Fondement d'une démarche de recherche informatique / musique

Claude Cadoz, Jean-Loup Florens

▶ **To cite this version:**

Claude Cadoz, Jean-Loup Florens. Fondement d'une démarche de recherche informatique / musique. Revue d'acoustique, 1978, 45, pp.86-101. hal-00878818v2

HAL Id: hal-00878818
https://hal.science/hal-00878818v2

Submitted on 1 Sep 2015

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.

Fondement d'une démarche de recherche informatique/musique*

par Cl. CADOZ et J.-L. FLORENS**

Resumé

L'article formule un certain nombre des hypothèses qui déterminent la démarche de recherche en informatique musicale des auteurs. Plus que la production même des sons par un système de synthèse approprié, l'informatique musicale est abordée à un niveau qui semble essentiel : celui du rapport instrumental, déterminant dans la manière dont les sons synthétisés seront articulés.

La mise en œuvre d'expériences élémentaires suffisamment générales et fondamentales passe par la mise au point de dispositifs de commande spéciaux. Les résultats présentés ici concernent plus particulièrement un de ces dispositifs, pour lequel on a analysé le rapport mécanique entre le système humain et un système capable de communiquer à l'ordinateur des paramètres de contrôle d'une manière efficace et appropriée.

Le système mis en œuvre joue un rôle double : extraction de paramètres gestuels et simulation d'un comportement mécanique approchant celui des organes mécaniques manipulés dans le cas d'instruments traditionnels. Ce comportement mécanique est obtenu grâce à des servo-moteurs commandés par un modèle mécanique programmé.

THE WAY OF RESEARCH IN COMPUTER MUSIC

Abstract

Some hypotheses determining the way of research in computer music are investigated by the authors. Rather than sound production by means of adequate synthesis systems, computer music is considered according to a particular approach which set the fundamental problem of instrumental relations between musician and computer.

So, special devices must be implemented in order to support elementary and general experiments. This article gives a description of one of these particular devices for which mechanical relations between human system and a simple mechanical system have been studied. The device achieved performs two functions : coding of the gestual parameters from the instrumental, and simulation of an instrument-like mechanical bihavior.

The latter function is obtained by means of electrodynamic servo-motors controlled by a computer through a functional model.

INTRODUCTION

La perception est initialement et en permanence un processus actif. La preuve la plus élémentaire est son caractère indissociable à tous les niveaux, d'une dépense énergétique dont la source est l'individu percevant lui-même.

L'analyse de la perception cependant, ne saurait se ramener à l'étude exclusive de l'investissement énergétique. Un deuxième axe d'analyse correspond au domaine de la Théorie de l'Information qui définit une mesure quantitative de ce que A. MOLES [1] appelle la «complexité de l'Information». Le rapport objectif dans lequel se place la Théorie de l'Information, n'observant que des émetteurs, des canaux, des récepteurs extérieurs à l'observateur, lui permet de poser sans ambiguité la définition de l'unité de mesure : le «bit» ou le «logon». La complexité d'une information se mesure alors au nombre d'alternatives élémentaires qui, partant d'un ensemble de cas équiprobables, conduisent à une détermination unique.

Au sujet de la perception, le problème est difficile, car la mesure de l'information suppose immuable et définitivement connu l'ensemble des références élémentaires sur lesquelles le choix s'opère. Or, l'observateur

* Manuscrit reçu le 20.1.78

** Laboratoire de la Communication Parlée et de l'Instrumentation de Mesure (L.C.P.I.M.) E.N.S.E.R.G. - Équipe de recherche associée au C.N.R.S.
et
Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression (A.C.R.O.E.). Association de recherche régie par la loi 1901 ; subventionnée par le Ministère de la Culture et de l'Environnement.

Les travaux sont effectués sur programme commun entre le LCPIM et l'ACROE.

est ici sujet et le propre de son expérience vivante est bien l'évolution permanente de ces références. Ni l'une ni l'autre de ces deux caractéristiques quantitatives n'aborde en fait la question du sens, de la signification de l'information. La démarche de recherche musicale à laquelle nous nous attachons ici aborde résolument le problème en amont de l'analyse du sens.

Renvoyant cette question au niveau de l'expérience créatrice elle-même considérée comme expérience ultime, nous nous attachons à l'étude des moyens expérimentaux qui l'autorisent.

Dans la première partie de l'exposé qui suit, l'expérience musicale est abordée au travers des moyens technologiques qui la soutendent. Deux phases sont très schématiquement opposées : celle de la mécanique, sur laquelle est fondée ce que nous appellerons l'instrumentation traditionnelle, et celle des technologies contemporaines, que nous classerons, tout aussi schématiquement, en électroacoutique et information musicale.

CHAPITRE 1

1.1 LA MUSIQUE ÉLECTROACOUSTIQUE

Elle est une étape de la Musique où l'on observe une incidence bouleversante du développement des moyens technologiques. Elle naît de « l'accéléré et du ralenti que permet en 1948, le tourne-disque », se développe avec le magnétophone, puis toute la chaîne électroacoustique avec, entre le microphone et les enceintes, les auxiliaires plus sophistiqués : magnétophone, ciseaux, variateur de vitesse, phonogène universel, filtres, oscilloscopes, générateurs de matière, de formes, synthétiseur analogique, chambre de réverbération, table de mixage, amplificateur, etc..., le tout dans le contexte de la phonographie et surtout de la radiodiffusion.

L'émerveillement originel, vécu lucidement par un petit nombre, effectivement, procède alors de la découverte d'un champ objectif nouveau — Champ défini par P. SCHAEFFER dans le Traité des Objets Musicaux [2] comme celui des « objets sonores ».

Une continuité essentielle est réalisée avec l'expérience musicale antérieure. En effet, le champ des objets sonores y est parfaitement identifiable : les instruments et les instrumentistes de la musique traditionnelle créent des objets sonores perceptibles en tant que tels.

L'ampleur du champ nouveau, dont l'exploration ne fait que commencer, est cependant sans communes mesures avec le précédent. Les conditions premières de l'expérience, ici expérience acoustique, posées dans « l'écoute acousmatique » ([2], p. 91) consacrent la rupture franche et irréversible avec les causalités instrumentales — au sens général des instruments et des corps sonores — des objets sonores. On découvre alors, autour d'objets qui paraissaient jusque là impénétrables ou sans intérêt, comme à l'approche au microscope, un espace aux dimensions insoupçonnées avec ses potentialités propres de structuration, du niveau élémentaire des objets musicaux au niveau complexe des structures — « œuvres électroacoustiques ».

C'est qu'en fait, les moyens pour cette expérience sont extrêmement nouveaux :

— possibilités de jeu concret (1) avec la chronologie des événements sonores, simples ou élaborés, par le moyen du découpage et du montage de la bande magnétique.

— transformation, ajustement de la taille temporelle de ces évènements par l'accéléré ou le ralenti à la lecture.

