



HAL
open science

Co-construction interactive de connaissances, application à l'analyse mélodique

Béatrice Fuchs

► **To cite this version:**

Béatrice Fuchs. Co-construction interactive de connaissances, application à l'analyse mélodique. IC 2012, 22èmes Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, May 2012, Chambéry, France. pp.705-722. hal-00746733

HAL Id: hal-00746733

<https://hal.science/hal-00746733v1>

Submitted on 29 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Co-construction interactive de connaissances application à l'analyse mélodique

Béatrice Fuchs

Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information
UMR5205 CNRS/Université de Lyon/Université Lyon 1/Université Lyon 3
23-25 avenue Pierre de Coubertin, 69622 Villeurbanne Cedex, France
beatrice.fuchs@liris.cnrs.fr

Résumé :

Cet article illustre le processus de co-construction interactive de connaissances à partir de traces. Il s'agit d'expérimenter les principes du Système à Base de Traces modélisées (SBT) dans un processus itératif de découverte de connaissances. L'approche montre l'aide apportée par les possibilités multiples de transformation qui interviennent à différentes étapes du processus en exploitant des connaissances du domaine. Des séquences d'événements sont construites à partir de la trace et exploitées par un algorithme de fouille qui en extrait des motifs fréquents. Ces motifs sont transformés sous forme intelligible pour permettre leur interprétation par l'analyste. À partir des motifs sélectionnés, la séquence est réécrite en remplaçant les motifs sélectionnés par de nouveaux événements représentant ces motifs, et le processus est réitéré sur la séquence ainsi transformée. Ces principes sont appliqués à l'analyse motivique où les événements sont les symboles du texte d'une partition musicale. Le processus illustre la co-construction de connaissances où des heuristiques élaborées progressivement par l'analyste influent directement sur le processus de découverte.

Mots-clés : co-construction interactive de connaissances, analyse motivique

1. Introduction

L'observation des interactions homme/machine permet de mieux comprendre les processus cognitifs, sociaux sous-jacents à l'activité humaine et de faire évoluer les environnements informatiques pour mieux les adapter à l'utilisateur. L'analyse des interactions entre les utilisateurs et leur environnement informatique s'appuie sur un processus de découverte qui nécessite la collecte de données sur cette activité : les traces d'interactions. L'approche des traces modélisées (Settoui, 2011) repose sur l'instrumentation de l'environnement

de sorte que les interactions entre l'utilisateur et son environnement sont enregistrées et collectées puis manipulées de façon générique par un Système à Base de Traces modélisées. Le couple homme-machine est ainsi considéré comme un couple co-apprenant, où une double boucle relie l'utilisateur au système informatique. Dans un sens, l'utilisateur influe sur le système en exploitant ses connaissances et dans l'autre sens il acquiert plus expérience qui contribuent à améliorer ses connaissances et sa compréhension du domaine au fur et à mesure de son activité.

Au delà de l'étude des interactions entre un utilisateur et son environnement informatique, nous pensons que le modèle de trace peut également s'appliquer à beaucoup d'autres domaines, et nous proposons une expérimentation de ces principes dans le domaine de l'analyse motivique de mélodie à partir de partitions musicales. Ce choix de domaine a été motivé par la disponibilité d'un corpus de textes musicaux ainsi que de l'expertise nécessaire et par la problématique de l'analyse musicale qui reste un sujet de recherches ouvert (Cambouropoulos & Rolland, 2004; Lartillot, 2004). Le principe est de représenter un texte musical comme une trace dans laquelle on souhaite découvrir des motifs puis des thèmes pour mettre en évidence la structure de la pièce. Un algorithme de fouille de séquences est mis en œuvre pour proposer des motifs candidats à l'analyste.

2. Système à Base de Traces modélisées

Un Système à Base de Traces Modélisées (SBT) (Settouti, 2011) est un système dédié à la modélisation et la manipulation de traces numériques issues de l'observation d'une activité au cours de laquelle ont eu lieu des interactions. Une trace comporte un ensemble d'éléments observés, les *obsels*, situés dans le temps et organisés les uns par rapport aux autres. La trace construite à partir des données collectées par les capteurs est appelée *trace première*. Elle est souvent difficile à interpréter car les observés se présentent sous une forme peu intelligible et sont de granularité très faible. Pour la rendre plus facilement exploitable, un processus de transformation est appliqué afin de la mettre sous une forme plus "abstraite" (figure 1). L'analyse des traces a pour objectif de découvrir des *motifs* faisant sens dans l'activité de l'utilisateur et qu'il est possible de mémoriser. À partir des motifs, la trace est transformée en substituant toutes les occurrences de ces motifs dans la trace par un nouvel événement appelé *transformé* représentant ce motif. Une succession d'étapes de découverte - transformation est ainsi répétée sur la trace

transformée faisant graduellement remonter le niveau d'intelligibilité de la trace.

