



HAL
open science

Informatique musicale : utopies et réalités

Martin Laliberté

► **To cite this version:**

Martin Laliberté. Informatique musicale : utopies et réalités. Les Cahiers de l'IRCAM, 1993, Utopies, 4, pp.163-172. hal-01721995

HAL Id: hal-01721995

<https://hal.science/hal-01721995v1>

Submitted on 23 Mar 2023

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.

Informatique musicale : utopies et réalités (1957-90)

Martin Laliberté
Université de Marne la Vallée
Laboratoire CICM, Université de Paris-8

Publié dans *Les Cahiers de l'Ircam no 4*, Utopies, 1993, pp 155-172

Je présenterai ici un parcours de l'informatique musicale du point de vue des aspirations qui l'ont fait naître ainsi que des objectifs techniques et musicaux qui ont nourri sa maturation dans l'histoire sociale et musicale depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Dépositaire de siècles de recherches occidentales et d'attentes quasi messianiques d'une merveilleuse "machine universelle" (Lévy 1987), l'informatique musicale est aujourd'hui enveloppée d'une gangue de sédiments historiques et culturels. Il faut donc, pour une juste compréhension des enjeux technologiques et musicaux actuels, intégrer à notre réflexion autant des phénomènes culturels que les simples données techniques. Cela signifie non seulement dépouiller la masse de documentation technique aride trop rapidement périmée face aux avancées technologiques, mais aussi inclure des études sociologiques et anthropologiques beaucoup plus générales. Vaste projet dont cet article ne pourra qu'esquisser les axes principaux.

Premiers pas de l'informatique musicale (1957-1968)

A l'aube de la musique électronique, trois axes de réflexion inspiraient les créateurs. Ces trois axes agissent comme des développements de la virtuosité du siècle dernier, un rêve romantique avec des moyens nouveaux¹. On retrouve ici la virtuosité instrumentale poussée vers son absolu, sous trois aspects :

1° la recherche d'une musique sans compromis ni entraves historiques ou matérielles. Virtuosité d'écriture.

2° l'intuition de sonorités aussi neuves que les concepts musicaux (Busoni 1911, Russolo 1913, Varèse 1922)². Virtuosité sonore.

3° la fascination pour l'exécution musicale parfaite ou, mieux encore, le souhait d'une machine à musique devant réaliser "directement la pensée musicale" (Babbitt 1962 : 44)³. Virtuosité d'interprétation.

L'esthétique de pureté formelle propre à l'après-guerre (48-58) constitue le facteur essentiel de la naissance des nouvelles technologies musicales. En tant que chef d'orchestre, Boulez développera peu-à-peu une technique très efficace pour souligner les caractéristiques structurelles des oeuvres, pour en permettre la meilleure lisibilité possible. On pourrait comparer cette gestique contemporaine à celle des pianistes ou violonistes du siècle dernier aux prises avec des oeuvres forçant le développement de nouvelles postures : celles d'un Liszt visaient tout autant que celles de Boulez à obtenir de son instrument des résultats sonores répondant aux exigences de la nouvelle musique (Biget 1987 : 28).

Cet idéal de l'interprétation rigoureuse, parfaite et détachée, allait de pair avec une volonté de noter la musique exactement telle qu'elle devait être interprétée. On croyait à l'époque la chose réalisable et nécessaire, sinon dans l'immédiat, du moins dans le futur. Il fallait forcer les habitudes. Les partitions d'alors atteignaient une complexité d'écriture paroxystique : pensons par exemple aux premiers *Klavierstücke* de Stockhausen ou aux deux premières *Sonates* de Boulez, à la multiplication des informations, l'imbrication des valeurs rythmiques irrationnelles à plusieurs niveaux, les changements de tempo et de métrique constants. Jamais jusqu'alors des partitions musicales ne s'étaient tant attaquées aux limites de l'exécutable et du perceptible.

Dans ces conditions, plus d'un compositeur déçu des "mauvaises exécutions instrumentales" s'est senti encore davantage attiré par d'autres sources potentielles.

Une nouvelle lutherie électrique

En parallèle à ce contexte, il convient d'évoquer également les développements d'une technologie électrique. Cahill et son Dynamophone (1906), De Forest et ses lampes triodes (1907) ou les différents acteurs de la radiophonie (1910-1930) ont ouvert la voie aux premières applications de l'électricité en musique : Thereminvox (1920), Ondes

¹ L'électronique et l'informatique musicale apparaît donc au moment historique de fusion entre une maîtrise sans précédent de la vitesse et du temps et la recherche d'une formalisation absolue du langage. Ceci rejoint la notion de *devenir mécanique* de Lévy, 1987.

² Cités dans Luening 1975 et dans Kaegi 1970.

³ A partir de 1955, Milton Babbitt se mit à travailler avec le premier synthétiseur programmable (par cartes perforées), le RCA de Belar et Olson. Ce compositeur trouva dans cet outil un prolongement direct de sa pensée musicale.

Martenot (1928), Trautonium (1930), guitare électrique Rickenbacker A-30, (1931), orgue électrique Hammond (1935), pour ne nommer que les instruments les plus importants. Un second domaine avait de plus été amorcé par Edison et Cros en 1877: l'enregistrement sonore. Les différents développements de ces techniques ont abouti aux disques 78 tours et, vers le début de la seconde guerre mondiale, aux premiers magnétophones à bandes (d'acier pour les Alliés, de plastique pour les Allemands). Il a toutefois fallu la fin de la guerre pour que toutes ces techniques se retrouvent dans les stations de radio d'état des différents pays occidentaux.

Les deux premiers studios "d'expérimentation" puis de "musique" électro-acoustique étaient logés dans ces radios nationales : à l'ORTF de Paris (1948) et à la WDR de Cologne (1950). Ces deux institutions fondatrices se réclamaient d'un certain esprit de synthèse scientifique et artistique :

" La musique pourrait donc être présentée, dans son évolution, comme liée au progrès scientifique - dans la mesure où elle reçoit ses moyens de l'acoustique et désormais de l'électronique et de l'électro-acoustique - , mais, à travers tant de nouveaux objets sonores, il devrait être possible de retrouver les structures permanentes de la pensée et de la sensibilité humaine. Dans cette complémentarité des moyens naturellement donnés et des structures culturelles, on verrait alors se résoudre nombre d'oppositions superficielles, celle des anciens et des modernes, celle des arts et des sciences, celle du sonore et du musical." (Schaeffer 1977 : 10-11 et 15).

On laissera toutefois de côté le devenir de la musique électroacoustique pour s'attacher aux premières applications musicales de l'informatique civile.

Naissance de l'informatique

Après la guerre, les premiers calculateurs électroniques se sont également retrouvés démobilisés. Ces machines étaient apparues dans les années 40 (1943 : ordinateur ENIAC), à la suite notamment des idées de Babbage et Lovelace au début du XIX^e siècle (1823), venant ainsi couronner l'aboutissement de plusieurs décennies de recherches en logique (Turing 1936) et sur la théorie de l'information (Shannon 1938 et 1949)⁴. En pratique, elles avaient été développées pour aider la marine américaine à résoudre ses problèmes balistiques⁵. Le monopole militaire de cette technologie a pris fin avec la guerre et on vit apparaître les premières machines civiles. Ainsi, International Business Machines lance en 1954 son modèle 650.

