

L'ESPACE ABSTRAIT DANS LA MUSIQUE DE IANNIS XENAKIS

*Peter Hoffmann**

"There is no flow of time at all. We have just space-time"

Roger Penrose, *The Emperor's New Mind. Concerning Minds, Computers, and the Laws of Physics*

Introduction

En musique, surtout s'il s'agit de création musicale, les procédures mentales qui aboutissent à la définition des structures sonores dépassent en général le pur phénomène physique du son en faveur de modèles plus abstraits de la pensée. L'espace de la réalité physique du son peut être décrit par la fonction temporelle de la pression d'air momentanée qui opère sur notre tympan. Même si cette fonction élémentaire est elle-même posée comme objet de la composition musicale (nous verrons un exemple à la fin), il faut des structures et processus qui résident dans des espaces plus abstraits. Des exemples seraient les gammes de hauteurs musicales, des structures rythmiques, mais aussi des marches aléatoires. Ces structures et processus abstraits sont liés à leur réalisation sonore physique par une correspondance plus au moins directe.

Le compositeur Iannis Xenakis, depuis ses débuts dans les années 1950, a toujours travaillé avec des modèles qui font appel à des structures géométriques dans des espaces abstraits, à savoir des espaces qui ne sont pas à la base de notre expérience spatiale quotidienne. À l'aide de ceux-ci, il pouvait effectuer des manipulations géométriques qui conduisaient son imagination musicale à des solutions sonores nouvelles et inédites, soit en définissant un

* Né en 1964 à Bambrück. Études de musicologie et d'informatique à l'Université Technique de Berlin. Préparation en cours d'un doctorat en musicologie sur la musique pour ordinateur de Iannis Xenakis

calcul formalisé, soit en étayant ses idées intuitives. Il pouvait ainsi construire un univers sonore plus universel que celui découlant des méthodes enseignées à l'époque dans les institutions dites "académiques".

Pour parcourir le chemin de cette abstraction spatiale progressive, nous partirons de la conception familière de l'espace physique telle qu'elle est constituée par notre expérience quotidienne. Ensuite, nous introduirons des abstractions successives : l'espace commun sera d'abord complété par la dimension du temps pour former un espace-temps (représentation sous la forme de "partition" des phénomènes temporels) ; celui-ci sera ensuite généralisé en un espace multidimensionnel (espace de phases), qui peut décrire un système complexe par ses degrés de liberté. Ces deux généralisations de la notion commune d'espace, inventées au cours de l'histoire des sciences naturelles depuis Galilée, contribueront à une compréhension intuitive des principes fondamentaux tels que la relativité et la flèche du temps. Ces principes nous aideront à apprécier correctement quelques pensées musico-philosophiques du compositeur.

L'espace-temps

Examinons d'abord la conception de l'espace physique qui nous entoure.

La géométrie euclidienne, comme on l'apprend à l'école, correspond à notre conception intuitive de l'espace. Pourtant, cette géométrie ne constitue pas l'approche exclusive de la réalité et, en fait, à l'échelle cosmique, elle a été remplacée par une géométrie généralisée (une géométrie différentielle qui rend compte des courbures de l'espace en raison des masses de gravitation qui s'y trouvent). Dans le monde antique, la géométrie euclidienne fournissait le cadre pour l'étude des phénomènes statiques, voire l'étude des états d'équilibre par Archimède. Mais les phénomènes dynamiques, à savoir, la notion de mouvement en général, échappaient plus ou moins à la science antique¹.

Ce n'est qu'au XVII^e siècle que l'étude scientifique du mouvement fut fondée par Galilée et, avec celle-ci, le principe de la relativité. Il n'y a pas d'espace absolu : ses mesures semblent très différentes à des observateurs en mouvement relatif (Galilée parlait des gouttes d'eau dans la cabine d'un bateau qui tombent verticalement pour l'observateur à bord, tandis qu'elles se

¹ Cf. *ibid.*, p. 210.

déplacent avec le bateau pour un observateur extérieur). La notion de relativité ne doit pas être comprise dans un sens subjectif ("tout est relatif") mais, bien au contraire, elle garantit une validité universelle et objective des lois naturelles pour tout observateur, dans n'importe quel système de référence. En particulier, il n'y a pas de système de références idéal "en repos" qui pourrait être le système d'observation privilégié.

