

L'analyse computationnelle : rapport avec la composition, la segmentation et la représentation à l'aide de graphes

Yun-Kang AHN

IRCAM

2 décembre 2009

Contexte

- Analyse musicale
- Définition générale de Bent :

L'analyse musicale est la résolution d'une structure musicale en éléments constitutifs relativement plus simples, et la recherche des fonctions de ces éléments à l'intérieur de cette structure

Bent I. L'analyse musicale, Macmillan Press Ltd, 1987.

- Commentaire, lecture subjective d'une œuvre
- Analyse à support informatique

Exemple d'analyse musicale

Mesnage M., Riotte A. *Un modèle informatique du « Troisième Regard sur l'Enfant Jésus » d'Olivier Messiaen in Actes du colloque 1990 « Musique et assistance informatique »*, 186-209, 1992

Périodicité 11 ♩

L'ECHANGE Olivier MESSIAEN

Structure temporelle d'une période
et algorithmes hauteurs correspondants

$\frac{3}{16} \left(\frac{3}{4} \right) \frac{3}{8} \left(\frac{3}{4} \right)$
 $\frac{3}{8} \left(\frac{3}{4} \right)$
 $\frac{1}{8} \left(\frac{9}{8} \right) \frac{3}{8} \left(\frac{4}{4} \right)$

STRUCTURE MÉTRIQUE
DE LA PÉRIODE CI-DESSUS

Logiciel d'aide à l'analyse : *iAnalyse*

Couprie P. *iAnalyse : un logiciel d'aide à l'analyse musicale*, Journées d'Informatique Musicale - JIM08, GMEA, Albi, 115-121, 2008

The screenshot displays the iAnalyse software interface for analyzing a musical score. The main window shows three systems of piano music for J.S. Bach's BWV 846. The first system is labeled 'Exposition' and 'Réponse', with a 'Sujet' (Subject) highlighted in green and a 'Réponse' (Response) highlighted in purple. The second system shows a 'Réponse' and a 'Sujet'. The third system shows a 'Sujet' with a '6' in a green box. Above the first system, the text reads: 'Sujet: B=2, A=1, C=3, J=8' and '2+1+3+8 = 14 notes'. The software title bar indicates the file path: 'Disque mou Users:pierrecouprie:iAnalyse ressources projets iAnalyse 2:Bach-Fugue.ianalyse'. The interface includes a menu bar with options like 'Nouveau/Ouvrir', 'Marquer', 'Ajouter des images', 'Curseur', 'Interpolation', 'Plan graphique', 'Navigation', 'Bibliothèque', 'Affichage', and 'Plein écran'. A search bar is located in the top right. On the right side, there is a 'DIAPOSITIVE' panel with fields for 'Nom' (Page 1 (haut)), 'Position temporelle' (00:00:00), and 'Propriétés graphiques' (Color of background, Coordinates x:4, y:31). Below this is an 'Image de fond' section with a checked 'Image' option and a dropdown menu showing 'page01.jpg'. A 'Commentaire' field is also present. At the bottom, there is a timeline with markers at 0:00, 0:10, and 0:20, and a control panel with 'Volume' and 'Tempo' sliders, and a play button with a timer set to 00:00:00. The bottom status bar shows 'S17x454' and navigation icons.

Logiciel d'aide à l'analyse : *Humdrum*

Wild J. *A Review of the Humdrum Toolkit : UNIX Tools for Musical Research, created by David Huron, Volume 2, Numéro 7, 1996.*

**kern	**kern	**kern	**kern
*A :	*A :	*A :	*A :
4AA	4c#	4a	4ee
=1	=1	=1	=1
8A	4c#	4a	4ee
8B	.	.	.
8c#	4c#	4a	4ee
8A	.	.	.
8D	4d	4a	4ff#
8E	.	.	.
8F#	4d	4a	4ff#
8D	.	.	.

Valeur ajoutée à l'analyse assistée par ordinateur

- Analyse assistée par ordinateur
 - Pas de structures de données encodées ni de contrôle de ces données
 - La partition et l'analyse sont indépendantes
- Analyse computationnelle
 - Abstraction de la partition et des éléments analytiques
 - Interaction entre la partition et l'analyse

Objectif idéal : outil complet d'analyse computationnelle

- Interface assistant l'analyste dans sa démarche
- Format de données liant la partition graphique et l'analyse
- Variabilité du cadre théorique de l'analyse : théorie tonale, théorie sérielle . . .
- Représentations visuelles du support musical

Mesnager M., Riotte A. *Formalismes et modèles musicaux*. Éditions Delatour, Collection Musique/Sciences, 2006.

Limitation à 3 aspects de l'analyse musicale

- Analyse et composition
- Analyse et segmentation
- Analyse et organisation de la segmentation

Analyse et composition

Rasch, aber leicht (*)

p

poco rit. *pp* *leicht* *pp* *poco rit.*

f martellato *ff* *ff* *ff*

The image displays a musical score for piano, consisting of three systems of notation. The first system is a single staff with a treble clef, marked 'Rasch, aber leicht (*)' and 'p'. The second system is a grand staff (treble and bass clefs), marked 'poco rit.', 'pp', 'leicht', 'pp', and 'poco rit.'. The third system is also a grand staff, marked 'f martellato', 'ff', 'ff', and 'ff'. The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings.