Hiller et la Suite Illiac

Contrairement à ce que l'histoire subséquente pourrait laisser croire, le premier geste de l'informatique musicale fut de se tourner vers la composition assistée par ordinateur. Après quelques années de recherche sur la formalisation de l'écriture musicale, le compositeur Lejaren Hiller donna le coup d'envoi en faisant calculer, en 1957, sa *Suite* pour quatuor à corde par l'ordinateur Illiac de l'université de l'Illinois.

⁴ Pour plus de détails consultez le chapitre 4 du livre de 1987 de Pierre Lévy.

⁵ A bien des égards, cette première génération d'ordinateurs fut une réussite exemplaire. L'architecture matérielle de ceux-ci, pensée par le mathématicien et cybernéticien John von Neumann, demeure encore le modèle courant. Cette configuration informatique classique est de type sériel : un seul calculateur, "le processeur central" effectue des opérations, nourri par une mémoire vive et soutenu par une mémoire de stockage à long terme, dite "mémoire de masse".

Le compositeur avait formalisé les règles et interdits du traité de contrepoint de J.J. Fux. Il avait ensuite amené l'ordinateur à calculer certaines solutions à des problèmes musicaux, ainsi que certaines permutations contrapuntiques (Schaeffer 1970 : 66-67). Ce choix est très révélateur : le sérialisme avait aussi cours aux Etats-Unis, bien que sous une forme particulière, et des musiciens comme Babbitt, Carter ou Hiller en étaient fortement imprégnés. A l'instar de Webern, Schönberg, Boulez, Stockhausen ou Pousseur, les musiciens américains se préoccupaient de formalisme musical et de construction contrapuntique. Autre signe des temps⁶, Hiller avait également introduit le hasard dans sa pièce en mêlant les premiers essais de composition par règles et une application de l'aléatoire ou des chaînes markoviennes à la construction musicale⁷.

Toutefois, malgré son ouverture conceptuelle et son allure de manifeste, les résultats musicaux de cette première entreprise ont déçu. Une des premières applications parfaitement rigoureuses d'un système de contraintes pures se soldait ainsi par un échec. Les règles mises au point par Hiller étaient probablement trop simples pour donner un résultat musical probant. Pour reprendre la formule de Babbitt : "les règles du contrepoint nous disent de qu'il faut ne pas faire, elles ne nous disent pas ce qu'il faut faire" (Schaeffer 1970 : 67). Ainsi, dans les termes même d'un des plus grands promoteurs du formalisme pur en musique, cette conception formelle stricte de la musique venait d'être prise en défaut. Il y eut essentiellement deux réactions à ce problème. Les uns, Xenakis, Barbaud ou Babbitt, préconisèrent une poursuite du travail et un approfondissement des conceptions formelles de la musique tandis que les autres, la plupart, décidèrent de ne pas déléguer les aspects compositionnels à une machine⁸.

Il faut sans doute rappeler de plus qu'après son utopie initiale des années 40, le sérialisme intégral était en perte de vitesse à la fin des années 50. Les artisans de cette esthétique étaient en train de laisser place au non-formalisé, à l'informalisable, voire au hasard.

Mathews et le langage MUSIC

Peu de temps après Hiller (1958) Max V. Mathews obtenait ses premiers résultats aux laboratoires de la compagnie téléphonique Bell, près de New York, recherches marquant ainsi les véritables débuts de la création sonore par ordinateur. Tout comme ceux de certains grands studios électroniques européens, les travaux de ce groupe avaient comme objectif central l'analyse et la synthèse de la parole plutôt que de la musique. Toutefois, une place réelle était ménagée aux musiciens et, très tôt, quelques uns d'entre eux abordèrent des questions musicales. A partir de 1961, le compositeur Jean-Claude Risset s'était joint à l'équipe de Mathews et on doit à ce groupe de travail quelques concepts et outils fondamentaux de l'informatique musicale : les principes de la synthèse modulaire et de l'échantillonnage musical, les

⁶ Le concept de l'aléatoire possède une longue histoire mais il était devenu central dans la théorie de l'information.

⁷ Xenakis entreprenait vers la même époque son travail sur la stochastique (1954-56) (Xenakis 1963 : 19). Cage travaillait aussi depuis le début de cette décennie sur la question de l'aléa en musique. Ce travail devait résulter plus tard dans la série de pièces calculées à partir d'une formalisation informatique du *I Ching*, par exemple ses ultimes pièces comme *One*, *Two* et les autres "number pieces".

⁸ Pour le plus grand nombre de musiciens informatiques, les questions de la formalisation des principes compositionnels ou, plus simplement, de l'aide à la composition ne redeviendront essentielles qu'à partir de la seconde moitié des années 70, après la longue quête d'une qualité sonore acceptable.

convertisseurs analogiques numériques ainsi que toute une famille de logiciels de synthèse des sons, la famille MUSIC.

On leur doit également – et peut-être surtout – le mythe fondateur de l'informatique musicale. Par quelques preuves mathématiques et techniques, Mathews démontrait que la synthèse de tout son reproductible par haut-parleur était en principe possible, du moment que l'on savait le décrire à l'ordinateur (Mathews 1969 : 12)⁹. Cette déclaration, pourtant prudente, s'est vu rapidement saisie par l'inconscient collectif : "L'ORDINATEUR PEUT CREER TOUS LES SONS". Cet espoir a suscité passions et rejets, déceptions amères et créativité intense.

L'ordinateur peut-il faire tous les sons ?

Le passage de cette magnifique idée à la réalité musicale ne fut pas simple. Les théories acoustiques de la première moitié du siècle constituaient le point de départ de Mathews. Les questions de timbre, ayant été "élucidées" par les explications spectrales de Helmholtz et de Fourier, on croyait assez naïvement que le phénomène sonore se réduisait à une question d'addition pondérée de partiels plus ou moins harmoniques ou encore de bruits plus ou moins filtrés. En effet, Helmholtz avait entendu et Fourier avait démontré mathématiquement que tout son périodique complexe pouvait se décomposer en une somme de sons simples.

Les premières tentatives de synthèse instrumentale ont fait déchanter rapidement. La vision spectrale classique s'avérait infructueuse pour une synthèse crédible : tel dosage d'harmoniques censé recréer un violon ou une trompette différait à peine de celui devant reproduire une flûte ou un hautbois (Schaeffer 1977 : chapitres X et XI). Aucune explication classique, même tempérée par les premières ébauches d'enveloppes temporelles, n'assurait une synthèse efficace. Malgré la belle assurance scientifique, ici débutaient donc les déboires de la synthèse imitative, déboires qui perdurent aujourd'hui sous d'autres formes.

Le second geste fondateur de l'informatique – celui de la synthèse sonore – fut donc aussi un échec relatif. Toutefois, cet échec initial a donné lieu à une fuite en avant générale, assez remarquable par sa créativité. Contrairement aux questions compositionnelles – des questions extrêmement complexes d'intelligence artificielle – on a cru pouvoir résoudre "bientôt" les problèmes de la synthèse sonore, étant donné que le problème était théoriquement déjà maîtrisé. La prochaine version du matériel ou du logiciel saurait "enfin" fournir le son idéal.

