

**VOLUME!**

**Volume !**

La revue des musiques populaires

**12 : 2 | 2016**

**Special Beatles studies**

---

## *Hey Maths !* Modèles formels et computationnels au service des Beatles

*Hey Maths! Formal and Computational Models in the Service of the Beatles*

**Moreno Andreatta, Mattia G. Bergomi et Franco Fabbri**

---



**Édition électronique**

URL : <http://journals.openedition.org/volume/4723>

DOI : [10.4000/volume.4723](https://doi.org/10.4000/volume.4723)

ISSN : 1950-568X

**Édition imprimée**

Date de publication : 22 mars 2016

Pagination : 161-179

ISBN : 978-2-913169-40-1

ISSN : 1634-5495

**Référence électronique**

Moreno Andreatta, Mattia G. Bergomi et Franco Fabbri, « *Hey Maths !* Modèles formels et computationnels au service des Beatles », *Volume !* [En ligne], 12 : 2 | 2016, mis en ligne le 22 mars 2018, consulté le 10 décembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/volume/4723> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/volume.4723>

---

L'auteur & les Éd. Mélanie Seteun

# Hey Maths!

## Modèles formels et computationnels au service des Beatles

par

Moreno Andreatta (Ircam-CNRS-UPMC)

Mattia G. Bergomi (LIM-Milan/Ircam-UPMC)

Franco Fabbri (Université de Milan / conservatoire de Parme)

**Résumé :** Cet article livre quelques réflexions sur les modèles formels et computationnels *dans* et *pour* les musiques populaires tout en mettant l'accent sur les chansons des Beatles. Après une présentation rapide des approches systématiques dans l'analyse de la forme, mais aussi des outils théoriques à la base de la représentation géométrique des structures et des processus musicaux (*Tonnetz*, constructions issues de la tradition analytique néo-riemannienne), les auteurs évoquent les questions que soulève l'analyse d'une collection de chansons des Beatles dès lors qu'on les envisage d'un point de vue formel et computationnel. En effet, si la forme et la structure des chansons des Beatles peuvent être étudiées sans recourir à des outils mathématiques, la modélisation informatique du processus de segmentation d'une pièce de musique, ainsi que les techniques issues du *Music Information Retrieval*, permettent d'approcher ces chansons d'un point de vue computationnel tout en posant la question de leur singularité par rapport à d'autres musiques elles aussi qualifiées de « populaires ».

**Mots-clés :** *forme – Tonnetz – analyse transformationnelle – modèle système-contraste – dendrogramme – traitement de l'information musicale – Math'n Pop*

**Abstract:** This article proposes some thoughts on formal and computational models *in* and *for* popular music by focusing on Beatles songs. After a brief presentation of some systematic approaches in the analysis of musical form and of some theoretical tools used in the geometric representation of musical structures and processes (the *Tonnetz* and other Neo-Riemannian constructions), the authors deal with the questions raised by the analysis of a collection of Beatles songs once they are studied either from a formal or a computational viewpoint. Even though the form and the structure of Beatles songs can be studied without using mathematical tools, the computer-aided modelling of the segmentation process of a musical piece, as well as the techniques belonging to the field of Music Information Retrieval, allow to give a quantitative, computational-oriented interpretation of Pop songs. At the same time, this approach opens the question of the singularity of this repertoire with respect to other popular music pieces.

**Keywords:** *form – Tonnetz – transformational analysis – system-contrast model – dendrogram – Music Information Retrieval – Math'n Pop*

La musique des Beatles représente un cas intéressant non seulement pour le musicologue computationnel, mais encore, plus généralement, pour l'analyste s'intéressant aux articulations entre musique savante et musique populaire<sup>1</sup>. En effet, longtemps avant de devenir un objet d'étude pour les chercheurs travaillant dans ce qu'on appelle traditionnellement la *Music Information Retrieval*, cette musique a fasciné les compositeurs issus de la tradition savante. Il suffit, pour s'en convaincre, de songer aux arrangements pour voix soliste et ensemble (jusqu'à neuf instruments) de Louis Andriessen et Luciano Berio<sup>2</sup> ou aux transcriptions pour guitare de quatre chansons des Beatles par Tōru Takemitsu<sup>3</sup>. Comme l'a récemment montré un colloque organisé sous l'égide de la Société Française d'Analyse Musicale<sup>4</sup>, on pourrait même ajouter à ces quelques exemples les nombreuses autres formes d'articulation entre démarche savante et pratiques compositionnelles caractéristiques du répertoire populaire (dont les Beatles sont l'un des représentants). Parallèlement à une typologie basée sur le « triangle axiomatique » de Tagg, dans lequel la *popular music* est, avec la musique folklorique (ou traditionnelle) et la musique classique (ou savante), l'un des trois types (*kinds*) de musique (Tagg, 1982), il est intéressant d'aborder la notion complexe de *genre* en considérant les objets musicaux comme des « faits » et des « événements ». Ces derniers sont caractérisés par un ensemble de propriétés que l'on peut regrouper dans des familles d'ordre supérieur appelées des « types » (Fabbri, 2007; 2014). Dans le cas des chansons des Beatles, une approche par « types »

conduit, en premier lieu, à s'intéresser au problème de la modélisation de la forme comme l'a initialement envisagé Fabbri (1996; 2012a). Un rappel de la terminologie qui sera utilisée dans ces pages peut s'avérer utile.

- *Refrain* : section d'une chanson dans laquelle la musique et les paroles sont répétées à l'identique tout au long de la pièce, les paroles faisant apparaître le titre de la chanson;
- *Chorus* : section d'une chanson dans laquelle la musique est répétée à l'identique tandis que les paroles varient. Certaines lignes du texte (dont le titre de la chanson) sont, cependant, elles aussi répétées;
- *Verse* : section d'une chanson dans laquelle la musique est répétée à l'identique tandis que l'ensemble des paroles varie;
- *Bridge* : section d'une chanson qui se positionne après les chorus et dont elle diffère par le caractère harmonique et mélodique.

Une analyse systématique des chansons des Beatles révèle que la majorité d'entre elles utilise la forme AABA (ou *chorus-bridge*<sup>5</sup>). C'est par exemple le cas de « From Me to You », dont le schéma formel est donné dans la figure 1<sup>6</sup>.

On retrouve le même schéma, quoique légèrement étiré dans le temps, dans « A Hard Day's Night » (figure 2).

Ce type formel s'oppose à la forme *verse-refrain* ou *verse-chorus*<sup>7</sup>, que l'on trouve dans d'autres chansons, comme « Penny Lane » (figure 3) ou « Let It Be » (figure 4).

Hey Maths !