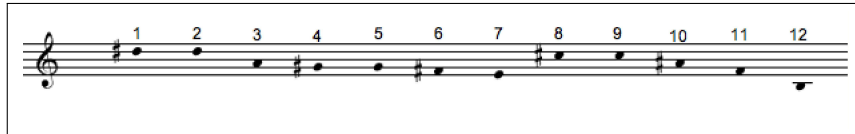
Analyse créatrice : analyse et composition

- Terme emprunté au compositeur Pierre Boulez qui y voit la seule finalité de l'analyse
- Générations de deux modèles informatiques de *Structures 1A* de Pierre Boulez à partir d'une analyse de György Ligeti

György Ligeti, *Pierre Boulez – Decision and automatism in Structure IA*, Die Reihe 4 (1975), 36–62

Structures IA de Pierre Boulez

- Composition sérielle basée sur un ordonnancement des douze notes de la gamme chromatique
- Ordonnancement des notes appliqué aux rythmes, intensités et attaques

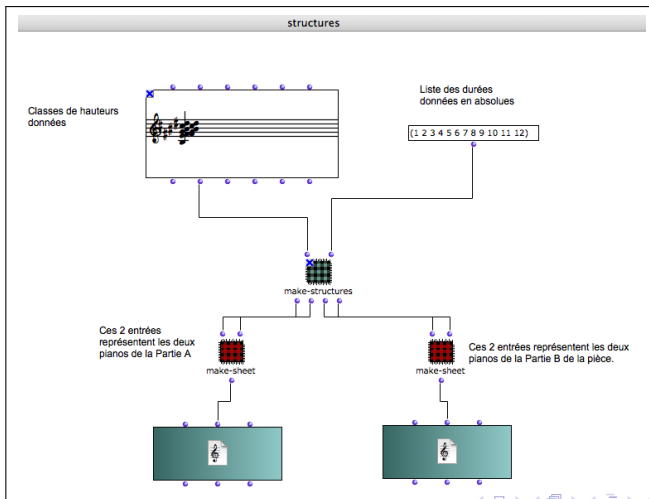


Génération de séries numériques

The image displays three staves of musical notation, each with 12 notes. The notes are numbered 1 through 12. The first staff shows a sequence of notes with numbers 1-12 above them. The second and third staves show the same sequence of notes, but with different note positions and numbers, connected by red arrows indicating a transformation. The first staff has notes on the following lines/spaces: 1 (line 1), 2 (space 1), 3 (line 2), 4 (space 2), 5 (line 3), 6 (space 3), 7 (line 4), 8 (space 4), 9 (line 5), 10 (space 5), 11 (line 6), 12 (space 6). The second staff has notes on: 2 (space 1), 8 (line 2), 4 (space 2), 5 (line 3), 6 (space 3), 11 (line 4), 1 (space 4), 9 (line 5), 12 (space 5), 3 (line 6), 7 (space 6), 10 (line 7). The third staff has notes on: 3 (space 1), 4 (line 2), 1 (space 2), 2 (line 3), 8 (space 3), 9 (line 4), 10 (space 4), 5 (line 5), 6 (space 5), 7 (line 6), 12 (space 6), 11 (line 7). Red arrows point from note 1 in the first staff to note 2 in the second, and from note 3 in the first to note 4 in the third. Cyan arrows show the sequence of notes in each staff.

Implémentation sous *OpenMusic*

Agon C. *OpenMusic : Un langage visuel pour la composition assistée par ordinateur*, Thèse de doctorat, Université Paris 6 Pierre et Marie Curie, 1998.



Implémentation sous *OpenMusic*

The image displays a musical score for five staves, likely representing a complex piece of music. The notation is dense, featuring various rhythmic values, accidentals, and dynamic markings. The score is presented in a clean, black-and-white format, typical of a digital music notation software output. The first staff begins with a treble clef and a key signature of one sharp (F#). The music is characterized by intricate rhythmic patterns, including many sixteenth and thirty-second notes, and frequent use of accidentals. There are several dynamic markings, such as 'p' (piano) and 'f' (forte), and some phrasing slurs. A second ending bracket is visible in the first and fourth staves, marked with a '2'. The overall impression is that of a highly detailed and technically demanding musical composition.

Implémentation sous *OpenMusic*



Opérations fonctionnelles sur le résultat musical

The diagram illustrates functional operations on musical notation. It features two staves of music, each with a treble and bass clef. A green 'X' is positioned between the two staves. Below the second staff, a blue dot is connected to a green 'X' above a grid icon labeled 'reverse'. This grid icon is connected by an arrow to a box containing a musical staff with a tempo marking of $\text{♩} = 50$. The box also contains a grid of blue dots, suggesting a mapping or transformation between the original notation and the processed notation.