⁹ En fait, l'ordinateur musical peut être perçu comme un pilote sophistiqué d'amplificateurs et de haut-parleurs.

De véritables outils de travail : l'informatique classique 1969-80

Après ses premiers balbutiements, l'informatique musicale évolue rapidement, à la vitesse d'une technologie phare de notre civilisation, comme en témoigne cet arbre généalogique, dressé par Stanley Haynes en 1980 :

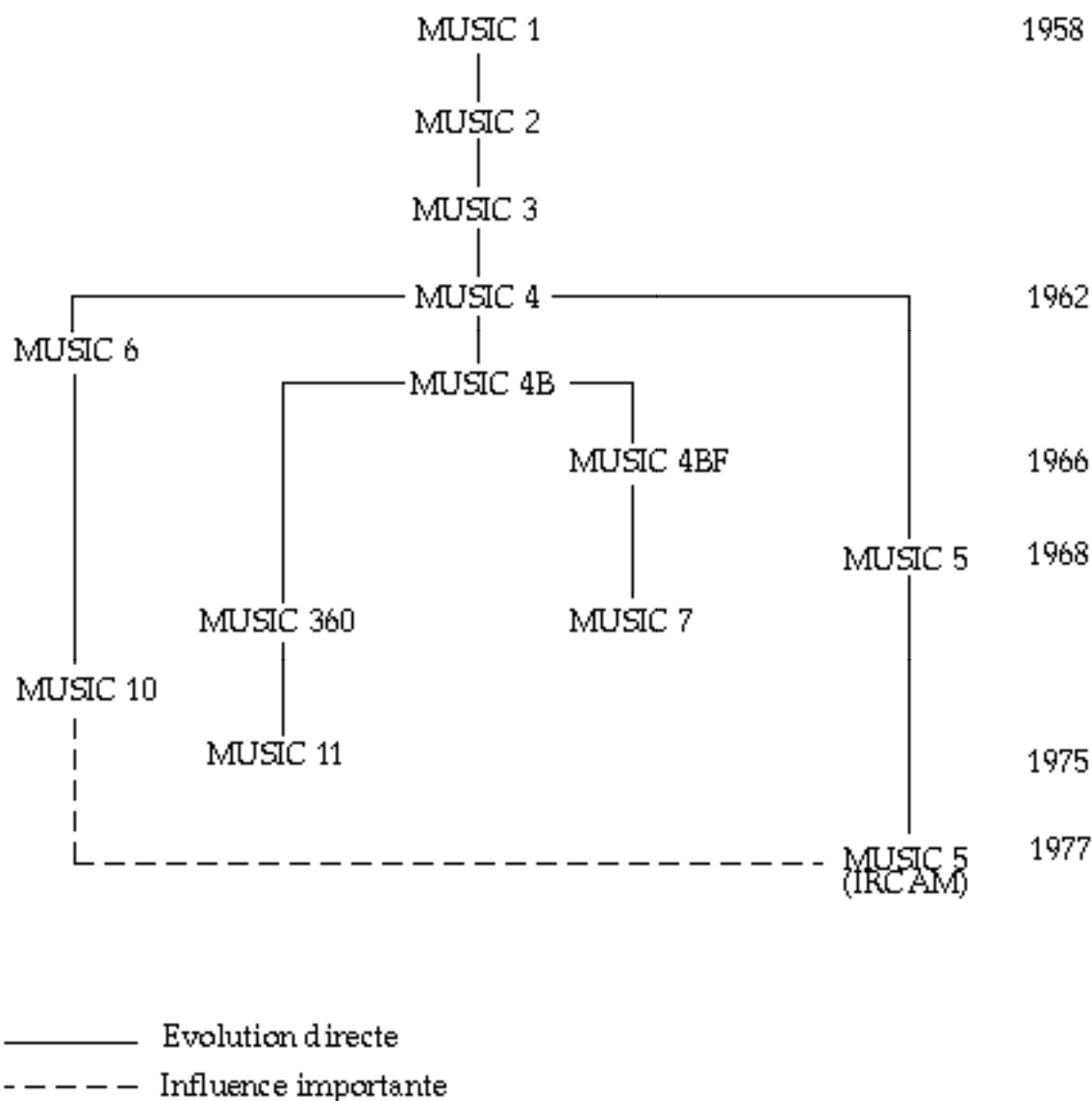


Figure 1 L'arbre généalogique des langages MUSIC jusqu'en 1980¹⁰

Jusqu'en 1962, l'évolution est directe, aux laboratoires Bell et sous le contrôle personnel de Mathews. En 1962, le langage MUSIC atteint une maturité et une efficacité évidente. A ce point de l'histoire technologique, les ordinateurs ne sont plus des raretés – IBM a perdu son quasi monopole – et la plupart des centres de recherche et des universités en sont dotés. Toutefois, cette floraison technologique a engendré une variabilité des plates-formes informatiques. Machines et langages ne sont pas facilement compatibles. Ainsi le MUSICOMP de Hiller, écrit en langage-machine

¹⁰ D'après Haynes 1980 : 15

spécifiquement pour IBM 7090 n'a rien à voir avec MUSIC IV écrit en langage-machine pour un IBM 7094. Pire encore, les versions parallèles de MUSIC IV diffèrent toutes entre elles de façon importante.

Pourquoi cette dépendance ? Deux raisons l'expliquent :

1° la puissance et la vitesse de travail de la seconde génération d'ordinateurs demeurent assez modestes;

2° la synthèse des sons s'est avérée dès le début (et demeure aujourd'hui) une tâche complexe, poussant les machines à leurs limites :

"We can now begin to appreciate the huge task facing the computer. For each second of high-fidelity sound, it must supply 30,000 numbers to the digital-to-analog converter. Indeed, it must put out numbers steadily at a rate of 30,000 per second. Modern computers are capable of this performance, but only if they are expertly used." (Mathews 1969 : 6)¹¹

En conséquence, pour utiliser toute la puissance des ordinateurs disponibles, il fallait programmer le plus efficacement possible, c'est-à-dire directement dans le code intime de l'ordinateur, les procédures évoluées ralentissant beaucoup le travail. Or ce code de base est inextricablement lié à la configuration matérielle de chaque ordinateur. Dans ces conditions, pour pouvoir utiliser un logiciel donné, il faut soit disposer du même ordinateur soit procéder à une réécriture en fonction de la nouvelle machine¹².

A partir de 1962, la qualité sonore permise par MUSIC IV et son support matériel suscite suffisamment d'intérêt pour encourager sa transcription vers de nouvelles machines : MUSIC 6, 10 et 11 pour les PDP-6, 10 et 11 de DEC, MUSIC 360 pour IBM 360, etc... De tous ces programmes, la version la plus facilement transposable, "portable", est MUSIC V, héritière d'une expérience de dix ans dans ce domaine. En effet, les machines et langages s'étant développés en passant de la seconde à la troisième génération d'ordinateurs, il était désormais possible de programmer presque tout en langage "évolué", indépendant du matériel. MUSIC V, programmé en FORTRAN IV, fut un succès considérable. Plus de vingt ans après, ce langage constitue toujours l'archétype en la matière, même si les plates-formes matérielles n'ont plus grand chose à voir avec le GE 645 qui l'a vu naître¹³.