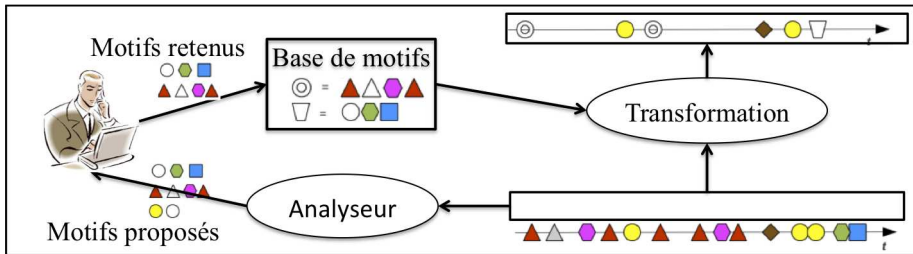


FIGURE 1: Principe des transformations

Dans le domaine de l'analyse musicale, les symboles musicaux d'une partition sont principalement des notes associées à leur durée. Elles sont modélisées comme des obsels qui se produisent à des instants précis dans le temps. L'extraction de motifs est assistée par de multiples transformations qui s'appuient sur les connaissances du domaine et permettent de changer le point de vue sur la trace : mélodique, rythmique, intervalles, etc. Ainsi, la tâche de l'utilisateur est assistée par la multiplicité de ces points de vue et de leur confrontation.

3. Cycle de découverte de connaissances

Le processus de découverte comporte six étapes (figure 2).

- la collecte initiale des données de la partition pour constituer une première trace,
- la préparation qui consiste à construire une séquence sous une forme exploitable par l'analyseur, puis le paramétrage qui consiste à choisir les paramètres adéquats pour la fouille,
- la fouille qui utilise l'algorithme $dmt4sp^1$ d'extraction de motifs fréquents à partir d'une ou plusieurs séquences.
- la mise en forme des motifs issus de la fouille de façon à les présenter sous forme intelligible et la visualisation
- l'interprétation par l'expert du domaine grâce à l'exploitation de connaissances du domaine, l'ajout d'informations pour l'aider à choisir les "meilleurs" motifs, puis

1. Data Mining Techniques For Sequence Processing

- la réécriture qui transforme la trace en remplaçant toutes les occurrences d'un motif par un nouvel obsel.

Le processus peut être réitéré en modifiant les paramètres ou en préparant les données selon un nouveau point de vue (rythme, intervalles, etc.).

