



HAL
open science

Informatique et outil de création musicale

Claude Cadoz

► **To cite this version:**

Claude Cadoz. Informatique et outil de création musicale. Marsyas: Revue de pédagogie musicale et chorégraphique, 1988, 7, pp.18-29. hal-00878811v1

HAL Id: hal-00878811

<https://hal.science/hal-00878811v1>

Submitted on 25 Nov 2013 (v1), last revised 8 Sep 2015 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CLAUDE CADOZ

Informatique et outil de création musicale.

L'HISTOIRE de l'informatique musicale a commencé il y a environ une trentaine d'années. Les premières expériences de « composition automatique » de Hiller et Isaacson en 1956*, avaient un caractère essentiellement démonstratif : montrer que l'ordinateur pouvait intervenir dans le processus de composition musicale à un niveau qui semblait jusque là exclusivement réservé à l'intelligence humaine.

Le premier système de synthèse sonore par ordinateur conçu par Mathews, et qui a donné le jour à MUSIC V₂, démontrait sensiblement à la même époque que l'ordinateur était également à même de prendre en charge, sans limitation théorique, ce qui jusque là semblait exclusivement réservé aux objets ou aux instruments naturels : la production de la vibration sonore. L'ordinateur, dans le domaine de la création musicale comme dans tous les domaines, a pris le pouvoir par la fascination et il a du même coup insidieusement jeté le trouble dans nos catégories et représentations traditionnelles : parce que l'ordinateur est capable de produire de toute pièce le son, des variétés de sons, une infinité de sons, est-il un instrument, un « nouvel instrument », universel ? Parce que l'ordinateur peut proposer des modèles de structuration de la même nature et au même niveau que le compositeur, et même dépasser ses capacités, est-il un « compositeur artificiel » ? Le statut de l'ordinateur dans le processus de création reste énigmatique tant qu'on cherche à l'expliquer en référence exclusive aux catégories traditionnelles.

La musique « des technologies traditionnelles », de la lutherie à l'écriture, fait appel à des moyens matériels dispersés, exclusifs dans leurs fonctions. L'ordinateur inverse la situation : il se présente comme un outil général, une « machine universelle », dont une application particulière peut être la création musicale. Son rôle dans la création musicale est « englobant », même s'il ne peut aujourd'hui prétendre être total.

C'est dans ce contexte que le concept d'outil, au singulier, émerge pour la création. C'est là qu'il faut chercher un premier sens au rôle de l'ordinateur dans la création musicale. Au delà des considérations techniques et conjoncturelles que suscite l'évolution vertigineuse et permanente des machines, il faut alors tenter de s'attacher à ce qui est

essentiel dans les fonctions de l'ordinateur, faisant la part des choses entre ce qui tient aux principes stables et ce qui est soumis à l'évolution des performances. L'unification et la réalité de l'outil tiennent alors plus à la cohérence d'un système conceptuel qu'à la réalisation illusoire d'une machine totale répondant définitivement à toutes les fonctionnalités.

Dans cette quête même, c'est sur le processus de création lui-même que l'on est de fait conduit à s'interroger. Et l'on prend rapidement conscience de ce que le processus de création n'est pas uniquement ce que l'on peut observer de l'activité visible et « officielle » d'un artiste confirmé, mais qu'il a des racines profondes, qu'il faut y inclure toutes les phases de l'apprentissage, tous les intermédiaires où se franchissent les différents niveaux de l'expérience à la codification ...

Et de même que l'ordinateur impose une entrée dans tous les problèmes à leur niveau le plus élémentaire (c'est clair dans le cas de la synthèse du son, où l'on doit partir de la plus fine décomposition), l'outil informatique pour la création intègre nécessairement des fonctions propres à l'apprentissage. Il est nécessairement « auto-pédagogique ».

Partant de considérations générales et théoriques sur le processus de création, en particulier musical, nous tenterons de montrer ici, en quoi l'ordinateur et l'informatique contiennent les facteurs d'une mutation profonde de l'acte créatif. Nous présenterons alors quelques éléments d'un système informatique dont le développement, composante essentielle des activités de recherche de l'ACROE, tente de donner corps à ces réflexions.

Conditions objectives

1. La « situation traditionnelle ».

Il n'y a pas d'intelligence ni de conscience musicales possibles sans phénomène sonore perçu ou mémorisé. Plus encore, il n'y a pas de musique si ce phénomène sonore n'est pas d'une manière ou d'une autre voulu, provoqué, influencé ou au moins désigné par une intervention humaine. La musique est un processus de communication, le phénomène sonore un média objectif nécessaire entre deux formes de comportements actifs: les uns pour sa production, les autres pour sa perception.

Aussi, quel que soit le protocole envisagé, faut-il, si l'on désigne par « geste » l'ensemble des comportements, complémentaires de l'émission vocale, par lesquels l'homme informe ou transforme son environnement, un moyen physique, matériel, qui per-

1.. Les chiffres renvoient à la bibliographie située en fin d'article

mette au geste, à court ou à long terme, de s'adresser à l'oreille. Un dispositif matériel, distinct du sujet, est nécessaire et celui-ci doit contenir, dans ses fonctions, réalisées par des organes localisés ou répartis, la transformation des phénomènes gestuels objectifs en ce phénomène non moins objectif qu'est la vibration acoustique. Cette nécessité constitue un principe commun à tous les arts dont les objets, tout en étant accessibles aux sens, ne peuvent être des émanations directes de nos organes d'émission naturels.

Historiquement, la première réponse à cet impératif est donnée par l'instrument. L'instrument de musique effectue cette transformation du geste en son et, qui plus est, de manière directe (on dirait aujourd'hui « en temps-réel ») c'est-à-dire dans le temps même des actions.

D'un point de vue purement « fonctionnel », ce que réalise l'instrument est une adaptation du débit d'information propre à deux phénomènes physiques de natures différentes : les phénomènes gestuels, d'un côté, à faible débit, et les phénomènes sonores, de l'autre, à haut débit. Il ne peut remplir cette fonction que parce que lui-même contient, par sa structure, sous forme atemporelle, une certaine quantité d'information.

Dans cette situation, geste et instrument se combinent, et le geste, d'ailleurs, loin d'être un simple contrôle, est une contribution mécanique au phénomène vibratoire. A ce titre, il détermine très directement certains attributs du son décisifs pour la perception et la musicalité.

Il faut alors considérer que l'acte créatif commence en réalité par l'élaboration de l'instrument. On pourrait d'ailleurs appeler instrument tout objet qui a cette propriété de répondre par un phénomène sonore à une sollicitation gestuelle directe, inclure dans cette définition les objets naturels ou élémentaires que la musique concrète appelait « corps sonores » et considérer que, de l'appropriation simple d'un corps sonore fruste à la construction d'un instrument sophistiqué, s'établit une large échelle sur laquelle on peut situer le degré de signification « humaine » inscrite dans l'objet.