L'utopie en voie de réalisation

Au début des années 60, l'informatique musicale classique ayant déjà trouvé sa formule essentielle¹⁴, la problématique est devenue celle des interfaces logicielles.

¹¹ "Nous pouvons maintenant commencer à apprécier la tâche immense dévolue à l'ordinateur. Pour chaque seconde de son en haute-fidélité, il doit fournir 30 000 nombres au convertisseur numérique-analogique. En effet, il doit fournir des nombres de manière constante à un taux de 30 000 par seconde. Les ordinateurs modernes sont capables d'une telle performance mais seulement s'ils sont employés de façon experte. "

¹² Un peu plus tardivement, après 1965, les programmes se sont mis à employer aussi les langages assembleurs, sortes de traducteurs plus maniables vers le langage-machine spécifique. L'assembleur dépend lui aussi d'une machine donnée.

¹³ Pour plus de détails concernant les premiers pas de l'informatique musicale, consultez les articles de Risset 1978, Schaeffer 1970 et Rogers 1975.

¹⁴ Un ordinateur général puissant, quelques convertisseurs audio-numérique et numérique-audio, un système de stockage des masses d'échantillons et un langage de

Compte tenu des possibilités du matériel et de la complexité des problèmes musicaux, on avait opté pour une informatique très générale et ouverte, en temps différé. Les logiciels de Mathews reposaient sur une vision assez hiérarchique et traditionnelle de la musique : on programmait, à l'aide de fonctions de base¹⁵, des "instruments de musique" virtuels, combinés en "orchestres". Ensuite, un texte musical, une "partition", venait fournir les indications locales dans un ordre chronologique. La partition précisait les "notes" à jouer, les indications de nuances de toutes sortes et tous les processus temporels. Une fois les cartes perforées ou les fichiers informatiques écrits, le tout était soumis au calculateur qui effectuait les actions demandées quand venait le tour de ces fichiers. Quelques heures plus tard, souvent le lendemain, le fichier son résultant était prêt à être entendu et les programmes à être corrigés, le cas échéant.

Cette laborieuse procédure était imposée par les contraintes matérielles des centres de recherche et par le manque initial d'outils plus performants. Une seconde approche, plus tardive, sera le travail en "temps partagé" (shared time). On disposait cette fois de terminaux alpha-numériques ou graphiques personnels dans chaque bureau de travail, l'ordinateur central étant relié à un réseau de terminaux personnels et donnant l'illusion, par le biais d'une division du temps de travail entre les différentes opérations, qu'il se consacrait exclusivement aux demandes de chaque usager¹⁶. Toutefois, si la tâche des compositeurs devenait un peu plus aisée car les temps d'attente étaient moindres et les écrans alphanumériques plus agréables à utiliser que les perforatrices de cartes, les vitesses de calcul atteintes ici ne permettaient pas aux programmes de synthèse un travail en temps réel, instantané. Malgré une amélioration technique certaine, et musicalement non neutre¹⁷, de longs écarts séparaient encore la demande d'une action informatique de son résultat sonore.

Qu'en était-il de l'impact de ces nécessités sur la démarche musicale ? La lourdeur de la mise en oeuvre de tout son informatique imposait une approche très rationnelle aux créateurs. Ceux-ci devaient penser à tout, tout de suite, la machine n'exécutant que des ordres précis sans rien leur ajouter. Pour en arriver au résultat, une formalisation très importante de la composition était nécessaire.

$$\text{"Time scale} \equiv \frac{\text{time to compute samples of a sound}}{\text{duration of the sound}}$$

(...) Time scales from 50 to 1000 become so time consuming and expensive that even the most reckless experimenter pauses to consider whether the value of his sound justifies the time and money. At a scale of 1000, 20 minutes of computer time are needed for each second of sound. It must be a remarkable second to make this effort worth while. (Mathews 1969 : 34-35)¹⁸

programmation modulaire et abstrait. Les améliorations importantes et nombreuses qui ont suivi n'ont fait que perfectionner cette approche.

¹⁵ Cette approche est une des premières applications historiques de la programmation "orienté-objet" autant que la première instance de la synthèse modulaire, reprise par la suite par les synthétiseurs analogiques des années 60.

¹⁶ Ce type d'informatique de réseau avait encore cours il y a peu.

¹⁷ voir la discussion à ce propos dans Haynes 1980 : 143-144

¹⁸ "Echelle temporelle = temps nécessaire pour calculer un son
durée du son

(...) "Des échelles temporelles de 50 à 1000 deviennent si gourmandes en temps et si coûteuses que même l'expérimentateur le plus forcené s'arrête pour se demander si la

Une telle démarche, bien qu'inscrite dans la suite logique de l'esthétique sérielle ou formaliste, était tout de même assez nouvelle pour les compositeurs. Le seul volontarisme esthétique n'avait pas préparé le compositeur à devenir à la fois luthier, technicien, informaticien et interprète. La "plus value" apportée à la musique par l'interprétation humaine ne pouvant être produite par une machine sans qu'on le lui demande, les compositeurs informaticiens ont eu beaucoup à faire.

"Alors que nous avons une relation aisée ou malaisée mais définie avec des objets trouvés, voilà que nous devons décider, à tout instant, d'objets créés. Peut-être s'agit-il là d'une liberté fondamentale, quoique passablement embarrassante, cette faculté de décider du matériau en fonction de la structure à réaliser, de l'oeuvre à accomplir". (Boulez 1981 : 47)

La course au son de synthèse idéal

Les programmes de la famille MUSIC étaient modulaires. Chaque étape de l'évolution de cette technologie musicale a donc laissé des traces sous la forme de modules particuliers. Les premiers modules préparés furent des oscillateurs à formes variables, des additionneurs simples et des générateurs d'enveloppes. Ces outils s'inscrivaient essentiellement dans le paradigme de la synthèse additive, le plus proche du modèle spectral des acousticiens. L'étape suivante, fut bientôt l'introduction des divers filtres et générateurs de bruit ou d'impulsions pour la réalisation d'une synthèse soustractive proche des outils et concepts des phonéticiens. En fait, chaque extension des programmes de synthèse informatique avait pour objet de suppléer aux manques et impossibilités des modules de la génération précédente. Ces deux techniques initiales, malgré leur proximité de modèles perceptifs assez intuitifs possèdent des lacunes importantes. La première permet un contrôle soigné au niveau du contenu spectral mais se prête mal à la production de bruits. La seconde facilite ce travail à partir de sons complexes mais ne permet pas une très grande précision. Enfin, dans les deux cas, l'obtention d'un son complexe et bien contrôlé se paye par des temps de calculs importants et donc par une qualité matérielle incontournable¹⁹. Avec la dissémination croissante de l'informatique musicale, à partir des années 70, on se mit donc en quête d'autres approches.

Dans son célèbre article sur la synthèse par modulation de fréquence, Chowning décrit aussi un oscillateur spécialisé devant s'ajouter à la panoplie de MUSIC V (Chowning 1972/85 : 19)²⁰. L'avantage de la modulation de fréquence est sa simplicité d'usage et la faible quantité de modules nécessaire pour réaliser des sons complexes. Il s'agit donc d'une technique économique. Typiquement, ce fut d'ailleurs la première retenue pour les synthétiseurs numériques commerciaux (Synclavier, 1978, Dx-7, 1985). En revanche, la modulation de fréquence demeure assez problématique pour la perception. Malgré le fait que le principe soit globalement facile à saisir, il demeure

valeur de son son justifie le temps et l'argent. Avec une échelle de 1000, 20 minutes de temps d'ordinateur est nécessaire pour chaque seconde de son. Ce doit être une seconde remarquable pour rendre cet effort valable."