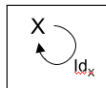
Implémentation sous *Rubato*

Mazzola G., Milmeister G., Morsy K., Thalmann F. *Functors for Music : The Rubato Composer System* in *Transdisciplinary Digital Art. Sound, Vision and the New Screen*, Springer Berlin Heidelberg, 2008

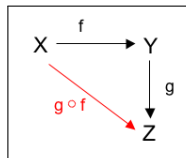
- Simulation basée sur la théorie mathématique de Guerino Mazzola
- Premier exemple sur une composition existante

Théorie des catégories

- Collection d'objets et de morphismes entre ces objets
- Axiomes :
 - Morphismes identités



- Composition de morphismes



Architecture théorique de *Rubato*

- Utilisation d'une catégorie particulière (topos)
- Liaison entre la catégorie des modules et la catégorie des ensembles
 - Utilisation des modules et des morphismes associés
 - Union et produit des modules

Un objet est caractérisé par le morphisme qui le vise

- Un objet a d'une catégorie peut être caractérisé par son morphisme identité $Id_a : a \rightarrow a$
- Un entier n n'existe pas en tant que tel mais se définit par un morphisme $0 \rightarrow n$
- La gamme chromatique est représentée sous la forme d'un morphisme $h : \mathbb{Z}^{11} \rightarrow \mathbb{Z}$ tel que $h(x) = Ax + B$ où $A = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]$ et $B = 60$

Opérations entre modules

- Morphismes entre modules et non pas entre les éléments des modules
- Transposition des douze notes de la gamme chromatique :

composition des morphismes h et T

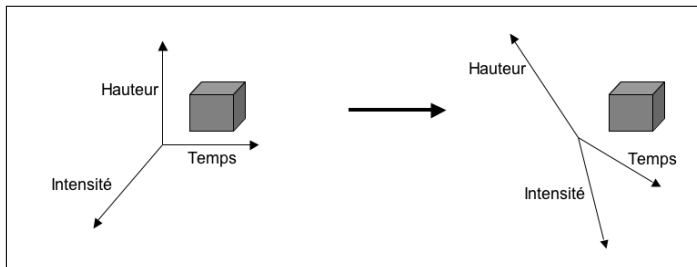
$h : \mathbb{Z}^{11} \rightarrow \mathbb{Z}$ tel que $h(x) = Ax + B$ où

$A = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]$ et $B = 60$

$T : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ tel que $T(x) = x + 5$

$T \circ h : \mathbb{Z}^{11} \rightarrow \mathbb{Z}$

Changement d'observation d'un objet musical



Deux implémentations

- *OpenMusic* : langage visuel
 - Disposition des fils sériels
 - Modification de la partition
- *Rubato* : environnement visuel
 - Utilisation de morphismes généralisés
 - Composition « graphique »

Mazzola G., Ahn Y-K. *La Vérité du Beau dans la Musique*. Éditions Delatour, Collection Musique/Sciences, 2007.

Analyse et segmentation

The image displays three staves of musical notation, likely from a piano score, with specific sections highlighted by red dashed boxes. The first staff is labeled "Rasch, aber leicht (+)" and features a piano (*p*) dynamic. The second staff is labeled "poco rit." and "leicht" (*pp*), with a "poco rit." marking at the end. The third staff is labeled "f martellato" and features a forte (*f*) dynamic. The highlighted sections represent segments identified in the analysis.

Le *Klavierstück III* de Stockhausen analysé par David Lewin

Making and Using a Pcset Network for Stockhausen's Klavierstück III, in *Musical form and transformation : Four analytic essays*, Yale University Press, 16-67, 1993

- Décomposition de l'analyse en deux étapes
 - Segmentation
 - Mise en relation des segments
- Segmentation non explicitée
- Démarche expérimentale

Le Klavierstück III de Stockhausen

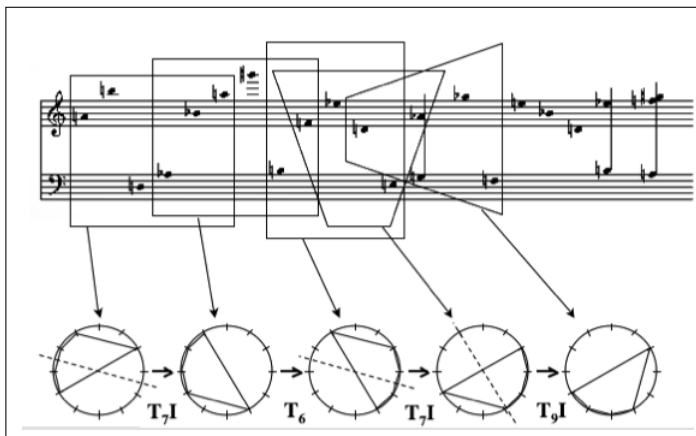
Interprétation de Steffen Schleiermacher

The image displays three systems of musical notation for 'Le Klavierstück III' by Stockhausen. Each system consists of a grand staff with a treble and bass clef. The first system begins with a 4/8 time signature and includes dynamic markings such as *p*, *mf*, *f*, and *ff*. The second system features a 4/8 time signature and dynamic markings like *p*, *mf*, *f*, and *ff*. The third system also has a 4/8 time signature and dynamic markings including *p*, *mf*, *f*, and *ff*. The notation includes various rhythmic values, accidentals, and performance instructions such as *mf*, *f*, *ff*, *p*, and *mf*.