Mais de fait, dans la situation traditionnelle, la nécessité de l'instrument sépare les actes de « lutherie » et le geste instrumental en deux catégories fortement déterminées et fortement distinctes. Cette dernière remarque peut paraître triviale, pourtant, c'est là une des premières catégorisations que l'ordinateur dissout.

L'instrument est un outil de création

Dans la situation traditionnelle, toujours, l'instrument est central. Sans lui, il n'y a pas de musique. La composition fait bien sûr appel à des outils d'un autre ordre: l'écriture par exemple, et la partition qui, elle aussi, en tant que support, est matérielle. Mais l'instrument est déjà, en soi, un outil de création. Le jeu et l'improvisation sont incontestablement des formes d'activités créatives. « Primitives » et élémentaires (en apparence), elles permettent d'observer quelques premiers éléments du processus de création.

A l'issue du stade de l'élaboration ou du choix de l'instrument par le musicien, l'instrument est un inconnu. Aussi, la première expérience créative est-elle une interrogation: Les agissements de l'instrumentiste sont arbitraires par rapport à l'espace sonore que peut offrir l'instrument, et n'ont pour résultat, dans un premier temps, que de permettre au premier de découvrir quels comportements gestuels lui autorise l'instrument, l'espace sonore possible ainsi que la manière dont le geste en détermine le parcours.

Ce n'est qu'à un stade très avancé de son expérience que le musicien devient apte à véritablement anticiper sur l'événement sonore et à en déduire les comportements qui lui permettront de le produire. Les actes sont presque des images du résultat sonore. A ce stade, l'instrument devient en quelque sorte organe, comme dans l'exercice de la voix, où ce sont les paroles ou les sons vocaux à réaliser qui déclenchent et pilotent tout le processus de production, même si celui-ci passe par un ensemble complexe de comportements articulatoires.

L'expérience instrumentale vise à intégrer l'objet au sujet, cependant l'ambivalence demeure, permanente et féconde. L'instrument reste objet, l'instrumentiste peut s'en défaire, en adopter un autre, et chacun impose ses contraintes et ses nécessités propres, inaliénables. De fait, l'instrument joue, tour à tour, et c'est là une fonction vitale, le rôle d'organe intégré au sujet ou le rôle d'objet extérieur, vis-à-vis du sujet.

Et de fait, la situation du jeu et de l'improvisation est beaucoup plus subtile qu'il n'y paraît au premier abord: la pensée élabore, par ses propres nécessités, des projets, des représentations et tente de les concrétiser. La pensée contient des heuristiques, des mécanismes de stimulation et de découverte, mais l'instrument complète ou féconde ces heuristiques. Ainsi l'idée musicale, s'il faut comprendre par là ce qui sera finalement retenu comme significatif et donné à la perception, n'a pas son siège exclusive-

ment dans la pensée du musicien. Cette situation ne correspond qu'à l'un des deux pôles du processus. En effet, on peut dire parfois que l'« idée » existe dans l'objet final, c'est-à-dire dans le phénomène sonore, produit de manière fortuite dans la rencontre d'actes gestuels arbitraires par rapport à leur conséquence sonore et de la « personnalité » propre de l'instrument, avant de s'imposer à la pensée, qui s'y intéresse, la « récupère » et commence à projeter des développements possibles.

L'instrument n'est pas simplement un moyen d'extériorisation, mais un partenaire renfermant son potentiel de situations inédites. Il ne traduit pas, il révèle en se révélant lui-même. Ainsi, le processus de création est-il essentiellement un dialogue. Cette dernière proposition pourrait faire l'objet d'un autre principe si nous ne sentions qu'elle porte les germes d'une généralisation au-delà de la situation instrumentale.

La parole et l'écriture

Dans la relation directe avec l'instrument, un processus de création authentique et à part entière peut s'instituer. Appelons « improvisation », bien que le terme soit très connoté, ce mode particulier de création.

Mais si autour de l'instrument se développent, à partir de sa découverte, une expérience et un apprentissage entièrement originaux, ces derniers ne se font jamais dans un terrain totalement vierge. Une pensée et une expérience du monde et des sens préexistent à cette expérience particulière. Des représentations, des images, des formes, des idées sont présentes, conscientes ou non, formulées ou potentielles, dans les limbes ou au bord de l'émergence. L'expérience instrumentale n'est alors qu'une expérience complémentaire venant ajouter sa contribution à l'espace complexe des représentations mentales. La pensée est plus large que l'expérience particulière, elle préexiste à celle-ci et l'oriente.

Symétriquement, les résonances des expériences sur la pensée dépassent le cadre temporel de leur durée stricte. La pensée élabore des modèles d'une extrême variété, depuis l'image quasi « photographique » des phénomènes réalisés, puis des modèles « comportementaux » qui intériorisent une logique générative des effets plutôt que les effets eux-mêmes, jusqu'à la signification, qui en dernier lieu intègre les éléments et leurs relations en une entité ultime et synthétique.

Dans la relation instrumentale, le temps de la pensée est asservi à celui des comportements de l'instrument, des actes gestuels et des phénomènes

sonores. Or la pensée a son temps propre que l'instrument ignore. Les représentations mentales sont fondées sur, ou plus exactement sont ... la mémoire, qui, entre autre, donne au temps une correspondance atemporelle. Ces représentations constituent un matériau, idéal, que la pensée est à même de traiter, agencer, structurer, et ceci, dans une relative liberté par rapport aux événements réels.

En « temps-différé », la pensée épure, compare, combine, inverse, transforme, ..., « compose », et elle a besoin précisément pour cela, de ne pas être soumise au flux réel du temps sonore.

La composition est ce mode de création complémentaire et nécessaire au processus d'objectivation. Une dialectique s'établit entre l'expérience réelle et l'expérience mentale. Elles se conditionnent mutuellement, mais il y a une relative similitude entre les deux : l'expérience instrumentale est un dialogue « objectif », l'expérience mentale un dialogue « subjectif ».

Mais la pensée a aussi ses limites, la mémoire se grave ou s'évapore capricieusement, disparaît avec le sujet. Aussi, est-ce un autre besoin impérieux que de garantir sa permanence, la continuité du sujet avec lui-même, la communication avec d'autres dans le temps et dans l'espace. La « mémoire objective » est l'autre moyen matériel nécessaire au processus de création.

La partition traditionnelle, objet permanent dans le temps, est la première réponse à cette seconde nécessité : la trace, la mémoire objective.

Ainsi justifiée, elle introduit cependant un troisième terme dans le processus de création : Il ne peut y avoir de mémoire d'un phénomène temporel sans une anamorphose essentielle imposée par le principe d'une représentation du temps par un objet permanent. La notation musicale est un procédé finalement très sophistiqué qui fait intervenir aussi un dispositif matériel (le support et des traces sur ce support) imposant à son tour ses contraintes. Sur les propriétés de ce dispositif se construit un codage, c'est-à-dire une représentation d'éléments « musicaux », nous voulons dire ici essentiellement temporels, par des traces possibles dans le système que constitue ce dispositif.