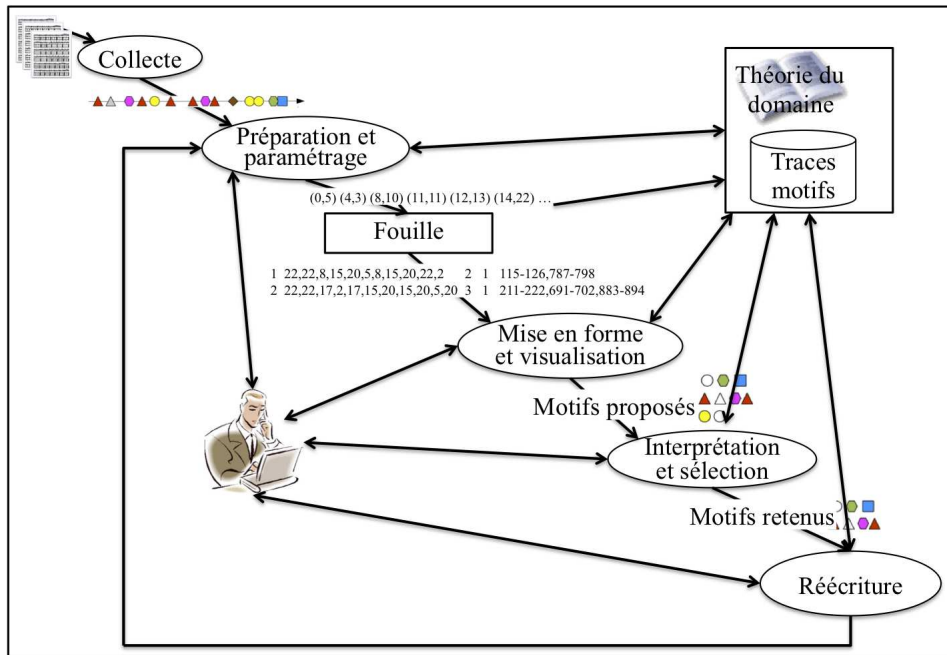


FIGURE 2: Les différentes étapes du processus de découverte

3.1. Collecte et sélection des données

La trace initiale a été construite à partir de la partition musicale de l'œuvre décrite avec Lilypond, un langage dédié à la description de partitions similaire à \LaTeX . Un fichier source Lilypond comporte une description textuelle des notes et silences d'une partition associées à leur hauteur, leur durée ainsi qu'une multitude d'autres attributs musicaux tels que la métrique, la tonalité, etc. Les notes y sont étiquetées par un nom (do, re, mi, fa, sol, la, si) éventuellement suivi du suffixe "d" pour un dièse ou "b" pour un bémol et un silence est noté "r". Il y a donc 22 types d'événements différents². Les durées sont

2. Parmi les 21 types d'événements représentant des notes, il y a en réalité seulement 12 hauteurs différentes. En effet, il y a des *enharmonies*, par exemple ré \sharp et mi \flat , qui sonnent

codées à l'aide d'entiers : 1 pour la valeur la plus longue, la ronde (♠), 2 pour la blanche (♩), 4 pour la noire (♪), etc. jusqu'à 64 pour la quadruple croche. À l'issue de la collecte, une trace initiale est élaborée et constituée d'une suite de noms de notes associés à une durée et un octave.

Par exemple l'extrait de fichier source Lilypond ci-dessous correspond à la partition de Reichert :

```
\include "italiano.ly" % notation italienne (do, re, etc.)
\header{ title = "Tarentelle"
        subtitle = "Etude de salon"
        composer = "Mathieu André Reichert (1830 - 1880)"}
\clef treble % clé de sol
\score {\new Staff = flute{
\set Staff.instrumentName = #"Flute" % instrumentation
\relative do'' { % note de référence : do 4
\key la \minor % tonalité la mineur
\time 6/8 % métrique
\set Score.skipBars = ##t R2.*3 % Introduction : 3 mesures
r4. la'8 (do,) la' % mesure 4
sold (si,) sold'si (re,) si' % mesure 5
la (do,) la'mi' re do % mesure 6
si do re do si la % mesure 7
si sold mi la (do,) la' % mesure 8
sold (si,) sold'si (re,) si' % mesure 9
la (do,) la'do si la % mesure 10
sol la si la sol fad % mesure 11
mi fad sold
...
}}}
```

Une fois compilé, Lilypond produit un fichier pdf en sortie, par exemple pour l'extrait ci-dessus :

Tarentelle
Etude de salon
Mathieu André Reichert (1830 - 1880)

Flute

9

3.2. Préparation des données

À partir des données collectées dans la trace initiale, une séquence est construite selon le format d'entrée de dmt4sp.

de façon identique mais qui sont considérés comme différents du point de vue harmonique et que nous avons différenciés. Les bb et x n'ont pas été pris en compte.

3.2.1. Construction de la séquence

Dans dmt4sp, une séquence est représentée par une suite d'événements estampillés : $S = \{(e_i, t_i)\}$, où $e_i \in \mathbb{N}$ est un type d'événement et $t_i \in \mathbb{N}$ une estampille. Lorsque les types d'événements sont des notes ou des silences, on a $e_i \in [1, 22]$, et les estampilles sont calculées selon une unité de temps qui correspond à la valeur la plus courte de la pièce. Chaque note étant associée à une durée, l'estampille d'une note est calculée en cumulant toutes les durées des notes la précédant : $t_i = \sum_{j=1}^{i-1} d_j$, où d_j est le nombre d'unités de temps représentant la durée de la note associée à e_j . La durée d'une note n'est donc pas explicite mais peut-être calculée par différence entre son estampille et celle de la note qui la suit : $d_i = t_{i+1} - t_i$. Ainsi, à partir de la partition de Reichert présentée précédemment, la séquence correspondante se présentera sous la forme :

```
estampille 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 ... 1638 1639 1640
événement 11 17 2 17 15 20 15 20 5 20 ... 17 22 17
```

La fouille se focalise prioritairement sur les notes et par défaut, un événement représente une note ou un silence, mais peut également représenter une durée de note, un degré harmonique, un intervalle, etc. selon le point de vue que l'analyste souhaite explorer. Par ailleurs, il existe de multiples façons de représenter les hauteurs des sons que nous n'approfondirons pas (Cambouropoulos *et al.*, 2001). Dmt4sp ne peut prendre en compte d'autres attributs associés aux notes, il est nécessaire pour cela d'effectuer des changements de points de vue.