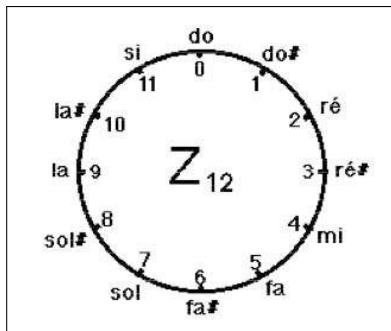
Un extrait de la segmentation de David Lewin

The image displays a musical score with three systems of staves. The score is annotated with various colored boxes and lines, indicating a segmentation analysis. The first system shows a treble and bass staff with a 4/8 time signature. The second system shows a grand staff (treble and bass) with a 3/8 time signature. The third system shows a grand staff with a 3/8 time signature. The annotations include red boxes, blue boxes, and red lines connecting different parts of the score, suggesting a complex segmentation process. The score includes dynamic markings such as *p*, *mf*, and *f*, and articulation marks like accents and slurs.

La segmentation de David Lewin : processus chronologique

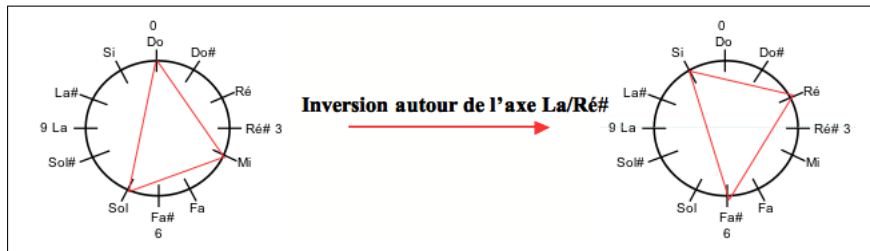


Les ensembles de classes de hauteurs : réduction des hauteurs musicales à 12



Les transformations élémentaires de classes de hauteurs :

- Transposition de n demi-tons : $x \rightarrow x + n \pmod{12}$
- Inversion de n demi-tons : $x \rightarrow n - x \pmod{12}$



- Multiplication de n demi-tons : $x \rightarrow x * n \pmod{12}$

Modélisation de la segmentation

- Postulat de la segmentation optimale : partition au sens mathématique de la pièce
- Critères d'optimisation :
 - Progression : succession des segments
 - Couverture : acceptation de toutes les classes de hauteurs de la pièce

Exploration de l'espace des segmentations possibles

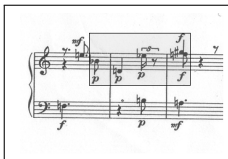
- Recherche avec variation de la cardinalité du segment
- Recherche avec variation des notes manquantes dans un segment

Séquences horizontales - verticales de classes de hauteurs

A musical score snippet illustrating horizontal and vertical sequences of pitch classes. The score is written on two staves. The upper staff contains a sequence of notes: a whole note with a flat (B-flat), a half note with a flat (B-flat), and a quarter note with a flat (B-flat). The lower staff contains a sequence of notes: a quarter note with a flat (B-flat), a quarter note with a flat (B-flat), and a quarter note with a flat (B-flat). The notes in the lower staff are grouped by a bracket and marked with a forte (*f*) dynamic. The notes in the upper staff are marked with piano (*p*) and mezzo-forte (*mf*) dynamics. A vertical sequence of pitch classes is indicated by the number '3' above the first measure and '8' below the first measure. Below the score, the sequence (4 (7 8) 6) is written in bold black text.

■ Deux types de sauts :