Le dispositif et le codage suffisent alors à introduire des contraintes et des potentialités au départ extrinsèques à l'espace sonore en représentation.

A leur tour, ils constituent un « matériau », d'une autre nature, mais dans le même sens que pour l'instrument. Et, de là, une nouvelle forme de dialogue s'instaure, qui se distingue et complète les deux précédentes. De la même manière, le système de notation, d'écriture, et plus généralement de mémorisa-

tion objective, intervient activement dans le processus de création par le fait qu'il est susceptible de susciter l'émergence de combinaisons, de formes, d'évènements qui n'auraient pu se manifester directement par le jeu mental ou instrumental.

Nous sommes alors ici en mesure de synthétiser ces remarques en un second principe: Le processus de création est essentiellement un dialogue, mais on voit maintenant à quel point il est complexe puisque trois protagonistes essentiellement différents sont en cause : les objets et phénomènes réels, les représentations mentales et des représentations matérialisées ... des uns et des autres.

Remarquons que «dans la situation traditionnelle », la correspondance entre les représentations mentales et/ou les phénomènes réels d'une part, et leur représentation dans la partition est conventionnelle et fait intervenir, dans le sens de l'écriture comme dans celui de la lecture, un «codage » et un «décodage» par le sujet, compositeur ou interprète.

A nouveau, cette remarque peut sembler banale parce que nous n'avions jusque là connu ni même envisagé d'autre situation. Or, là aussi, l'ordinateur intervient d'une manière extrêmement pertinente en permettant une mémorisation objective automatique non plus seulement de l'effet final, comme le magnétophone pour le phénomène sonore, mais de toute l'information caractéristique de la relation instrumentale, dispositif et actions, et, partant de là la mise en oeuvre de représentations objectivement liées à cette information.

L'apport de l'ordinateur, en fait, n'est pas tellement là où l'on en fait la «publicité» en général. On reste souvent à la surface des faits en évoquant une plus grande richesse sonore, l'automatisation des opérations complexes, l'aide à la composition. Derrière tout cela, il y a une unité plus fondamentale, et ce sera l'objet du chapitre suivant, à partir de l'idée centrale de la représentation: l'ordinateur est fondamentalement et essentiellement un moyen matériel de représentation mais d'une portée et d'une généralité sans précédent

2. L'ordinateur

La synthèse du son :

L'ordinateur permet la synthèse intégrale de tout phénomène sonore. Le premier système de synthèse qui a apporté la preuve de cette capacité est celui qui a donné le jour par la suite au célèbre programme MUSIC V, développé par Mathews dès la fin des années 50. Mais, depuis cette époque, le procédé s'est largement développé et aussi «vulga-

risé », en particulier avec l'apparition et la diffusion des «synthétiseurs ». Le terme synthèse a acquis une sorte d'aura, de magie, qui a rendu plus ou moins confuse l'interprétation de ce qui se passe du « naturel » au synthétique.

La synthèse, c'est d'abord une mutation radicale du processus de production du phénomène sonore. Dans l'instrument acoustique, les constituants fonctionnels, judicieusement dimensionnés, calibrés, agencés, articulés, sont de « vrais » objets qui, sous l'action mécanique du geste, bougent, percutent, frottent, résistent, vibrent et font vibrer le tympan. Dans la synthèse sont en cause des processus électroniques numériques, complètement étrangers au monde des phénomènes sensibles. La maîtrise de ces processus, dans la technologie d'aujourd'hui, a atteint un degré de finesse et d'intimité tel que l'on a pu envisager de leur faire simuler un peu toutes les catégories de phénomènes, et de les substituer à ceux-ci là où c'est leur image qui nous intéresse. C'est le sens premier du mot informatique: phénomènes, signaux, processus sont caractérisés par leur « information » et traduits dans le langage de l'information électronique binaire et de son traitement par des combinaisons complexes de quelques opérateurs élémentaires.

Synthétiser un son c'est organiser des processus électroniques numériques en algorithmes, c'est-à-dire en séquences d'opérations qui, au bout du compte, reconstruisent point par point une onde électrique. Et ce n'est qu'à l'extrémité ultime, juste avant l'oreille, qu'un « transducteur » particulier, le haut-parleur, donne au phénomène un visage humain, une forme accessible à nos sens.

L'ordinateur producteur de son n'est pas un instrument.

Produisant le phénomène sonore, l'ordinateur possède au moins un attribut essentiel de l'instrument. Par ailleurs, entre l'instrument et l'algorithme de synthèse il y a des similitudes: comme l'instrument, l'algorithme doit être préalablement constitué. Pour un algorithme ou une catégorie d'algorithmes donnés, il y a une classe d'évènements, un espace sonore possibles qui ne peuvent être découverts, parcourus, qu'au travers d'instanciations particulières correspondant à la détermination de paramètres laissés libres, l'élaboration de commandes. L'algorithme en tant qu'entité stable génératrice de variété est aussi nécessaire que l'instrument et établit une catégorisation du même ordre entre information structurelle et information événementielle.

Cependant il y a plusieurs différences fondamentales. Rappelons tout d'abord qu'aux débuts de la

synthèse sonore numérique, le son ne « sortait » de la machine qu'après un temps parfois très différé de celui des actions déterminant le processus. Il n'était pas question alors de situation instrumentale. Les actions, descriptions d'instructions en code alphanumérique, n'avaient rien non plus du geste instrumental.

Bien que dans sa terminologie, MUSIC V sépare « Instruments » et « Notes », les premiers correspondant à une catégorie d'instructions déterminant le processus de génération, les secondes à des commandes de ces processus produisant des événements spécifiques, la distinction reste fictive et la notion de jeu est totalement absente. D'un côté on pourrait dire qu'il ne s'agit, pour l'ensemble, que d'un acte de lutherie, l'instrument résultant produisant alors une musique complète sous l'action d'un geste réduit à sa plus simple expression: le déclenchement de la sortie sonore au moment où tous les calculs sont terminés. Mais d'un autre côté, les actes descriptifs du processus peuvent être assimilés à une forme d'écriture et l'opération serait plutôt à rapprocher de la composition. Une composition qui s'attache alors aussi bien à la microstructure du phénomène sonore qu'à l'articulation des sons entre eux.

Les différents systèmes et les différentes approches de la synthèse et de la composition à l'aide de l'ordinateur qui ont vu le jour depuis MUSIC V ont apporté de nombreuses évolutions, mais globalement, le paradigme de base est inchangé.