### From Me To You

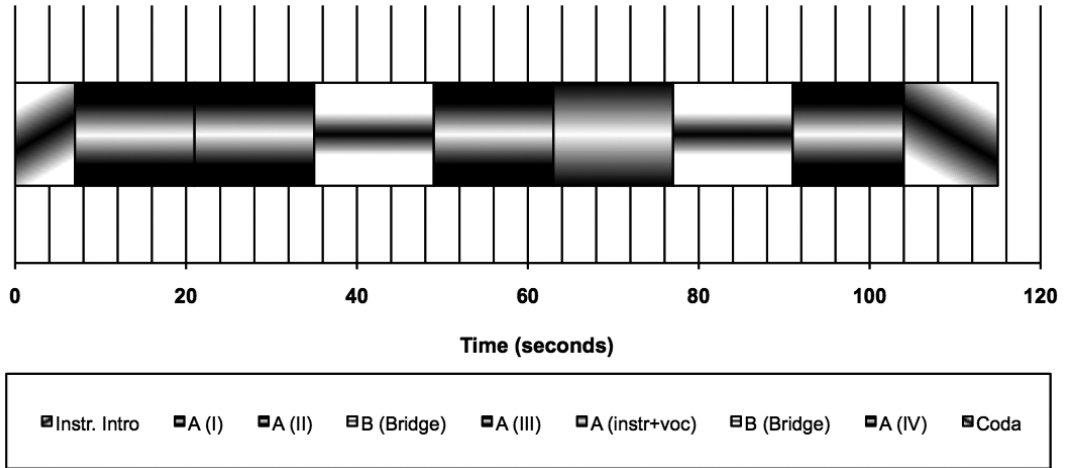


Figure 1 : Schéma de la chanson « From Me to You ».

### A Hard Day's Night

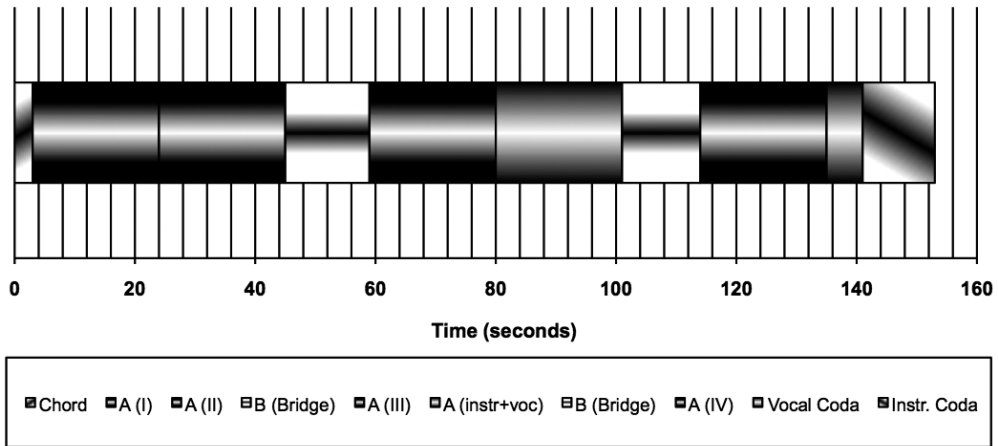


Figure 2 : Schéma de la chanson « A Hard Day's Night ».

## Penny Lane

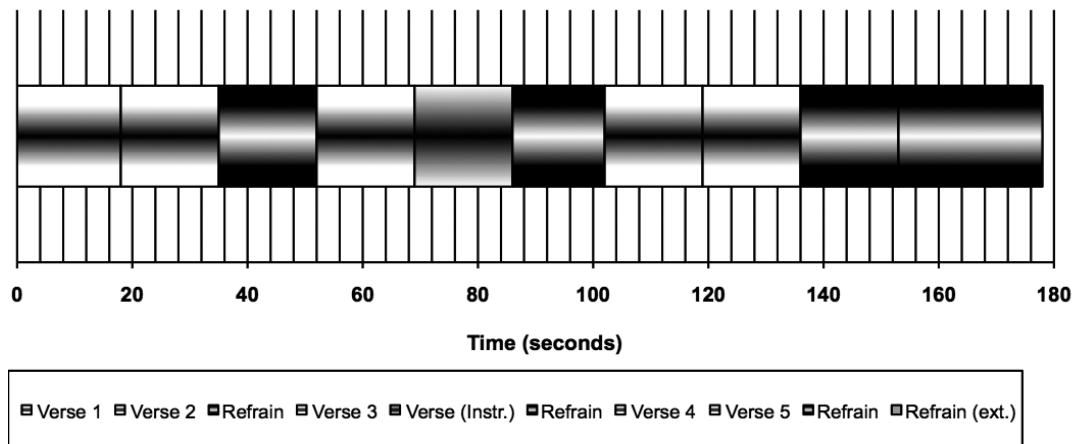


Figure 3 : Schéma de la chanson « Penny Lane ».

## Let It Be

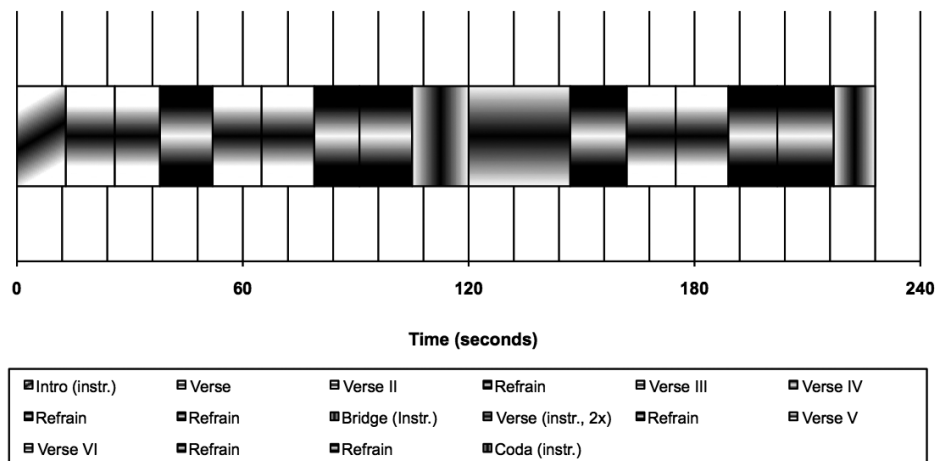


Figure 4 : Schéma de la chanson « Let It Be ».

Hey Maths !

Selon Fabbri (1996), les types AABA et *verse-refrain* (ou *verse-chorus*) représentent deux modèles antagonistes en termes de stratégie rhétorique. Dans le cas d'une forme AABA (ou *chorus-bridge*), on a affaire à un modèle soustractif, qui possède un caractère non-téléologique. À l'inverse, dans une forme *verse-refrain* (ou couplet-refrain), le caractère narratif et directionnel est typique, par exemple, de la « chanson à texte ». Dans le premier cas, le caractère exclamatif découle du fait que le centre d'intérêt (le *hook*) se trouve en début de section, alors que dans le second, la narration impose un aspect additif (d'où le positionnement du *hook* en fin de section<sup>8</sup>).