3.2.2. Examen des données et paramétrage

Un premier examen des données par l'analyste est utile pour lui donner une idée générale du texte à fouiller. L'évaluation des fréquences des notes et des différentes valeurs est utile pour le premier paramétrage de la fouille. Dmt4sp peut-être paramétré de façon à introduire de fortes contraintes dans le but de limiter le nombre de résultats, et l'observation des durées est primordiale pour élaborer une première stratégie. Par exemple on peut remarquer dans la pièce de Reichert que sur 1606 symboles, 1584 sont des croches, ce qui est très intéressant pour contraindre très fortement dans un premier temps le processus de fouille et de chercher d'emblée des motifs longs.

3.3. Fouille

Dmt4sp (Rigotti, 2006) est un prototype d'extraction de motifs et de règles à partir d'une ou plusieurs séquences d'événements, conformément à la sémantique d'occurrence minimale définie dans (Mannila *et al.*, 1997). Dmt4sp permet d'introduire plusieurs types de contraintes utiles pour limiter les résultats :

- Des contraintes de support : le nombre minimum d'occurrences peut être spécifié pour la sélection des motifs fréquents. Dans le domaine de l'analyse musicale, ce nombre est toujours 2 car par définition, un motif musical est une séquence de notes qui apparaît au moins deux fois dans une pièce musicale. Cependant certains motifs plus courts peuvent avoir une fréquence supérieure qui pourra être utilisée dans certaines analyses pour limiter les résultats.
- Des contraintes temporelles : la taille maximale de la fenêtre correspond à la largeur maximale de l'intervalle de temps dans lequel un motif peut s'étendre.
- Des contraintes d'intervalle indiquent l'intervalle de temps minimum et maximum séparant les événements.
- Des contraintes de longueur indiquent les longueurs minimum et maximum des motifs à extraire.
- Des contraintes de préfixe indiquent une liste de types d'événements par lesquels les motifs doivent commencer.
- Le filtrage d'événements ayant un numéro supérieur à une valeur donnée. Ce paramètre a permis d'éliminer dans un premier temps tous les événements issus de transformations c'est-à-dire dont l'étiquette est supérieure à 22.

3.4. Mise en forme et visualisation

Dmt4sp fournit les résultats sous forme textuelle avec un motif par ligne. Chaque ligne précise :

- le numéro de motif,
- la liste des types d'événements constituant le motif séparés par “,”,
- le nombre d'occurrences du motif,
- les informations de localisation des occurrences sous la forme estampille de début - estampille de fin

Ces résultats doivent être mis en forme afin d'être intelligibles et de permettre à l'analyste de les interpréter plus rapidement. Les motifs sont d'abord réécrits

en remplaçant les numéros d'événements par des noms de notes pour être plus lisibles. Par exemple le motif : 17, 2, 17, 15, 20, 15, 20, 5, 20, 17, 2, 17 est réécrit en : la, do, la, sol#, si, sol#, si, re, si, la, do, la. Puis les estampilles sont réécrites sous forme de triplets (nm , nt , p), où nm est un numéro de mesure, nt un numéro de temps dans la mesure et p la position dans ce temps en nombre d'unités de temps. Ce triplet facilite à l'analyste la localisation du motif dans la partition. Par exemple, avec une métrique $\frac{6}{8}$, et la ♩ comme unité de temps, l'estampille 15 correspond à 1^{ère} croche du 2^{ème} temps de la 3^{ème} mesure :

Mesures :	1	2	3
Temps :	1 2	1 2	1 2
Estampilles :	0 3 4 5	6 7 8 9 10 11 12 13 14	15 16 17

3.5. Interprétation des résultats

Il est d'usage en analyse musicale d'utiliser une notation à l'aide de lettres A, B, C, etc. pour identifier les thèmes d'une pièce musicale et caractériser comment ces thèmes s'agencent. Une succession de thèmes selon un certain arrangement caractérise la structure de la pièce. Par exemple une forme ABA ou ABACA qui alterne un thème A avec un ou plusieurs thèmes caractérise la forme rondo. Une pièce est composée de phrases musicales et une phrase peut être composée d'un seul ou d'une succession de motifs musicaux. L'interprétation consiste en un étiquetage des motifs que l'analyste juge pertinents à l'aide de lettres. Cette tâche est primordiale pour l'interprétation de la structure de la pièce et est à la charge de l'analyste.

L'analyste parcourt la liste des résultats mis en forme à la recherche de motifs intéressants. La liste peut être longue et la mise en place d'une stratégie apparaît indispensable pour faciliter à l'analyste le travail de localisation des motifs intéressants. Généralement, une bonne façon de procéder est de présenter les motifs de façon séquentielle dans l'ordre d'apparition dans la partition.