Parmi les développements plus récents, l'arrivée du temps-réel, avec la mise au point dans les années 70 des processeurs de synthèse spécialisés, ainsi que l'apparition de dispositifs de contrôle gestuels restituant partiellement l'ergonomie des instruments traditionnels, ont changé la situation et rétabli certaines conditions du jeu instrumental. Cependant, même dans cette situation, l'assimilation de l'ordinateur synthétiseur à un instrument est conceptuellement réductrice.

La substitution aux processus mécaniques des processus électroniques numériques a un sens particulier : l'ordinateur, même lorsqu'il produit le son sous l'effet de gestes, en temps-réel, possède des attributs de l'instrument mais n'est pas instrument. Il est une **représentation** de l'instrument.

Cette « nuance » n'est pas purement académique. Elle offre à l'analyse une dimension supplémentaire là où elle se perdait dans la confusion des « projections ».

La représentation, d'une manière générale, met en présence deux entités : ce qui est à représenter et ce qui le représente et établit des correspondances entre certains de leurs attributs. Le principe essen-

tiel de la représentation réside alors dans l'indépendance a priori des deux systèmes auxquels se rattachent l'« original » et le « substitut ». Cette indépendance permet une certaine liberté dans l'établissement des correspondances. Aussi, d'un côté, de l'original au substitut, il peut y avoir une réduction, une économie qui autorise des conduites sur le substitut moins praticables, voire impossibles sur l'original. En contre-partie, cette réduction dénature l'original et certains de ses attributs, peut-être précieux, seront nécessairement absents.

D'un autre côté, les propriétés intrinsèques du moyen de représentation peuvent conduire à la présence dans le substitut d'attributs étrangers à l'objet de référence et conduire à la représentation d'un objet inexistant.

Le propre de la représentation est autant de permettre, à s'y tromper, la simulation du réel, que celle, à s'y tromper aussi, de l'impossible. Mais c'est là une des conditions essentielles à la création: créer commence par la représentation de l'inexistant.

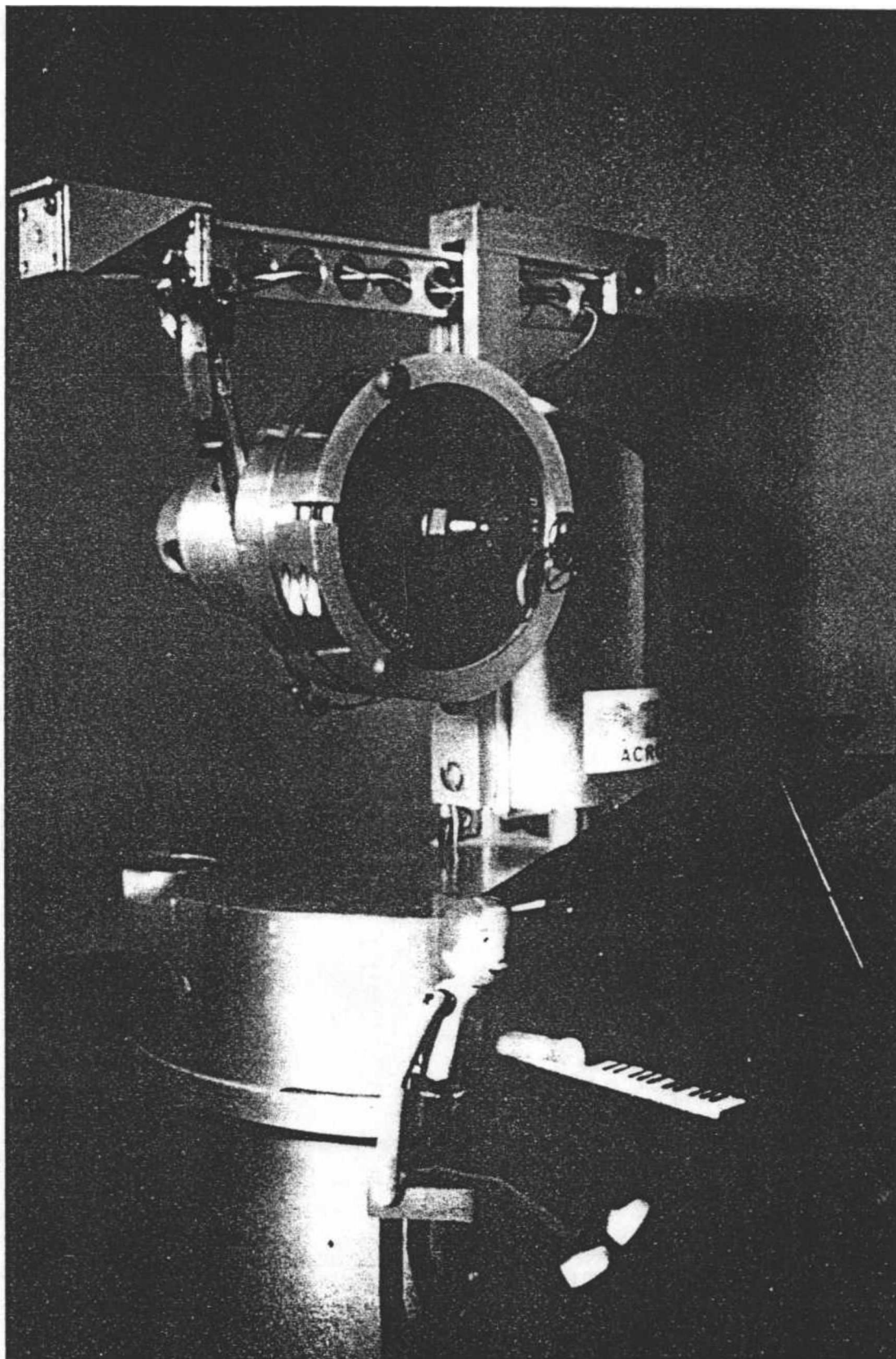
Le passage des processus sonores « naturels » à la synthèse entre exactement dans cette problématique. La représentation acquiert cependant, ici, une dimension nouvelle en ce qu'elle est en elle-même opérante: la représentation du processus générateur est elle-même génératrice.

De ces considérations, nous pouvons déjà tirer trois conséquences :

1. Réduction/Extension : les procédés de synthèse ne permettent pas toujours d'atteindre la finesse et la richesse propres aux instruments acoustiques ou aux phénomènes sonores naturels. Mais inversement ils donnent l'existence à de nouvelles entités comme dans les interpolations de timbres, où l'on pourra créer par exemple des « chimères » intermédiaires entre le violon et la trompette.

2. Décatégorisation : l'immersion du système des fonctions mécaniques dans celui des fonctions numériques, à la fois plus fin et plus général, dissout certaines frontières. En particulier, si avec l'algorithme la séparation entre information structurelle et information événementielle demeure, la frontière entre le geste et l'instrument n'est plus nécessaire. Dans le contexte de la synthèse, les fonctions génératrices et les fonctions de commande peuvent se délocaliser et se distribuer et, on l'a vu, la relation instrumentale effective est une possibilité et non une nécessité. A l'opposé, la création de l'onde sonore peut être entièrement « prescrite » dans un acte exclusivement de nature compositionnelle.