L'approche formelle évoquée ci-dessus repose sur des segmentations qui dépendent de connaissances musicologiques préalables. Autrement dit,

c'est au musicologue et à l'analyste qu'il appartient de repérer, dans un flux audio, les segments qui correspondent aux parties codifiées dans la structure des chansons – *refrain*, *verse*, *chorus*, *bridge*. Cela étant, il est aussi envisageable de réaliser une analyse plus fine en segmentant le signal sonore en blocs plus petits dont l'assemblage permet ensuite de retrouver les parties plus traditionnelles de la chanson. Le modèle « système-contraste », développé par Frédéric Bimbot et son équipe à l'IRISA de Rennes (Bimbot *et al.*, 2012), peut s'avérer ici d'une grande utilité. Inspiré de la linguistique, ce modèle permet d'annoter des fichiers sonores avec une granulosité plus ou moins importante. La figure 5 fournit un exemple de ce qu'il donne appliqué à la chanson « Come Together ».

### Come Together

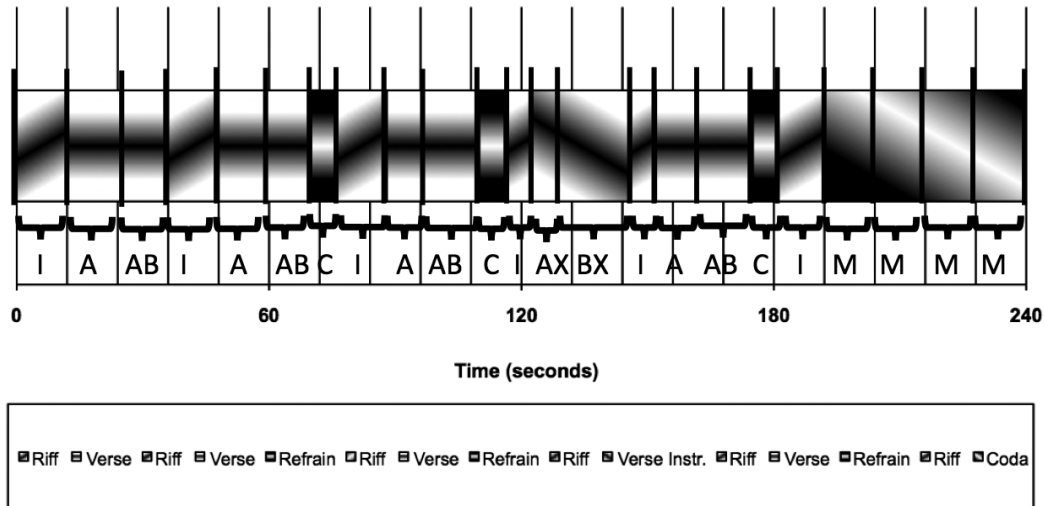


Figure 5 : Segmentation de « Come Together » avec indexation des différentes parties selon les conventions utilisées par les auteurs du modèle « système-contraste ».

Comme nous allons le voir, cette façon d'annoter les segments d'une pièce constitue, lorsqu'elle est combinée avec des techniques d'alignement des séquences de symboles, une nouvelle approche dans l'analyse des bases de données et dans la classification stylistique automatique. Avant de présenter les résultats de cette approche computationnelle, commençons toutefois par évoquer un modèle géométrique qui permet d'ajouter à l'information formelle une information harmonique, condition nécessaire pour raffiner les techniques de recherche de similarité entre les pièces d'un même auteur (dans le cas présent, le corpus de chansons des Beatles qui figurent dans la base de données Quaero<sup>9</sup>), mais aussi entre les pièces de deux groupes appartenant à des répertoires stylistiques différents (en l'occurrence, les Beatles et Buena Vista Social Club).

### Un outil conceptuel pour l'analyse musicale : le Tonnetz

L'utilisation de l'informatique pour analyser les musiques actuelles est étroitement liée à la question de la représentation symbolique des structures et des processus musicaux (Lalitte, 2014). Le *Tonnetz* (ou « réseau tonal »), représentation à la fois mathématique et musicale, est à la base de l'analyse néo-riemannienne – une branche formelle de la musicologie dont le domaine d'application a largement dépassé le cadre initial de la musique savante pour inclure, de plus en plus, le rock, le jazz et la musique *pop* (Capuzzo, 2004; Hascher, 2007; Briginshaw, 2012<sup>10</sup>). À la différence de la plupart des musicologues qui se sont

déjà penchés sur le sujet, nous aimerions insister ici sur le potentiel computationnel du *Tonnetz*, c'est-à-dire sur sa capacité à être utilisé dans le cadre d'une analyse musicale assistée par ordinateur (Bigo & Andreatta, 2014; 2015). Le *Tonnetz* peut être défini comme un espace géométrique engendré par des transformations musicales qui s'appliquent à des accords consonants (majeurs et mineurs). Chaque accord du *Tonnetz* est représenté sous la forme d'un triangle, lequel est entouré par trois autres triangles qui correspondent aux accords avec lesquels il entretient une relation de « parallèle » (via l'opérateur indiqué par la lettre P, qui transforme par exemple un accord de *do* majeur en un accord de *do* mineur), de « relatif » (via l'opérateur indiqué par la lettre R, qui transforme par exemple un accord de *do* majeur en un accord de *la* mineur), ou de « leading tone », soit de « sensible » (via l'opérateur indiqué par la lettre L, qui transforme par exemple un accord de *do* majeur en un accord de *mi* mineur). Ces trois opérations sont les seules opérations qui permettent de passer d'un accord parfait majeur à un accord parfait mineur ayant deux notes en commun avec lui (figure 6).

Prenons l'exemple du refrain de la chanson « Shake the Disease » du groupe Depeche Mode (figure 7). Ce refrain est constitué de quatre accords qui se répètent de façon cyclique en déployant de multiples symétries (Capuzzo, 2004). Une première transformation, indiquée par la flèche ascendante, relie les accords de *ré* mineur et de *fa* mineur, qui ont la note *fa* en commun. Cette transformation n'appartient pas à la famille des transforma-





tions élémentaires néo-riemanniennes que nous venons d'évoquer, mais elle peut être interprétée comme la combinaison d'une transformation R (de *ré* mineur à *fa* majeur) et d'une transformation P (de *fa* majeur à *fa* mineur), d'où l'indication « RP ». Une transformation similaire relie les deux accords suivants (*ré<sub>b</sub>* majeur et *si<sub>b</sub>* majeur), qui ont eux aussi la note *fa* (F) en commun. La transformation indiquée à l'aide d'une double flèche (entre le deuxième et troisième accord) est quant à elle une transformation élémentaire, puisqu'elle correspond à l'opérateur L. À noter qu'elle permet en

outre de revenir à l'accord de départ, ce qui contribue à la nature cyclique du refrain.

