulou, C. : Representation and Discovery of Multiple Viewpoint Patterns. *International Computer Music Conference* (2001)
- [5] Conklin, D., Anagnostopoulou, C. : Discovery of segmental patterns in music. *INFORMS Journal on Computing* (à paraître)
- [6] Cook, N. : A Guide to Musical Analysis. J.M. Dent & Sons (1987)
- [7] Cope, D. : Computer and Musical Style. Oxford University Press. (1991)
- [8] Dannenberg, R., Hu, N. : Pattern Discovery Techniques for Music Audio. *International Conference on Music Information Retrieval* (2002)
- [9] Deliège, I. : Grouping conditions in listening to music : An approach to Lerdahl and Jackendoff's grouping preference rules. *Music Perception* **4** (1987) 4 :325–360
- [10] Deutsch, D., Feroe, J. : The Internal Representation of Pitch Sequences in Tonal Music. *Psychological Review* **88**(1981) 6 :503–522
- [11] Dovey, M.J. : A technique for “regular expression” style searching in polyphonic music. *International Conference on Music Information Retrieval* (2001)
- [12] Dowling, W.J., Harwood, D.L. : *Music Cognition*. Academy Press (1986)
- [13] Eerola, T., Toiviainen, P. : MIR In Matlab : The MIDI Toolbox *International Conference on Music Information Retrieval* (2004)
- [14] Ganter, B., Wille, R. : *Formal Concept Analysis : Mathematical Foundations*. Springer-Verlag (1999)
- [15] Good, M. : MusicXML for Notation and Analysis. *Computing in Musicology* **12** (2001)
- [16] Hjelmslev L. : *Prolégomènes à une théorie du langage* (1966). Traduction française : Éditions de Minuit, 1971.
- [17] Howell, P., Cross, I., West, R. : *Musical Structure and Cognition*. Academic Press, 1985.

- [18] Huron, D. : Humdrum and Kern : Selective Feature Encoding. in Selfridge-Field, E. : Beyond MIDI : The Handbook of Musical Codes. MIT Press. (1997)
- [19] Husserl, E. : Leçons pour une phénoménologie de la conscience intime du temps (1905). Traduction française : Presses Universitaire de France, 1964.
- [20] Lartillot, O. : A Musical Pattern Discovery System Founded on a Modeling of Listening Strategies. *Computer Music Journal*, **12** (2004) 3 :53–67
- [21] Lartillot, O. : Fondements d'un système d'analyse musicale computationnelle suivant une modélisation cognitiviste de l'écoute. Thèse de l'Université de Paris VI (2004)
- [22] Lartillot, O., Saint-James, E. : Automating Motivic Analysis Through the Application of Perceptual Rules. *Computing in Musicology* **13** (2005)
- [23] Lerdahl, F., Jackendoff, R. : A Generative Theory of Tonal Music. MIT Press (1983)
- [24] Lévi-Strauss, C. : Anthropologie structurale. Plon (1958)
- [25] Meeùs, N. : Heinrich Schenker : Une introduction. Pardaga (1993)
- [26] Meredith, D., Lemström, K., Wiggins, G. : Algorithms for discovering repeated patterns in multidimensional representations of polyphonic music. *Journal of New Music Research* **31** (2002) 4 :321–345
- [27] Meudic, B., Saint-James, E. : Automatic Extraction of Approximate Repetitions in Polyphonic MIDI Files Based on Perceptive Criteria. in U.K. Will (éd.), *Computer Music Modelling and Retrieval* Springer-Verlag (2004)
- [28] Meyer, L.B. : Emotion and Meaning in Music. The University of Chicago Press (1956)
- [29] Mongeau, M., Sankoff, D. : Comparison of Musical Sequences. *Computer and Humanities* **24** (1990) 161–175.
- [30] Narmour, E. : The Analysis and Cognition of Basic Melodic Structures : The Implication-Realization Model. The University of Chicago Press (1990)
- [31] Nattiez, J.-J. : Fondements d'une sémiologie de la musique. Union Générale d'Éditions (1975)
- [32] Rétzi, R. : The Thematic Process in Music. Macmillan Publishing (1951)
- [33] Rolland, P.-Y. : Discovering Patterns in Musical Sequences. *Journal of New Music Research* **28** (1999) 4 :334-350.
- [34] Rouget, G. : Un chromatisme africain. *L'Homme* **I** 3 (1961)
- [35] Rowe, R. : Interactive Music Systems (Machine Listening and Composing). MIT Press (1993)
- [36] Ruwet, N. : Méthodes d'analyse en musicologie. *Revue belge de musicologie* **20** (1966) 65-90
- [37] Temperley, D. : The Cognition of Basic Musical Structures. MIT Press (1988)
- [38] Tenney J., Polansky, L. : Temporal Gestalt Perception in Music. *Journal of Music Theory* **24** (1980) 205-241.