— par l'accéléré ou le ralenti, corrélativement, transposition spectrale où deux paramètres sont en jeu : de position (hauteur) et d'encombrement (masse).

— le phonogène universel établit ensuite, dans une mesure acceptable pour le contexte expérimental, une indépendance entre les dimensions temporelle et spectrale. Il permet la transposition de la hauteur seule du son, ou la variation seule de la durée.

— le filtrage s'applique alors, en réplique au découpage et au montage temporel, à la dimension spectrale pure.

— enfin, la table de mixage et l'amplificateur apportent à l'ensemble la dimension énergétique au niveau relatif des divers objets et structures simples entre eux et au niveau global, de l'œuvre avant la diffusion.

Mais, dans le principe de ces bases expérimentales, où n'apparaît pas encore la génération de « voltage-control » (commande par la tension électrique), les chances d'existence de cette nouvelle musique sont tout entières contenues dans deux pouvoirs fondamentaux : celui de la diffusion temporelle et de la diffusion spatiale de l'espace des objets sonores, contenus à leur tour dans le principe de l'enregistrement sur bande magnétique allié à celui de la transmission hertzienne. Ces pouvoirs ont donné en effet au champ créé tout son potentiel d'objectivité sociale en rendant possible, pour l'expérience acoustique, la postulation de l'identité des objets sonores, pour le même individu à des instants différents, pour deux individus en même temps, etc...

Cependant, la musique de ce contexte technologique dont le « Traité des Objets Musicaux » est plus une définition ouverte qu'une description, tarde à se faire reconnaître en tant que Musique. « Le Traité des Objets Musicaux dix ans après » [3] se montre encore sous une ambivalence de certitudes mêlée d'efforts pour exister, propre à renvoyer aux origines, à la génèse de la démarche.

La génèse de tout système a ceci de particulier, d'être lisible à chaque étape de son développement : un extrait du chapitre « Le préjugé scientifique » ([2] p. 129) où l'on développe une critique de l'approche physicienne du phénomène musical, nous servira ici :

« a) Mettons en tête l'origine visible des sons, au niveau du geste instrumental : nous trouvons d'abord l'exécutant, sa physiologie, sa technique, son art.

b) Puis la vibration elle-même des instruments, cordes et membranes, qui se propage à la vitesse du son jusqu'à notre oreille : c'est le résultat purement acoustique de l'activité de l'exécutant.

c) Ce trajet traditionnel, cette acoustique ancestrale se complique de nos jours : la chaîne électro-acoustique, microphones et magnétophones, amplis et haut-parleurs, stéréophoniques ou non, diffusés ou non par la T.S.F., s'interposent désormais dans un grand nombre de cas, entre exécutant et auditeur.

d) A l'entrée de l'oreille... »

(1) au sens donné par Schaeffer lui-même à ce terme, à propos de la « musique concrète ».

On peut identifier en amont et en aval de la phrase clef : « c'est le résultat purement acoustique de l'activité de l'exécutant... » deux pratiques **distantes** présentées comme naturellement dans le prolongement l'une de l'autre. Alors se pose la question de la « permanence et de la variation » de l'une à l'autre.

Ce que l'on peut dire, c'est que cette phrase anodine dans son contexte, n'attire pas avec détermination l'attention sur le fait que la discontinuité réside bien précisément en cette concentration soudaine sur le « résultat purement acoustique ». Il est une dimension de la musique traditionnelle que le microphone le plus parfait ne laissera jamais passer : celle des causalités gestuelles, initiales et nécessaires à l'articulation de toute intention.

La musique électroacoustique ne les évacue pas définitivement ; elle accorde un soin extrême à la « facture » des objets sonores, trace d'une intention, source pour l'expérience ultérieure.

Cependant, et sa raison d'être serait douteuse s'il en allait autrement, la voie capitale par où cheminent ses intentionalités est construite sur l'ensemble des manipulations « électroacoustiques » qui succèdent à cette première phase.

Or, la destination finale implicite, toujours présente, du concert, de la discogravure ou de la radiodiffusion détruit d'un même coup les chances d'existence objective, au-delà d'un certain niveau, de ces deux stades d'expérience, pour ne laisser possible que l'acte d'écoute.

Rien ne permet au départ l'identification de la Musique à l'acte d'écoute seul. Seule se justifie entièrement la démarche expérimentale qui a son sens dans son contexte de moyens technologiques. Elle est à approfondir.

1.2 LA SYNTHESE MUSICALE PAR ORDINATEUR

La synthèse par ordinateur prolonge ce qui, dans la musique électroacoustique, procède des dispositifs à commande par tension, constituant des systèmes de synthèse analogique. La synthèse analogique approfondit l'analyse de l'objet sonore en termes de forme et matière, dans le sens d'une réduction en paramètres plus élémentaires. Les formes d'enveloppe et d'onde correspondent à une maîtrise plus fine des paramètres acoustiques : durée, intensité, hauteur... timbre, liés plus directement à des paramètres physiques : temps, amplitude, fréquence... spectre (1). La richesse des objets sonores, perceptibles après le premier « éblouissement » de l'inouï, est liée cependant à la complexité de la structure matérielle, c'est-à-dire au nombre et à l'agencement des modules électroniques élémentaires. La duplication de ces derniers, une fois leur principe mis au point, passe par la multiplication physique des composants électroniques qu'ils mettent en œuvre. Ceci constitue une limite à la complexité des structures, donc à la richesse des objets et des structures sonores élaborés. Une deuxième limite, imputable plus particulièrement aux systèmes analogiques, réside dans les phénomènes de dérive des tensions électriques. L'inconstance, même faible de certaines d'entre elles exclut, à partir d'un certain degré de complexité, la reproductibilité des expériences et limite ainsi le degré d'objectivité possible. Ce sont, entre autres, ces limites particulières que les systèmes digitaux puis « informatiques » permettent de dépasser.

La synthèse musicale par ordinateur, dont le premier système représentatif est le programme Music V [4] s'appuie sur le même formalisme, au niveau élémentaire (générateurs unités...) que le synthétiseur analogique (2) : la synthèse de FOURIER, où les éléments sont des oscillations permanentes sans définition temporelle, additionnées ou filtrées, formées à divers niveaux par des fonctions temporelles « enveloppes ». Le pas effectué est cependant fondamental et procède de possibilités nouvelles :

— Celle de disposer d'une dimension supplémentaire de jeu entre structuration instantanée et structuration temporelle : avec l'ordinateur, il n'est plus nécessaire de multiplier matériellement les composants électroniques qui constituent un module. La duplication ne correspond qu'à la multiplication séquentielle de l'utilisation du même module, rendue possible grâce à la rapidité de fonctionnement des circuits électroniques et aux mémorisations élémentaires intermédiaires, origines pour l'information de la problématique du temps réel/temps différé. Le temps d'utilisation d'un générateur unité de Music V, n'a plus rien à voir avec la période de la vibration qu'il permettra de produire. Mais ce qui est important est beaucoup plus l'indépendance de ces durées que la mesure de leur différence. Ainsi, une structure de complexité arbitrairement fixée au départ, peut être réalisée pour peu qu'on soit patient et que l'on accepte de différer le plaisir de l'écoute qui lui correspondra. A condition aussi que l'on dispose d'une « taille-mémoire » et d'une diversité de fonctions opératoires de base suffisante.