3.5.1. Segmentation

Des travaux dans le domaine de la recherche de motifs musicaux se sont intéressés à la *segmentation* de texte musical qui consiste à découper un texte musical afin de délimiter les phrases qui le composent et déterminer

à quel moment elles débutent et se terminent. Ces instants de début et de fin de phrases sont appelés des *frontières* de phrase et leur connaissance améliore considérablement l'efficacité de la recherche de motifs (Cambouropoulos *et al.*, 2001). Or, assez souvent, on peut observer des points communs entre les frontières des différentes phrases. Au fur et à mesure de l'examen des résultats de la fouille, l'analyste a eu tendance à rechercher des motifs à des frontières de phrase. Par exemple dans la pièce de Reichert (figure ??), la plus grande partie des motifs importants débutent sur la 1^{ère} croche du 2^{ème} temps et se terminent sur la 3^{ème} croche du 1^{er} temps :

Estampilles : 0 3 6 9 12 15 ... 90 93 96 99
 Mesures : 1 2 3 16 17

Cette heuristique a permis d'enrichir la description de chaque motif issu de la fouille avec la propriété de frontière, calculée à partir de la métrique et les estampilles de début et de fin du motif. Deux indicateurs appelés indicateurs de début et de fin de phrase ont été élaborés afin d'attester si les motifs sont situés sur une sur une frontière de phrase. Ces informations sont primordiales pour la focalisation sur les motifs potentiellement intéressants et le filtrage des résultats. En revanche, cette heuristique peut exclure temporairement des motifs intéressants qui ne vérifient pas cette propriété du fait des nombreuses variations qui peuvent intervenir en début ou en fin de phrase.

3.5.2. Regroupements

L'ordre de présentation des résultats est importante pour faciliter le travail de l'analyste. Dans un premier temps, les motifs qui respectent la propriété de frontière de phrase permet d'examiner un sous-ensemble beaucoup plus réduit de résultats contenant un grand nombre de motifs. Le reste des résultats doit suivre l'ordre d'apparition dans la partition pour plusieurs raisons. D'abord cette présentation permet une lecture séquentielle plus "naturelle". Mais elle permet également de regrouper ensemble les motifs similaires qui débutent sur la même estampille de façon à les rassembler pour les examiner et les comparer plus facilement. La recherche de motifs pourra alors consister à traiter des groupes et à choisir dans ces groupe celui qui "représente" le mieux un ensemble d'occurrences.

3.6. Sélection et filtrage

La sélection de motifs peut-être une opération très délicate, car il peut y avoir de nombreuses variations de la mélodie et du rythme dans la pièce. Le choix des motifs se base en général sur le meilleur compromis entre la fréquence et la longueur. Il s’agit de sélectionner l’intension d’un motif, c’est-à-dire celui représente le mieux toutes les occurrences de ce motif qui constituent l’*extension* du motif (Rolland, 2001).

La sélection d’un motif qui s’étend sur un intervalle $[t_1, t_2]$ va impliquer l’abandon des motifs qui chevauchent l’intervalle du motif sélectionné, c’est-à-dire ceux dont l’intervalle $[t_i, t_j] \cap [t_1, t_2] \neq \emptyset$. La liste des résultats est donc filtrée “naturellement” au fur et à mesure que des motifs sont sélectionnés par l’analyste.

3.7. Réécriture

Le principe de la réécriture est de transformer une séquence à partir des motifs trouvés lors de la fouille. Les motifs sont remplacés par de nouveaux types d’événements (figure 3). Chaque motif trouvé est remplacé par un nouvel événement auquel un numéro est attribué. Son estampille est celle du premier événement du motif.

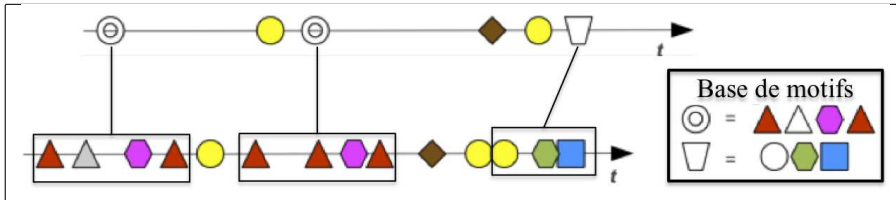


FIGURE 3: Principe de la transformation.

Par exemple dans la pièce de Reichert, le premier motif trouvé apparaît avec une fréquence de 16. Il a été étiqueté 23 et correspond à : 17, 2, 17, 15, 20, 15, 20, 5, 20, 17, 2, 17, c’est-à-dire le motif la, do, la, sol#, si, sol#, si, re, si, la, do, la :



Toutes les occurrences de ce motif sont remplacées par l’événement 23. Ainsi le nombre d’événements correspondant à des notes diminue progressivement au fur et à mesure que des événements correspondant à des motifs les

remplacent dans la séquence.

