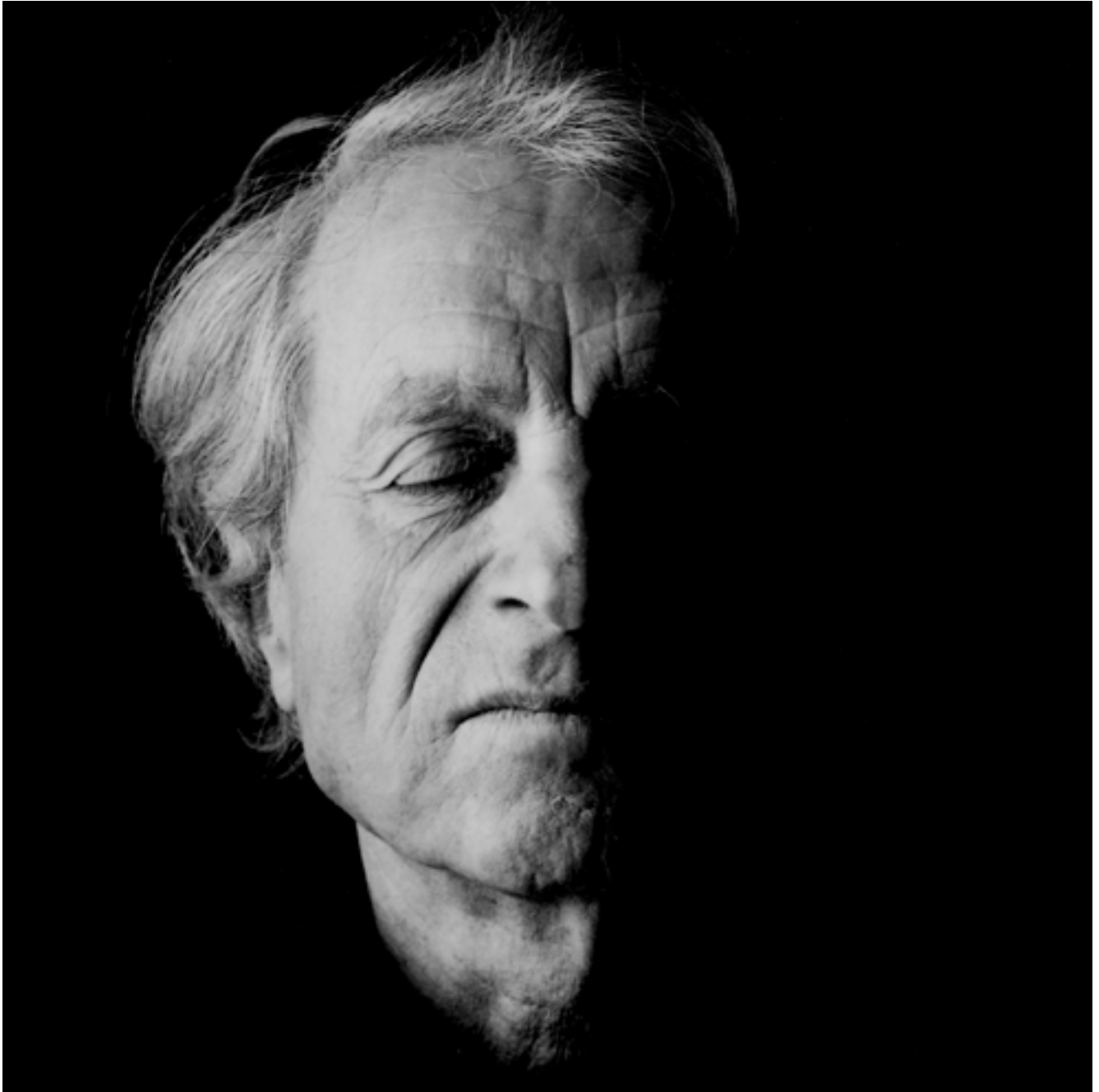


Concours Supélec Sciences et Technologies dans l'Art 2011

Paul Mouginot

Promotion 2013



***Pithoprakta*, de Iannis Xenakis**

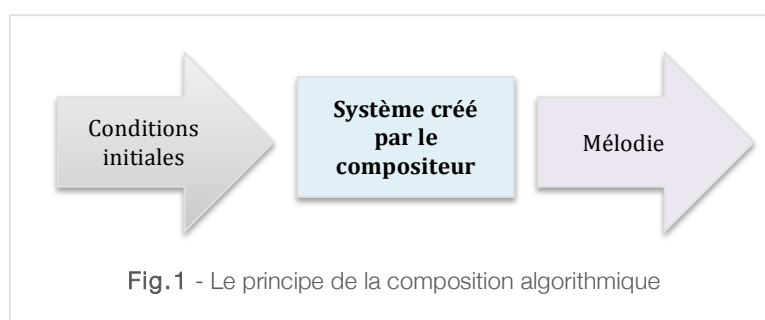
La composition algorithmique : quand les chaînes de Markov donnent le LA.