— Une deuxième faculté propre à l'ordinateur réside en l'analyse et la mémorisation d'informations (acoustiques pour le cas de la musique) pour un niveau de finesse et de permanence plus grand, à l'issue de périphériques (capteurs et interfaces) d'une meilleure sensibilité, selon une complexité accrue. Le champ acoustique objectif s'agrandit à nouveau : il est possible d'établir des catalogues, sorte de partitions généralisées, non seulement de sons instrumentaux, mais d'instruments [5] à partir desquels tout studio équipé d'une installation informatique même de dimensions peu importantes, peut bénéficier de tout le travail d'étude effectué auparavant.

La synthèse, au travers de Music V et des programmes qui s'en déduisent, apporte en fait une certitude : celle qu'avec l'ordinateur, pour peu qu'on puisse y mettre les moyens, tous les sons de la musique traditionnelle sont possibles autour d'une instrumentation unifiée dont les capacités de diffusion sont en puissance sans commune mesure avec celle du contexte électroacoustique. L'incompréhension actuelle du phénomène fait douter la plupart du temps de l'intérêt d'installations informatiques de grande envergure. Ce qui engendre cette incompréhension, est, en fait, l'absence totale d'une mesure de comparaison.

Plus loin que cette certitude, la synthèse par ordinateur dont l'intérêt fondamental ne réside pas dans le fait de refaire les sons connus, ouvre une méthode d'investigation pour des sons nouveaux : synthétiser des catégories distinctes de sons connus, débouche dans ce contexte, sur la synthèse de sons intermédiaires entre ces catégories, le passage pouvant se faire selon des chemins d'interpolation que seul l'ordinateur permet.

(1) En première approximation : en référence aux premières analyses de Helmoltz.

(2) Il faut noter cependant que les concepts de Music V sont antérieurs au développement du synthétiseur analogique.

Par extension, l'interpolation permet l'extrapolation : des cheminements jalonnés entre les catégories connues peuvent être déduits des jalons pour l'exploration à l'extérieur de ces catégories, une sorte de charpente pour l'expérience de sons inouïs. La pièce composée par J.-C. RISSET : — «Dialogues» — pour magnétophone et instruments traditionnels, le magnétophone lisant en fait une structure sonore composée «pour» et produite par l'ordinateur, concentre d'un coup toute cette expérience, traduite par les jeux de continuité et de rupture entre les objets et structures musicales issus d'instruments et instrumentistes au sens traditionnel et ceux qui retracent l'investigation faite grâce à l'ordinateur. Il existe un cheminement des sons connus aux sons inouïs du champ nouveau, ce qui est bien essentiel.

Cette progression n'est pas entièrement fondée, cependant, sur l'origine de la synthèse additive telle qu'elle est définie dans le principe de la synthèse analogique. Le meilleur de Music V semble se déterminer autour d'un principe qu'il contenait au départ, mais qui n'avait pas été vraiment l'objectif visé : celui de la modulation de fréquence, que J. CHOWNING [6] a été le premier à exploiter en synthèse par ordinateur, découvrant ainsi une corrélation bien plus directe et bien plus efficace entre la dimensionalité et l'ambitus de l'espace des paramètres d'entrée et la richesse de l'espace acoustique perçu. Cependant, l'ensemble des problèmes et des difficultés qui semblent se présenter maintenant au devant de la synthèse par ordinateur, provient peut-être bien de son principe même : non pas celui de l'ordinateur qui vient à peine de dire ses premiers mots, mais celui de cette synthèse.

La recherche du temps réel... est une course qui rappelle un peu la recherche de la Haute Fidélité au début de la chaîne électroacoutique. Les performances des circuits digitaux aujourd'hui, permettent largement la compétitivité, relativement à la richesse des sons obtenus en temps réel, avec la synthèse analogique. Ainsi en témoignent certains dispositifs comme celui de DI GIUGNIO à l'IRCAM, où le même module digital, fondé sur le principe de l'oscillateur de base de Music V, peut fonctionner 256 fois «plus vite qu'en temps réel». Ceci permet alors, à partir de ce seul module, de réaliser une structure tout comme si l'on disposait de 256 modules fonctionnant simultanément, en temps réel. La richesse et la finesse de contrôle des sons obtenus fait progresser à nouveau la synthèse des sons connus tels que sons de cloches, etc... déjà finement étudiés auparavant. On découvre aussi des particularités surprenantes sur les effets de chœur (1). Cependant, qu'est-ce qu'un chœur évoquant des centaines de voix, produit par une machine et quelques personnes ? La question des accès, de la maîtrise de la dimensionalité de l'espace des paramètres d'entrée : le problème fondamental auquel on est renvoyé est là. Le temps réel comme notion limite, dont le sens devient difficile lorsqu'on croit l'atteindre ? C'est un peu ce à quoi condamne la synthèse sonore pure.

On a remarqué à propos de la musique électroacoustique qu'elle opérait un filtrage indépendant de la perfection de ses microphones. On peut remarquer qu'avec la synthèse par ordinateur, le filtrage est encore plus violent. On ne trouve pas, avec Music V, l'équivalent du geste qui est la genèse, au travers de la «facture», de l'être sonore. Les gestes initiaux et nécessaires sont ceux que le clavier de machine à écrire (de la télétype) impose. Quelle est leur correspondance avec la facture des objets sonores ou des structures obtenues ? Le chemin est trop long et tortueux pour qu'on ait envie de s'y aventurer. Par ailleurs, en perception, le temps nous est compté : l'objet perçu un centième de seconde ou trois mois (2) après l'acte interrogatif n'est pas le même.

Alors, par réflexe de symétrie, il faut peut-être se concentrer précisément et fondamentalement sur l'acte qui commence par le geste.

L'ordinateur à ce propos, se révèle prometteur. Au travers des travaux effectués par Max MATHEWS [7] on découvre cet autre aspect fondamental de l'informatique que ni la radio ni la télévision ne contiennent potentiellement : le fait que l'on puisse généraliser à d'autre sens que l'ouïe et la vue, le principe du transcodage, c'est-à-dire de la transformation de paramètres correspondant à des critères d'observation d'un objet donné, en des paramètres électriques digitalisés, mémorisables pour leur traitement, leur conversion symétrique éventuelle en des instants et des lieux différents. Ceci avec une précision et une maîtrise accessibles seulement dans ce contexte informatique.

Les exemples sont courants, — dans la régulation de grosses installations industrielles : raffineries, etc... où des capteurs multiples et divers informent sur le «métabolisme» de la structure au niveau des températures, des flux, des densités, etc...