4. Expérimentations

L'expérimentation a porté sur l'analyse mélodique de deux pièces de musique brésilienne du XIX^{ème} siècle. La première, "Lundu caracteristico" est de de Joachim Callado et la deuxième une tarentelle de Mathieu-André Reichert.

4.1. Cycles

La première expérimentation a été réalisée pour la pièce de J. Callado en fa mineur, sans utiliser d'heuristique particulière. Dans le tableau ci-dessous, chaque ligne représente un cycle complet de découverte avec les paramètres utilisés et les résultats de l'analyse.

séq.	nb d'évts.	fréq. min	largeur fenêtre	long. min	préfixe	nb de résultats	nb de motifs	nb de réécritures.	nb evts restants
0	556	4	8	5		668	8	40	338
1	378	4	64	8	23	300	1	4	338
2	350	2	32	4	23,24,23	55	1	2	
2	350	2	16	10	14,7,2,16,14	5	1	2	
2	350	2	16	10	11,8,14,11,8	232	1	2	
2	350	2	16	10	2,16,11,4,2	7	1	2	
2	350	2	32	19	2,16,11,4,2	16	1	2	
2	350	2	15	14		139	1	2	
2	350	2	10	6		90	1	2	202
3	216	2	256	4	31	235	1	2	200
4	202	2	5	5		33	2	4	
4	202	2	8	6		265	3	6	140

Chaque ligne du tableau représente une itération du processus de découverte. Pour chacune d'elles, les colonnes du tableau représentent :

- La version de la trace : "0" est la version initiale qui correspond à la partition (556 événements notes ou silences). Les versions suivantes intègrent des événements correspondant à des motifs découverts lors des cycles précédents.
- Le nombre d'événements de la séquence : il diminue au fur et à mesure des réécritures à l'aide des motifs trouvés.
- Les colonnes 3 à 6 correspondent aux paramètres utilisés pour la fouille : la fréquence seuil, la largeur de la fenêtre, la longueur minimum des motifs et le préfixe.
- Le nombre de résultats est le nombre de motifs trouvés par dmt4sp.
- Le nombre de motifs sélectionnés par l'utilisateur

- Le nombre de réécritures : chaque motif trouvé fait l’objet d’une réécriture qui a pour effet de remplacer chaque motif sélectionné par un numéro d’événement correspondant dans la séquence.

La stratégie adoptée pour cette première pièce a consisté à exploiter les motifs découverts lors de cycles précédents pour orienter la recherche de motifs plus long par l’utilisation de préfixes. Un premier motif très fréquent trouvé lors de la première analyse est celui qui débute la pièce et de nombreux débuts de phrases. C’est l’accord de fa mineur (longueur 3, fréquence 29) qui a constitué ensuite le préfixe de beaucoup d’autres motifs plus longs. Huit cycles de découverte sur la version 1 puis 2 de la séquence ont été effectués pour trouver d’autres motifs plus longs.

La deuxième expérimentation a été réalisée pour la pièce de M.-A. Reichert dont la première partie commence en la mineur et la deuxième partie en la majeur. L’analyse a utilisé des heuristiques pour faciliter la localisation des motifs. La fréquence minimale était toujours 2.

séq.	nb evts	longueur min /max	larg. fen.	Evt max	nb de résultats	contraintes début/fin/2	nb motifs	nb de réécritures
0	1606	12 /12	12		297	51/51/51	30	99
1	618	11 /12	12	22	179	30/30/6	4	12
2	498	10 /12	12	22	431	53/57/14	6	351
3	424	9 /12	12	22	1846	280/279/62	309	1
4	117	2 /4	50		299	282/0	14	32

Un nombre moins important de cycles de découverte a été effectué. À chaque cycle une réécriture de la séquence a été réalisée (changement de version). La colonne 7 permet de rendre compte de l’intérêt de l’application de l’heuristique de frontière. Les trois valeurs $n1/n2/n3$ sont respectivement le nombre de motifs parmi les résultats vérifiant la contrainte de début de motif, le nombre de motifs vérifiant la contrainte de fin de motif, le nombre de motifs vérifiant les deux contraintes de début et de fin de motif. L’heuristique de frontière de phrase a été appliquée dès la première fouille sur la séquence 0. Les paramètres choisis pour la première fouille ont tiré profit des premières observations du texte pour rechercher d’emblée des motifs dont la longueur colle à la fenêtre (peu de variations de durée qui limitent la combinatoire). Ceci a limité fortement le nombre de résultats (297) et l’application de l’heuristique de frontière de phrase a permis de sélectionner 51 résultats sur ces 297 dans lesquels 30 motifs ont été trouvés. La découverte des premiers motifs et la réécriture de la séquence a ensuite permis de se focaliser sur d’autres motifs moins faciles à identifier, en relâchant les contraintes de longueur. La fouille a d’abord été focalisée sur les événements non issus de transformations