3. Mais le plus important est l'apparition, dans le protocole général, d'un terme supplémentaire. L'instrument n'est plus seulement à élaborer au pre-



*Le premier
transducteur
gestuel
rétroactif. 1981
(la marionnette
articulée a été
construite par
Claude Cadoz)*

DOSSIER

mier degré comme dans la situation traditionnelle. Il y a d'un côté l'instrument, ou son extension, en tout cas un « modèle » à prendre en référence, correspondant aussi bien à une classe d'événements ou d'attributs acoustiques qu'à des principes fonctionnels de génération et, de l'autre, un système pour les représenter. Il s'établit une dialectique nouvelle entre le « modèle de production sonore » et sa représentation dans une combinaison d'algorithmes et de commandes, et en conséquence un nouveau type de dialogue, sans équivalent antérieur, entre le créateur et ... son nouvel outil.

L'organisation des sons

Que l'ordinateur permette une relation entièrement « déterministe » entre l'écriture (à l'aide d'un clavier alpha-numérique) et l'émission effective du son, sans autre intermédiaire humain, montre qu'il inclut, aux côtés des processus de production, des fonctions actives dans l'organisation des phénomènes sonores.

Dans la « composition automatique », du moins à l'origine, c'est encore plus net : les programmes réalisés par Hiller et Isaacson en 1956 à l'Université d'Illinois, ne prenaient en compte que l'organisation sonore et l'exécution de la « Suite Illiac », pièce « composée » par ces programmes, était confiée à des instruments et instrumentistes en « chair et en os ».

La méthode de « Monte-Carlo » mise en oeuvre alors, s'appuyait sur une génération pseudo-aléatoire de suites de paramètres musicaux (hauteur, durée, etc...) codés numériquement et qui étaient ensuite passés au « crible » des règles compositionnelles programmées, déterminant s'ils devaient être retenus ou éliminés.

Mais cet algorithme n'en est qu'un parmi d'autres. La composition automatique fait appel, d'une manière générale à des procédés qui relèvent plus ou moins directement de certaines méthodes de l'intelligence artificielle.

Comme l'algorithme de synthèse, l'algorithme de composition est une séquence de calculs, comparaisons, tests, enchaînements conditionnels, construits à partir de processus numériques élémentaires. Matérialisant tous deux des règles et des contraintes dans l'agencement même de ces opérations, ils contiennent l'un et l'autre le principe du développement : l'un et l'autre, il génèrent une forme particulière à partir d'une « information concentrée » et de certaines conditions d'instanciation. Les données fournies à l'ordinateur ne décrivent pas la forme réalisée mais des conditions de sa génération.

Ct qu. !~:distingue cependant, c'est la substance

de ce qu'ils engendrent; alors que l'algorithme de synthèse élabore les « échantillons numériques » qui permettent la reconstruction du signal sonore continu, l'algorithme de composition sélectionne, agence, combine, transpose des attributs du phénomène sonore, soit en s'attachant directement à leur forme perceptuelle, comme dans les programmes de Hiller et Isaacson, Barbaud ou Xénakis, soit en s'attachant aux paramètres physiques (fréquence, durée, ...) ou encore aux paramètres de contrôle de l'algorithme de synthèse.

Le compositeur n'est pas un ordinateur

Dans la situation traditionnelle, le compositeur organise les événements sonores en s'appuyant sur une circulation entre ses représentations mentales, des représentations graphiques et la réalisation effective des événements sonores. Il met en jeu, dans ce protocole, certains processus structurés de sa pensée : les règles classiques de l'harmonie et du contrepoint sont des contraintes explicitées et formalisées. Analysables dans l'écriture, elles sont en fait des modèles intériorisés de génération de formes et de structuration.

Bien que la valeur musicale de la « Suite Illiac » soit limitée, ce qu'a démontré la démarche initiale de Hiller et Isaacson, c'est que de tels processus idéels, intérieurs au sujet, pouvaient être « objectivés », « mécanisés » au sens où l'entend l'Intelligence Artificielle, c'est-à-dire traduits en systèmes matériels objectifs et opérants.

Alors, là aussi, en adoptant un point de vue du même ordre que précédemment, on peut sortir d'un certain confusionnisme; en intervenant activement dans l'organisation sonore, l'ordinateur remplit une fonction qui était jusque là l'exclusive du compositeur, mais il n'est pas plus compositeur (« artificiel ») ici qu'il n'était instrument tout-à-l'heure. Il y a le même rapport entre les processus mentaux et l'algorithme de composition qu'entre l'instrument et l'algorithme de synthèse. C'est une relation de représentation.

Comme pour la synthèse, il n'y a a priori pas d'isomorphie entre le système en représentation (les processus mentaux) et le moyen de représentation (les opérateurs et les traitements informatiques). L'algorithme compositionnel est une reconstruction sur la base de processus d'une autre nature.

Les conséquences sont du même ordre que précédemment ; il s'institue un nouvel ordre de dialogue entre le créateur et son outil dans lequel le premier invente, formalise et objective des modèles compositionnels actifs en s'appuyant sur le « matériau » que lui propose l'ordinateur. Et comme précédem-

ment, le fait que l'ordinateur induise des modèles inédits, inexistantes ou impossibles dans la pensée initiale du compositeur, renforce l'idée de la représentation plutôt qu'elle ne l'invalide.

Quant à la réduction inévitable de l'original au substitut, elle a ici une signification fondamentale: de même que l'instrument existe indépendamment de ses représentations et que chacune d'elles ne peut être qu'une approche finie de son identité totale, le modèle compositionnel se substitue à certains processus de la pensée, mais pas au compositeur lui-même. Le compositeur n'est pas un ordinateur et la pensée reste souveraine en ce qu'elle transcende les modèles que l'on peut en donner.

«*Décatégorisation*» :

Ainsi, le principe de représentation s'applique aussi bien aux processus de génération sonore qu'aux processus d'organisation et, qui plus est, l'un et l'autre font appel au même «*matériau de construction*». Plus loin encore, la « *finesse*» et l'universalité des processus numériques induisent une possibilité de décomposition telle que l'un et l'autre peuvent se retrouver en totale symbiose dans un seul et même algorithme ou une seule classe d'algorithmes.

Les actes de «*lutherie*» et les actes instrumentaux, tout en restant possibles, disparaissent en tant que catégories nécessaires. Une frontière s'est dissoute. Il en est de même pour la frontière entre les actes instrumentaux et les actes compositionnels.

Dans des langages de création musicale par ordinateur tels que «*Formes*» de X. Rodet (3), la structure et le contrôle des algorithmes de synthèse, les attributs perceptuels élémentaires et les structures sonores complexes se traitent et se maîtrisent au même niveau de formalisation et de description.