- en robotique, secteur dont le développement est réel actuellement, où l'on capte, mesure, simule des comportements, des évènements mécaniques proches des comportements gestuels humains.
- etc...

Max MATHEWS, à l'aide du système GROOVE [7] met en œuvre un capteur de fonctions gestuelles. Grâce à la faculté de les «garder en mémoire», de les traiter a posteriori, de les restituer, une seule et même personne peut alors «synthétiser» le quator de RAVEL (1) (fa majeur). Ceux qui n'auront pas compris le sens de cette expérience compareront en premier lieu le temps de «l'instrumentiste» seul à celui des quatre formant le quator à cordes, le «résultat purement musical» de «l'œuvre synthétisée» à celui de «l'œuvre jouée». Nourris de la nouveauté de cette expérience, nous avons la prétention simple de pousser, s'il se peut, la question un peu plus loin.

Certains systèmes sont étudiés actuellement de telle façon que le comportement mécanique de l'organe manipulé ne soit pas déterminé une fois pour toutes. Cependant, les variations, les modifications et les réglages possibles ne sont eux-mêmes effectués que mécaniquement. (On change la résistance à l'enfoncement d'une touche, par exemple, en faisant varier la longueur d'un ressort réel).

Ce qui semble intéressant est d'envisager une programmation, une simulation de ce comportement mécanique. Remarquons en effet que le geste, parmi tous les canaux qui relient l'individu au milieu extérieur, à la particularité d'être bilatéral, c'est-à-dire que dans le temps même de l'émission, par des efforts et des déplacements, d'énergie et d'information mécaniques, à lieu, la plupart du temps en provenance du milieu, une récep-

(1) Exemple de sons obtenus avec le dispositif de DI GIUGNIO

(2) Les premières utilisations de Music V au GRM/ORTF exigeaient au départ un envoi outre atlantique des bandes digitales pour leur conversion analogique.

(1) Synthèse effectuée par Max MATHEWS au Bell Laboratorium en 1975.

tion d'énergie et d'information sous la même forme mécanique à l'échelle des gestes. Cette réception est une manifestation directe de la réalité, de l'objectivité mécanique de ce milieu extérieur, perçue par les nerfs tactiles (toucher), par les muscles (perception cénesthésique) etc...

Si bien que, partant de la même intention que P. SCHAEFFER, on peut risquer la définition d'**Objet Gestuel** et de son champ expérimental, qui paraît alors complètement indissociable de tout objet sonore contenant à un degré suffisamment prégnant une intention humaine. Ce champ nouveau n'acquerra son degré d'objectivité qu'au travers d'un ensemble d'expériences dont la première étape consistera en la définition de leurs bases.

1.3 L'OBJET GESTUEL — CHAMP EXPÉRIMENTAL

L'analyse de la pratique musicale traditionnelle peut être fondée sur l'observation de la conjonction de plusieurs circuits énergétiques et informationnels. Les «parcelles» de notre décomposition cartésienne qui pourraient s'appliquer à tout autre mode de création/perception, sont alors autant de circuits :

— de l'action gestuelle à la perception visuelle

— de l'action gestuelle à la perception acoustique

— de l'action gestuelle à la perception gestuelle

pour ne citer que les plus importants.

Cependant cette décomposition ne peut être opérée sans la perception d'une recomposition. En effet, nous dirons encore avec P. SCHAEFFER :

« La perception — mais l'appellerons-nous musicale cette fois ? — *est la perception d'une structure (...) comment pouvons-nous parler (...) de la perception — musicale — d'objets isolés» ?* [3]

Bien que le visuel ait un rôle permanent évident dans la pratique musicale traditionnelle — la partition, l'aspect spectacle pour les yeux, du concert, etc... sont bien là pour le montrer — nous ne nous attacherons dans un premier temps qu'aux deux autres circuits :

— gestuel/acoustique

— gestuel/gestuel

Il convient alors de les définir plus précisément.

Les «instruments électroniques» du commerce traduisent une évolution spécifique particulière : il suffit d'effleurer du doigt le «clavier digital» d'un synthétiseur, où l'on vous épargne la peine d'enfoncer une touche, pour déchaîner, pour peu que les baffles, les amplis et les watts soient là, un tonnerre de décibels sur la place publique. Cette évolution correspond presque à l'idée d'un progrès où la maîtrise d'une complexité, d'une richesse de plus en plus grande nécessite un investissement énergétique qui va en diminuant. Encore faudrait-il être acteur de ce progrès...

Les premiers critères de définition de nos circuits peuvent s'articuler sur le rapport énergétique.

L'énergie acoustique qui provoque l'ébranlement des tympans est extrêmement faible, comparée à celle que peuvent développer les actions mécaniques gestuelles. Cependant, lorsque l'évènement acoustique provient d'un instrument traditionnel, aussi faible soit-elle, cette énergie a son origine dans l'instrumentiste lui-même (1). Ce n'est plus le cas avec les instruments électroniques qu même simplement électriques. L'énergie provient de la centrale hydraulique ou thermique... Ce fait, on ne peut plus banal, est propre cependant à perturber profondément, si l'on n'y prend garde, la perception des différents rapports en cause. La situation à ce propos, entre le contexte mécanique des instruments traditionnels et celui de l'électronique de l'informatique est bien différente. La perception des objets musicaux a ses racines, ses références, ses codages dans la pratique traditionnelle. Dans cette pratique, le problème de la dissociation des deux circuits ne se pose pas, il est donc probable que le contenu du «résultat purement acoustique de l'activité de l'instrumentiste» extrait de ce prolongement culturel, ait quelque chose à voir avec cet investissement global d'où il provient. C'est ce sur quoi nous voudrions avoir le cœur net en dissociant délibérément, pour expérience, les deux circuits. Leur réassemblage n'en pourra qu'être plus fécond.

Nous définirons alors le premier comme une limite où l'investissement de l'acteur tend vers zéro.

Le deuxième, par contre, prendra tout en charge, du point de vue énergétique. Tout I pas vraiment. Le «Cordon» qui relie la machine au «secteur» est là pour trahir l'artifice. Il suffira de savoir que l'instrumentiste établit un certain rapport à son auditoire par le jeu de l'amplification.

L'étude particulière du premier circuit nécessite un dispositif capteur de paramètres gestuels exclusivement cinétiques. Les claviers «digitaux» de certains synthétiseurs correspondent à cette fonction. La tablette graphique, présente dans la plupart des installations informatiques, correspond au même principe, cependant plus général par sa bidimensionnalité et par l'absence au départ de la contrainte de la «discrétisation» en touches. Dans le prolongement de ce capteur, un système doit effectuer la transposition de l'espace gestuel en espace acoustique. Le rapport entre les durées «vécues» à l'action et à la perception bénéficie du degré d'indépendance décrit à propos du temps réel et du temps différé ; la seule question est alors d'évaluer clairement avant l'expérience, le niveau structurel de ce que l'on désire percevoir dans le temps même de l'investissement actif. C'est dans cette problématique que l'on peut poser la définition du temps réel. Ainsi pour des musiciens instrumentistes, la référence sera celle du geste instrumental (percussion des doigts sur des touches par exemple) auquel correspond dans l'immédiat un objet sonore bien identifié (son de percussion de cordes). Pour le Chef d'Orchestre ou le compositeur, la référence sera différente...