Remarque préliminaire : il est difficile de présenter une œuvre musicale à l'aide d'un simple dossier papier.

De nombreux exemples sonores, cités ci-après, sont donc écoutables sur le mini-site : <http://minu.me/5msw> spécialement créé à cet effet. Se référer à la bibliographie en fin de dossier.

La composition algorithmique a été définie en 1995 par Adam Alpern [1] comme étant « le processus utilisant des processus formels pour faire des morceaux de musique, avec une intervention humaine réduite à son minimum ». Le terme même d'« *algorithme* » est nouveau et date du XX^e siècle : une définition couramment admise est « un ensemble prédéterminé d'instructions, destiné à résoudre un problème spécifique en un nombre limité d'étapes ».

L'intervention humaine, dans le cas de la composition algorithmique, se résume donc à définir les conditions initiales et le processus. Elle cesse une fois que le système est mis en mouvement et que la mélodie est générée. On pourrait donc parler de « *composition automatique* », puisqu'est automatique tout ce qui peut bouger, ou agir de lui-même.



Le compositeur cherche donc à créer un système parfaitement adapté à ses besoins particuliers. Si une autre personne est amenée à produire de la musique en utilisant le système du compositeur, il n'en devient pas l'auteur, car c'est véritablement le système qui est ici l'*objet* créé.

On se représente plaisamment le compositeur comme un monstre romantique, aux traits de génie fulgurants et aléatoires. Pourtant le processus de création fait appel à la mémoire, et reprend donc naturellement certains aspects de son fonctionnement.

Ainsi, l'appréciation d'une pièce musicale implique non seulement la jouissance pure de l'expérience sonore, appréciée par la mémoire à court terme, mais aussi la satisfaction de certaines attentes créées par des « *expériences précédentes, conservées dans la mémoire à long terme* » [2], selon les termes mêmes du musicologue Erik Christensen.

Dès les temps anciens, bien avant l'apparition des ordinateurs, les compositeurs ont compris que toute création musicale était une alchimie subtile faite de références au passé, d'automatismes stylistiques, et de création pure.

L'idée d'utiliser des instructions formelles et des processus pour créer de la musique remonte à la Grèce Antique. Pythagore, de même que ses successeurs Ptolémée ou Platon, croit en une relation directe entre les lois de la nature et l'harmonie des sons utilisés en musique.

On observe certaines traces d'écriture « mécanique » chez Guido d'Arezzo : au XI^e siècle, il développe une méthode permettant de mettre un texte en musique. En dessous de chaque voyelle était inscrit un ton, et la mélodie variait en fonction de ces voyelles [3].

On peut citer beaucoup de compositeurs qui, au Moyen-Âge, construisent leur œuvre en fonction de motifs géométriques ou de ratios numériques, comme Guillaume Dufay qui écrit le motet *Nuper Rosarum Flores*, à l'occasion de l'inauguration de la cathédrale de Florence. La pièce reprend dans sa structure les ratios de proportion de la nef. Mais c'est sans doute Mozart qui, de manière la plus explicite, utilise pour la première fois des techniques véritablement algorithmiques, dans son *Musikalisches Würfelspiel*, ou « Dé Musical ». Des fragments musicaux sont censés avoir été combinés en fonction du résultat de plusieurs lancers de dés. [4]

Ce type de technique a même été commercialisé ! En 1865, le professeur Clinton invente un système de partitions sous forme de cartes, qui permettent à un pianiste de générer plus de 428 millions de quadrilles, une danse à la mode à l'époque. [5]

Avec l'apparition des ordinateurs, dans le courant du XX^e siècle, la composition algorithmique se répand, se libère, et devient plus enfantine : le kit *Geniac Electric Brain* permettait de construire, chez soi, un calculateur concevant automatiquement des mélodies.

Fig. 2 - Extrait de la publicité pour le kit Geniac Electric Brain

Après la guerre, l'avant-garde des compositeurs algorithmiques se scinde en deux écoles radicalement différentes, à la fois en terme d'approche et de résultat sonore. D'une part, l'école employant des techniques algorithmiques plutôt déterministes, d'autre part, celles utilisant des procédés probabilistes, notamment stochastiques.