Un enchaînement harmonique plus complexe est utilisé par Frank Zappa dans la partie instrumentale d'« Easy Meat » (voir Capuzzo, 2004). Cet enchaînement peut être décomposé en quatre cellules de quatre accords, pour un total de seize accords. Chacune de ces cellules reproduit la cellule précédente à la tierce mineure inférieure ( $T_{-3}$ ), déployant ainsi la même succession de transformations néo-riemanniennes : P, R et L (les quatre parcours correspondants sont représentés dans le *Tonnetz* en figure 8).

fa la- la<sub>b</sub> sol ré fa<sub>#</sub>- fa mi si ré<sub>#</sub>- ré ré<sub>b</sub> la<sub>b</sub> do- si si<sub>b</sub>

The figure illustrates a harmonic chain through four boxes of chords and their corresponding Tonnetz diagrams. The notes above the staff are: fa, la, la<sub>b</sub>, sol, ré, fa<sub>#</sub>, fa, mi, si, ré<sub>#</sub>, ré, ré<sub>b</sub>, la<sub>b</sub>, do, si, si<sub>b</sub>. The four boxes of chords are: 1) fa, la, la<sub>b</sub>, sol; 2) ré, fa<sub>#</sub>, fa, mi; 3) si, ré<sub>#</sub>, ré, ré<sub>b</sub>; 4) la<sub>b</sub>, do, si, si<sub>b</sub>. Below each box is a Tonnetz diagram showing the relationships between the notes of that chord. Three curved arrows labeled  $T_{-3}$  indicate the relationship between the first three diagrams.

Figure 8 : Représentation d'un enchaînement harmonique engendré par la « translation spatiale » (ou transposition) d'une même cellule de quatre accords à l'aide du Tonnetz.

Hey Maths !

Une technique compositionnelle similaire est à la base de la chanson « Madeleine » de Paolo Conte où, cette fois, une même cellule de quatre accords est transposée à la tierce mineure supérieure (figure 9).

La figure 10 offre un dernier exemple d'utilisation des techniques d'analyse néo-riemanniennes appliquées à la chanson française. L'impression de

symétrie que l'on peut ressentir entre les accords qui composent les quinzième et seizième mesures des couplets des « Filles de l'Aurore » de William Sheller se voit confirmée par la représentation géométrique de l'enchaînement harmonique correspondant – il va sans dire qu'une analyse fonctionnelle classique aurait été incapable de rendre compte de la logique musicale éminemment « spatiale » d'un tel enchaînement.

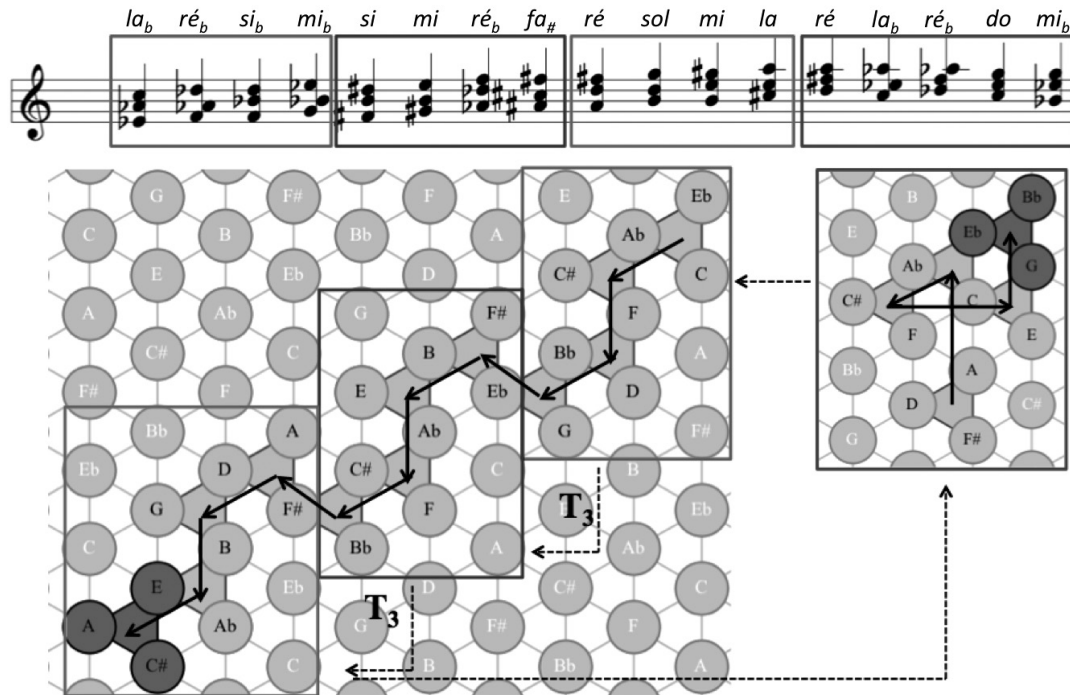


Figure 9 : Représentation de l'enchaînement harmonique à la base de la pièce « Madeleine » (Paolo Conte) à l'aide du Tonnetz.

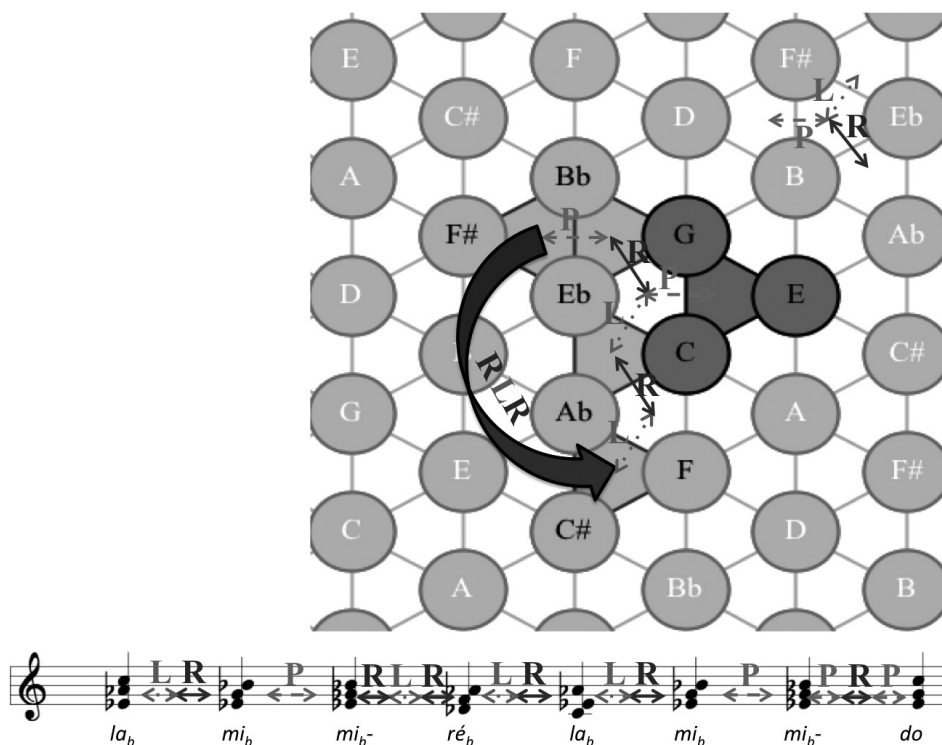


Figure 10 : Représentation de l'enchaînement harmonique des mesures 15 et 16 des couplets des « Filles de l'Aurore » (William Sheller) à l'aide du Tonnetz.