L'ordinateur comme support de cette transformation de l'espace gestuel en espace acoustique, impose que l'on prenne le problème à un niveau d'élémentarité qui lui corresponde. Les formalismes employés en synthèse analogique ne sont pas nécessairement adaptés. Il semble que la synthèse de FOURIER soit elle-même en cause. Le passage des formalismes analogiques à des formalismes digitaux tel qu'il s'opère de la «Transformée en p» et à la «transformée en z» (qui soustend le développement du filtrage numérique...) contient une rupture qui laisse le problème un peu en suspens. (Voir en annexe la description sommaire du dispositif récursif mis en œuvre).

---

(1) Sauf pour l'orgue, cependant, qui nécessite une accumulation d'énergie distribuée par l'action de l'organiste.

L'étude du deuxième circuit auquel nous accordons le plus d'importance dans l'immédiat, s'articule de même sur deux dispositifs expérimentaux :

- Un transducteur effectuant la transformation d'une part de paramètres mécaniques (gestuels) cinétiques et dynamiques, en paramètres électriques digitalisés pour leur traitement par l'ordinateur, d'autre part la transformation symétrique de paramètres électriques digitaux en grandeurs mécaniques cinétiques et dynamiques à l'échelle des gestes.

- Un programme de simulation permettant d'asservir le comportement perceptible («gestuellement») des organes du transducteur, à un modèle mécanique étudié et mémorisé auparavant.

Dans l'un et dans l'autre cas, les problèmes théoriques et pratiques posés sont d'une certaine complexité. Ils conduisent à une série de compromis dépendants des possibilités technologiques et des moyens disponibles pour leur mise en œuvre.

La deuxième partie de cet article donne une description du premier système mis en œuvre actuellement dans le cadre de cette recherche.

CHAPITRE 2

2.1 LIAISON MÉCANIQUE/TRANSDUCTEUR

L'étude d'un transducteur tel qu'il a été défini, de ses performances et du nombre de degrés de libertés demandés repose sur l'analyse des caractéristiques mécaniques des membres supérieurs et de la main. Ces caractéristiques peuvent être mises en évidence par l'étude anatomique et géométrique de ceux-ci, mais aussi à partir d'expériences de manipulation sur des objets simples, mécaniquement connus. Enfin, les premières réalisations de système gestuel ouvrent dans ce sens un champ d'expérimentation important.

2.1.1 Liaison mécanique par un solide

Imaginons deux systèmes mécaniques — le cas de l'individu humain est un cas particulier de cette situation si on le considère en effet comme un système mécanique — ayant en commun un solide (sans masse, et lié à aucun autre système). La position de ce solide dans l'espace peut être décrite par 6 variables (nécessaire et suffisant) que l'on peut représenter par un vecteur X. De même, le champ des forces circulant d'un système à l'autre par l'intermédiaire de cette liaison peut être décrit par 6 autres variables — que l'on représentera par le vecteur F. (X et F ne sont pas définis, a priori, dans le même espace).

Chacun des deux systèmes impose à la liaison (c'est-à-dire à X et F) un nombre égal de contraintes qui conduisent à la détermination à chaque instant de ces 12 variables, c'est-à-dire de l'état de la liaison. (Nous reviendrons sur la nature de ces contraintes dans la deuxième partie). X et F apparaissent ainsi comme des signaux résultant du couplage des deux systèmes.

2.1.2 Transducteur

La simulation de l'un des deux systèmes mécaniques consiste à interposer entre le calculateur dans lequel est programmé le modèle de système simulé et le système S1, un transducteur qui lui-même comportera deux parties distinctes :

- un ensemble de capteurs fournissant les signaux électriques, images des 12 (dans le cas d'une liaison solide) variables caractérisant la liaison,

- un ensemble de 6 moteurs permettant d'imposer les contraintes calculées à partir des informations issues des capteurs et de la donnée du modèle.

Ce schéma (figure 1) peut se généraliser à des systèmes liés par plusieurs solides et conduit à traiter un plus grand nombre de signaux. On pourra, en général, traiter une liaison comme la juxtaposition de liaisons à un solide.

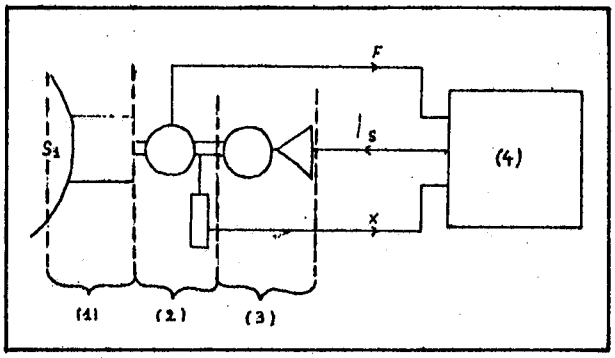


Figure 1 — Simulation d'un système mécanique lié au système S1
(1) Liaison
(2) Capteurs
(3) Moteurs
(4) Calculateur
(5) Transducteur.

Remarque sur la disposition des capteurs de force

Les capteurs de force sont placés le plus près possible de la liaison et donc en amont des capteurs de déplacement, ceci afin de minimiser les erreurs dues aux frottements et aux forces d'inertie. L'erreur ainsi introduite sur les signaux de déplacement est minime en raison de l'importante raideur des capteurs de forces à jauges extensiométriques utilisés.

Le choix du repère que nous utilisons plus loin est justifié par cette disposition.

2.1.3. Choix des variables pour une liaison solide

Les informations échangées entre le transducteur et le calculateur sont, comme nous l'avons vu de trois types :

- État dynamique de la liaison : (signaux issus des capteurs de forces et moments),

- État cinétique de la liaison (signaux issus des capteurs de déplacement),

- Réaction du modèle (signaux de commande des servomoteurs).

Dans le cas d'une liaison solide, chacune des trois voies correspond à la transmission de six signaux réels. Le choix de ces différentes variables est fonction, d'une part, de la géométrie du transducteur (exemple : bras articulé, bras à glissières, etc...) elle-même déterminée à partir de critères purement mécaniques (rigidité, inertie, frottements, course), des contraintes liées à la nature des capteurs et d'autre part de la simplicité de la simulation (qui dépend évidemment du choix des variables d'état de la liaison).