■ Saut vertical



■ Saut horizontal



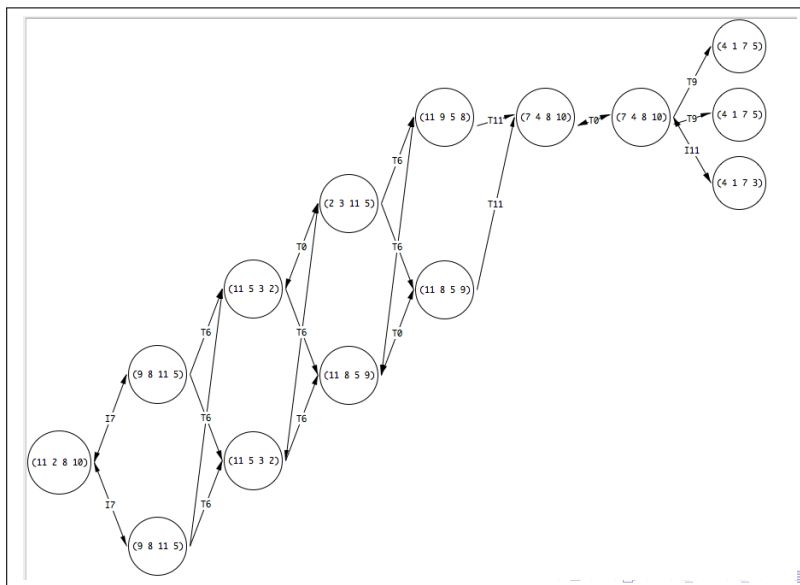
■ Stratégie de recherche des segments

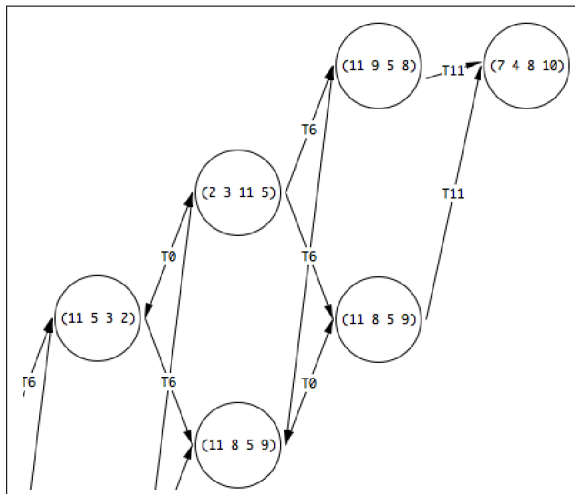
- Pas de sauts horizontaux - Sauts verticaux autorisés
- Aucun saut autorisé

Recherche d'une succession de segments : constitution d'un graphe sur une même classe d'équivalence de segments

- Les arêtes sont orientées dans l'ordre chronologique
- Les arêtes sont valuées selon la proximité temporelle et le contenu des segments
 - Poids plus ou moins importants selon la situation chronologique
 - Poids croissants selon le nombre de sauts que contient le segment (saut vertical moins important que saut horizontal)

The image displays three staves of musical notation in 4/8 time, showing dynamic markings (p, mf, f) and articulation marks (accents, slurs). The notation is presented in three rows, with the first two rows having a light gray background and the third row having a white background. The notation includes treble and bass clefs, a 4/8 time signature, and various notes and rests. Dynamic markings include p (piano), mf (mezzo-forte), and f (forte). Articulation marks include accents and slurs. The notation is presented in three rows, with the first two rows having a light gray background and the third row having a white background.





Deux types de segmentation recherchés

- Progression privilégiée
 - Problème de recherche dans le graphe du plus court chemin entre le premier segment et tous les autres
 - Algorithme de Dijkstra
- Couverture privilégiée
 - Problème de recouvrement
 - Algorithme glouton

Résultats

- Transposition et Inversion : transformations minimales (i.e. pas de multiplication)
- Détection de la meilleure structure : pentacorde avec 2 sauts horizontaux
- Détection des segments de Lewin

Couverture optimale : pentacorde et 2 sauts horizontaux

The image displays three staves of musical notation, each representing a different segment of a piece. The notation includes treble and bass clefs, a 4/8 time signature, and various dynamic markings such as *p*, *mf*, *f*, and *ff*. The staves are annotated with red boxes and lines, indicating specific musical elements and their relationships. A large, shaded pentagonal shape (pentacord) is overlaid on the first staff, and a red line with a jump indicates a horizontal transition between the first and second staves. A second shaded pentagonal shape is overlaid on the second staff, and another red line with a jump indicates a horizontal transition between the second and third staves. The third staff also features a shaded pentagonal shape and red annotations. The overall diagram illustrates the concept of optimal coverage in musical segmentation, showing how a single pentacord and two horizontal jumps can effectively cover the musical material across different staves.

Bilan

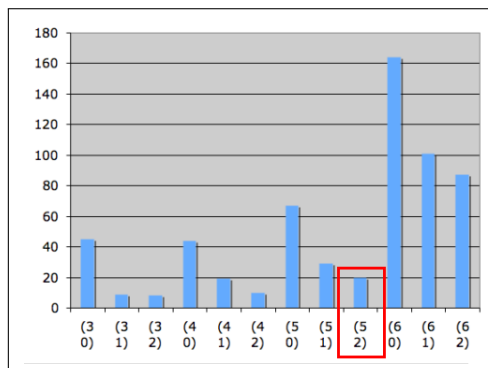
- Validation de la méthode : détection de la même structure de segments et récupération des segments de Lewin
- Extension de l'analyse de Lewin : détection de nouveaux segments
- Recherche locale