La conséquence pour la conception générale de l'espace fut d'assigner une "incarnation" propre d'espace euclidien à chaque instant du temps. Ces espaces momentanés sont reliés (ou enchaînés) à l'aide d'une quatrième coordonnée : le temps. Ensemble, ils constituent l'espace-temps². Les points de l'espace-temps signifient des "événements" instantanés (par exemple, la naissance d'un être humain). La position d'un observateur en mouvement uniforme (par exemple, toute la vie de l'être humain) est représentée par une ligne droite. Des observateurs en mouvement relatif sont représentés par des lignes droites qui pointent dans des directions différentes. Or, comme chaque observateur regarde le monde d'après son propre système de références, la situation dépend du point de vue que l'on adopte.

Depuis ses débuts en 1954 avec *Metastaseis* pour 60 musiciens, Iannis Xenakis a conçu ses constructions sonores à l'aide de représentations espace-temps. L'espace considéré principalement est l'espace des hauteurs musicales, un espace d'une seule dimension. Dans cet espace sont inscrites des hauteurs instantanées d'une pièce musicale. L'espace-temps est l'enchaînement infini de tels espaces-hauteurs à travers l'axe du temps. Le temps est simplement vu comme dimension supplémentaire dans un espace plus abstrait. Cet espace-temps menait le compositeur aisément à la conception du changement infinitésimal de hauteur du son glissé. Aux yeux de Xenakis, le son glissé, malgré son effet sonore, n'est rien d'extraordinaire, pour les mêmes raisons que, en relativité, il n'y a pas de mouvement préféré (par exemple, un observateur "en repos").

Le mouvement uniforme (de vitesse constante) s'inscrit dans l'espace-temps par une ligne droite. Le mouvement accéléré (ou ralenti : avec une accélération négative) est tracé par des lignes en courbe. Au début, Xenakis ne dessinait pas de courbes — il ne concevait que des lignes droites. Les courbes ne sont venues qu'à la fin des années 1960. Là, les courbes sont approximées à l'aide de petits bouts de droites enchaînés.

² Cf. *ibid.*, p.213

La représentation espace-temps des processus et développements musicaux comporte l'intervention de la perception visuelle. Celle-ci est extérieure au flux temporel. La perception visuelle des structures musicales, dessinées dans l'espace-temps, les soustrait au temps. Elle les analyse instant par instant et les réduit à un groupement de valeurs spatio-temporelles (hauteur/instant), dans le sens exact d'une application mathématique. Cette saisie analytique des phénomènes temporels est une conquête des sciences et des mathématiques du XIX^{ème} siècle. Tous les événements dans l'espace-temps sont fixés avec une ubiquité instantanée. Il est même possible de considérer les deux axes comme interchangeable. Bien que, en sciences, les événements futurs sont fixés par les lois naturelles, en art, ils peuvent être fixés arbitrairement par l'artiste-créateur.

Les transformations de l'espace

Comment la validité des lois naturelles peut être universelle pour des observateurs dans des systèmes de références différents ? Leur perception de l'espace est différente parce qu'ils en font des mesures différentes. Pour que les observateurs différents puissent communiquer leur vue de l'espace, il leur faut la "traduire" en appliquant une transformation géométrique aux mesures qu'ils ont prises. A chaque valeur de coordonnée mesurée dans leur système de références est assignée une valeur correspondante qui aurait été prise du même point par un observateur qui se trouve dans l'autre système de références. Chaque point de l'espace-temps est traduit par cette transformation qui est fonction de la vitesse relative entre les deux systèmes de références. Par conséquent, les positions dans l'espace n'ont pas de validité absolue. Mais les structures abstraites entre elles (les distances, par exemple) restent valables. On parle des qualités invariantes par rapport à une transformation donnée. Par exemple, en musique, les intervalles musicaux restent invariants lors de la transposition d'une mélodie.

Le principe de transformation est à la base de la pensée musicale de Iannis Xenakis. Il s'imbrique avec son imagination géométrique. On sait que, dans sa jeunesse, il transcrivait graphiquement des fugues de Bach. Xenakis comprend les formes en miroir du contrepoint (l'inversion, la rétrogradation, et leur combinaison) comme un groupe de transformations géométriques. Il y a des transformations plus simples et des transformations plus sophistiquées, formant des groupes de transformation. Elles sont différenciées selon leurs invariants. Nous allons différencier surtout des transformations "linéaires" et "non-linéaires". La combinaison

de ces transformations géométriques avec la conception musicale de l'espace-temps les rend extrêmement fructueuses. Du fait de sa pratique comme architecte, Xenakis était toujours familier avec des groupes de transformations géométriques tels que la translation, la rotation, la projection, la perspective, etc. Par exemple, des transformations rigides (rotations) des cubes et d'autres corps géométriques contrôlent l'enchaînement des textures musicales dans *Nomos alpha* (1965) et *Nomos gamma* (1967-68). Les transformations des espaces dans la musique de Xenakis se font par des opérations intuitives ou formalisées. Les opérations intuitives consistent par exemple en des graphiques faits à la main ou à l'aide d'outils comme l'UPIC¹.