Mais au travers de cette décatégorisation, deux frontières plus essentielles subsistent : - Celle qui sépare d'un côté ce que l'on a déjà plusieurs fois appelé l'information structurelle, qui caractérise un processus, aussi bien de production que d'organisation, dans sa définition génératrice et indépendante du temps, et de l'autre l'information événementielle, instanciation particulière qui fixe, au travers de paramètres ou de fonctions temporelles déterminées un événement parmi tous ceux dont la structure est capable.

- Et celle qui sépare les actions, en fonction de cette première distinction, mais également sous la contrainte des performances des machines, qui doivent ou peuvent s'effectuer en temps-réel de celles qui ne le pourront qu'en temps-différé. Encore faut-il définitivement préciser le sens du terme « *temps-*

réel» : le temps (malheureusement !) est toujours réel. En fait la réalité dont il est question dans cette formule est celle de l'évènement sonore et l'expression indique que c'est le temps de celui-ci qui sert de référence. Une opération en « *temps-réel*» est alors une opération qui s'effectue pendant la durée du phénomène et qui naturellement est susceptible d'avoir une incidence immédiate sur son développement.

Remarquons alors que ce partage n'est pas contradictoire avec celui de la situation traditionnelle : l'information structurelle peut correspondre à la représentation d'un instrument au sens habituel, l'information événementielle à la commande en temps réel de cet «*instrument*» et les actions en temps-réel peuvent être des gestes instrumentaux. Mais il s'agit d'une possibilité et non plus d'une nécessité. Dans le cas général, la description des structures et des événements, quelle que soit leur nature, peut s'effectuer en temps-différé et par l'intermédiaire d'organes de dialogue divers tels que les claviers alpha-numériques, souris, et autres tablettes graphiques. Les événements, dans la mesure où les variables du geste suffisent à les décrire, peuvent être « *joués*» en temps-réel. Par contre, « *définir une structure en temps-réel*» n'a pas de sens parce qu'une structure, par principe, existe par sa permanence, elle est complète à un moment donné et les phases de sa construction sont logiques plutôt que chronologiques. Parler par exemple de « *composition en temps-réel*» serait une pure ineptie.

La chaîne des actes à la réalité sonore est maintenant complète, et.. elle passe entièrement par l'ordinateur. Tout ce qui caractérise aussi bien l'expérience que les différentes manières de déterminer un événement musical dans sa totalité entre, par des organes divers, claviers alphanumériques ou « *transducteurs gestuels*», dans l'ordinateur et se diffuse dans des représentations numériques et algorithmiques diverses.

Il nous reste alors à évoquer une troisième incidence, complémentaire et tout aussi fondamentale que les précédentes, de ce principe de représentation généralisé.

Mémoire objective

La fonction de représentation par l'ordinateur est englobante. La relation du créateur à l'ordinateur représente momentanément une relation complète à l'univers réel. L'ordinateur étant un univers fini cette transposition est bien sûr foncièrement réductrice. Cependant, il existe une contrepartie qui n'a pas d'antécédents.

Nous avons souligné, au chapitre précédent, la

nécessité d'une mémoire objective en soutien aux processus et représentations mentales et une forme duale de représentation, supportée par un système matériel, celui de la partition dans la situation traditionnelle.

La mémoire matérielle est l'une des fonctions existentielles de l'ordinateur, et, dans la mesure où tout ce que l'ordinateur représente, signaux, phénomènes et processus, se traduit sous une forme unique et généralisée d'information et d'opérations, cette mémoire peut s'appliquer à l'intégralité des expériences, phénomènes et processus en cause dans la relation du créateur à son outil.

Et par là même, là où la conservation d'une « trace » et sa relecture exigeait une intervention humaine, l'ordinateur permet, dans les deux sens, une correspondance exhaustive et automatique.

Cette trace est cependant en général peu évocatrice dans sa forme brute (mémoire d'échantillons de signaux, de paramètres de contrôle, etc.), et si la mémorisation objective est automatique, la codification symbolique ne l'est pas. L'intervention humaine reste nécessaire, mais précisément là où elle seule est légitime. De cette trace, qui recèle toute l'information causale, il est possible d'extraire de nouvelles représentations sous toutes les formes utiles et pertinentes pour le travail compositionnel.

Cette latitude ouvre des voies à une généralisation des fonctions de la partition : tout en conservant le principe d'une codification des durées par des figures graphiques atemporelles, cette représentation graphique peut porter sur tous les éléments qui interviennent dans la chaîne déterministe de l'acte à l'écoute. La partition pourra alors symboliser aussi bien d'une manière purement suggestive que rigoureuse et opératoire, ce que l'on doit entendre ou ce que l'on doit faire pour l'entendre.

Une autre conséquence est que le travail compositionnel peut porter sur toutes les catégories d'événements en cause dans la chaîne complète, fonctions gestuelles de contrôle à l'un des pôles, signal sonore à l'autre, dès lors que cette mémorisation leur donne le statut d'« objets ».

Au travers de toute cette mutation, on aura observé une permanence dans le processus de création : La circulation entre les représentations mentales, les représentations atemporelles matérialisées et la réalisation effective des événements sonores.

Le principe de représentation intervient ici pour généraliser les conditions de cette circulation.

Conditions subjectives

Il faudrait maintenant un autre long développement pour indiquer comment, sur la base de ce contexte matériel où les possibilités se sont radicalement démultipliées, des chemins de reconnaissance doivent être tracés pour atteindre l'essentiel : la signification, la fonction symbolique, ... la Musique.

L'entreprise est d'une autre envergure et ne peut relever que de l'engagement créatif proprement dit. Et sur ce point, il faut admettre que l'informatique musicale, malgré de nombreuses oeuvres et parmi elles des chefs d'oeuvre, n'est qu'à son matin.

Nous ferons cependant une incursion dans cette direction, limitée à certains aspects de la perception, dans la mesure où il y a là encore quelques incidences sur les bases matérielles de l'outil.

Il n'y a pas de mutation positive sans continuité.

Après avoir autant insisté sur l'ouverture sans précédent que représente l'introduction de l'ordinateur dans la création, il convient de prendre la mesure de certaines limites.

Dès les débuts de la synthèse, des problèmes nouveaux et inattendus se sont présentés : il ne suffit pas de savoir que tous les sons sont possibles, il faut pouvoir décrire en termes exhaustifs tout ce qui les caractérise et ceci en fonction d'un résultat dont seul, au bout du compte, l'oreille, plus précisément le système auditif sera juge. Ainsi par exemple, pour saisir ce qui fait la substance du son « cuivré », Risset (4) a-t-il dû mettre en évidence qu'il fallait associer la richesse du spectre dans les composantes aiguës à l'augmentation de l'amplitude dans le corps du son.