## Outils informatiques pour l'analyse des chansons des Beatles

À l'aide des informations harmoniques fournies par le *Tonnetz* (ou d'autres modèles du même type, comme le *Spiral Array*<sup>12</sup>), il est possible d'affiner la technique d'alignement « par paires » des séquences symboliques utilisée par l'un des auteurs dans l'analyse de corpus musicaux (Bergomi & Esling, 2014).

On peut ainsi parvenir à un nouveau système de classification automatique des styles musicaux, l'analyse de bases de données et le tri automatique de chansons en fonction de leurs auteurs intéressant les musicologues computationnels au plus haut point.

Pour en revenir à la base Quæro (et plus particulièrement aux chansons des Beatles qui figurent dans cette base), la technique d'alignement des

Hey Maths !

séquences symboliques dérivées des segmentations issues du modèle « système-contraste » permet, lorsqu'elle est appliquée à un tel répertoire, d'obtenir les dendrogrammes circulaires représentés dans les figures 11 et 12.

Représentation arborescente de type circulaire, le dendrogramme est basé sur la prise en compte des accords qui, dans une chanson donnée, peuvent être interprétés comme les degrés d'une même tonalité. Les séquences de symboles correspondant à chaque chanson sont ensuite alignées comme des séquences génétiques, la distance entre deux séquences étant proportionnelle à la qualité de leur « alignement » (la longueur des segments reliant deux chansons entre elles est, quant à elle, équivalente à leur distance en termes d'alignement). Le dendrogramme de la figure 12 démontre ainsi que les chansons des Beatles sont « structurellement » différentes de celles de Buena Vista Social Club<sup>13</sup>.

Considérant que, dans le modèle « système-contraste » utilisé pour annoter les fichiers audio de la base de données Quaero, aucune compétence musicologique préalable ne permet de définir (et de repérer) dans le flux sonore des parties comme le *refrain*, le *verse* ou le *bridge*, quelles conclusions pouvons-nous tirer des lignes précédentes ? L'analyse automatique de la forme se fait à partir de petits segments et de leur indexation à l'aide d'un système de symboles. C'est ce système qui est ensuite interprété dans une démarche d'alignement de séquences qui fait apparaître ou non les similarités structurelles entre la famille des chansons des Beatles et d'autres pièces contenues dans la base de données Quaero (dans le cas présent, trois chansons du Buena Vista Social Club). Une

analyse plus poussée du dendrogramme précédent s'avère donc nécessaire pour mettre en lumière l'existence de deux familles nettement séparées au sein même des chansons des Beatles contenues dans la base de données Quaero. Et les résultats de cette analyse pourraient même être complétés grâce aux techniques issues de la reconnaissance de *pattern*, ces dernières permettant, selon Joe George et Lior Shamir, d'établir un modèle computationnel capable d'analyser des similarités stylistiques entre différents albums d'un même groupe et de les classer par ordre chronologique de façon automatique (George & Shamir, 2014).

## Conclusions et perspectives

Les pages précédentes proposent un rapide aperçu de ce à quoi permet d'aboutir l'utilisation de modèles formels et computationnels dans les musiques populaires en prenant pour exemple les chansons des Beatles. Ce type de démarche s'inscrit dans l'axe de recherche transversal « Math'n Pop » de l'équipe Représentations musicales de l'Ircam, qui fait usage de modèles géométriques de l'espace d'accords (*Tonnetz*, *Spiral Array*), mais aussi de modèles informatiques issus de la *Music Information Retrieval* (comme le modèle « système-contraste ») ou de techniques d'apprentissage automatique (alignement multiple ou « par paires » de séquences symboliques). Une telle approche ouvre des perspectives nouvelles en matière de classification automatique des styles musicaux. L'une des pistes les plus prometteuses pour les recherches futures concerne probablement l'articulation entre approche symbolique et approche basée sur le

