

Problématiques scientifiques et compositions musicales

Iannis Xenakis

Édition Makis Solomos, d'après Agostino Di Scipio

« Problématiques scientifiques et compositions musicales », transcription d'une conférence dans le cadre du *Premier colloque international sur les relations actuelles entre les sciences, les arts et la philosophie*, Unesco, Académie Européenne des Sciences, des Arts et des Lettres, 1980. Publié pour la première fois en traduction italienne dans *Universi del suono. Scritti e interventi 1955-1994*, a cura di Agostino Di Scipio, Milano, Ricordi, sous un titre différent (« Problematiche tecnologiche della composizione »), p. 63-82.

Note : en souligné-pointillé les phrases recopiées d'après « Les chemins de la composition musicale », car elles étaient proches de phrases de la conférence.

Le thème de cette conférence est : “ Problématiques scientifiques et compositions musicales ” ; mais je souhaiterais inverser les termes et envisager une relation plus lâche entre eux : envisager la composition musicale et la problématique scientifique de manière plus ou moins indépendante. Le court exposé que je ferai aura trait à des expériences que j'ai eu l'occasion de faire en composition musicale, mais aussi avec des spectacles visuels à partir de principes valables dans le domaine de la musique, expériences qui ont également fait appel à l'ordinateur.

Musique

Pour commencer, je souhaiterais vous montrer comment sont nées les idées que j'ai développées par la suite. Juste avant la seconde guerre mondiale, j'écoutais, à l'occasion d'excursions, les cigales, le vent dans les pins, les bruits des vagues, la grêle sur ma tente, etc. Puis, pendant l'occupation nazie, j'entendais les formidables sonorités des foules marchant sur l'ennemi, au centre de la ville, protestant contre le travail forcé en Allemagne ou, tout simplement, réclamant du pain, de l'huile. Les artères principales d'Athènes se remplissaient alors avec ces slogans scandés, selon un rythme fort. Lorsque les manifestants —dont j'étais souvent dans le cortège de tête, comme la plupart de mes camarades de l'Université polytechnique, qui constituait un bastion de la Résistance— s'approchaient du centre, les nazis, qui les attendaient avec des chars, tiraient dans la foule. Des cris de colère, de douleur, de peur, de mort, remplaçaient soudain la manifestation rythmée, qui se transformait alors en une fantastique cohue de centaines de milliers de voix, remplissant la ville entière de cris, de fumées, de poussières et de sang, le tout ponctué de mitrailleuses et d'explosions.

Ces phénomènes naturels (bruits des vagues, des cigales, du vent) ou humains, je les écoutais en étant au centre de l'action et, en même temps, avec le détachement de l'observateur extérieur. Je n'osais pourtant pas les classer dans le domaine de la musique : ni les sons, ni leurs structures n'en faisaient partie. Cependant, à Paris, des années plus tard, ces réminiscences se sont vidées de leur contenu émotionnel pour ne laisser en moi qu'une question abstraite : quelles étaient leurs structures et leurs évolutions dans le temps ? Sur ce point, mes études antérieures —les

mathématiques et la physique que je travaillais à l'Université Polytechnique ainsi qu'une assez profonde étude de l'Antiquité et de la philosophie— m'ont servi. Car il s'agissait de phénomènes macroscopiques issus de la confusion du vent et des vagues ou de centaines de milliers de cris de manifestants. A la campagne ou durant les manifestations, j'entendais des *masses* sonores : telle fut la première conclusion. Nos sens et notre cerveau se comportent de manière statistique, ils font de l'analyse statistique sans le savoir. Dans un *magma* sonore, nous reconnaissions des densités, des moyennes de mouvement, de timbre, d'intensité, de hauteur. On pourrait les apprécier avec ce que Boltzmann et Maxwell ont dit quant aux limites du calcul newtonien pour rendre compte de la température et de la pression, fut la seconde conclusion. Pour pouvoir comprendre, créer et moduler une masse sonore, il faut disposer d'un grand nombre d'événements d'une part et, d'autre part, d'un modèle scientifique, fourni par le calcul des probabilités.