Des connaissances nouvelles ont dû être acquises sur les propriétés physiques des sons et sur le fonctionnement de l'appareil auditif.

Mais en dehors de cela, la généralité des représentations par les processus de synthèse est malgré tout relative par deux aspects différents :

- D'abord parce que les machines, tout universelles qu'elles soient, le sont surtout dans leur principe de base (et encore, la machine de Turing, en tant que machine séquentielle, est-elle aujourd'hui conçue comme une étape à dépasser). Leur réalité à un moment donné des performances technologiques quantitatives réduisent leur généralité en particulier lorsque la réalisation d'une fonction est fortement dépendante de la rapidité des processus. Aussi, la portée des algorithmes est-elle soumise à

des contingences techniques et à l'évolution d'un savoir-faire.

- Ensuite parce qu'en support à l'analyse des phénomènes et à la synthèse des procédés il y a nécessairement un outillage théorique et mathématique. Autre univers de représentations, les mathématiques et la physique acoustique ne sont pas forcément adaptées à la mise en relief de ce qui est pertinent pour la perception et la musicalité.

La psychoacoustique, interface entre l'analyse de Fourier entre autre et l'espace perceptuel est alors devenu un paradigme pour la synthèse musicale à l'aide de l'ordinateur. Et le développement des algorithmes et de leur utilisation est fortement marqué par ce parcours.

Un éclairage nouveau est intervenu depuis quelques années, au moment où l'on a considéré que l'oreille avait des exigences d'une nature particulière quant aux facteurs et indices contenus dans le signal. Sans entrer dans le détail, il s'avère que l'oreille, plutôt que d'effectuer un traitement homogène de toutes les données qui lui parviennent et d'en contempler les propriétés, cherche des attributs et des relations qui lui permettent d'identifier l'origine, la cause du phénomène. Et de fait, il y a une sorte de coupure ontologique à laquelle elle ne peut se résoudre, qui fait que même sollicitée par un son entièrement inouï, au sens éthymologique, elle lui cherche une raison, une logique causale, une authenticité possible, au moins sur certains de ses aspects, dans l'univers réel.

L'oreille a une fascinante faculté d'acceptation et d'intégration du «jamais encore perçu», mais elle réclame certaines garanties, une certaine continuité avec son passé ontologique.

Entre les sons des algorithmes de synthèse directement issus de la technologie et des mathématiques et ceux des processus mécaniques vibratoires de l'univers réel, il y a parfois une distance qui dissuade l'oreille de jamais les considérer comme musicalement exploitables.

Aussi est-il indispensable de ménager, dans les procédés de synthèse, cette continuité avec l'univers physique. C'est un des aspects auxquels nous nous sommes attachés dans notre recherche, mais avant d'y revenir, dans le chapitre suivant, nous étendrons encore ces considérations au delà de la perception, pour y intégrer l'action.

L'apprentissage des sons n'est pas un processus passif. Il y a bien sûr les sons qui existent indépendamment de nous, émanation des événements naturels ou humains ... mais il y a ceux que l'on provoque et la musique est d'abord faite de ceux-là. L'oreille musicienne s'est constituée dans un apprentissage instrumental et il faut entendre par

là, plus que l'apprentissage d'un instrument, l'expérience des objets qui ont la propriété de répondre par un phénomène sonore lorsqu'on les sollicite gestuellement. L'expérience instrumentale se fonde sur une relation sensori-motrice et, qui plus est, multisensorielle: dans la manipulation d'un objet physique, les perceptions sonores s'accompagnent de perceptions visuelles mais aussi de perceptions tactiles et « kinesthésiques ».

Alors que l'ordinateur ouvre l'horizon sonore sur des espaces véritablement inouïs, il nous semble indispensable de restituer, pour les explorer et les intérioriser, les conditions de l'expérience instrumentale dans le cadre même de cet «outil pour la création».

C'est une continuité plus fondamentale que nous cherchons là, prolongeant celle de la perception à l'expérience et l'action. Une conséquence est que, dans sa fonction de représentation, l'ordinateur doit permettre celle de l'instrument selon tous les aspects qui autorisent l'établissement d'une relation sensori-motrice.

CORDIS, modèles physiques, transducteurs gestuels rétroactifs

Nos travaux de recherche consistent entre autre en cette tentative d'analyse des fondements objectifs et subjectifs élémentaires du processus de création. Les considérations auxquelles nous arrivons là font de la conception et la réalisation de l'outil un projet sans limites visibles à court terme.

De nombreux travaux se développent dans les nombreux lieux de l'informatique musicale créés depuis une trentaine d'années et font avancer les connaissances et les techniques d'une façon parfois vertigineuse et déconcertante.

En ce qui nous concerne, dans la mesure où les quelques derniers points que nous venons d'évoquer nous paraissent primordiaux et les moins bien servis aujourd'hui, c'est sur ceux-ci que nous concentrons nos efforts de réalisation concrète et d'expérimentation, conscients de ce qu'ils ne sont qu'une entrée, mais nécessaire.

Parmi ces réalisations nous nous bornerons ici à la présentation de deux systèmes particuliers.

Les modèles physiques pour la synthèse:

Depuis 1979 (5), nous développons un système de simulation: le système CORDIS, fondé sur la décomposition de tout objet physique en composants mécaniques élémentaires, la simulation numérique de ces constituants et la reconstruction

modulaire des objets complexes à partir de ces simulations. Un programme de simulation est alors un calcul effectué en temps réel de tous les mouvements de l'objet vibrant. Le phénomène sonore est en quelque sorte un sous-produit de la simulation: il suffit de déclarer que les mouvements d'un ou de plusieurs points particuliers de l'objet serviront à ébranler, après passage dans un convertisseur numérique/analogique, la membrane d'un haut-parleur.

Ce qui est miraculeux, c'est que simulant ainsi les comportements par exemple d'une corde vibrante, ce que l'on entend, sortant du haut parleur, est ... le son d'une corde qui vibre. Et le réalisme est assez rapidement atteint sans que l'on ait à traquer le détail dans la manipulation et l'agencement des constituants.

CORDIS est un système modulaire, c'est-à-dire que les composants élémentaires constituent une base générative. Nous avons, dans cette même « philosophie », développé un langage de description des objets instrumentaux qui, associé à cette base et à des règles de construction, permet à l'utilisateur de « créer » des instruments.

Nous sommes toujours dans le cadre d'une représentation et nous tombons inévitablement sous le coup de ce dualisme réduction/extension. Si nous avons pu relativement facilement simuler des cordes pincées, des cordes frottées, des percussions, des granulations, etc., il sera probablement encore longtemps difficile de restituer ce qui fait la différence entre un violon ordinaire et un Stradivarius. Mais le Stradivarius n'est pas à refaire. Et s'il s'agit maintenant plus explicitement d'une représentation de l'instrument au sens habituel, s'atteler à un tel problème apporte une connaissance d'une nouvelle nature. Transposer les processus instrumentaux dans un autre espace de représentation conduit à une progression vers ce qui est plus essentiel. Dans cette démarche, ce que l'on découvre, c'est un peu une essence « archétypale » des mécanismes instrumentaux. Il n'est pas question de piano, ou de clavecin, ou de violon, mais de cordes frappées, pincées ou frottées ... ou d'hybridations qui, tout en n'ayant aucun équivalent naturel n'en sont pas moins physiquement cohérentes.