L'approche contemporaine tend désormais à être une hybridation de ces deux écoles. Différentes méthodes peuvent être utilisées dans une même œuvre, comme nous allons le voir avec *Pithoprakta* du compositeur franco-grec Iannis Xenakis. La composition algorithmique semble aujourd'hui progresser au même rythme que les recherches sur l'Intelligence Artificielle.

Les nouveaux systèmes générateurs de musique peuvent apprendre des compositions passées, improviser à l'échelle d'un orchestre virtuel [6] ou reprendre la couleur harmonique d'une œuvre de Beethoven. Ils sont soutenus par des processeurs toujours plus puissants, et une modélisation du fonctionnement du cerveau humain toujours plus fine.

On peut trouver des intérêts plus pragmatiques à l'emploi de la composition algorithmique : tout d'abord, avec les ordinateurs, il est aussi facile de générer 1000 notes que d'en générer 2 : pourquoi s'en priver ? En outre, un système bien paramétré peut créer des embryons de mélodies, que l'on peut ensuite trier, choisir et utiliser comme base de travail.

Pour comprendre la richesse de l'œuvre *Pithoprakta* de Iannis Xenakis, il faut mettre en évidence certaines des techniques utilisées en composition algorithmique. Ainsi, nous évoquerons brièvement la composition algorithmique déterministe avant de nous pencher sur l'œuvre de Xenakis et les techniques probabilistes qu'il emploie. Ne pouvant être exhaustif, on ne choisira de présenter que deux techniques parmi l'infinité existante : les automates finis et les chaînes de Markov. Ces algorithmes ont la particularité d'être étudiés à Supélec. Actuellement, les multiples applications des chaînes de Markov sont un sujet d'investigation majeur au département de recherche en informatique.

Les automates finis ou systèmes de Lindenmayer en musique

L'écriture de la musique est souvent un processus itératif. Comme pour toute fabrication artisanale, la matière brute doit être travaillée en plusieurs étapes avant que soit obtenue une version finale, satisfaisante. Lorsque deux processus non déterministes sont lancés en parallèle avec les mêmes conditions initiales, les chances qu'ils donnent exactement la même mélodie sont généralement faibles. Ainsi, si le compositeur a pu apprécier certaines caractéristiques dans une mélodie donnée, il aura du mal à retrouver facilement ces caractéristiques dans une nouvelle mélodie, à l'aide d'une méthode seulement soumise au hasard. Les processus déterministes peuvent être alors plus appropriés. Les systèmes de Lindenmayer ou *automates finis*, simples et élégants, sont idéaux pour une composition empreinte de régularité, ou du moins pour ébaucher une première structure. Le compositeur Hiller fut parmi les premiers à utiliser cette technique.



Fig. 3 – Le compositeur Tom Johnson

Tom Johnson, a étudié et décrit de près les systèmes de Lindenmayer. Il a ensuite appliqué ses découvertes dans ses propres compositions musicales.

Compositeur minimaliste américain, il est né dans le Colorado en 1939. Ayant étudié à l'université de Yale, il s'installe à Paris en 1983. Il travaille avec du matériel toujours restreint, en procédant de manière très mathématique, ce qui se traduit par un emploi fréquent de formules, de permutations et de séquences prévisibles, dont beaucoup sont récapitulés dans *Self-Similar Melodies*, un texte théorique qu'il publie en 1996. [7]

Tom Johnson est connu surtout pour ses opéras. Depuis 25 ans on présente régulièrement son *Opéra de quatre notes*. Il a reçu le prix des Victoires de la musique en 2000 pour sa pièce intitulée *Kientzy Loops*.