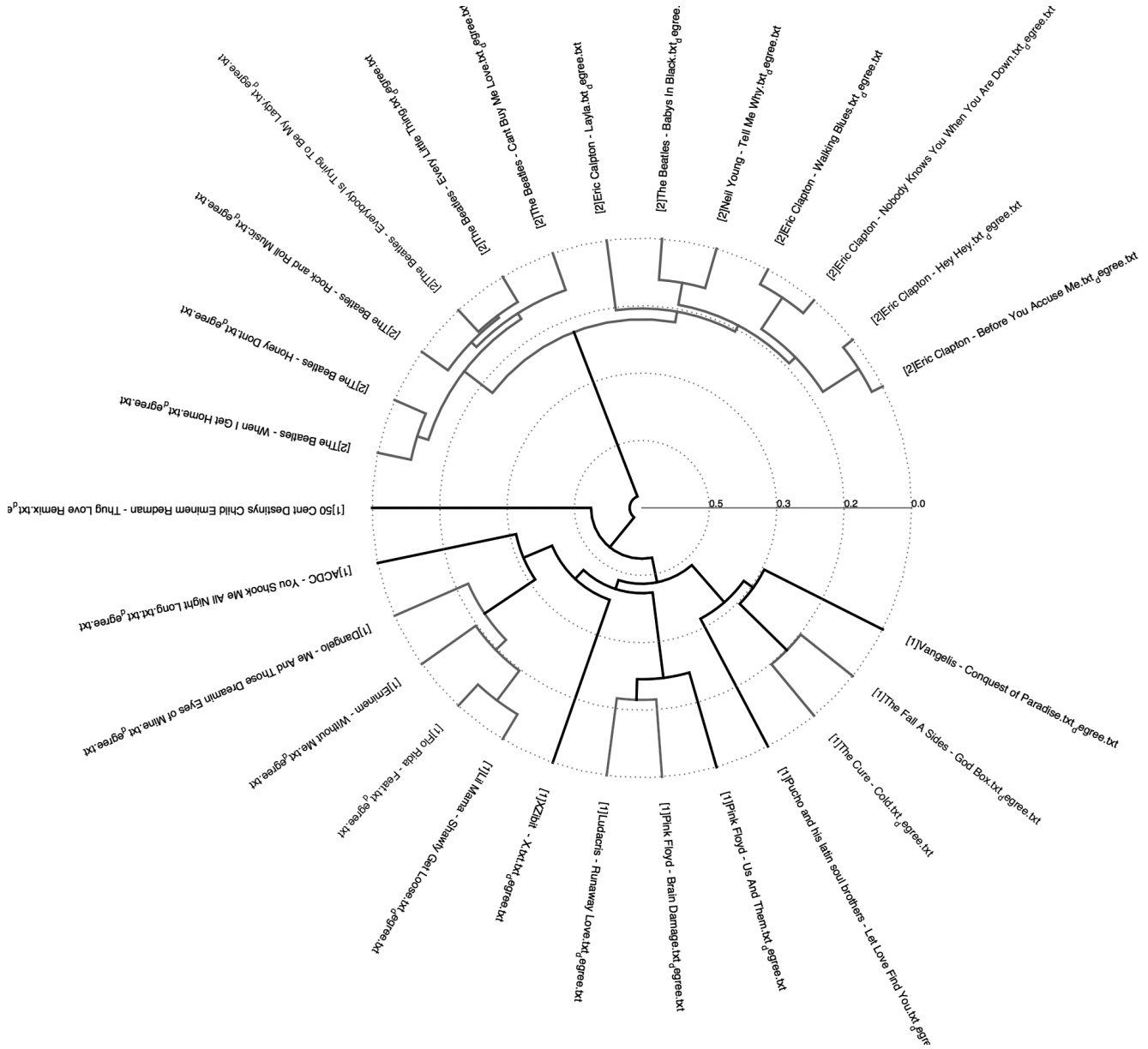


Figure 11 : Dendrogramme offrant une première catégorisation stylistique de la base de données Quaero.

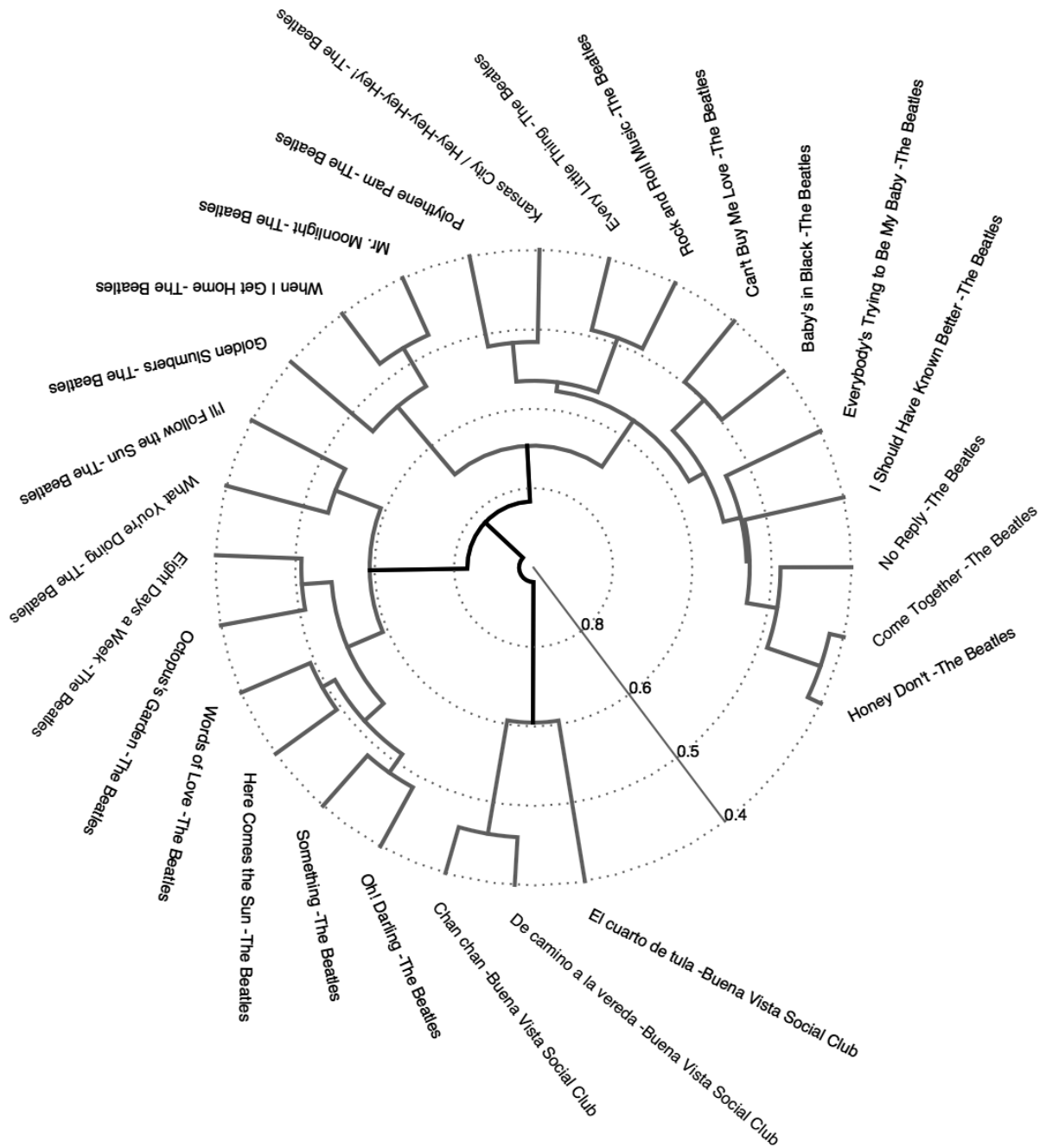


Figure 12 : Dendrogramme mettant en évidence la façon dont les chansons des Beatles se séparent automatiquement de trois pièces du Buena Vista Social Club.

signal audio, cette question faisant actuellement l'objet d'une thèse (Bergomi, 2015a). En effet, plusieurs faiblesses subsistent dans la structure du *Tonnetz* « symbolique » que l'on utilise pour analyser la musique à partir de fichiers MIDI. Au premier chef, on peut noter son caractère « isotrope », c'est-à-dire le fait que tous ses éléments (notes, accords, etc.) ont *a priori* le même poids. Cette structure géométrique ne permet donc pas, par exemple, de différencier une gamme de tous ses modes associés. La prise en compte du caractère consonant/dissonant des différents intervalles, à partir d'études psycho-acoustiques ou de données issues de la psychologie expérimentale (Purwins *et al.*, 2007/2008) permet d'obtenir, à

partir du *Tonnetz*, un espace anisotrope dont les objets n'ont pas tous le même poids. Un exemple de *Tonnetz* « déformé » est donné en figure 13.

Ces nouvelles structures géométriques, plus souples que les structures traditionnelles, pourraient ainsi compléter la palette des outils dont dispose l'analyse musicale computationnelle, en particulier dans l'articulation qu'elle semble de plus en plus rechercher entre les approches symboliques et les démarches basées sur l'analyse du signal audio. Les chansons des Beatles, loin de représenter un simple cas d'étude, constitueront, à n'en pas douter, un terrain de recherche particulièrement fertile dans ce domaine.