Parce qu'elle est fondée sur la simulation numérique de certaines propriétés comportementales des objets vibrants, et qu'à ce titre elle est propice à la restitution des richesses idiosyncrasiques du corps vibrant naturel, la synthèse par modèles physiques attire l'attention depuis quelques années. Toutefois, elle est souvent présentée comme un modèle de synthèse sonore de plus, qui par ailleurs comporte certaines limites dans la mesure où il est le plus coûteux

des algorithmes, pour une généralité médiocre. Bien que les opérations à mettre en oeuvre n'en soient pas fondamentalement affectées, nous préférons la présenter et la développer en tant que principe de synthèse non pas de l'onde sonore, mais de sa source, de sa cause. Ce qui est plus exigeant. A ce titre il s'agit quand même d'une catégorie d'algorithmes à part.

Aussi, pour que l'outil de création demeure général, faut-il qu'en incluant la synthèse par modèles physiques, il n'exclue pas les autres modèles. Or il se trouve que la structure de processeur la mieux adaptée pour répondre aux exigences du modèle physique l'est de fait pour tous les autres.

Ce sont ces structures, en particulier fondées sur le parallélisme, qui sont à l'ordre du jour actuellement et qui peuvent motiver la part de recherche technique à continuer aujourd'hui.

Les transducteurs gestuels rétroactifs, ou « TGR »

La synthèse par modèle physique est une condition nécessaire à la restitution du rapport instrumental. Il en est une autre, plus évidente: que le geste instrumental puisse s'exercer avec toute la richesse qui le caractérise.

Mais, nous l'avons souligné, la relation instrumentale est riche aussi par le fait qu'elle est multisensorielle et en particulier, les actions gestuelles, dès lors qu'elles s'appliquent à un objet, sont indissociables de perceptions, tactiles et kinesthésiques, qui renseignent sur la nature et le comportement de cet objet: le toucher d'un piano n'est pas neutre pour le pianiste, manipuler un archet n'est pas la même chose que jouer sur un clavier.

Nous avons alors étudié et réalisé des dispositifs d'accès gestuel d'un genre particulier que nous avons baptisés les « Transducteurs Gestuels Rétroactifs », ou TGR.

Dans leur principe ils tiennent compte du fait que le « canal gestuel » est à double sens, c'est-à-dire qu'il sert autant à émettre, par les actions gestuelles, qu'à percevoir. Deux catégories complémentaires de perceptions passent par les organes mêmes du geste: les perceptions tactiles, qui renseignent sur les aspects de surface de l'objet, mais aussi les perceptions kinesthésiques qui renseignent sur son poids, ses articulations, son comportement.

Le TGR n'est rien d'autre que l'équivalent pour le canal gestuel, du haut-parleur pour le canal acoustique ou de l'écran de visualisation pour le canal visuel.

Sa bilatéralité en fait cependant un dispositif beaucoup plus difficile à mettre en oeuvre a priori. D'autre part, les phénomènes en cause, déplace-

ments et forces, sont plus « matériels » que les ondes acoustiques ou optiques. Si le haut-parleur, par exemple peut être considéré comme relativement universel, un TGR universel est aujourd'hui matériellement inconcevable.

Il nous faut alors, partant d'une analyse typologique du geste instrumental, envisager des TGR de morphologies diverses, spécialisées et complémentaires.

Nous avons dès 1981 (6) étudié et mis au point un premier prototype expérimental de TGR. Constitué d'une touche de dimensions semblables à celles d'une touche de piano, il comporte des capteurs de force et de position qui donnent du geste élémentaire une image électrique, convertie en signaux numériques exploitables par l'ordinateur. La rétroaction, source de la perception kinesthésique est obtenue par un moteur qui commande les déplacements de la touche. Ce moteur est à son tour commandé par un signal issu de l'ordinateur.

Couplé à l'ordinateur simulant un objet mécanique, cette touche permet à l'opérateur de « manipuler » l'objet exactement comme s'il existait physiquement. Si l'objet simulé est une corde à pincer, en agissant sur la touche, l'opérateur, non seulement produit le pincement qui provoque alors la mise en vibration et l'émission du son, mais il perçoit aussi, sous son doigt, la mise en contact du « plectre » avec la corde, la résistance de celle-ci et le décrochement au moment où sa pression dépasse une certaine limite.

Lors de telles expériences, un phénomène nouveau se produit: même réduit dans la qualité de sa représentation, l'objet acquiert une présence véritablement surprenante et l'on peut même constater que l'écoute du phénomène sonore en lui-même en est modifiée, ce n'est plus un son de synthèse, mais le son d'un objet.

A la suite de cette touche, purement expérimentale et bien trop limitée pour les aspirations d'un instrumentiste, nous avons réalisé un clavier rétroactif. Premier dans son genre, il sera prochainement connecté dans notre laboratoire à un dispositif informatique complet intégrant lui aussi pour la première fois, bien que de manière encore embryonnaire pour certaines, toutes les catégories de fonctionnalités que nous avons évoquées ici.

L'outil informatique pour la création musicale est un concept, mais nous commençons à le toucher du bout du doigt.

C.C.

..

Les travaux de recherche de l'ACROE sont effectués en liaison avec le LIRA (Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle) et sont subventionnés depuis 1976 par le Ministère de la Culture et de la Communication, Direction de la Musique et de la Danse.

Bibliographie

- (1) Hiller, L.A. and Isaacson, L.M., *Musical composition with a high speed digital computer*, J.A.E.s., Vol.6, N°3, pp. 154-160, 1958.
 - (2) Mathews, M.V., *The technology of computer music*, M.L.T. Press, 1969.
 - (3) Rodet, X., et Cointe, P., *Formes: Composition and scheduling of process*, Computer Music Journal, Vol.8, N° 4, pp. 32-50, 1984.
 - (4) Risset, J.C., *Computer study of trumpet tones*, Bell Labs, Murray Hill, New Jersey 1966.
 - (5) Cadoz, C., *Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires*, Thèse de 3ème Cycle L.N.P.G., Grenoble, 1979.
 - (6) Cadoz, C., Luciani, A. et Florens, J.L., *Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude de l'Instrumental*, Revue d'Acoustique N° 59, pp. 279-292, 1981
- et
- Cadoz, C., Luciani, A., and Florens, J.L., *Responsive Input Devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms: The Cordis system*, Computer Music Journal N° 1, pp. 60-73, 1984.