Transformations "non-linéaires"

Pour des vitesses proches de celle de la lumière, la relativité des systèmes de références doit être adaptée à un facteur non-linéaire (la théorie de la relativité dite "restreinte" d'Einstein de 1905). Alors que la relativité de Galilée avait déjà aboli la notion d'un espace absolu, celle d'Einstein mettait fin à la notion d'un temps absolu. En conséquence, les transformations nécessaires à la "traduction" entre les systèmes de références sont plus puissantes : elles allongent et rétrécissent des règles et accélèrent ou ralentissent des chronomètres pour servir de médiateur entre des systèmes en mouvement relatif et de vitesse élevée.

Dans le cadre de la relativité restreinte, les transformations ne font la médiation qu'entre des observateurs en mouvement relatif uniforme. Mais avec la relativité généralisée d'Einstein, développée quelques années plus tard, toutes les forces d'accélération — telle que la gravitation — peuvent être éliminées par les transformations les plus puissantes que l'on peut s'imaginer. Par exemple, elles peuvent transformer l'espace d'une telle manière que l'orbite de la terre autour du soleil apparaisse comme un parcours tout droit. On parle d'espaces courbes. La courbure de l'espace à grande échelle est plus compliquée. L'univers se plie d'une façon flexible contre les masses des étoiles réparties dans l'espace. On peut étendre la notion de ce gauchissement spatial à des déformations arbitraires comme si la matière était élastique.

Des transformations d'un tel genre se trouvent à la base des structures musicales employées par Xenakis à partir des années

¹ L'UPIC est un système informatique de composition par dessin, conçu par Iannis Xenakis et développé au Centre d'Etudes de Mathématiques et Automatiques Musicales (Paris).

1970. Ce qui est préservé par ces puissantes transformations ne peut concerner que des propriétés géométriques très abstraites : par exemple, la contiguïté d'une structure. Les graphiques des années 1970 ne sont plus des constructions rigides mais consistent en des structures extrêmement flexibles, presque "biologiques". Xenakis a déclaré à plusieurs occasions qu'il s'intéresse à toute science qui recherche des formes : biologie, géologie, tout ce qui relève de la morphologie.

Des transformations non-linéaires peuvent aussi être appliquées à des structures d'une seule dimension. Un exemple d'une telle structure est fourni par les gammes de hauteur construites par Xenakis depuis le milieu des années 1960. Il a commencé par construire des échelles complexes, composées d'une superposition de plusieurs échelles "chromatiques" (où l'intervalle entre les valeurs est uniforme), traitées comme des ensembles mathématiques. Il les a appelées "cribles". L'axe temporel peut aussi être "criblé", ne laissant que des durées qui se composent d'une certaine unité de temps (par exemple, la croche).

Xenakis a conçu ainsi des points de repère qui établissent une sorte de "métrique" dans le continuum des paramètres musicaux. Il s'agit d'un raisonnement profond sur la notion universelle d'intervalle (un déplacement dans l'espace). La transformation d'un crible en un autre est appelée "métabole" par le compositeur. Cette opération revient à transformer l'échelle de l'axe des paramètres d'une façon non-linéaire : la fonction qui définit la transformation ne peut pas être décrite avec une équation linéaire. Quand le crible change, toute structure qui y est inscrite est transformée avec lui. Les structures peuvent devenir si complexes qu'elles touchent à des structures calculées stochastiquement (cf. *infra*).

Structures "hors-temps" et "en-temps"

Muni de la notion d'espace-temps il nous sera facile de comprendre les termes "hors-temps" et "en-temps", employés à maintes reprises par le compositeur. Prenons l'axe spatial de l'espace-temps seul, détaché, isolé. Quel est sa signification, sans dimension temporelle ? Toutes ses valeurs n'existent qu'en état de potentialité, car elles n'ont pas de durée. (Rappelons qu'il faut une multitude d'espaces liés par le temps pour soutenir une "existence" manifeste quelconque.)