Ce fut un pas décisif, qui donna naissance à deux œuvres en 1954 et 1955, *Metastaseis* — que vous avez entendue hier— et *Pithoprakta*, toutes deux pour orchestre, car l'orchestre fournissait une masse suffisante, notamment grâce aux cordes divisées à l'extrême pouvant atteindre une densité de 300 événements par seconde, qui est pertinente pour la répartition statistique souhaitée. Pour écrire ces sons, je fus obligé d'inventer une nouvelle notation cartésienne car les notations musicales traditionnelles ne permettaient pas d'envisager la continuité de l'espace sonore. Comme l'orchestre ne pouvait pas lire cette partition, je l'ai traduite dans la notation traditionnelle. *Metastaseis* n'est pas une musique ataxique, elle est ordonnée. Elle soulève surtout les problèmes de continuité-discontinuité et de transformation continue. D'ailleurs le terme *métastasis* signifie “ après ” (*méta*) et “ arrêt ” (*stasis*). Est ainsi posée la question de la continuité du mouvement qui intéressait déjà les Eléates. Cette section de *Metastaseis* fut réalisée avec un espace à trois dimensions —des surfaces réglées— que j'ai eu l'occasion d'utiliser peu après dans l'architecture du Pavillon Philips de l'Exposition de Bruxelles. Voici à présent un fourmillement de molécules scalaires : il s'agit du graphique de la composition d'un passage de *Pithoprakta*, constitué de superpositions successives afin de créer une atmosphère, une sorte de gaz sonore, *pithoprakta* signifiant actions de probabilité. Ce fourmillement de molécules avec une densité qui s'accroît vers le bruit constitue une modulation par rapport à l'ordre et au désordre.

Lorsque l'on parle d'ordre ou de désordre, on pense surtout au temps, mais on peut également appliquer ces notions à d'autres domaines : les hauteurs, les dynamiques, etc. Exemple avec les valeurs de temps : les instants temporels —tout au moins, à notre échelle— peuvent être ordonnés : on est capable de dire, à propos de trois instants, lequel se trouve entre les deux autres. La même chose vaut pour trois hauteurs, trois intensités, trois densités, trois degrés d'ordre, etc. Par contre, cela n'est pas possible avec les couleurs sonores : entre une couleur claire et une couleur qui tend vers le bruit, il existe plusieurs cheminement possibles équivalents ; on ne peut donc pas parler d'ordre, de structure d'ordre. Pour revenir au temps, le monde de la musique se situe à une échelle plus grande que celle des particules subatomiques, où le temps pourrait être réversible partiellement. Grâce à cette structure, on peut représenter le temps avec des dates qui, axiomatiquement, peuvent à leur tour être confondues avec l'ensemble des sons que perçoit l'oreille. Nous voyons ainsi comment on passe de la sensation à la notation graphique —par

exemple, avec des points sur une droite— et, ensuite, aux nombres. On constate immédiatement la possibilité d'utiliser le calcul, à la main ou mécaniquement —cela n'a pas d'importance. Pointe alors la pensée mathématique dans toute sa splendeur ; ou, tout au moins, une partie de la pensée mathématique : le graphisme, la représentation numérique des faits sonores, qui est évidente, puisque les musiciens comptent, aux classes d'équivalence près, les durées comme le font les physiciens. Cette représentation à la fois graphique et numérique est également valable dans le domaine des hauteurs, car les hauteurs des musiciens forment un ensemble totalement ordonné (à nouveau aux classes d'équivalence près). On confond par exemple deux hauteurs voisines de moins d'un coma. Le coma, comme vous le savez, est la distance minimale définie par Pythagore comme la proportion de 81 sur 80, correspondant environ au neuvième de ton. Il y a également une suite ordonnée pour d'autres caractéristiques du son. Ce qui vient d'être dit légitime *a posteriori* l'emploi des mathématiques au niveau du calcul arithmétique —avec ou sans ordinateur— appliqué à la musique. A l'époque, dans les années 1950, je n'avais pas d'ordinateur à ma disposition. Les idées, au niveau macroscopique (c'est-à-dire au niveau de la forme) pouvaient aussi être fécondées par une approche philosophique, scientifique et mathématique.