(Evt max = 22). L'utilisateur recherche d'abord les motifs vérifiant la double contrainte de frontière de début et de fin, puis il recherche dans un deuxième temps les motifs vérifiant une seule de ces contraintes. Quelques motifs sont difficiles à identifier, par exemple le motif e_1 , e'_1 , e''_1 a été délicat à trouver du fait que des variations ont lieu en début de phrase :

Ces variations sont dues à l'enchaînement à partir de la phrase précédente et à l'effet que le compositeur a voulu donner pour appuyer le changement de tonalité et de thème.

Dans certaines zones du texte, aucun motif n'a été trouvé mais il existe cependant des similarités qu'il serait intéressant d'étudier en faisant varier le point de vue sur la trace, par exemple en adoptant un point de vue sur les intervalles.

4.2. Résultats

À partir des motifs trouvés nous avons pu obtenir la structure de la pièce de J. Callado du fait de la répétition de certains motifs qui articulent la pièces : a_1 et b_1 , et qui correspondent respectivement aux transformés N° 31 et 46.

Phrase	mesures	motifs	mesures	Transformés
A	32	$a_1 a_2$	16	8 + 8 31,33, 35
		$a_1 a_3$	16	8 + 8 31, 36, 37, 38
B	32	$b_1 b_2$	16	8 + 8 46, _
		$b_1 b_3$	16	8 + 8 46, _
A	32	$a_1 a_2$	16	8 + 8 31, 33, 35
		$a_1 a_3$	16	8 + 8 31, 36, 37, 38

Les motifs forment des groupes de 8 mesures qui peuvent se grouper en 16 pour former les thèmes. La forme ABA est caractéristique du rondo. Dans les phrases b_2 et b_3 de la partie B, aucune régularité n'a été trouvée. Cependant, une analyse rythmique a mis en évidence des motifs rythmiques caractéristiques syncopés.

Pour la pièce de Reichert le résultat de l'interprétation est le suivant :

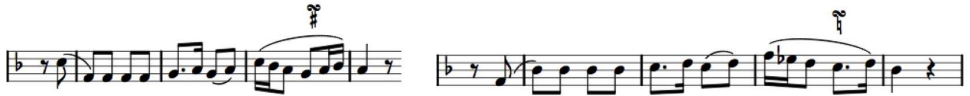
thème	mesures	Motifs mélodiques	Transformés	
Première partie en la mineur				
A	16	4×2×2	aa'aa''	60,61
B	16	4×2×2	bb'bb''	62,63
A	16	4×2×2	aa'aa''	60,64
C	32	4×4×2	cc'cc''	65,66,65,66
D	16	2×4×2	dd'dd''	67,_,67,_
C	16	4×4	cc'''	65,_
A	16	4×2×2	aa'aa''	60,61
B	16	4×2×2	bb'bb''	62,63
A	16	4×2×2	aa'aa''	60,64
Deuxième partie en la majeur				
E	16	4×4×2	ee'e''e''	68,69,70,69
F	16	2×4 + 4 × 2	f ₁ f ₁ f ₂ f ₂ f ₃ f ₃	38,_,38,_,39,39,40,40
E	16	4×4	e''e'''	70,_
G	42	4×4×2	g ₁ g ₂	72,72,73,73
		4×2 + 2×2	g ₃ g ₄	46,46,74,74

La première partie de la pièce en la mineur possède une structure symétrique ABACDCABA. Il y a une alternance du thème A avec les thèmes B et C. La deuxième partie en la majeur possède la structure EFEG où le thème E alterne avec les thèmes F et G. Les phrases et motifs sont le plus souvent des groupes de 4, 8 ou 16 mesures. Cette structure est typique de la forme rondo (Biven, 1998; Fuchs, 2010) et de ce style de musique.

5. Discussion

La réalisation de ce travail s'est heurtée à plusieurs difficultés. Les pièces étudiées comportent assez peu de variations et d'irrégularités rythmiques. Si la pièce comportait beaucoup plus de variations, cela se traduirait en un "étalement" plus important des motifs qui seraient plus difficiles à identifier du fait d'une combinatoire importante. Nous projetons d'étudier d'autres pièces typiques de ce problème, et là encore, l'heuristique de frontière de phrase peut également s'appliquer. Des difficultés apparaissent également lorsqu'on est en présence de variations rythmiques ainsi qu'une variation importante des durées. Nous avons testé un changement de point de vue sur la trace qui permet de diminuer le nombre de résultats et d'identifier les motifs rythmiques et phrases plus facilement, mais ce résultat doit encore être confronté au point de vue mélodique pour être validé.