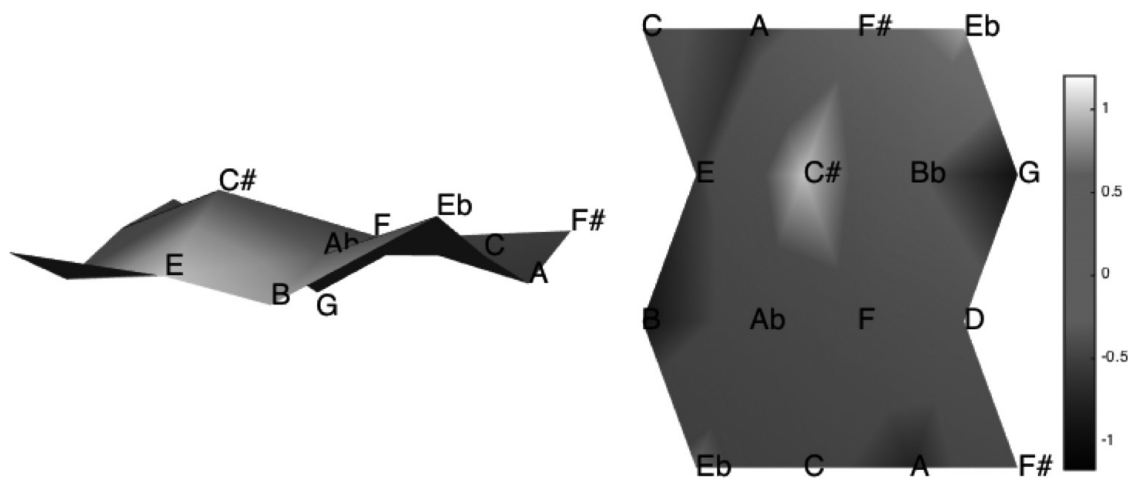


Figure 13 : Exemple de Tonnetz « déformé » (à l'aide, dans ce cas particulier, d'une fonction consonance basée sur l'accord de do majeur).

Hey Maths !

## Bibliographie

- ANDREATTA Moreno (2014), « Math'n pop workshop : Formal and computational models in popular music », *Workshop organisé dans le cadre de la ICMC/SMC Joint International Conference*, Athènes, 14-20 septembre.
- (2015), « Modèles formels dans et pour la musique pop, le jazz et la chanson », in Zoï KAPOULA, Louis-José LESTOCART & Jean-Paul ALLOUCHE (eds.), *Esthétique & Complexité II. Neurosciences, évolution, épistémologie, philosophie*, Paris, CNRS, p. 69-88.
- BERGOMI Mattia G. (2015a), *Dynamical and Topological Tools for Music Analysis*, thèse de doctorat, UPMC-Ircam-LIM (en préparation).
- (2015b), « Dynamics in modern music analysis », *XXI<sup>st</sup> Oporto Meeting on Geometry, Topology and Physics*, Lisbonne, 4-7 février.
- BERGOMI MATTIA G. & ANDREATTA MORENO (2015), « Math'n Pop versus Math'n Folk ; A computational (ethno)-musicological approach », *Proceedings from the Third International Workshop on Folk Music Analysis*, Paris, p. 32-34. <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/276246> [22-07-2015].
- BERGOMI Mattia G. & POPOFF Alexandre (2015), « Consonance-based structuration of musical entities », *Journal of Mathematics and Music* (en cours d'évaluation).
- BIAMONTE Nicole (2011), « Introduction », *Music Theory Online*, n° 17-3 (« (Per)Form in(g) Rock »), <http://www.mtosmt.org/issues/mto.11.17.3/mto.11.17.3.biamonte.html> [02-08-2015].
- (2012), « Les fonctions modales dans le rock et la musique *metal* », in Mondher AYARI, Jean-Michel BARDEZ & Xavier HASCHER (eds.), *L'Analyse musicale aujourd'hui*, Sampzon, Éditions Delatour France.
- BIGO Louis (2013), *Représentations musicales symboliques à l'aide du calcul spatial*, thèse de doctorat, Université de Créteil/Ircam.
- BIGO Louis & ANDREATTA MORENO (2014), « A Geometrical Model for the Analysis of Pop Music », *Sonus*, n° 35-1, p. 36-48.
- (2015), « Topological Structures in Computer-Aided Music Analysis », in David MEREDITH (ed.), *Computational Music Analysis*, Berlin, Springer, p. 57-80.
- BIMBOT Frédéric, DERUTY Emmanuel, SARGENT Gabriel, & VINCENT Emmanuel (2012), « Semiotic structure labeling of music pieces : concepts, methods and annotation conventions », *13<sup>th</sup> International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, Porto, 8-12 octobre.
- BRIGINSHAW Sara B. P. (2012), « A Neo-Riemannian Approach to Jazz Analysis », *Nota Bene : Canadian Undergraduate Journal of Musicology*, n° 5-1, <http://ir.lib.uwo.ca/notabene/vol5/iss1/5> [22-07-2015].
- CAPUZZO Guy (2004), « Neo-Riemannian Theory and the Analysis of Pop-Rock Music », *Music Theory Spectrum*, n° 26-2, p. 177-199.
- CATHÉ Philippe (2010), « Nouveaux concepts et nouveaux outils pour les vecteurs harmoniques », *Musurgia*, n° 17-4, p. 57-79.



- CHEW Elaine (2014), *Mathematical and Computational Modeling of Tonality : Theory and Applications*, New York, Springer.
- COVACH John (2005), « Form in Rock Music : A Primer », in Deborah Stein (ed.), *Engaging Music : Essays in Music Analysis*, New York & Oxford, Oxford University Press, p. 65-76.
- (2006), « From “Craft” to “Art” : Formal Structure in the Music of the Beatles », in K. WOMACK & T. F. DAVIS (eds.), *Reading the Beatles : Cultural Studies, Literary Criticism, and the Fab Four*, Albany (NY), State University of New York Press, p. 37-54.
- ESLING Philippe & BERGOMI Mattia G. (2014), « Towards a unifying symbolic/audio environment for chord recognition and perceptual-based Tonnetze representations », *Math'n Pop Workshop on Formal and Computational Models in Popular Music*, conférence ICMC/SMC, 17 septembre.
- FABBRI Franco (1996), « Forme e modelli delle canzoni dei Beatles », in Rossana DALMONTE (ed.), *Analisi e canzoni*, Trento, Università di Trento, p. 169-196.
- (2007), « The king is naked : The musicological unified field and its articulation », *British Forum for Ethnomusicology Annual Conference*, Newcastle, 16-21 avril.
- (2012a), « Verse, Chorus (Refrain), Bridge : Analysing Formal Structures of the Beatles' Songs », in Geoff STAHL, & Alex GYDE (eds.), *Popular Music Worlds, Popular Music Histories : IASPM 2009 Proceedings*, IASPM, p. 92-109. <http://www.iaspm.net/proceedings/index.php/iaspm2009/iaspm2009/paper/viewFile/764/58> [22-07-2015].
- (2012b), « How Genres Are Born, Change, Die : Conventions, Communities and Diachronic Processes », in Stan HAWKINS (ed.), *Critical Musicological Reflections : Essays in Honour of Derek B. Scott*, Farnham & Burlington (VT), Ashgate, p. 179-191.
- (2014), « Music taxonomies : an overview », *JAM 2014 : Musique savante/musiques actuelles : articulations*, Ircam, 15-16 décembre.
- FRITH Simon (1998), *Performing Rites : On the Value of Popular Music*, Cambridge (MA) & Londres, Harvard University Press.
- GEORGE Joe & SHAMIR Lior (2014), « Computer analysis of similarities between albums in popular music », *Pattern Recognition Letters*, n° 45, p. 78-84.
- HASCHER Xavier (2007), « A Harmonic Investigation into Three Songs of the Beach Boys : All Summer Long, Help Me Rhonda, California Girls », *SONUS*, n° 27-2, p. 27-52.
- JULIEN Olivier (2010), « “Musiques populaires” : de l'exception culturelle à l'anglicisme », *Musurgia*, n° 17-1, p. 49-62.
- LALITTE Philippe (2014), « Outils informatiques et méthodes pour l'analyse des musiques actuelles », in GONIN P. (ed.), *Focus sur le rock en France. Analyser les musiques actuelles*, Sampzon, Éditions Delatour France.
- MEEHAN Kate (2011), « Berberian Sings the Beatles (with Help from Andriessen and Berio) », *Mitteilung der Paul Sacher Stiftung*, n° 24, p. 25-29.