Évaluation de la segmentation : définition de mesures

- Fouille de données : F-mesure
 - Exhaustivité et pertinence d'une recherche
 - Résultat : structure identifiée mais segmentation différente
- Méthode de Cooccurrence
 - Traitement Automatique de la Langue : mesure de la croissance de l'information par rapport à la taille de l'échantillon
 - Information croissante de 2 à 6 notes puis décroissante

Évaluation de la segmentation de Lewin

- Évaluation auparavant de notre démarche par rapport à celle de Lewin
- Vérification de la spécificité de la structure du pentacorde avec deux sauts



Analyse et organisation de la segmentation

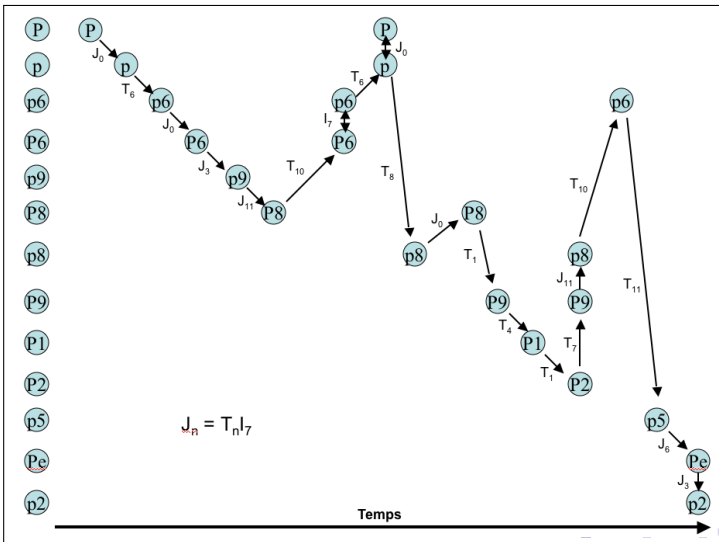
The image displays a musical score for piano, divided into three systems. The first system is marked "Rasch, aber leicht (+)" and features a piano (*p*) dynamic. The second system includes markings for "poco rit.", "pp", "leicht", and "poco rit.". The third system is marked "f martellato". Several segments of the score are highlighted with grey rectangular boxes. Red dashed arrows indicate relationships between these segments across the different systems, showing how musical motifs or structures are repeated or varied.

Le *Klavierstück III* de Stockhausen analysé par David Lewin

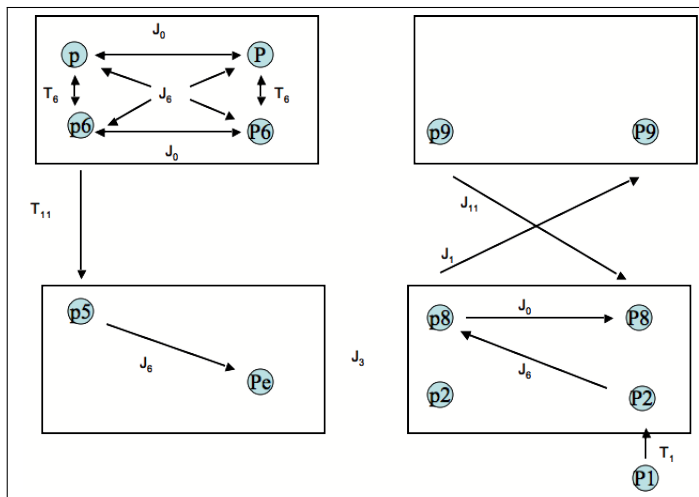
Making and Using a Pcset Network for Stockhausen's Klavierstück III, in *Musical form and transformation : Four analytic essays*, Yale University Press, 16-67, 1993

- Processus d'analyse : segmentation et mise en relation des segments
- Structure de graphe pour illustrer ces réseaux
- Exemple de l'analyse de Lewin
 - Caractère graphique et transformationnel de l'analyse

Progression transformationnelle

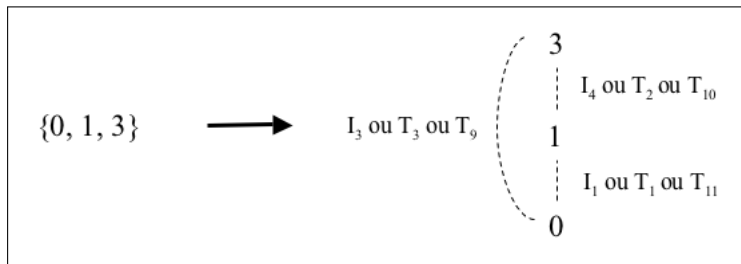


Réseau transformationnel

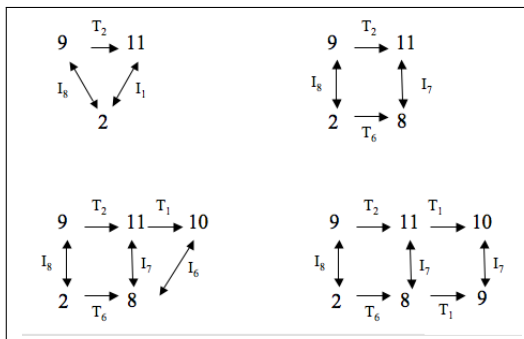


Outil analytique : les K-réseaux

- Un K-réseau est un graphe connexe dont les sommets sont les classes de hauteurs et les arêtes les opérations de transposition et d'inversion