Parmi les changements de points de vue possibles, on peut, connaissant la tonalité si elle est explicite, remplacer les notes par leur degré dans cette tonalité et d'éliminer ainsi les notes étrangères. Cela permet d'éliminer une partie de "bruit". Cependant il ne faut jamais perdre de vue qu'il y a souvent, dans une pièce musicale, des modulations qui ne sont pas explicitées et qu'il n'est pas facile de détecter sans une analyse harmonique avec la ligne de basse. Considérons par exemple, les motifs suivants :



La pièce est en ré mineur, mais ici la première phrase a modulé en fa majeur et la deuxième en si \flat majeur. Il s'agit à peu de chose près du même motif transposé, (marche harmonique), mais pour pouvoir le détecter il faut connaître la tonalité qui n'est pas explicitée. L'analyse des intervalles entre notes successives permettrait également de détecter une régularité et de délimiter les phrases. L'analyse du mouvement (ascendant, descendant) permettrait également de détecter des similarités mais de façon plus approximative lorsque certains motifs sont particulièrement difficiles à identifier.

Tous ces changements de représentation, calculs et réécritures sont des sortes de transformations automatisables grâce au système à base de traces.

6. Conclusion, perspectives

Nous avons présenté une expérimentation des principes de la théorie de la trace dans le domaine de l'analyse musicale, où un grand nombre d'opérations réalisées durant le processus sont assimilables à des transformations qui est l'opération de base dans un SBT.

Actuellement le processus n'est que partiellement automatisé, et les perspectives à ce travail concernent deux directions principales :

- l'automatisation complète des transformations avec un SBT qui permettrait de gagner considérablement en efficacité,
- l'analyse musicale exploitant les transformations pour effectuer des transformations beaucoup plus élaborées selon de multiples points de vues.

L'automatisation faciliterait beaucoup le travail de l'analyste et offrirait plus de possibilités de changements de point de vue pour améliorer le processus de découverte. La découverte de connaissance exploitant une base de

connaissances du domaine offrirait de plus grandes possibilités de transformations.

De plus, l'analyse effectuée n'exploite pour le moment que la partie mélodique, mais nous projetons d'intégrer les différentes parties d'accompagnement. Actuellement, seul un ensemble restreint de symboles musicaux a été exploité, et il faudrait prendre en compte d'autres symboles tels que par exemple les liaisons, les barres de mesure, la métrique, la dynamique, etc.

Enfin, pour terminer, un outil de visualisation et d'écoute apporterait sans doute une grande aide pour la sélection des motifs et leur localisation sur le texte de la partition.

Références

- BIVEN D. (1998). *Le choro, musique instrumentale brésilienne*. Mémoire de maîtrise d'ethnomusicologie, Université de Paris VIII.
- CAMBOUROPOULOS E., CRAWFORD T. & ILIOPOULOS C. (2001). Pattern processing in melodic sequences : Challenges, caveats and prospects. *Computers and the Humanities*, **35**, 9–21.
- CAMBOUROPOULOS E. & ROLLAND P.-Y. (2004). *Algorithmes et techniques pour l'analyse musicale*, In (Pachet & Briot, 2004), chapter 9, p. 311–337. Hermès.
- FUCHS B. (2010). *La musique et la place de la flûte au Brésil du XIX^e siècle*. dossier pour le Certificat de Fin d'Études Musicales (CFEM), École Nationale de Musique de Villeurbanne.
- LARTILLOT O. (2004). *Fondements d'un système d'analyse musicale computationnelle suivant une modélisation cognitiviste de l'écoute*. Thèse de Doctorat en Informatique, Université Paris VI.
- MANNILA H., TOIVONEN H. & VERKAMO A. (1997). Discovery of frequent episodes in event sequences. *DMKD Journal*, **1**, 259–289.
- F. PACHET & J.-P. BRIOT, Eds. (2004). *Informatique musicale : du signal au signe musical*. Traité IC2, série Informatique et systèmes d'information. Hermès.
- RIGOTTI C. (2006). dmt4sp : Data mining technique for sequence processing. <http://liris.cnrs.fr/~crigotti/dmt4sp.html>.
- ROLLAND P.-Y. (2001). Introduction : Pattern processing in music analysis and creation. *Computers and the Humanities*, **35**, 3–8.
- SETTOUTI L. S. (2011). *Systèmes à Base de traces modélisées - Modèles et langages pour l'exploitation des traces d'Interactions*. Thèse de doctorat en informatique, Université Claude Bernard Lyon 1.