Ici se pose une première question sur la forme musicale : peut-on faire table rase de toutes les règles de composition antérieures ? C'est ce que j'avais déjà fait intuitivement avec *Pithoprakta*, même avec *Metastaseis*. Cependant, à présent, la question se pose de manière consciente : faire table rase de toutes les règles de composition antérieures (tonales, sérielles, etc.) en composant néanmoins une œuvre musicale —telle est la question. En cas de réponse positive : comment composer ? Devrait-on inventer de nouvelles règles et lesquelles ? Pourrait-on envisager une absence de règles ou faudrait-il un nombre minimal de règles ? Mais, au fait, que signifie une règle ? Voilà la question qu'il faut se poser directement, automatiquement, surtout quand on vous a tapé sur les doigts parce que l'on faisait des fautes d'orthographe en harmonie, en contrepoint ou même en écriture. C'est par la dernière question qu'il faut commencer : que signifie une règle, une loi ?

J'ai mis malheureusement longtemps à pénétrer le sens de ce que l'on appelle si facilement règle. Une règle existe dès qu'il y a renouvellement, répétition d'un phénomène, d'un événement ou d'une relation. Une règle est inconcevable sans la reproduction de quelque chose ; elle s'identifie donc à la répétition d'un événement. L'imitation canonique d'une mélodie, d'un contrepoint traditionnel obéit à certaines conditions de répétition qui constituent les règles de l'imitation ; de même pour les règles de l'harmonie ou les lois physiques, par exemple celles de Newton ou celles de la relativité. Lorsqu'il n'y a pas de répétition, on ne peut pas dire qu'il y a loi.

Pour éclairer ce qui vient d'être dit, prenons un exemple tiré encore une fois des phénomènes temporels. Marquons le commencement d'un phénomène sonore ou visuel par un point sur la droite horizontale du temps, sur laquelle nous avons choisi un point comme origine et un segment de l'axe comme unité temporelle, par exemple, la seconde. Le même événement ou un autre événement pourra se produire ; le commencement sera donc marqué par un deuxième point sur cette droite, et ainsi de suite, pour chaque réapparition d'un événement quelconque, sonore ou visuel. Ces points peuvent symboliser les attaques d'un son, le début d'un événement quelconque, un accident de

voiture par exemple, etc. Si la règle consistait à créer des symétries —symétrie signifie “même mesure”—, on aurait des répétitions de segments. Si les intervalles ne présentent pas de symétries, d'égalités ou de périodicités précises, c'est-à-dire si les répétitions ne sont pas précises, s'il y a des défauts, nous aurons à faire encore à une règle, mais de nature quelque peu différente de la précédente, bien qu'elle ne soit que l'extension de l'idée de périodicités strictes (d'égalité ou de symétrie) à des classes dont les éléments sont approximativement symétriques, égaux ou périodiques. Tout se passe comme si cette seconde règle était plus relâchée, plus libre, plus riche que la précédente. Une troisième étape serait d'imaginer finalement des classes d'équivalence infiniment grandes, où les symétries, les égalités, les périodicités au sens strict seraient abolies. Ceci correspond à l'idée d'une distribution quelconque, au hasard, d'un nombre infini de points sur une droite sans fin —il faut bien sûr que la droite soit éternelle, qu'elle aille d'un point de l'univers à l'infini.

C'est ici que l'on trouve peut-être une réponse à la question de savoir comment composer avec un minimum de règles. La règle se confond dans ce dernier cas avec une loi de probabilités, puisqu'il n'y a pas de répétition. La répétition étant abolie, notre règle est l'absence de répétition, c'est une condition minimale. La liberté de distribution des points est très grande et distribuer au hasard des points sur une droite —pour l'orchestre, ces points peuvent être des hauteurs, des timbres, des intensités, des modes de jeu, etc.— peut être traité avec plusieurs lois de distribution probabiliste : celles de Cauchy, de Poisson, de Gauss et bien d'autres. L'exemple que je vous ai donné précédemment avec *Pithoprakta* était basé sur une distribution gaussienne de hauteurs.