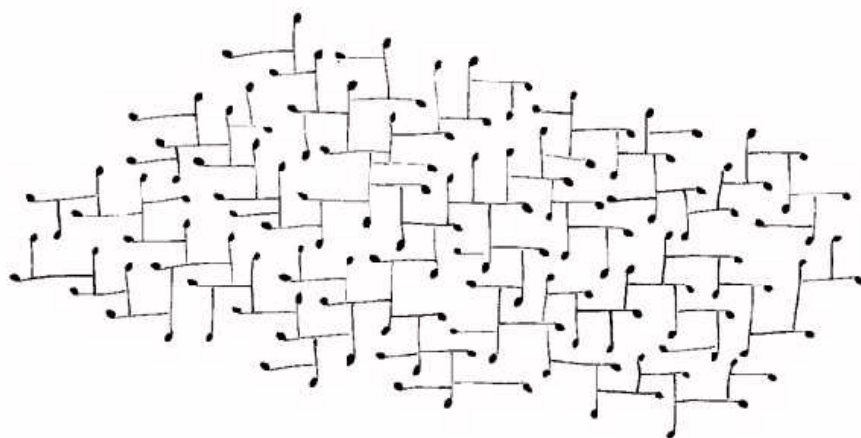


Fig. 4 – « *Syncopated Texture* », dessin de Tom Johnson extrait d'*Imaginary Music*, un autre de ses livres (épuisé)

Un automate fini est une séquence utilisant un nombre fini de symboles et de lettres répondant à des règles précises.

Tom Johnson propose dans beaucoup de ses publications l'exemple d'un percussionniste qui peut jouer trois notes : une basse, notée 1, une haute, notée 2 et un silence noté 3. En posant les règles :

1 --> 1 1 2
 2 --> 3 2
 3 --> 3 3
 Commencer par 1

On produit ainsi une séquence du type :

1
 112
 11211232
 11211232112112323332
 11211232112112323332112112321121123233323333332
 etc.

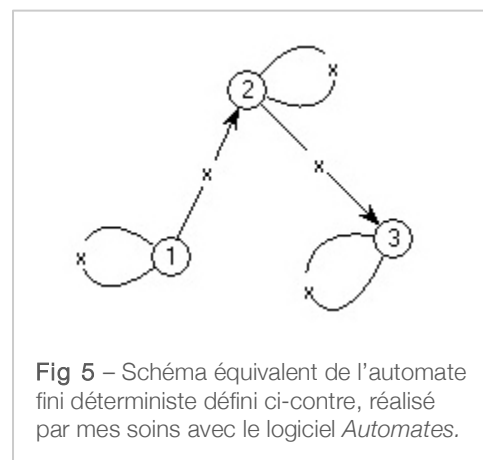


Fig 5 – Schéma équivalent de l'automate fini déterministe défini ci-contre, réalisé par mes soins avec le logiciel *Automates*.

Chaque transformation, chaque ligne, commence ici par deux répétitions de la ligne précédente. Les longueurs des lignes croissent indéfiniment.

Bien sûr, ces séquences ne fournissent aucune indication sur l'interprétation en tant que telle, mais permettent de créer des structures musicales auxquelles l'esprit s'accoutume naturellement, car elles contiennent des motifs qui se répètent. En ce sens, on peut interpréter la figure précédente comme un canon. [8]

Beaucoup de suites numériques étudiées par les mathématiciens, de la forme $Un+1 = f(Un)$, sont similaires à celles produites par les automates finis.

Les détracteurs des compositeurs déterministes leur reprochent le manque de fantaisie de leurs compositions, en dépit de leur régularité mélodique, qui n'est pas évoquer les canons.

L'introduction du hasard, selon eux, donne plus d'attrait aux pièces musicales, et l'utilisation des chaînes de Markov, on va le voir, leur donne une couleur.

Xenakis, pionnier de la composition algorithmique probabiliste

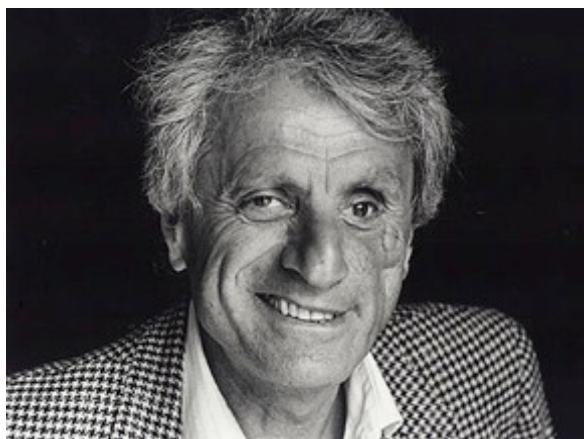


Fig. 6 - Iannis Xenakis (source guardian.co.uk)

Iannis Xenakis est sans aucun doute celui qui a utilisé, en premier et le plus conséquemment, les méthodes probabilistes –ou stochastiques- dans la composition algorithmique.