Malgré l'absence de durées, l'axe spatial (par exemple, l'axe des hauteurs musicales) peut être équipé d'une structure à lui —

d'un crible. Sans l'axe du temps, la structure criblée de chaque musique reste "hors-temps", dans l'état de "matériau" non matérialisé. Ce n'est que la combinaison avec l'axe du temps qui donne l'espace-temps et avec lui la réalisation "en-temps" des structures issues de ces métriques.

Comment cette réalisation "en-temps" se fait-elle ? Pour spécifier des points définis dans l'espace-temps (c'est à dire des "événements"), des valeurs de l'axe spatial doivent être assignées à des valeurs de l'axe temporel. Une relation des valeurs paramétriques aux moments temporels doit être établie. Considérons un modèle simplifié d'espace-temps avec une dimension spatiale (toujours la hauteur musicale). Pour simplifier encore plus, la coordonnée spatiale et le temps seront discrétisés (ils ne prendront que des valeurs entières). Par conséquent, on n'a affaire qu'à une grille de cellules dont les côtés seront des unités "atomiques" d'espacement et de durée.

On peut concevoir des relations simples : un ton par durée se déplaçant dans l'espace tonal par unité, donnera "en-temps" l'échelle tonale de toutes les hauteurs disponibles. Ensuite, plusieurs valeurs pourraient être assignées au même moment temporel (intervalles et clusters). Mais la relation temps-espace peut être aussi compliquée qu'une fractal (cf. *infra*).

La vitesse de la lumière

Jusqu'ici, la vitesse de la lumière a été exclue du raisonnement sur l'espace. En fait, il n'y a rien de plus rapide que la lumière. Toute causalité dans le monde macroscopique est limitée par la vitesse de la lumière.

Les lois physiques élémentaires représentées dans l'espace cellulaire décrit plus haut seront très simples. Elles ne relient que des cellules adjacentes (lois différentielles). L'évolution temporelle d'un tel espace se fait par enchaînement de pas individuels. Ces pas "atomiques" relient les "tranches" séparées du temps par la relation "cause-effet". Ces lois sont locales. Elles ne définissent que la valeur d'une seule cellule à la fois. En revanche, elles sont appliquées simultanément à toutes les cellules d'espace. Certaines règles donnent des évolutions globales très complexes et même "chaotiques" (dans le sens qu'elles ne peuvent être définies que par les structures géométriques fractales dites "attracteurs étranges").

Examinons le lien entre cause et effet dans l'espace cellulaire employé par Xenakis dans *Horos* (1986) pour grand orchestre

(mesures 10-16). Chaque cellule représente une valeur d'un crible. Le temps est criblé aussi. L'assignement des valeurs de hauteur à chaque valeur du temps signifie une projection "en temps" du crible des hauteurs. Xenakis marque un événement initial dans l'espace-temps en changeant l'état d'une cellule quelconque. L'effet de ce changement se propage alors avec les tranches de temps sur tout l'espace à disposition, mais avec une vitesse limitée. La trace de cette propagation laissera un cône dans l'espace-temps dont la pointe est l'événement lui-même. Dans le sens inverse, l'état d'une cellule ne peut être influencé que par un nombre limité d'états antérieurs des cellules en voisinage. Ici, le cône pointe dans l'autre direction du temps (on appelle le premier "faisceau lumineux du futur", le second "faisceau lumineux du passé"). En fait, la règle employée pour définir l'automate cellulaire de *Horos* ressemble beaucoup à la loi physique de la diffusion des liquides⁴. Pourtant, Xenakis prend la liberté d'intervenir dans le jeu de la nature. Il change arbitrairement l'état de quelques cellules pour perturber l'automate. L'effet de cette perturbation se propage dans l'espace-temps cellulaire à la "vitesse de la lumière".

Nous venons d'examiner des exemples de transformations géométriques non-linéaires et déterministes dans la conception musicale de Iannis Xenakis. Abordons à présent les transformations stochastiques.

La flèche du temps

Nous avons déjà constaté que la loi qui régit l'espace cellulaire détermine l'état présent des cellules à partir de l'état passé des cellules voisines. Pourrait-on renverser cette procédure et déterminer l'état passé à partir des états présents pour regagner l'état initial ? La réponse est positive si la loi est symétrique dans l'axe du temps. Les lois physiques possèdent une telle symétrie de temps. Il n'y a pas de direction préférée du temps. Pourtant notre expérience quotidienne nous dit qu'on ne peut pas aller contre la flèche du temps. D'où vient cette flèche du temps qui doit être extérieure aux lois naturelles ? En physique, l'argument est d'une nature probabiliste.