Étude informatique des K-réseaux et sélection de réseaux standard



Relation entre réseaux : isographie positive $\langle T \rangle$

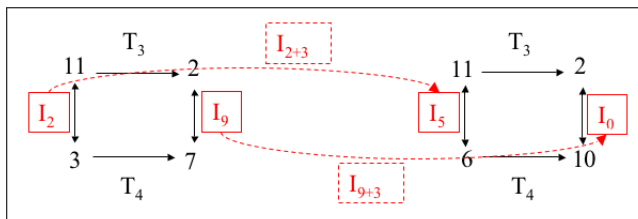
11	2	11	2
3	7	6	10

Relation entre réseaux : isographie positive $\langle T \rangle$



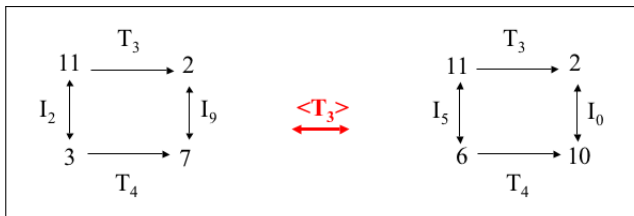
$$\langle T \rangle: \begin{cases} T_3 \rightarrow T_3 \\ T_4 \rightarrow T_4 \end{cases}$$

Relation entre réseaux : isographie positive $\langle T \rangle$



$$\langle T \rangle: \begin{cases} T_3 \rightarrow T_3 \\ T_4 \rightarrow T_4 \\ I_2 \rightarrow I_{2+3} = I_5 \\ I_9 \rightarrow I_{9+3} = I_{12} = I_0 \end{cases}$$

Relation entre réseaux : isographie positive $\langle T \rangle$

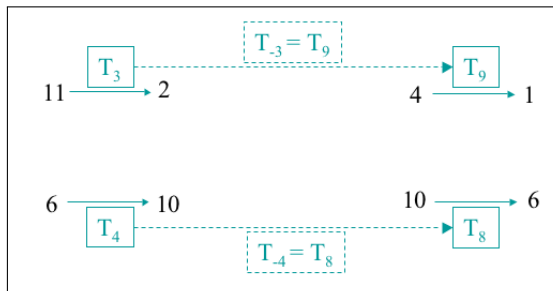


$$\langle T_3 \rangle: \begin{cases} T_3 \rightarrow T_3 \\ T_4 \rightarrow T_4 \\ I_2 \rightarrow I_{2+3} = I_5 \\ I_9 \rightarrow I_{9+3} = I_{12} = I_0 \end{cases}$$

Relation entre réseaux : isographie négative < I >

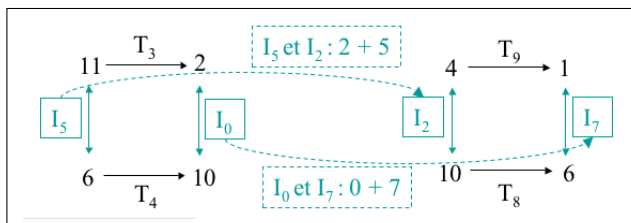
11	2	4	1
6	10	10	6

Relation entre réseaux : isographie négative $\langle I \rangle$



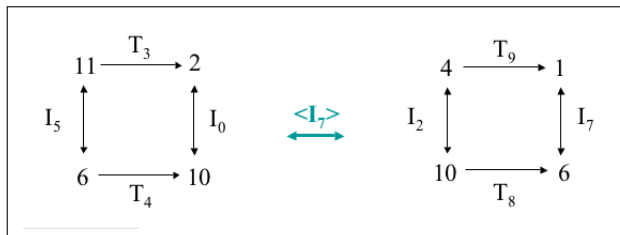
$$\langle I \rangle: \begin{cases} T_3 \rightarrow T_{-3} = T_9 \\ T_4 \rightarrow T_{-4} = T_8 \end{cases}$$

Relation entre réseaux : isographie négative $\langle I \rangle$



$$\langle I \rangle: \begin{cases} T_3 \rightarrow T_{-3} = T_9 \\ T_4 \rightarrow T_{-4} = T_8 \\ I_5 \rightarrow I_{-5+7} = I_2 \\ I_0 \rightarrow I_{-0+7} = I_7 \end{cases}$$

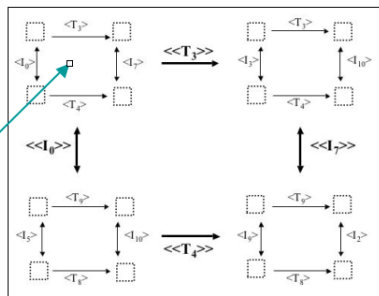
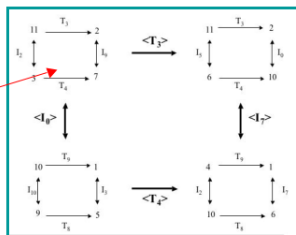
Relation entre réseaux : isographie négative $\langle I \rangle$