Dans la suite, nous supposerons que les capteurs de forces sont placés au niveau de la liaison (d'après la remarque du paragraphe précédent). Nous admettrons également qu'un capteur de forces à 6 composantes (3 forces et 3 moments) suivant des directions choisies a priori est réalisable avec des performances suffisantes [8] . Dans ces conditions, l'information dynamique sur la liaison pourra toujours être transmise par 6 signaux représentant les composantes, suivant un repère porté par le solide de liaison, des éléments de réduction du torseur des forces en un point de celle-ci.

Chaque capteur de déplacement est associé à un servomoteur, de sorte que les variables de position correspondent aux mêmes degrés de liberté que les variables de réaction. Ainsi, les traitements intermédiaires à appliquer aux signaux de réaction et permettant de simplifier les problèmes de simulation compte-tenu des impératifs de réalisation propres au transducteur, seront déduits simplement sous condition d'inversibilité de ceux que nous nous proposons de définir à propos des variables cinétiques.

La simulation est simplifiée dans le cas où l'énergie mécanique échangée au niveau de la liaison peut s'exprimer ainsi :

$$dW = \sum_{i,j} \alpha_{ij} f_i dx_j \text{ avec } \alpha_{ij} = 0 \text{ si } i \neq j,$$

où les f_i x_j sont les variables d'état de la liaison après traitement intermédiaire (c'est-à-dire vues du simulateur). Cette condition est indispensable pour l'exploitation du formalisme des modèles linéaires proposé dans la deuxième partie. Il est bien évident que si l'architecture du transducteur permet de réaliser directement cette condition, ce traitement intermédiaire ne sera plus nécessaire.

2.1.3.1. Préliminaires

Choisissons arbitrairement un trièdre de références (lié au sol) : $0\,u_1\,u_2\,u_3$ orthonormé, ω étant un point (choisi arbitrairement) lié au solide s ; la position de ce solide peut être caractérisé par :

- le vecteur 0ω
- Une application orthogonale droite $\mathcal{R}$ définie dans R^3 euclidien, (c'est-à-dire conservant la norme et l'orientation d'un trièdre).

Les images de $u_1\ u_2\ u_3$ par $\mathcal{R}$ sont $U_1\ U_2\ U_3$ qui seront (par définition de $\mathcal{R}$) liés au solide (et constituent un trièdre orthonormé de même orientation que $u_1\ u_2\ u_3$). La matrice de $\mathcal{R}$ sur la base $U_1\ U_2\ U_3$ s'écrira :

$R = [r^j_k]$ c'est une matrice orthogonale droite

$$(\|R\| = 1).$$

Étant donné que les conditions d'orthogonalité conduisent à 6 équations sur les r^j_k , 3 paramètres $\alpha\ \beta\ \gamma$ seront nécessaires et suffisants pour définir $\mathcal{R}$ c'est-à-dire l'orientation du solide. On pourra par exemple mettre $\mathcal{R}$ sous forme de produits de 3 rotations chacune dépendant d'un paramètre. Le vecteur 0ω sera défini par 3 autres variables : a, b, c, telles que les composantes de 0ω sur la base de $U_1\ U_2\ U_3$ soient

$$0\omega \begin{cases} s_1(a,b,c) \\ s_2(a,b,c) \\ s_3(a,b,c) \end{cases} \qquad 0\omega = S(a,b,c)$$

Si $\alpha, \beta, \gamma,$ a, b, c, sont les signaux fournis par le capteur de déplacements, les fonctions r^j_k , s_1, s_2, s_3 caractérisent ce capteur. On écrira :

$$X = (a, b, c, \alpha, \beta, \gamma).$$

Dans ces conditions, un point M lié au solide (de liaison) vérifiera la condition :

$$0M = 0\omega + [\mathcal{R}(\alpha,\beta,\gamma)]\ (\omega_0 M_0)$$

$$= S(a,b,c) + [\mathcal{R}(\alpha,\beta,\gamma)]\ (\omega_0 M_0).$$

$\omega_0 M_0$ vecteur constant définissant la position de M par rapport au solide.

Si l'on différencie ceci, on obtient :

$$dOM = \frac{\partial S}{\partial a} da + \frac{\partial S}{\partial b} db + \frac{\partial S}{\partial c} dc + d(\mathcal{R}(\alpha\beta\gamma)\ \omega_0 M_0)$$

$$+ (d\mathcal{R})\ \omega_0 M_0 .$$

$d\mathcal{R}$ peut être défini comme représenté par la matrice $d(\mathcal{R})^{-1}$ sur la base $U_1\ U_2\ U_3$. On supposera en effet que les r^j_k sont différentiables en tout point ; on montre alors que :

$$d(\mathcal{R}(\omega_0 M_0)) = (d\mathcal{R})(\omega_0 M_0).$$

Il existe alors un vecteur $d\Omega$ (ayant pour composantes sur $U_1\ U_2\ U_3$, 3 formes différentielles en $d\alpha$, $d\beta$, $d\gamma$ d'où la notation $d\Omega$) et vérifiant la propriété :

$$\forall X \epsilon R^3 \quad d\mathcal{R}(X) = d\Omega \wedge \mathcal{R}(X),$$

que l'on pourra écrire :

$$d\mathcal{R} = (d\Omega \wedge)_0 \mathcal{R}$$

Remarque : Ceci exprime, dans le cas particulier où, $\alpha, \beta, \gamma,$ sont des fonctions d'une même variable t , que le champ des vitesses dans le solide est un champ de moments (propriété bien connue) — Le vecteur $\omega = \frac{d\Omega}{dt}$ est le vecteur rotation instantanée.

Démonstration et calcul des composantes de $d\Omega$

On a $U_k = \mathcal{R}(u_k)$

U_k est unitaire puisque $\mathcal{R}$ est orthogonal et u_k unitaire.

On en déduit que :

$$dU_k \cdot U_k = 0 \quad \Rightarrow dU_1 = dt_1^2\, U_2 + dt_1^3\, U_3$$

$$dU_2 = dt_2^1\, U_1 + dt_2^3\, U_3$$

$$dU_3 = dt_3^1\, U_1 + dt_3^2\, U_2 .$$

D'autre part on a :

$$U_k U_j = 0 \quad \Rightarrow (dU_k) \cdot U_j = - (dU_j) \cdot U_k ,$$

$$\text{or } (dU_k) \cdot U_j = dt_k^j ,$$

$$\text{on en déduit } \quad dt_k^j = - dt_j^k .$$

La matrice $[dt_k^j]$ peut alors s'écrire :

$$[dt_k^j] = \begin{pmatrix} 0 & dt & -ds \\ -dt & 0 & dr \\ ds & -dr & 0 \end{pmatrix}$$

Cette matrice représente sur la base $U_1\ U_2\ U_3$ un endomorphisme antisymétrique $d\mathcal{E}$, tel que :

$$dU_k = (d\mathcal{E})\,(U_k) \qquad k = 1, 2, 3 .$$

D'autre part : $dU_k = (d\mathcal{R})\, u_k$,

$$= (d\mathcal{R}_0 \mathcal{R}^{-1})\, U_k ,$$

Comme U_k est une base,

$$d\mathcal{E} = d\mathcal{R}_0 \mathcal{R}^{-1} \quad \Rightarrow \quad d\mathcal{R} = d\mathcal{E}_0 \mathcal{R}$$

Or, d'après la forme de $d\mathcal{E}$ il existe un vecteur dQ tel que $\forall X \quad dQ \wedge X = d\mathcal{E}(X)$.