⁴ Cf. HOFFMANN (Peter), *Amalgam aus Kunst und Wissenschaft: Naturwissenschaftliches Denken im Werk von Iannis Xenakis*, Frankfurt am Main, Peter Lang, 1994 (= Publications Universitaires Européennes, série 36, vol. 110), p. 147.

Nous savons tous qu'il n'y a pas de *perpetuum mobile*. L'énergie d'un appareil mécanique se dégrade. Or, l'énergie est conservée à l'intérieur d'un système clos. Une partie de cette énergie se transforme en chaleur. La chaleur est un phénomène cinétique : le mouvement sans ordre des molécules ou atomes dans le système. L'énergie est donc transformée d'un état d'ordre (où elle peut fournir du travail) en un état de désordre (où elle produit de la chaleur). Ce processus n'est pas réversible. Par exemple, il n'est pas possible de gagner de l'énergie en refroidissant la mer (le contraire est malheureusement possible). Il n'est pas possible de transformer le désordre en ordre sans investir de l'énergie, ce qui, en conséquence, augmente le désordre ailleurs. En fait, nous préservons l'ordre de nos corps en augmentant le désordre dans l'univers.

Quel est le rapport entre le désordre croissant dans l'univers et l'irréversibilité du temps ? Ici intervient l'argument probabiliste. Si on lance une pierre, elle tombera par terre. Son énergie cinétique se transforme en chaleur à l'endroit où elle tombe. Tous les atomes et molécules de la terre et de la pierre entrent en mouvement plus rapide. L'énergie est donc parfaitement conservée. En principe, les lois physiques de la mécanique n'excluent pas que toutes ces molécules et atomes se mettent à bouger dans la même direction et relancent la pierre à l'endroit d'où elle est venue ! La seule raison pour expliquer que cela n'a jamais été observé est que la probabilité en est quasi nulle. Car il n'y a qu'une seule configuration où toutes les particules ont le même mouvement : par contre, elles sont en nombre pratiquement illimité dans le cas opposé. La probabilité pour que la pierre rebondisse constitue un cas unique parmi des cas quasi innombrables.

De même, il est pratiquement exclu que toutes les molécules d'un gaz se concentrent en une partie du volume disponible. Bien au contraire, tout gaz tend à se diffuser dans tout l'espace disponible. Le mouvement des particules du gaz est indépendant sauf en ce qui concerne leurs collisions mutuelles. En théorie, il serait possible de calculer le mouvement de toutes les particules à l'aide des équations mécaniques, mais en réalité, ce n'est pas faisable. Observons donc une particule individuelle. Il semblerait qu'elle suive une marche aléatoire. Chaque collision la pousse dans une autre direction, mais comme on ne peut pas la calculer, elle semble imprévisible et aléatoire. Le botaniste Robert Brown découvrit ce type de mouvement au XIX^{ème} siècle quand il observa des petits grains dans un liquide — il eut alors l'impression d'assister à une danse d'êtres vivants !

L'automate cellulaire de *Horos* constitue en fait la modélisation d'un processus de diffusion. Sa règle a la même structure que l'équation de diffusion discrétisée. Cette équation n'est pas symétrique par rapport à l'axe du temps. Dans ce sens, les quelques mesures de *Horos* modélisées par l'automate cellulaire sont effectivement de la musique "irréversible".

On peut illustrer graphiquement l'argument probabiliste pour la flèche du temps. Pour cela, il nous faut une notion encore plus abstraite de l'espace : l'espace des phases. Cet espace représente l'état d'un système entier (par exemple d'un gaz dans un volume) par une multitude de dimensions. Chaque molécule du gaz est représentée par ses "degrés de liberté" qui occupent six dimensions de cet espace (les trois dimensions spatiales de sa position et trois dimensions qui décrivent son mouvement). Le mouvement de toutes les molécules du volume est défini par le mouvement d'un seul point dans l'espace des phases. Il n'est pas possible d'imaginer concrètement un tel espace avec un nombre de dimensions qui serait égal à six fois le nombre des molécules d'un gaz. Pourtant, on peut illustrer quelques propriétés de cet espace et du mouvement du point imaginaire. Son mouvement obéit à une marche aléatoire. L'espace des phases est sous-divisé en sous-espaces qui correspondent à des configurations de molécules qu'on ne peut pas distinguer (rappelons que les molécules sont indiscernables).