La réponse à la question que nous avons posée est donc : oui, nous pouvons imaginer une macroforme musicale avec un minimum de règles de composition, représentée par des lois de probabilités dûment enchevêtrées et intercalées. Voilà un autre exemple pour la macroforme : un tableau à deux dimensions avec une distribution de la densité d'événements qui suit la loi de Poisson, laquelle est sans doute une des premières lois —parmi les plus simples— qu'on trouve dans le calcul des probabilités, en dehors de la loi de Bernoulli. Il faut naturellement définir les deux dimensions de ce tableau, puisqu'en musique nous ne sommes pas dans l'espace physique à trois dimensions, mais dans l'espace sonore, musical —les dimensions ne sont absolument pas de même nature, ce qui augmente l'intérêt du problème. (Je dois signaler que la géométrie analytique a en quelque sorte été inventée plusieurs siècles avant Descartes, par des musiciens comme Guido d'Arezzo, grâce à la notation musicale qui relie deux dimensions sensibles différentes dans un plan). Pour revenir à notre tableau : le sens vertical correspond à des qualités sonores, la première ligne, par exemple étant celle de la flûte, la ligne du milieu celle de percussion, la ligne du bas celle des cordes jouant avec l'archet ; dans le sens horizontal, nous avons le temps. Les couleurs qui remplissent ce tableau indiquent la densité de ces nuages de sons ; par exemple, le jaune signifie une densité pratiquement nulle (il n'y a pas ou presque pas de son), le vert une densité unitaire définie par le compositeur, le bleu une densité double, le rouge une densité triple et le noir, qui ne survient qu'une fois, une densité quadruple. Ces densités ont été calculées avec des formules de probabilités : elles ont donné naissance à une musique stochastique.

Puisqu'il y a calcul, l'ordinateur peut servir et je l'ai utilisé en écrivant un programme en Fortran, qui m'a permis de composer plusieurs morceaux. La réponse donnée ici à la macroforme n'est pas sans affinités avec l'une des formes les plus complexes et les plus strictes du passé, la fugue, qui est basée essentiellement sur l'imitation d'un thème et ses transformations canoniques, c'est-à-dire ses duplications plus ou moins conformes, utilisant la transposition, l'augmentation ou la diminution temporelles, etc. Aujourd'hui, le compositeur est obligé de penser non seulement selon des moules de macroformes, mais aussi en inventant ses propres macroformes. L'ordinateur peut permettre une exploration plus poussée de la question des règles de la composition et des macroformes. J'ai traité ces questions dans plusieurs livres ou articles. Je n'évoquerai ici que deux directions possibles pour vous donner une idée de la nature de ces questions. Tout d'abord : la réalisation d'une musique stochastique, probabiliste, mais qui intègre les chaînes markoviennes. Vous connaissez le rôle que ces dernières ont joué aussi bien dans les recherches en stratégie, que dans la naissance de l'informatique avec Shannon et Weaver. Elles ont aussi servi à la linguistique —Chomsky démontra finalement qu'on ne pouvait pas fabriquer une langue à partir de ces chaînes. En musique, cela est possible, même si, heureusement ou malheureusement, il n'existe aucun critère de validation esthétique.