¹⁹ A cette époque, les groupes de recherches s'abonnait aux services informatiques communs. Chaque minute d'utilisation était facturée et les dépenses en temps de calcul informatique avait un coût toujours présent à l'esprit des chercheurs.

²⁰ Toutes les articles mentionnés ici comportant l'expression "/85" sont réunis dans l'ouvrage cité en bibliographie : "Foundations of Computer Music", Roads et Strawn 1985.

assez difficile de prévoir *en détail* le produit exact d'une modulation donnée, en particulier au niveau des amplitudes individuelles de chaque partiel ajouté au son de départ. A part quelques points de convergence particuliers, il n'existe guère de cohérence perceptive reliant deux indices de modulation successifs.

Ce type de recherche sera donc élargi à son tour, donnant naissance à différentes techniques de distorsion non-linéaires tenant davantage compte de la perception (Beauchamp 1979/85). On a aussi reproché à l'informatique musicale sa dépendance par rapport au modèle de Fourier qui intègre difficilement les évolutions temporelles du son. Une alternative a été proposée avec le modèle granulaire de Gabor. Différents compositeurs et informaticiens ont tâché de le mettre en oeuvre : Roads, Truax ou, plus récemment, Arfib et Kronland (Roads, 1978/85). D'autre part, les recherches sur la voix humaine se poursuivant, les années 70 virent aussi apparaître de multiples techniques visant à mieux modéliser ce type de sonorité : le vocoder à canal ou le vocoder de phase²¹ (Moorer 1978), le codage par prédiction linéaire (Cann 1979/85), ou les différentes techniques de synthèse formantiques comme les FOF de Rodet.

N'allongeons pas davantage cette liste. Deux explications à ce foisonnement :

1° Par leur large diffusion les outils de l'informatique musicale ont suscité intérêt croissant. Dans un contexte où la technologie proliférait aussi de façon presque délirante, chaque équipe de travail, dotée de son environnement informatique propre, se concentrait sur un problème musical ou acoustique donné, selon les intérêts personnels des musiciens impliqués, ou encore ceux des bailleurs de fonds.

2° Après une période d'expérimentation avec les trois principaux modèles généraux de synthèse, synthèse additive, soustractive ou par modulation de fréquence, on s'est rendu compte qu'une synthèse fine nécessitait des approches plus spécialisées, en particulier lors de synthèses imitatives.

Ainsi, à la fin des années 60 et dans les années 70 on vit proposer un grand nombre de recettes spécialisées, que ce soit pour réaliser un son de trompette ou pour synthétiser le "a" de Caruso ou le clavecin enfin bien tempéré... A partir des essais de Risset²², on s'est rendu compte que la synthèse imitative revenait à une question de juste perception de la nature acoustique du son à reproduire. La nécessité de traiter chaque cas instrumental comme un problème acoustique et psychoacoustique particulier, demeure aujourd'hui d'actualité. En ce sens, la synthèse par modélisation des structures physiques vibrantes constitue une nouvelle réponse aux difficultés de produire des imitations instrumentales convaincantes. Malgré une tendance inavouée à un certain conservatisme sonore, cette fascination historique pour une synthèse imitative se justifie dans la mesure où elle a beaucoup stimulé les recherches sur les méthodes de synthèse. Les algorithmes de production sonore ainsi obtenus servaient, ou auraient dû servir, à synthétiser des sons inouïs, inexistant dans la nature. Ces algorithmes de plus en plus fins sont contemporains de la recherche musicale des hybrides, des chimères ou des monstres. Ainsi, dans *Archipelago*,²³ R. Reynolds transformait progressivement un timbre en interpolant graduellement des sons d'instruments acoustiques bien connus, violoncelle, alto, hautbois, clarinette, flûte,

²¹ Le principe du vocoder de phase avait été proposé dès 1966 mais cet outil n'a été compris et utilisé activement qu'à partir du milieu des années 70. Voir Dolson 1986.

²² *An Introductory Catalogue of Computer Synthesized Sounds*, 1969.

²³ Réalisé à l'IRCAM en 1983.

etc²⁴. Entre ces pôles reconnaissables, une foule d'hybrides survenaient, au carrefour des archétypes sonores. Les usagers de la synthèses par modèles physiques rêvent souvent de coupler des composantes impossibles à associer dans la nature, chimères d'une timbale excitée par une attaque de clarinette, d'un biseau de flûte activant les résonances d'un tam-tam.

Un nouvel espoir : le mythe de la "bonne machine".

En 1974, Pierre Boulez pose un nouveau geste fondateur. Il fonde l'Institut de Recherche et de Coordination Acoustique Musique afin de relancer l'utopie d'une collaboration moderne entre scientifiques et musiciens. Pour les compositeurs, le système informatique de l'IRCAM proposait d'abord une nouvelle version de MUSIC V, permettant de bénéficier des acquis de plus de cinq années de travail. De plus, l'environnement de travail bénéficiait aussi des résultats des projets hybrides, et du projet GROOVE en particulier²⁵ : différentes interfaces de commande ont ainsi été réalisées à l'institut²⁶. La série de synthétiseurs numériques²⁷ développés à l'IRCAM, les 4A, 4B, 4C et 4X, sont probablement les machines ayant le plus fait couler d'encre à l'époque. Les développements du matériel informatique courant dans la seconde moitié des années 70 ont en effet permis l'élaboration de la première génération de synthétiseurs entièrement numériques et en temps réel.

Ceci n'était pas l'exclusivité de l'IRCAM mais rejoignait une tendance générale : le SYTER du GRM, l'UPIC de Xenakis, les systèmes de Alles, Samson ou des Lucasfilms aux Etats-Unis. On pourrait voir dans cette étape de la technologie musicale la résurgence du mythe de la "bonne machine", mythe parallèle à celui de l'algorithme de synthèse idéal. En pratique, toutefois, chaque machine matérialise les a priori techniques et esthétiques de son équipe de réalisation. Ainsi, pour ne retenir que des exemples français, les 4A, 4B, et 4C mettaient surtout en oeuvre un grand nombre d'oscillateurs, principe cher aux compositeurs sériels comme Boulez et Berio. Fidèle à ses origines au GRM, le SYTER tâchait de simuler par informatique les outils de la musique concrète : filtres, chambre d'échos, transpositeurs, générateurs d'enveloppes, systèmes de mixage et de montage sophistiqués. La 4X combinait les approches de

²⁴ Pour arriver à ce résultat, le compositeur s'est servi des données obtenues par Moorer et Grey à l'aide d'une analyse des timbres par vocoder de phase. Les sons étaient resynthétisés par synthèse additive et il s'agissait pour passer d'un timbre à l'autre de faire passer progressivement les valeurs d'intensité et de fréquence des partiels du son d'un état reconnaissable à un autre.