Né en 1922, tiraillé entre l'envie d'une carrière scientifique et son attirance pour les arts, il choisit de devenir ingénieur. Marqué physiquement par la guerre –il fut défiguré en 1944 par une décharge de schrapnel- il partit à Paris à la fin de celle-ci, et fut embauché comme assistant par le fameux architecte Le Corbusier. Ce dernier, sachant que Xenakis composait mais était frustré par son manque de technique, le fit rencontrer Olivier Messiaen. Déjà à l'époque, Messiaen était considéré comme un compositeur majeur et le conseil qu'il donna à Xenakis fut fondateur :

***« Tu as la chance d'être architecte, et d'avoir étudié les mathématiques.
Tire-en parti, fais-en ta musique ».***

Xenakis réalisa alors que les calculs structurels, les nouvelles théories de la physique, pouvaient être transposées en musique. Des « trous » dans un continuum sonore pouvaient être un rythme !

Décédé il y a exactement dix ans, il décrit ainsi son rôle de compositeur, avec des mots qui évoquent la conduite d'un vaisseau spatial futuriste : « avec l'aide d'ordinateurs électroniques, le compositeur devient une sorte de pilote : il appuie sur des boutons, entre des coordonnées, et

supervise les contrôles d'un vaisseau cosmique naviguant dans l'espace du son, à travers les constellations de sons » [9]. Son approche a permis la création de pièces musicales radicalement nouvelles, telles *Pithoprakta* en 1956 [10], en utilisant des formules originellement développées par Maxwell ou Boltzmann pour expliquer le comportement des particules de gaz. Fait intéressant, l'œuvre de Xenakis a donné lieu à la création de ballets. Ainsi, le ballet *Pithoprakta*, fut créé par George Balanchine d'après la pièce de Xenakis en 1968. [11]

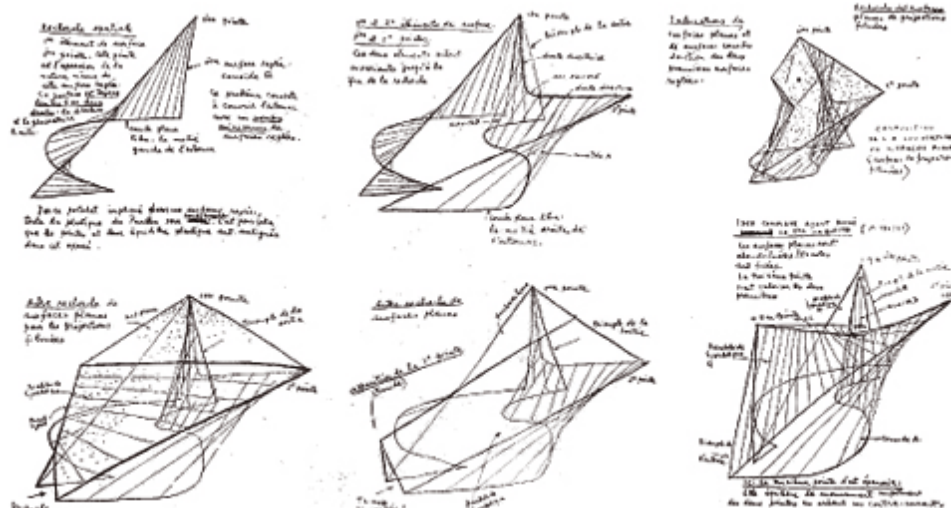


Fig. 7

A droite : Pavillon Philips « *Poème électronique* » par Le Corbusier, Iannis Xenakis et Edgard Varèse, 1958

A gauche : Croquis de Xenakis, décrivant quelques principes formels de composition musicale dans *Musiques formelles* (La revue musicale, Éditions Richard-Masse, Double numéro spécial 253 & 254, Paris, 1963).

La similitude visuelle entre les deux œuvres est saisissante !

Il composa la pièce *Eonta* pour deux trompettes, trois trombones ténor et un piano, à l'aide d'un ordinateur IBM 7090, fait exceptionnel pour l'époque : ces machines étaient rares et leur réservation pour des calculs –même scientifiques– était coûteuse !