Avec l'autre direction, nous quittons les probabilités pour revenir à la répétition au sens strict, c'est-à-dire fidèle. Ici, la fidélité sera absolue : nous entrons dans un environnement de type causal, déterministe —contrairement aux lois des probabilités qui n'étaient pas déterministes. Cette direction est basée sur la structure des groupes finis ou infinis. Grâce à la structure de groupe, nous pouvons mesurer la symétrie d'une construction quelconque —c'est pourquoi la cristallographie ou la physique subatomique utilisent des groupes. La symétrie suppose la répétition, la copie, donc la présence d'une règle de constitution interne non temporelle, hors-temps. Il s'agit là d'une notion très importante pour la musique : pratiquement toute notre conception de la musique, toute notre expérience de la musique, se fait en dehors du temps, malgré le paradoxe —la musique nécessite le temps pour se manifester ; car pour la comprendre et la sentir, nous devons la sortir du temps, l'imaginer comme instantanée. Ainsi, une grande partie de la musique se passe hors du temps. Prenons un groupe fini de 24 éléments représenté par les symétries du cube. Le cube a 8 arêtes. Ses transformations peuvent se décrire par un ensemble de 8 objets que l'on classerait dans 8 cases —un par case— mais pas selon toutes les permutations possibles —ce qui ferait $8!$ possibilités, soit 40 320. Nous nous limiterons aux permutations qui traduisent la symétrie du cube. On comprend ici que l'abstraction est importante en musique. Chacun des 8 objets en question peut correspondre à des nuages d'événements sonores, par exemple, des nuages pointillistes, ou bien faits de petits glissandi, etc. ; on peut aussi envisager un certain type d'ordre. On a alors une grande quantité de nuages possibles et encore plus de successions possibles ! Pour les choisir, nous pouvons nous servir des symétries du cube précédemment évoquées.

Quittons à présent le domaine des grandes formes et abordons la synthèse de sons par ordinateur. Tout son peut être représenté, dans un plan à deux dimensions, par une ligne sinuuse correspondant à l'onde qui frappe nos oreilles, qui constitue la variation de la pression atmosphérique. Un oscilloscope nous donne cette courbe pour tout son, bien qu'il soit difficile de

savoir si la courbe dessinée correspond à un bruit ou à une symphonie de Beethoven. Cependant, si l'œil ne peut établir cette distinction, l'oreille le peut. Avec un signal qui semblera complexe, indéchiffrable à l'œil, l'oreille reconnaîtra une grande quantité d'éléments : des hauteurs, des intensités, etc. Elle reconnaîtra aussi des symétries, des répétitions, des lignes mélodiques, des polyphonies, des harmonies ainsi que toutes sortes de configurations à des niveaux de plus en plus élevés et complexes. Avec l'ordinateur, nous pouvons construire, grâce à des formules mathématiques, des courbes représentées par des suites serrées de nombres, qui correspondent aux valeurs de la pression dans le temps. En passant à une vitesse convenable dans un convertisseur, ces suites seront converties en variation de tension électrique ; si nous branchons un haut-parleur à la sortie du convertisseur, nous entendrons la courbe.

La question qui se pose dans toute sa généralité est de savoir quelle est la construction mathématique qu'il faut élaborer avant d'en nourrir l'ordinateur, afin que ce que l'on entendra soit aussi intéressant que possible —à la fois nouveau et original. Sans trop m'attarder sur ce sujet, je peux tout de même citer un exemple intéressant qui relève de ce que j'ai découvert il y a quelque temps, en employant une distribution des probabilités dites "logistiques" qui, pour certaines valeurs de ces paramètres et des barrières élastiques utilisées, passe par une phase de résonance stochastique, ce qui rend le son produit très intéressant. Je ne sais pas si cela correspond à ce que Monsieur Prigogine a dit hier ; c'est possible. Si l'on confie une telle distribution à un ordinateur, celui-ci tire au hasard des valeurs de la pression qui, en défilant dans le temps, donnent la courbe pression-temps. Personne ne garantit que ces valeurs ne dépassent pas les intensités admissibles par l'oreille —vers 120-130 dB, qui constitue le seuil de la douleur. C'est pourquoi on ajoute les "barrières", qui correspondent en quelque sorte à des surfaces sur lesquelles les probabilités buttent et se réfléchissent.