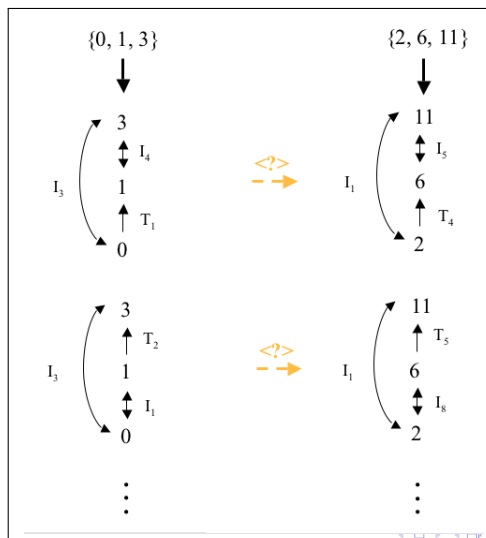
$$\langle I_7 \rangle : \begin{cases} T_3 \rightarrow T_{-3} = T_9 \\ T_4 \rightarrow T_{-4} = T_8 \\ I_5 \rightarrow I_{-5+7} = I_2 \\ I_0 \rightarrow I_{-0+7} = I_7 \end{cases}$$

Utilisation : Analyse de Xavier Hascher

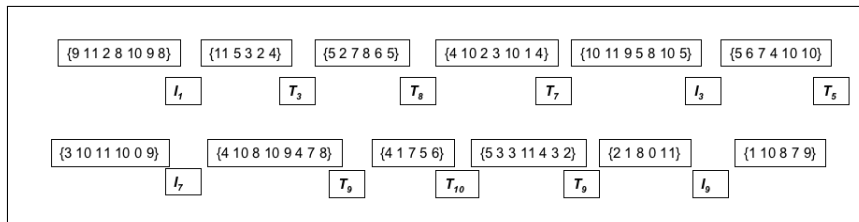
Une analyse transformationnelle de l'op. 19 n° 4 de Schönberg au moyen des K-réseaux, in Autour de la set-theory, Delatour France, 63-95, 2008



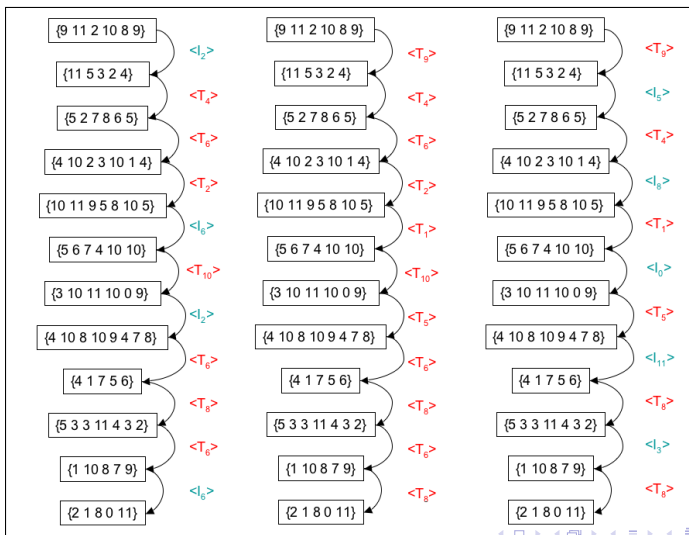
Détermination automatique des isographies



Application des isographies sur une segmentation du *Klavierstück III*



Application des isographies : aide à la segmentation



Conclusion

Résumé

- Modèles compositionnels génératifs s'appuyant sur une analyse de *Structures IA* de Boulez
- Formalisation de la segmentation du *Klavierstück III*
- Étude préliminaire de l'utilisation informatique des K-réseaux

Perspectives

- Vérification « musicologique »
- Application à un corpus musical
- Visualisation et représentation graphique de la segmentation et de son organisation

Merci de votre attention

F-mesure :

■ Moyenne de la précision et du rappel

- $Précision_i = \frac{\text{documents correctement attribués à la classe } i}{\text{nombre de documents attribués à la classe } i}$
- $Rappel_i = \frac{\text{documents correctement attribués à la classe } i}{\text{nombre de documents appartenants à la classe } i}$
- Classe i : classe de documents pertinents

■ Définitions complémentaires

- Silence = 1 - Rappel : moyenne du nombre de notes non trouvées sur le nombre de notes total
- Bruit = 1 - Précision : moyenne du nombre de notes couvert par plus d'un segment sur le nombre de notes total

$$f = 2 * \frac{p * r}{p + r}$$

Exemple du diagramme de Voronoi sur une partition