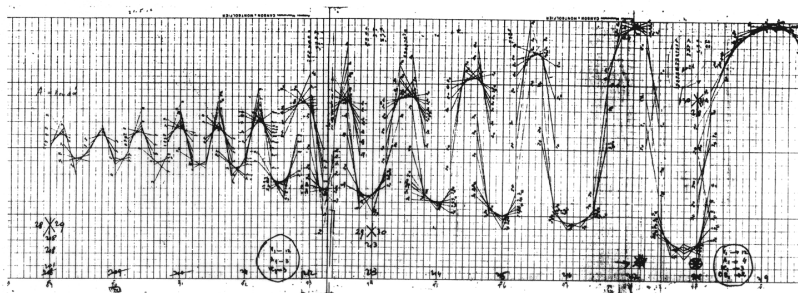
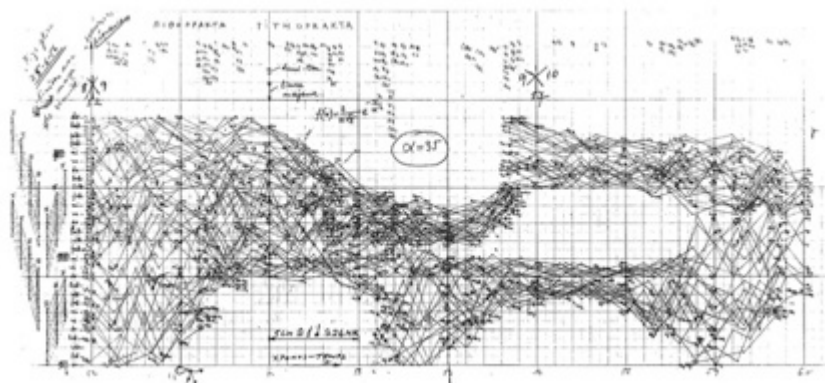


Fig. 8 - *Pithoprakta*, mesures 52-59 et mesures finales : graphique de Xenakis
(source : *Musique. Architecture.*, de Iannis Xenakis, Tournai, Casterman, 1976)

Ses techniques de composition musicale permettent une relation fluide et continue entre les formes musicales macroscopiques, qui structurent ses œuvres, et les plus petits « motifs », qui les ornent. Son art atteint un sommet avec le programme de synthèse musicale stochastique *Gendy3*, que Xenakis développe en 1992. [12]



Fig. 9 - Iannis Xenakis, lors de la mise en place du programme *Gendy3*, en 1992 (source : <http://www.iannis-xenakis.org>)

Dans *Pithoprakta* [10] et beaucoup de ses pièces, le choix et la distribution des notes, qu'il voit comme des nuages de particules, sont définis en fonction de tables de probabilités, qui pondèrent l'occurrence d'événements spécifiques en fonction des événements précédents. Ceci donne un résultat sonore saisissant, auquel l'oreille s'habitue après plusieurs écoutes.

Les tables de probabilités sont comparables aux matrices de transition dans la théorie des chaînes de Markov.

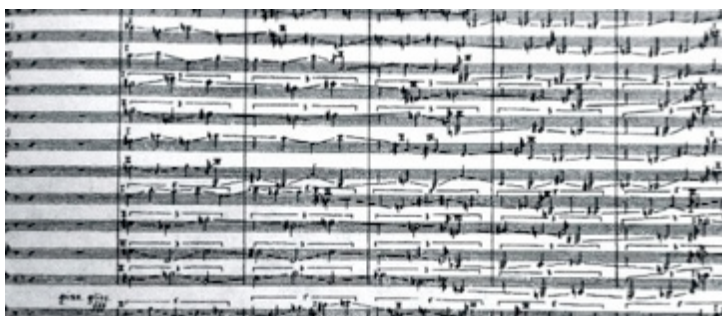


Fig. 10 - Détail d'une partition de *Pithoprakta*

Xenakis et les chaînes de Markov dans la composition musicale

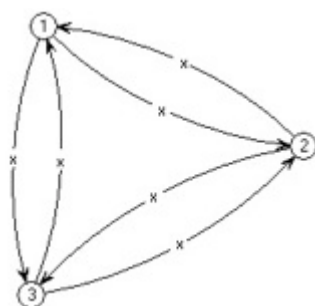
Présentées pour la première fois en 1906, les chaînes de Markov sont nommées d'après le mathématicien russe Andrey Markov (1856 – 1922), dont la recherche sur les processus aléatoires a mené à la théorie éponyme. Cette théorie énonce que toute l'information utile pour la prédiction du futur d'un processus donné est contenue dans l'état présent de ce processus.



Fig. 11 – Le mathématicien Andrey Markov

Sans rentrer dans les détails, étudions une des implications de cette théorie, pour un système à trois états, comme celui représenté ci-après.

	E1	E2	E3
E1	p11	p12	p13
E2	p21	p22	p23
E3	p31	p32	p33



On peut écrire le tableau de changement d'état, ou *matrice de transition*, les p_{ij} étant la probabilité de passage de E_i à E_j

On applique alors cette théorie à la musique en posant que les états E_i correspondent aux notes.