²⁵ Plusieurs expériences d'association de mini-ordinateurs avec des systèmes de synthèse analogiques ont eu lieu au début des années 70. Dans ce cas, l'ordinateur pilotait, par le biais de commandes numériques converties en tensions continues, des modules de synthèse analogiques : oscillateurs à formes variables, filtres, amplificateurs, etc. GROOVE, dirigé par Mathews s'était plus spécialement attaché à la question des interfaces en temps réel. Un autre projet important avait eu lieu à Londres, autour du Synthi 100 de EMS. Voir Mathews et Moore 1970 et Rogers 1975.

²⁶ Voir la thèse de Haynes à ce propos, 1980.

²⁷ Synthétiseur au sens général, pas nécessairement celui des synthétiseurs commerciaux dotés d'interfaces clavier standardisées. Les synthétiseurs développés à l'IRCAM avait approximativement l'apparence, aujourd'hui courante, de carte informatiques à insérer dans un ordinateur hôte.

synthèse additive et celles du studio électroacoustique²⁸. L'UPIC proposait, entre autres, une interface graphique en forme de table d'architecte et un travail sur le continuum sonore, moyens qui étaient au coeur de l'approche de Xenakis.

Ces machines de rêve ont été rendues possibles par une nouvelle donne technologique : avec des circuits à forte densité d'intégration, la synthèse ou le traitement des sons par des algorithmes variés, et surtout le temps réel deviennent envisageables, quoiqu'encore assez coûteux. Cette introduction tant attendue du temps réel constitue un point tournant de l'histoire de l'informatique musicale. Avec cette nouvelle génération de machine, le compositeur peut enfin entendre ses idées musicales et réagir vite pour les corriger ou les rejeter. La composition avec ordinateur peut alors s'approcher de la boucle imagination/réaction déjà permise par la musique électroacoustique et passer à une vitesse et une qualité musicale supérieure. On a beaucoup écrit sur l'impact d'une telle méthode sur la pensée musicale et il est inutile de s'y attarder ici (Schaeffer 1977). Pour l'interprète de la musique électrique, les possibilités de synthèse en temps réel – en direct sur scène, pendant le concert – signifient aussi une libération majeure par rapport à la bande magnétique et son temps figé. Une pièce comme *Répons* de Boulez marque sans doute l'apothéose de cette approche.

Malgré ses succès spectaculaires, cette fin de décennie voit pourtant la fin d'une étape de la musique informatique.

²⁸ Outre le fait que ce synthétiseur a constitué un symbole de statut ou de prestige particulièrement fort, cette concentration des approches, ainsi que quelques percées technologiques et justifient probablement le grand intérêt que l'on a porté à cet outil.

Micro-informatique et contre-culture (1975-90)

En marge de l'informatique officielle et institutionnelle, l'apparition des circuits intégrés de haute densité, après le milieu des années 70, a suscité un autre type d'informatique. Cette micro-informatique, peu coûteuse – au départ littéralement du bricolage de garage par des amateurs – a profondément bouleversé notre environnement technologique.

La culture de masse des années 60 et 70 entretenait une relation ambivalente envers l'informatique. D'un côté, on était fasciné par cette machine toute puissante, servie par des collègues de prêtres-sorciers-technologues au rituel obscur et inaccessible. D'un autre côté, cette fascination entraînait aussi une répulsion, une méfiance assez typique de la génération des Baby-Boomers, ruant dans les brancards d'une société aux prises avec la décolonisation et la fin de la guerre froide. Combien de textes de science fiction partent de l'idée d'une prise de pouvoir de l'ordinateur sur l'humanité, combien de chansons pop exploitent cette ambiance trouble ? Les gros ordinateurs institutionnels se trouvent ici au carrefour des *utopies* de la génération précédente et des *distopies* des années 70.

La fascination pour l'outil magique a tout de même fini par prendre le dessus, par le biais de la petite informatique personnelle, reflet d'une autre marotte de l'époque : le Do-It-Yourself. Le premier grand succès de la micro-informatique était l'*Altair*, un kit à monter soi-même (Lévy 1990 : 48-56). Tout un milieu, celui des "hackers", proche des hippies de la contre-culture californienne, était en réalité en ébullition autour de Stanford. Les petits ordinateurs en kits ou déjà montés (comme le Apple 1), utilisant le langage BASIC développé par Bill Gates, n'intimidaient personne et suscitaient des passions. Contrairement à la grosse informatique, cette informatique personnelle – davantage un jeu à ses débuts qu'un véritable outil – proposait l'image d'une petite informatique réalisatrice de projets individuels, libérée des attaches institutionnelles ou d'une nécessité de rentabilisation.

Mais ce mouvement n'était pas que du vent. Les réunions du célèbre *Homebrew Computer Club* auquel appartenait le gratin de la future Silicon Valley étaient de véritables sessions de travail et de stimulation réciproque en vue d'un nouveau projet technologique et social. Cette informatique jeune a aussi bénéficié grandement de l'expérience de vingt années de recherches sur la question des interfaces, plus particulièrement celles du projet Smalltalk ("papotage") de la compagnie Xerox. L'histoire de la compagnie Apple met bien en lumière cette prise de conscience nouvelle (Lévy 1990).

De la contre-culture à la jungle Yup

Avec la micro-informatique, l'ordinateur, objet symbolique des années 60, fusionne avec le sens ludique d'une génération et son goût pour la consommation. Lorsque ce phénomène gagne de l'importance, après 1984, avec une nouvelle étape technologique et économique, une vague de petits ordinateurs envahit l'Amérique du nord et l'Europe. Dans bien des cas, l'attrait pour le symbole, plus ou moins justifié par la nécessité de "faire profiter les enfants de la technologie de demain", était plus fort que les besoins réels. Combien de Commodore 64 ou d'ordinateurs Tandy datant de cette époque dorment aujourd'hui dans les placards ou prennent la poussière dans la chambre des enfants, ayant depuis été remplacés par le Nintendo familial ?

Si elle fut bien rêvée par une génération de marginaux californiens, la révolution informatique des années 80 devint en réalité pratiquement inévitable pour des raisons techniques et économiques. Les grandes améliorations des circuits intégrés de cette décennie ont progressivement fait disparaître le matériel transistorisé des années 60. Le développement de puces d'usage général et à forte densité d'intégration abaissait d'autant les coûts de revient du matériel électronique qu'elle permettait une sophistication croissante de cette multitude d'appareils. En quelques années, industries et institutions sont donc passées de leur technologie classique à celle de la petite informatique. D'un rêve de "hackers" californiens, l'informatique personnelle est devenue une réalité quotidienne et un phénomène de masse. Ainsi, pendant ses trois premières années, le *Computer Music Journal* était publié par une association type loi-1901 : le *People's Computers*, Menlo Park, Californie. Par la suite, cette publication-clé fut réintégrée dans un giron institutionnel, le magazine étant repris par les publications MIT, à Boston. A Paris, le symposium de l'IRCAM sur les systèmes personnels en 1986 marque aussi un point tournant pour les institutions musicales.

Des stations informatiques personnelles

Musicalement, ce passage technologique s'est manifesté par l'adoption en masse de la petite informatique personnelle et de son complément le plus fort : la norme MIDI. Une fois les synthétiseurs informatisés en partie vers la fin des années 70, rien n'empêchait de poursuivre ce développement. Au début des années 80, l'informatisation à peu près totale des synthétiseurs a enfin permis le développement d'une norme d'interface entre les différents fabricants. La norme MIDI (Musical Instrument Digital Interface) voyait le jour en 1983²⁹.