Le *Diatope*

J'ai parlé pour l'instant de composition. Vous avez pu observer que les problèmes compositionnels sont liés à des concepts fondamentaux et que des solutions possibles dérivent de la pensée à l'œuvre dans d'autres domaines que la musique —la mathématique, la physique, éventuellement même la génétique. Ici, nous pouvons faire un transfert vers le domaine visuel : passer à l'espace à trois dimensions et composer avec la lumière comme l'on compose avec des sons. La composition musicale, qui s'adresse à l'oreille, nous mène à la composition visuelle, qui s'adresse à l'œil. Le rayon laser et le flash électronique sont les équivalents visuels de sons techniquement réussis et c'est créer une musique pour l'œil que de les faire briller dans l'espace, une musique visuelle, abstraite, qui rendrait accessibles à l'homme —à l'échelle terrestre, naturellement— les galaxies, les étoiles et leurs transformations à l'aide de concepts et de procédures issus de la composition musicale. Ce qui en résulte est une nouvelle forme d'art visuel et auditif qui n'est ni le ballet ni l'opéra, mais véritablement un spectacle abstrait au sens où l'est une musique de type astral ou terrestre. Trajectoires de galaxies (en mouvement accéléré), tempêtes, aurores boréales : voilà quelques exemples de ce que cette nouvelle forme d'art ne fait pas que reproduire —ce serait sans intérêt— mais produit véritablement, à l'aide de quelques-uns

des moyens mis à sa disposition par la technologie moderne. Je ne sais pas si l'on pourrait créer des aurores boréales artificiellement — cela pose des problèmes pour l'instant non maîtrisables, car il faudrait faire varier les champs électromagnétiques de la haute atmosphère, ce qui nécessiterait des énergies colossales ; mais on inventera peut-être des manières de détourner ces énergies pour créer des aurores boréales même ici. Dès à présent, un artiste d'un type nouveau peut se manifester à l'échelle d'une grande ville, si on lui en donne les moyens. Et il sera bientôt en mesure d'aller dans l'espace. C'est ce que l'on peut faire avec le *Diatope*. Grâce à sa tente en matière plastique dont l'architecture spéciale en paraboloïdes hyperboliques a été conçue par le Centre National d'Art et de Culture Georges-Pompidou pour son inauguration. Le *Diatope* est itinérant et il est allé à Bonn en 1979.

Quatre rayons lasers de 4 watts chacun sont équipés de systèmes optiques qui produisent des effets de lumière variés. 400 miroirs spéciaux, associés au rayon laser, créent de multiples toiles d'araignées lumineuses en mouvement. Des taches de lumière en mouvement ou des projections multiples de flèches lumineuses dessinent dans l'espace et sur la toile noire de la tente des trajectoires d'étoiles filantes ou des mosaïques d'éclats lumineux. Des configurations tourbillonnantes enveloppent le spectateur assis ou couché sur un sol en carreaux de verre, qui laisse passer sous lui d'autres événements lumineux.

Pour l'architecture, ont été adoptées des doubles courbures, pour obtenir des modulations de l'espace, mais aussi de l'acoustique et du jeu des lumières. Dans une forme sphérique, vous avez des réflexions successives qui créent une sorte d'effet mitrailleuse. Les architectes, en règle générale, ne connaissent pas ou négligent de tirer parti des formes modernes et se content, pour les salles de concert, de "cages à lapin" — salles cubiques, avec des faces parallèles, qui n'utilisent pas les doubles courbures. Par contre, avec une simple toile, le *Diatope* offre une sensation sonore "agréable", sans aucune correction acoustique des parois. Les courbes et les fuites créent une sorte de caverne, c'est-à-dire quelque chose d'ouvert et servant à la fois d'abri.

Dans le spectacle, 1 600 flashes électroniques forment des spirales tournantes qui envahissent l'espace, puis disparaissent dans l'obscurité complète. Ces flashes sont fixés sur un filet métallique suspendu sous la paroi de plastique. La musique, enregistrée sur 7 pistes, est distribuée automatiquement et en mouvement continu à 11 haut-parleurs de qualité par l'intermédiaire d'une partition programmée. Les ordres viennent d'une bande magnétique numérique de 9 pistes qui décide une "image" du jeu d'ordres simultanés (il y en environ 2 000) tous les vingt cinquièmes de seconde ; les ordres sont transmis par liaison électrique à leur destination dans l'espace. Le spectacle de 46 minutes emploie 140 500 000 commandes binaires. Il va de soi que, pour contrôler et coordonner toutes ces configurations, leurs transformations et leurs mouvements, il faut utiliser l'ordinateur soit de façon interactive, soit en écrivant une bande numérique, en suivant une partition spécialement conçue pour programmer le dispositif lumineux ; c'est cette bande qui, décodée tous les vingt-cinquième de seconde, contrôle l'état des milliers de sources lumineuses ou de systèmes optiques qui doivent rendre cette musique visible. La composition lumineuse et la bande magnétique ont été réalisées au CEMAMu ; la musique, elle, a été réalisée au CEMAMu et achevée au studio électronique du Westdeutsher Rudfunk (WDR) de Cologne.