Les composantes de dQ sur la base U U U sont alors :

$$dQ = \begin{bmatrix} -dr \\ -ds \\ -dt . \end{bmatrix}$$

La relation $d\mathcal{R} = d\ {}_0\mathcal{R}$ permet d'exprimer ces composantes en fonction des r_k^j et donc en fonction des variables α, β, γ.

En effet, si l'on écrit cette relation sous forme matricielle, on obtient :

$[dT] = [dR]^t [R]$ (car ${}^tR = R^{-1}$ puisque R est orthogonale)

et d'après ce qui précède (relation entre les coefficients de la matrice dT et les composantes de dQ) on en déduit :

$$-dr = \sum_k r_3^k\, dr_2^k$$

$$-ds = \sum_k r_1^k\, dr_3^k \quad \text{avec } R = \begin{pmatrix} r_1^1 & r_1^2 & r_1^3 \\ r_2^1 & r_2^2 & r_2^3 \\ r_3^1 & r_3^2 & r_3^3 \end{pmatrix}$$

$$-dt = \sum_k r_2^k\, dr_1^k$$

$$\text{et finalement } dQ = \sum_k \begin{pmatrix} r_3^k \frac{\partial r_2^k}{\partial \alpha} & r_3^k \frac{\partial r_2^k}{\partial \beta} & r_3^k \frac{\partial r_2^k}{\partial \gamma} \\ r_1^k \frac{\partial r_3^k}{\partial \alpha} & r_1^k \frac{\partial r_3^k}{\partial \beta} & r_1^k \frac{\partial r_3^k}{\partial \gamma} \\ r_2^k \frac{\partial r_1^k}{\partial \alpha} & r_2^k \frac{\partial r_1^k}{\partial \beta} & r_2^k \frac{\partial r_1^k}{\partial \gamma} \end{pmatrix} d \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}$$

Remarque sur les notations :

A aucun moment le vecteur Q n'a été défini. Seul le vecteur dQ l'a été ; cette notation ne présuppose pas l'existence d'un tel vecteur (dont dQ serait la différentielle).

Conditions pour que dQ soit une différentielle totale :

$$dQ = A d\alpha + B d\beta + C d\gamma .$$

Les conditions au nombre de 9 sont :

$$\frac{\partial A}{\partial \beta} = \frac{\partial B}{\partial \alpha}$$

$$\frac{\partial B}{\partial \gamma} = \frac{\partial C}{\partial \beta} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = \frac{\partial A}{\partial \gamma} .$$

Cela signifie qu'il existe un vecteur Q dont dQ est la différentielle.

2.1.3.2 Détermination des variables de force

Le champ de forces circulant dans la liaison est un champ de moment que l'on ramènera à ses éléments de réduction en ω.

G résultante

C moment résultant .

Les capteurs de forces liés au solide seront étudiés de façon à fournir les signaux composantes de ces deux vecteurs suivant le trièdre $U_1\ U_2\ U_3$ lié au solide.

$$G \begin{cases} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{cases} \qquad C \begin{cases} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{cases}$$

on écrira $F = (g_1, g_2, g_3, c_1, c_2, c_3)$.

2.1.3.3 Choix des variables de déplacement

Dans ces conditions, l'énergie mécanique élémentaire s'exprime ainsi :

$$dW = G\ dS + C.dQ$$

$$= \Phi(F, dX) \quad \text{où } \Phi \text{ est une forme bilinéaire.}$$

La matrice représentant Φ a l'allure suivante :

$$[\Phi] = \left[\begin{array}{c|c} [\Psi] & 0 \\ \hline 0 & [\varphi] \end{array}\right]$$

avec

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_1}{\partial a} & \frac{\partial s_1}{\partial b} & \frac{\partial s_1}{\partial c} \\ \frac{\partial s_2}{\partial a} & \frac{\partial s_2}{\partial b} & \frac{\partial s_2}{\partial c} \\ \frac{\partial s_3}{\partial a} & \frac{\partial s_3}{\partial b} & \frac{\partial s_3}{\partial c} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi] = \sum_k \begin{bmatrix} \frac{r^k \partial r^k}{\partial \alpha} & \frac{r^k \partial r^k}{\partial \beta} & \frac{r^k \partial r^k}{\partial \gamma} \\ \multicolumn{3}{l}{\text{idem que dans l'expression précédente de } dQ} \end{bmatrix}$$

Il est intéressant de parvenir à mettre ces matrices sous forme diagonale, soit en réalisant un capteur de déplacement satisfaisant directement à ces conditions (ce qui est pratiquement impossible pour $[\Phi]$, soit en effectuant, à l'aide d'un calculateur auxiliaire, un changement de variables approprié.

MATRICE $[\Psi]$

Les fonctions s_1 (a, b, c), s_2 ( ), s_3 ( ) sont stockées en mémoire par tabulation. Les nouvelles variables seront

$a' = s_1$ (a, b, c)

$b' = s_2$ ( )

$c' = s_3$ ( )

La matrice $[\Psi]$ devient alors :

$$[\Psi] = [I]$$

Le problème se simplifie évidemment lorsque les fonctions S sont linéaires ; la transformation se réduit à un produit matriciel et seuls 9 coefficients sont stockés en mémoire. Mais ce n'est malheureusement pas le cas dans les systèmes où l'on utilise des bras articulés par exemple.

MATRICE $[\Phi]$

On voit qu'il est intéressant d'adopter une géométrie et une disposition des capteurs de déplacements telles que les conditions (1) soient vérifiées ; le problème se ramène alors à celui de $[\Psi]$ et l'on prendra :

$$\left.\begin{array}{l} \alpha' = Q_1 \\ \beta' = Q_2 \\ \gamma' = Q_3 \end{array}\right\} \quad \begin{array}{c} \text{Composantes de Q suivant} \\ U_1\ U_2\ U_3 \end{array}$$

2.1.4 Application au système mécanique humain

Si on se limite aux liaisons ne touchant que les membres supérieurs ou plus particulièrement la main, qui seule, intervient dans la manipulation de petits objets, le système d'entrée doit prendre en compte toutes les liaisons mécaniques qui interviennent dans la manipulation de ces objets ; il semble alors suffisant d'établir ces liaisons au niveau des dernières phalanges de la main et éventuellement de la paume.

Il s'agit ici de liaisons entre solides — c'est-à-dire nécessitant 6 capteurs de déplacements, 6 servo-moteurs et 6 dynamomètres. Il faut multiplier tout ceci par 6 si l'on veut coupler une main.