L'impact combiné de la révolution micro-informatique et de la norme MIDI a eu un effet spectaculaire sur la musique par ordinateur. Ces deux bouleversements ont entraîné une démocratisation – imprévisible il y a 20 ans – des outils de la musique nouvelle. De phénomène-phare mais marginal, réservé à des compositeurs-spécialistes, la musique informatique est devenue la base du commerce musical. Les synthétiseurs MIDI ont fait passer l'électronique musicale d'une échelle artisanale à une distribution industrielle (Bristow 1990). D'autre part, la hausse spectaculaire de la qualité des outils a aussi entraîné la fin de la spécificité du matériel consacré à la musique de recherche. Le matériel ordinaire des studios de musique de variété actuels intègre tous les outils des grands studios de la décennie précédente. Devant une telle hausse de qualité et devant le passage de l'économie artisanale à une économie industrielle des facteurs de matériel, les grandes institutions de recherche perdent une bonne part de leur justification en tant que développeurs de machines.

²⁹ Sommairement décrite, cette norme traite des protocoles numériques d'échanges d'informations entre divers modules compatibles. Pour arriver à un tel résultat, le geste musical (et non le résultat sonore) est codé en différents paramètres discrets tels le numéro de note jouée (hauteur), son signal de déclenchement "note-on", son signal d'interruption "note-off", sa vélocité (intensité dynamique), son canal (instrument-source), son numéro de "patch" (numéro de case mémoire dans lequel un timbre particulier est stocké) et en quelques valeurs continues affectées à l'expression musicale. Le type de connecteur utilisé et le genre de câble subissaient aussi une normalisation. Grâce à de telles standardisations, il devenait possible de brancher n'importe quel synthétiseur équipé de la sorte sur n'importe quel autre pour faire doubler à volonté un synthétiseur par un autre, ou pour bénéficier du timbre d'un clavier donné par le biais d'un autre instrument de contrôle à distance.

Ainsi, l'époque des 4X, Syter et autres, avec leurs très coûteuses puces spécialisées et leur construction à très petite échelle, est aujourd'hui révolue. La prochaine génération de "station personnelle de travail musical" se base maintenant sur une technologie beaucoup plus courante. Les studios musicaux sont aujourd'hui des organismes complexes, multiformes mais presque entièrement numériques, quel que soit le genre de production musicale.

Les compositeurs attirés par les nouvelles technologies ne sont plus les mêmes qu'il y a 20 ans. L'apparition d'un matériel d'informatique musicale alternatif de qualité accrue dissipait un grand nombre de difficultés. L'expérience d'un compositeur comme Tristan Murail est révélatrice. Ce compositeur s'était heurté à plusieurs limites en tentant d'utiliser le langage MUSIC V dans une de ses oeuvres au début des années 80³⁰. La lourdeur de mise en oeuvre du gros système informatique de l'IRCAM, les conceptions musicales impliquées s'opposant à celles du musicien spectral, avaient considérablement gêné son travail. Après cette expérience, il s'est tourné vers une toute petite station de travail personnelle, rudimentaire mais programmée par ses soins en BASIC pour ses besoins spécifiques. Cet outil a transformé sa méthode de travail et lui a permis de se concentrer sur des objectifs plus musicaux que technologiques (Murail 1990)³¹. Le compositeur doté d'une station de travail personnelle compose chez lui, dans le confort de son lieu naturel, quitte à rencontrer occasionnellement des personnes susceptibles de l'aider à avancer davantage (Dalbavie 1989). Il est aussi extrêmement significatif que la problématique de l'aide informatique à la composition ait commencé à reprendre un intérêt dans les différents forums de l'informatique musicale avec la fin des années 70. Les questions compositionnelles sont éminemment personnelles et il est pratiquement impossible de leur proposer des solutions générales.

Un dernier avantage d'une plus grande maniabilité des petits systèmes et de leur plus grande flexibilité est de permettre enfin aux usagers occasionnels de s'en servir. Il est très significatif à ce propos que des compositeurs plutôt spécialistes de la musique instrumentale, soient davantage tentés par les outils nouveaux. Toute une génération de jeunes musiciens considère en effet maintenant l'ordinateur comme le complément naturel et moderne de sa gomme et de son crayon de toujours. La division entre compositeur instrumental et compositeur informatique perd ainsi une grande part de sa justification. Elle laisse place au *compositeur* et à son questionnement musical.

³⁰ Désintégration, 1982.

³¹ Fort de cette expérience, il dirige d'ailleurs à l'IRCAM une équipe de recherche sur un logiciel d'aide à la composition (voir le numéro 1 des cahiers de l'IRCAM, 1992).

Pour conclure

Après bien des travaux préalables, l'informatique est née chez les militaires, elle s'est développée dans les milieux scientifiques lourds et la grande industrie. Une expertise importante s'est ainsi accumulée. Cette technologie a largement bénéficié de l'apport de la miniaturisation de plus en plus importante. Cette évolution technique ainsi que sa prise en charge par la génération des Baby-Boomers a permis la prise de vitesse de la technologie. La micro-informatisation lui permet d'atteindre une apogée à l'époque de la chute du communisme et du néo-capitalisme triomphant. Après des débuts californiens typiques, le micro-informaticien Bill Gates est aujourd'hui l'homme le plus riche des EU.

En ce qui concerne l'informatique musicale, deux coups d'essais marquèrent sa naissance. Le premier, en suite directe du projet esthétique ayant donné naissance à la musique de l'électricité, effectuait une tentative historique de formalisation de l'écriture et une des premières applications de l'aléatoire en musique. Cette première application fut toutefois un certain échec. Le second essai, restreignant davantage son objet à une dimension perçue comme plus abordable, établissait les premiers jalons d'une synthèse sonore informatisée. Les difficultés de mise en oeuvre de cette seconde entreprise ont toutefois suscité un bond en avant hautement créatif, du moins au plan technique.

Au niveau de cette synthèse des sons, la réaction de fuite en avant ayant débuté dans les années 50 dure toujours : la machine de demain sera la bonne ! Depuis 1958, de nombreuses générations de machines et de logiciels se sont créés, générant comme sous-produit la masse de littérature déjà évoquée. Chaque étape, logicielle surtout, intègre ou réfute la précédente en tâchant d'en régler les problèmes. Ainsi, CSOUND, un des derniers avatars de la famille MUSIC, héritière de tout ce processus, intègre des modules de synthèse de toutes les techniques évoquées, sauf celles, encore trop lourdes au niveau informatique, par modèles physiques.

S'en tenir à un tel constat de fuite serait toutefois insuffisant et trompeur. Cette critique, bien réelle quand même, s'applique essentiellement au phénomène périphérique de la synthèse imitative d'instruments réels. En concordance avec les nécessités évoquées plus haut d'un renouvellement de la matière sonore pour une musique de notre siècle, les nouvelles sonorités obtenues par les multiples techniques de synthèse du son ont été largement employées. Depuis la généralisation des disques laser et des échantillonneurs, on peut même dire que le son numérique occupe aujourd'hui davantage nos oreilles musicales que le véritable son acoustique. Le bon vieux piano droit familial d'autrefois est maintenant près d'une fois sur deux un piano échantillonné ou même un petit synthétiseur hybride (Clavinova, Portasound, Casio...).