Hey Maths !

- MOORE Allan F. (1995), « The so-called “flattened seventh” in rock », *Popular Music*, n° 14-2, p. 185-201.
- PURWINS Hendrik, BLANKERTZ Benjamin & OBERMAYER Klaus (2007/2008), « Toroidal Models in Tonal Theory and Pitch-Class Analysis », *Computing in Musicology*, n° 15, p. 73-98.
- SCOTT Derek B. (2009), « The Popular Music Revolution in the Nineteenth Century : A Third Type of Music Arises », in V. KURKELA & L. VÄKEVÄ (eds.), *De-Canonizing Music History*, Newcastle upon Tyne, Cambridge Scholars Publishing, p. 320.
- TAGG Philip (1982), « Analysing popular music : theory, method and practice », *Popular music*, n° 2, p. 37-67.
- TENDAHL Markus & GIBBS Raymond W. (2008), « Complementary perspectives on metaphor : Cognitive linguistics and relevance theory », *Journal of Pragmatics*, n° 40-11, p. 1823-1864.

## Notes

1. Tout au long de l'article, nous emploierons le terme de « musique populaire » au sens de *popular music*, dont on peut donner deux définitions complémentaires. En effet, si certains auteurs (Frith, 1998; Julien, 2010) considèrent cette catégorie comme étroitement liée à la « tradition phonographique », d'autres auteurs (Scott, 2009; Fabbri, 2012) assimilent la *popular music* à un type de musique qui émerge depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle dans un espace qui échappe à la fois à la tradition de la musique classique (ou savante) et à celui de la musique traditionnelle (ou folklorique). Les concepts mêmes de musique « classique » et de musique « folklorique » sont d'ailleurs apparus au début du XIX<sup>e</sup> siècle.
2. Ces arrangements, réunis sous le titre *Beatles Songs*, ont été réalisés entre 1965 et 1967. Ils comprennent notamment « Michelle I » (pour mezzo-soprano et deux flûtes ou flûte – ou hautbois – et clavecin), « Ticket to Ride » (pour mezzo-soprano et flûte, hautbois, trompette clavecin, violon, alto, violoncelle, contrebasse), « Yesterday » (pour mezzo-soprano et flûte, clavecin et violoncelle), « Michelle II » (pour mezzo-soprano et flûte, clarinette, harpe, violon, alto, violoncelle, contrebasse) et « Michelle II » (version transposée pour flûte, clarinette, harpe, violon, alto). Voir Meehan (2011).
3. Il s'agit des *Twelve Songs For Guitar* (1974-1977), parmi lesquelles on trouve des chansons comme « Here, There and Everywhere », « Michelle », « Hey Jude » ou « Yesterday ».
4. Nous faisons ici référence aux Journées d'Analyse Musicale consacrées à la question de l'articulation entre la musique savante et les musiques actuelles (JAM 2014). Le programme ainsi que les enregistrements vidéos des communications sont accessibles en ligne à l'adresse suivante : <http://repmus.ircam.fr/jam2014/home>.
5. Voir, entre autres, « Love Me Do », « Please Please Me », « Ask Me Why », « I Saw Her Standing There », « Do You Want to Know a Secret », « From Me to You », « Thank You Girl », « I'll Get You », « I Want to Hold Your Hand », « You Can't Do That », « And I Love Her », « I Should Have Known Better », « A Hard Day's Night », « I'll Cry Instead », « I'll Be Back », « Any Time at All », « Things We Said Today », « I Don't Want to Spoil the Party », « No Reply », « Eight Days a Week », « I Feel Fine » ou « I'll Follow the Sun » (pour ne citer que quelques exemples).
6. Dans ce schéma, comme dans ceux qui suivent, l'axe des abscisses indique le temps mesuré en secondes.
7. Pour une discussion détaillée de la forme *verse-refrain* ou *verse-chorus*, se reporter à Covach (2005; 2006).
8. D'autres exemples ont été évoqués par Franco Fabbri à l'occasion de la soirée « Math'n Pop » organisée dans le cadre des JAM 2014. La vidéo est disponible en ligne sur le webmagazine de la Bibliothèque publique d'information du Centre Pompidou : <http://webtv.bpi.fr/doc/4101/Math'n+Pop>. [01-08-2015].
9. La base Quaero contient 159 morceaux de musique appartenant au répertoire *pop*, chaque fichier sonore ayant été annoté manuellement par l'équipe de l'IRISA (Bimbot *et al.* 2012). [http://www.quaero.org/\[01-08-2015\]](http://www.quaero.org/[01-08-2015]).
10. L'approche néo-riemannienne n'est évidemment pas la seule possible dans l'analyse des musiques populaires. En plus de celle-ci, on citera notamment les démarches formelles basées sur les théories schenkeriennes (Moore, 1995), sur la théorie des vecteurs harmoniques de Nicolas Meeùs (Cathé, 2010) ou encore sur les théories modales (Biamonte, 2012). Pour une analyse critique des différentes approches analytiques de la forme dans la musique rock, se reporter à Nicole Biamonte (2011).

## Hey Maths !

11. Conformément à la tradition, les noms de notes sont donnés dans la nomenclature anglo-saxonne. On gardera la nomenclature francophone pour indiquer le nom des accords correspondants afin d'éviter une confusion entre ceux-ci, qui sont représentés par des triangles dans le *Tonnetz*, et les sommets des triangles qui correspondent aux notes.
12. Modèle hélicoïdal conçu par Elaine Chew, *Spiral Array* a été particulièrement utile dans le cadre de la présente étude. Pour une description détaillée de ce modèle, se reporter à Chew (2014).
13. Pour une interprétation de ces résultats dans le cadre d'une démarche d'analyse computationnelle de la musique folk, voir Bergomi & Andreatta (2015).