Le passage d'une note donnée à l'autre est donc conditionné par une probabilité. Les probabilités sont stockées dans la matrice de transition.

Intuitivement, on comprend que cette matrice va définir la « couleur musicale » d'un morceau. En effet et par exemple, dans un morceau en Do mineur, on s'attend à observer potentiellement plus de passages du Do au Mi bémol que dans un morceau en Do majeur. La probabilité $p_{DoMi\flat}$ de passage du Do au Mi bémol sera donc notamment supérieure à la p_{DoMi} de passage du Do au Mi, affectant du même coup la matrice de transition.

Il est possible générer la matrice de transition à partir de l'analyse statistique de morceaux de musique existants. La mélodie créée par composition algorithmique aura alors la même couleur musicale globale que ces morceaux.

Application musicale de la théorie des chaînes de Markov

Intéressons nous à la manière dont peut être créée une matrice de transition à partir d'un air tel que « Happy Birthday », bien connu de tous, dont les notes sont :

DO DO RÉ DO FA MI
DO DO RÉ DO SOL FA
DO DO DO5 LA FA MI RÉ
SIb SIb LA FA SOL FA

(DO5 désigne le DO de l'octave supérieure)

Dans le cas d'une chaîne de Markov du premier ordre, on s'intéresse aux probabilités qu'une note suive une note donnée. Pour chacune des notes de la gamme du morceau, notons les notes qui suivent :



Fig. 12 – Implémentation sous PureData [13]

Source : algorithmiccomposer.blogspot.com

DO : DO RÉ FA DO RÉ SOL DO C5

RÉ : DO DO Sib

MI : DO RÉ

FA : MI DO MI SOL

SOL : FA FA

LA : FA FA

Sib : Sib LA

DO5 : LA

	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	Sib	DO5
DO	0,375	0,25		0,125	0,125			0,125
RE	0,67						0,33	
MI	0,5	0,5						
FA	0,25		0,5		0,25			
SOL				1				
LA				1				
Sib						0,5	0,5	
DO5						1		

On en déduit ensuite la matrice de transition ci-contre, dite stochastique

car la somme des termes de ses lignes donne 1. Puis on utilise cette matrice dans l'implémentation de l'algorithme des chaînes de Markov. [13]

La composition algorithmique, futur de la création musicale ?

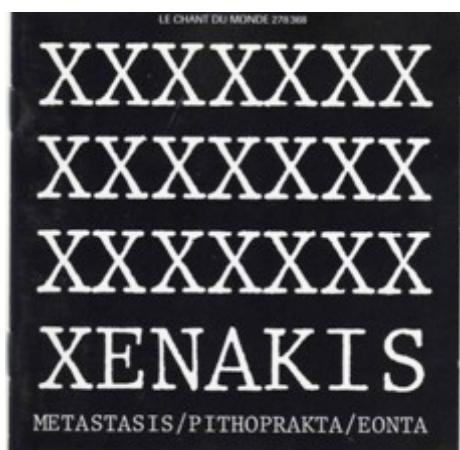


Fig. 13 – Couverture du vinyle de *Métastasis*, *Pithoprakta* et *Eonta*, trois pièces de Xenakis.

De nos jours, d'aucuns restent réticents à l'idée d'accepter la composition algorithmique comme véritable acte de création. Cette méfiance provient de la croyance répandue que c'est le système ou l'ordinateur, et non l'artiste, qui compose la mélodie finale, ce qui pose une problématique d'ordre éthique ou philosophique. Dans de nombreux cas, cette idée n'a, tout simplement, aucun fondement, car comme le relevait le musicien Curtis Roads, seul un bon compositeur est capable de concevoir des algorithmes et des systèmes générant des mélodies qui captivent notre imagination [5].

Il est vrai que de solides connaissances en logique et en programmation sont souvent nécessaires, et peuvent constituer un obstacle rédhibitoire pour un débutant. Mais en réalité, plus qu'une curiosité *geek*, bien au-delà du simple passe temps intellectuel, la composition algorithmique propose une démarche de création fondamentalement différente : alors que l'approche était plutôt du type *bottom-up*, les notes formant les mesures formant les pièces musicales, la nouvelle formalisation tend à être du type *top-down*. Le compositeur algorithmique cherche ainsi en premier lieu à structurer sa pièce, avant de la « remplir » par les motifs musicaux et même d'effectuer des ajustements à la main, ce que n'hésitait pas à faire Iannis Xenakis.