Si l'on a pas tout de suite, ou pas encore, obtenu le St-Graal du son après lequel notre coeur et nos oreilles soupirent, on a tout de même obtenu beaucoup de sons, de véritables océans. Ces sons, tous plus inouïs ou originaux les uns que les autres, nous baignent depuis au moins trente ans. Il serait stupide de les balayer inconsidérément du revers de la main. Voici trente ans qu'ils accompagnent notre vie musicale presque quotidienne. Peu de chef-d'oeuvres musicaux toutefois mais beaucoup de musique "intéressante", avec ce que comporte d'ambiguïté ce terme qui "n'engage à rien". Le mélomane moyen prend généralement encore moins ce répertoire au sérieux que le "contemporain" de mauvais aloi. Les praticiens de cette musique effectuent aussi à ce propos une fuite en avant, évoquent la nouveauté des outils, l'influence pernicieuse

d'institutions, de collègues ou le manque de temps de préparation, etc... Trop souvent, de nombreux mois de savantes opérations et de complexes calculs aboutissent dans des créations sonores vulgaires, à la portée du premier synthétiseur du coin de la rue et de trois idées formelles simples.

Ces critiques sont dures et simplifient sans doute à l'extrême les véritables problèmes. En tant que praticien motivé, voire militant, de l'informatique musicale sans doute me sied-il mal de reprendre l'argumentation des pires opposants au médium. Je crois pourtant qu'il nous est aujourd'hui nécessaire de faire un peu d'auto-critique. Les naïfs credo et mots d'ordre de toute sorte ont privé, à mon avis, les nouvelles technologies musicales de leur authenticité et de leur plein développement. Trop occupés à discourir sur la place publique, les acteurs de l'informatique musicale n'ont pas assez travaillé leurs outils. Aux prises avec des débats esthétiques, institutionnels et sociaux, nous nous sommes comportés comme des dilettantes de la technologie musicale. Réceptacles de la fascination séculaire pour la "machine universelle", nous avons cédé à des jeux de pouvoir ou à la tentation de nous pavaner avec un symbole de statut plutôt qu'à faire de la musique humblement avec un outil encore trop limité pour permettre une relation inattentive.

Je propose donc ici une nouvelle utopie. Abandonnons les débats technologiques inutiles et superficiels. Nous nous trouvons devant de beaux et complexes outils, pas ceux de nos rêves, pas encore suffisamment bons instruments de musique, mais bien là, devant nous, sous nos mains et nos oreilles. Ils sont encore trop sommaires pour permettre une approche superficielle de dilettantes. Il nous faut retrousser nos manches et travailler, simplement, en artisans, en musiciens.

Martin Laliberté
Compositeur

Bibliographie

- Babbit, Milton
1962 *Twelve-Tone rhythmic structures and the Electronic medium, in Perspectives of New Music, Princeton University Press, New York, automne, pp. 49-79.*
- Backus, John
1962 *Die Reihe – A Scientific Evaluation, in Perspectives of New Music, automne, Princeton University Press, New York, pp. 160-171.*
- Biget (Michelle)
1987 *Le pianiste romantique face aux impossibles de l'écriture, dans Analyse musicale, no 7, pp 28-36.*
- Boulez Pierre
1981 *L'in(de)fini et l'instant, in Le Compositeur et l'ordinateur, T.Machover éd., IRCAM, Paris, pp. 46-47.*
- Bouliane, Denis
1988 *Conférence sur la musique européenne de l'après-guerre, université Laval, Québec.*
- Bristow, David
1990 *Conférence au DEA Musique et Musicologie du XX^e siècle de l'EHESS.*

- Dalbavie, Marc-André
1989 Entretien personnel.
- Deliège, Célestin
1990 Conférence au DEA Musique et Musicologie du XX^e siècle de l'EHESS.
- De Schlozer, Boris et
Scriabine, Marina
1959 *Problèmes de la musique moderne*, Editions de Minuit, Paris.
- Gleick, James
1989 *La théorie du Chaos, vers une nouvelle science*, Flammarion, Paris, 431 pages.
- Grout, Donald Jay
1980 *A history of western music*, Norton, New York, 849 pages.
- Haynes, Stanley
1979 *The musician-machine interface in digital sound synthesis*, Thèse de doctorat ès Arts,
University of Southampton.
- Kaegi, Werner
1970 *Musique et technologie dans l'europe de 1970*, in *Musique et Technologie*, Revue Musicale,
Paris, pp.9-30.
- Lévy (Pierre)
1987 *La machine univers*, Paris, Editions La Découverte, 240 pages.
- 1991 *Les technologies de l'intelligence*, Paris, Editions La Découverte, 260 pages.
- Luening, Otto
1975 *Origins*, in *The development and practice of electronic music*, J.Appleton éd.,
Prentice-Hall, Englewood-Clifs, pp. 1-21.
- Mathews, Max
1969 *The technology of computer music*, MIT Press, Cambridge, 188 pages.
- avec Moore, Richard F.
1970 *GROOVE-A Program to Compose, Store and Edit* ~~Conférence de l'Association~~ *ti*
the Association for Computing Machinery, vol. 13, no 12, pp 715-721.
- Moorer, James A.
1978 *The use of the Phase Vocoder in Computer Music Applications*, in *Journal of the Audio*
Engineering Society 24[9] : 717-727.
- Murail, Tristan
1990 Conférence au DEA Musique et Musicologie du XX^e siècle de l'EHESS.
- Piencikowski, Robert
1990 Cours d'analyse au DEA de l'EHESS.
- Risset, Jean-Claude
1969 *An Introductory Catalogue of Computer Synthesized Sounds*, Bell
Telephone Laboratories, Murray Hill.

- 1978 *The Development of Digital Techniques : A Turning Point for Electelectronic Music ?*,
Rapport IRCAM no 9, Paris, 10 pages.
- Roads, Curtis et Strawn John
1985 *Foundations of computer music*, MIT Press, Cambridge, 712 pages.
- Rodet, Xavier et al.
1985, *CHANT, de la synthèse de , la* Rapport no 10, IRCAM no 35, Paris, Centre Pompidou, 21 pages.
- Rogers, John E
1975 *The Uses of Digital Computers in Electronic Music Generation*, in *The development and practice of electronic music*, J.Appleton éd., Prentice-Hall, Englewood-Clifs, pp. 189-285.
- Schaeffer, Pierre
1970 *La musique et les ordinateurs*, in *Musique et Technologie*, Revue Musicale, Paris, pp.57-88.
- 1977 *Le traité des objets musicaux*, Paris, Seuil, 1/1966, 2/1977, 672 pages.
- Stockhausen, Karlheinz
1957 *... wie die Zeit vergeht...*, in *Die Reihe* no 3, Traduction française dans *Contrechamps* no 9, L'Age d'Homme, Lausanne, pp. 26-65.
- Xenakis, Iannis
1981 *Musiques Formelles*, Stock Musique, Paris, repris de la *Revue Musicale*, 1963, 261 pages.