Pour penser la musique en tant que compositeur, c'est-à-dire en tant qu'artisan, que créateur, il est nécessaire de commencer par étudier pendant un certain temps le solfège, la notation, la théorie musicale, et même la pratique d'un instrument. Et puisque, en outre, la création musicale est considérée comme superflue, très peu de gens peuvent y prétendre. On prive ainsi l'individu et la société de l'immense pouvoir d'imagination libre que leur offre la composition musicale. Or la technologie de l'ordinateur et de ses périphériques met en mesure de déchirer ce rideau de fer. Le système qui a permis de réaliser ce tour de force est l'UPIC (Unité polyagogique informatique du CEMAMu), dont le principe est le suivant : sur un tableau spécialement conçu à cet effet, on trace à l'aide d'un stylo à bille électromagnétique des figures qu'un mini-ordinateur relié à la table interprète, au choix de l'utilisateur, comme des courbes de pression, des enveloppes dynamiques, des partitions notées selon les paramètres de la hauteur et du temps, etc. L'ordinateur calcule les données graphiques et le résultat, après être passé par un convertisseur numérique-analogique, est immédiatement reproduit par haut-parleur et enregistré sur magnétophone. On peut ainsi créer des banques de formes d'onde, d'enveloppes, de partitions graphiques, etc. On peut également mixer, effacer et effectuer la plupart des opérations d'un studio de musique électronique traditionnel en se contentant de pointer un stylo électromagnétique sur différentes parties de la table, qui sont aussi sensibles que les touches ou les boutons d'un appareil électronique ordinaire. Un enfant peut dessiner un poisson, une maison : il peut écouter ce qu'il a fait, y apporter des corrections et ainsi, progressivement et par le graphisme, apprendre à *penser* la composition musicale sans que le rebute le solfège ou la pratique d'un instrument. Qui plus est, comme il est amené à élaborer des rythmes, des gammes et des choses plus complexes encore, il est également contraint à combiner l'arithmétique, la géométrie, les formes, la musique. Par le jeu se dégage ainsi une pédagogie interdisciplinaire aux applications multiples. Tout cela s'adresse évidemment à l'homme de la rue et, *a fortiori*, au chercheur et au compositeur professionnel, puisque le son est produit par tranches fines, de l'ordre de 1/50 000^e de seconde.

Il découle de tout ceci que la musique et les arts visuels de demain exigeront des artistes qu'ils soient pluridisciplinaires et initiés aux mathématiques, à l'acoustique, à la physique, à l'informatique, à l'électronique, à l'histoire théorique de la musique et des arts visuels, ainsi qu'à la connaissance fondamentale d'une théorie des formes et de leurs transformations, aussi bien qu'en paléontologie qu'en génétique ou en astrophysique. Il faut donc les encourager et les former en leur donnant les moyens de créer, grâce à un système tel que l'UPIC pour les musiciens, ou un système analogue pour les artisans des arts visuels.

La pierre de touche de cette évolution sera l'enseignement ; il faut faire d'un grand nombre de gens, disons même de la masse, des artistes-créateurs. Cet enseignement, tout comme celui des disciplines scientifiques, devra commencer dès le jardin d'enfants et se poursuivre pendant toute la durée des études. C'est à cette fin que la télématique peut apporter une contribution majeure : en effet, c'est grâce à elle que, pour la première fois, sont rendues possibles d'une part la création immédiate et à domicile par l'intermédiaire de terminaux, d'autre part, la diffusion et la communication au grand public, avec *feedback*, de réalisations individuelles.