Fig. 13 – De haut en bas

- Le danseur Matthew Prescott retient sa comparse Elisabeth Holowchuk dans le ballet *Pithoprakta*, créé en 1968 par George Balanchine d'après la pièce de Xenakis (source NY Times) [11]
- Etude de Xenakis pour *Polytope de Montréal*, c. 1966. Le papier à dessin, successeur du papier à musique ?
- Iannis Xenakis avec Louis Leprince-Ringuet et Olivier Messiaen lors de sa réception à l'institut de France, à l'académie des Beaux-Arts de Paris, le 2 mai 1984.

Irvine Arditti, dont le quartet éponyme travailla longtemps avec Xenakis, ne fait que confirmer cette approche particulière au compositeur algorithmique : « *dans ses répétitions, Xenakis était intéressé non pas par les petits détails, mais par la structure au sens large, et par l'aspect du son* ». [14]

Alors, la composition algorithmique supplantera-t-elle un jour la composition traditionnelle dans la création musicale ? Ce n'est pas impossible : plusieurs équipes de chercheurs sont déjà parvenus à dévoiler quelques recettes rythmiques et mélodiques d'un « tube musical » réussi : pourquoi ne pas envisager un algorithme de génération de tube ?

Mais Iannis Xenakis laisse entrevoir une hypothèse de futur beaucoup plus plausible. En effet, explique-t-il : « *Avec le développement de la musique électronique et assistée par ordinateur, la multi dimensionnalité de la représentation sonore s'est avérée être à la fois naturelle et très utile. Mais la musique va au-delà de la simple multi dimensionnalité- elle est beaucoup plus complexe que cela* ». [15]

Un paradigme de création musicale assistée par ordinateur, mais qui laisse une place large à la retouche humaine, à l'imprévu, au génie qu'aucune machine ne saura modéliser : les chaînes de Markov donneront peut être le *LA*, mais c'est la main de l'homme qui décidera finalement s'il faut coucher, ou non, cette note sur le papier à musique.

Paris, le 30 décembre 2011

Bibliographie

- [1] Alpern, A. Techniques for algorithmic composition of music, 1995
<http://alum.hampshire.edu/~adaF92/algocomp/algocomp95.html>. Hampshire College.
- [2] Christensen, E. The Musical Timespace, a Theory of Music Listening. Aalborg University Press, Aalborg, Denmark, 1996.
- [3] Selon l'étude : Kirchmeyer, H. On the historical construction of rationalistic music. Die Reihe 8, 1962, pp 11–29.
- [4] Voir la démonstration en **Annexe n°5** du mini-site <http://minu.me/5msw>
- [5] Histoire rapportée dans Roads, C. The Computer Music Tutorial. MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- [6] Comme le fait le programme Voyager développé par George Lewis.
Lewis, G. Too many notes: Computers, complexity, and culture in Voyager. Leonardo Music Journal 10, 2000, pp 33–39.
- [7] Johnson, T., Self-Similar Melodies, Two Eighteen Press, 1996
- [8] On peut voir sur le site <http://minu.me/5msw> en **Annexe n°1**, l'implémentation de l'automate présenté en exemple.
- [9] « *With the aid of electronic computers, the composer becomes a sort of pilot: he presses buttons, introduces coordinates, and supervises the controls of a cosmic vessel sailing in the space of sound, across sonic constellations* » Xenakis, I. Formalized Music. Pendragon, Hillsdale, NY, 1992.
- [10] Un extrait de *Pithoprakta*, de Iannis Xenakis, peut être entendu ici : <http://minu.me/5msw>, **Annexe n°2**
- [11] Critique très riche, en anglais, du ballet « Pithoprakta », créé par George Balanchine d'après la pièce de Xenakis : <http://www.nytimes.com/2008/09/27/arts/dance/27fall.html>
- [12] Un extrait de *Gendy3*, de Iannis Xenakis, peut être entendu ici : <http://minu.me/5msw>, **Annexe n°3**
- [13] Le résultat d'une telle composition peut être entendu ici : <http://minu.me/5msw>, **Annexe n°4**
- [14] Une biographie (en anglais) de Xenakis : <http://www.guardian.co.uk/music/2011/nov/17/iannis-xenakis-huddersfield-contemporary-music>
- [15] « *With the development of electronic and computer music, multidimensionality of sound representation turned out to be both natural and useful. But music goes beyond multidimensionality - it is even more complex.* » in Xenakis, I., Determinacy and Indeterminacy, Organised Sound 1(3): 143-155, 1996