Xenakis emploie les marches aléatoires depuis les années 1970. On pourrait dire que des cheminements aléatoires différents sont reliés entre eux par des transformations stochastiques. C'est la façon la plus libre de définir des lignes mélodiques continues (Mikka, 1971) ou la répartition des notes dans divers registres (Mors, 1981). Appliqués à la synthèse de son, les processus stochastiques se montrent extrêmement puissants, car ils sont capables de générer de longues évolutions sonores d'une manière complètement libre mais cohérente. Les dimensions d'un espace de phases peuvent être interprétées comme l'amplitude et l'espacement temporel d'un signal électroacoustique. Le mouvement du point (ou de plusieurs points) dans l'espace engendre un bruit sonore caractéristique.

Examinons une application récente : le dernier programme informatique de Xenakis pour la synthèse de son (ainsi que pour des compositions entières)⁵. Ici, des marches aléatoires sont assignées à des points de repère d'une forme d'onde. Chaque point suit la marche d'une autre particule dans un espace des phases

⁵ Cf. XENAKIS (Iannis), *Formalized Music*, revised edition with additional material compiled by Sharon Kanach, Stuyvesant NY, Pendragon Press, 1992, pp. 289-322.

imaginaire. La forme d'onde se trouve dans l'espace-temps physique de la pression d'air instantanée qui fait bouger notre tympan. Le mouvement indépendant et non-corrélé des particules imaginaires change les positions des points de la forme d'onde d'une manière non-linéaire. Il est possible d'appréhender ce processus comme une transformation stochastique sans fin de la forme d'onde, celle-ci étant conçue comme une forme géométrique⁶.

Les marches aléatoires des points de la forme d'onde commencent à un point spécifique (toutes les positions étant au point zéro). Il n'y a qu'une seule figure de la forme d'onde qui permette cette configuration des valeurs : le silence absolu. Par contre, il y a beaucoup plus d'états qui produisent du son. L'évolution du système atteint rapidement "l'équilibre thermique" et la forme originale est complètement détruite au cours du temps. Ce qu'on entend, pourtant, est la manière avec laquelle la forme change. C'est le comportement dynamique qui donne les variations qui sont perçues par l'oreille comme une évolution sonore plus ou moins intéressante⁷.

Conclusion

Dans cet article, le jumelage de la pensée créatrice avec la pensée scientifique dans la musique de Iannis Xenakis a été souligné. Cependant, il faut dire aussi que Xenakis ne s'asservit pas aux modèles scientifiques auxquels il fait référence. Les rôles de l'art et de la science sont bien différents : la science doit toujours être conforme à la réalité. Des expériences doivent être toujours reproductibles. L'art, au contraire, crée ses propres univers. Il est obligé de créer des réalités autres que la réalité "objective". C'est le moment extraordinaire et non reproductible qui fait valoir une œuvre d'art.

Dans les sciences, le temps a été géométrisé. Le flux du temps (passé fixé-future incertain) est aboli par la conception de l'espace-temps. L'ensemble de l'espace-temps est déterminé par les lois naturelles — le passé comme le futur. De même en composition, par la notion de "hors-temps", la flèche du temps a été éliminée. Le temps s'est cristallisé en durées. La composition "en-

⁶ Cf. HOFFMANN (Peter), "Implementing the Dynamic Stochastic Synthesis", dans *Les cahiers du GREYC* n°4 : *Troisièmes journées d'informatique musicale IIM 96*, Caen, Groupe de Recherches en Informatique, Image, Instrumentation de Caen, pp.341-347.

⁷ Cf. HOFFMANN (Peter), "The New GENOYN program", à paraître.

temps" n'est que la dernière étape de la composition nécessaire pour définir la musique : les structures "hors-temps" sont lancées dans le fleuve héraclitéen du temps.

Dans le domaine de l'art, ce n'est pas l'analyse mais la synthèse des structures musicales qui compte. Même si ces structures possèdent souvent un attrait visuel immédiat (au moins dans le cas des esquisses graphiques, ou bien des croquis musicaux de Xenakis), elles habitent le temps. La ligne droite ou courbe devient une *world line* dans l'univers sonore ! En fait, la perception de l'"espace" sonore est telle que des hauteurs convergentes établissent une analogie avec un processus de "fermeture" et des hauteurs divergentes avec une "ouverture" de l'espace. Si le dessin des structures graphiques et l'imagination musicale vont de pair, on peut parler d'une pensée abstraite géométrique qui se manifeste dans les deux domaines : le visuel et le musical.