Il faut remarquer que les liaisons anatomiques naturelles entre ces différents solides — les phalanges — en limitent les déplacements relatifs d'une manière très complexe et non mesurable directement ; de plus, les paramètres de ces liaisons varient probablement d'un individu à l'autre. Le transducteur ne doit introduire aucune liaison supplémentaire, ce qui justifie les 36 voies de couplage. Toutefois, on voit que les zones d'évolution de ces différents solides ne pourront être simultanément très distantes, ainsi d'ailleurs que leurs orientations. Ceci revient à limiter a priori l'évolution de X à un certain domaine. Ceci permet d'accroître la précision du couplage en adoptant une structure analogue à celle des membres humains, c'est-à-dire :

- un des solides de liaisons montées sur bras long et permettant donc d'évoluer dans une zone importante de l'espace,
- les autres solides de liaisons liées au premier par des bras courts. Il existe à ce niveau plusieurs solutions.

Les impératifs technologiques étant en contradiction avec ceux de la simulation, le choix des variables et la détermination de dispositifs aussi complexes feront l'objet d'études ultérieures.

2.1.5 Remarques et Cas particuliers

2.1.5.1 Transducteurs à liaisons particulières

Dans un certain nombre de cas, la frontière entre les deux systèmes mécaniques se situe à un niveau où la matière ne peut pas être caractérisée aussi simplement que s'il s'agissait de matière solide. C'est le cas lorsque

la zone frontière est déformable, et où les variables de déformation doivent être prises en compte.

Le transducteur pourrait alors comporter un nombre suffisant de liaisons solides, mais cela conduit à augmenter considérablement le nombre de degrés de libertés de la liaison, et donc la complexité de la machine. Il peut alors être intéressant de remplacer certaines de ces liaisons par des liaisons ponctuelles (à 3 degrés de liberté). Par exemple, on pourra remplacer une liaison solide qui ne prendrait pas en compte les effets de déformation par une laison solide plus une liaison point, ce qui permet de traiter 3 degrés de liberté de déformation.

Il faut remarquer que du point de vue théorique, une liaison quelconque pourrait de façon tout aussi générale être décomposée en liaisons ponctuelles. Là où les problèmes se posent, c'est au niveau de la réalisation pratique d'un transducteur conforme à cette représentation. En effet, un transducteur à liaisons ponctuelles nécessiterait des systèmes de découplages complexes et encombrants, et conduirait en général à un nombre supérieur de voies de couplage.

Des problèmes particuliers pourront également conduire à des transducteurs de type intermédiaire du genre solide, mais pour lesquels toutes les variables ne sont pas prises en compte.

2.1.5.2 Contraintes internes connues

Imaginons un système S_1 (système humain dans le cas qui nous intéresse), lié par n liaisons solides. L'exploitation de ces liaisons nécessite en principe un transducteur à 6n voies de couplage. Or, parmi les contraintes caractéristiques du système S_1, on peut rencontrer le cas particulier suivant :

Le vecteur (X,F) caractérisant l'état de la liaison décrit un certain domaine @, on peut tenter de réaliser un transducteur adapté à @ et ainsi ne traiter que p voies de couplages. Des transducteurs particuliers à liaisons ponctuelles peuvent alors être intéressants. Lorsque ceci n'est pas possible, on peut cependant réaliser un transducteur à q voies de couplage ($p < q \leqslant 6n$), et simuler un transducteur adapté à l'aide d'un calculateur intermédiaire qui s'intercalera entre le transducteur réel et le calculateur principal. Ceci suppose également que les effets de ces contraintes internes puissent être simulés au niveau du calculateur intermédiaire. Les caractéristiques de ces contraintes pourraient être acquises par des processus d'apprentissage automatiques.

2.2 SIMULATION DE SYSTEMES MÉCANIQUES

Position du problème

Comme nous l'avons dit, le calculateur doit réaliser un certain nombre de fonctions :

- transformations des signaux en fonction de la géométrie du transcodeur et des capteurs,
- correction des caractéristiques mécaniques du transducteur : (masse, élasticité, frottements, ...)
- enfin, la simulation proprement dite.

Cette dernière fonction ne peut évidemment être définie de façon précise pour le cas le plus général. Il s'agit en fait pour un type de transducteur donné de réaliser un système matériel qui associé à un logiciel de base (réalisant entre autres, les deux premières fonctions) permette la plus grande souplesse de simulation. On peut se contenter ici de donner quelques modèles de base qui seront élaborés ou modifiés en fonction d'expériences ultérieures.

2.2.1 Principe de simulation

L'état du système simulé est à chaque instant représenté par un nombre fini de variables y_k (réelles). La capacité du simulateur dépendra donc de ce nombre n, mais aussi du nombre de degrés de libertés de la liaison (c'est-à-dire de la capacité du transducteur). Celui-ci sera toujours inférieur au premier. Si E désigne l'espace de définition de Y (dont les n composantes sont les variables y_k (c'est-à-dire R^n muni d'une structure d'Espace Vectoriel et sur lequel on a défini une base), étant donné un modèle particulier de système mécanique, il existe un sous-espace F de E tel que la trajectoire du vecteur d'état Y_0 associé à ce système soit incluse dans F. Ceci signifie que le nombre n, limité par la partie matérielle du système (ou la partie inférieure du logiciel inacessible à l'utilisateur) est le plus grand des nombres de variables d'état minimaux nécessaires pour chaque modèle égal à la dimension du sous-espace F qui lui est associé).

D'autre part, l'état de la liaison caractérisé par X et F peut être déterminé à partir de Y. Dans le système proposé, X et F sont les images de Y par des applications linéaires.

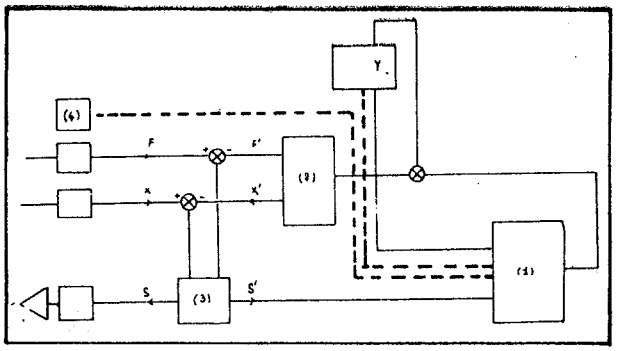


Figure 2 — (1) Calculateur programmé à partir du modèle et fournissant l'incrément ΔY
(2) (3) Opérateurs linéaires
(4) Synchronisation.

Dans le simulateur, ces opérations sont effectuées par le calculateur (2) (figure 2) dont la programmation (qui reviendra aux choix d'un certain nombre de constantes) est fonction du choix du modèle simulé — et sera donc accessible à l'opérateur — Ainsi, on obtient des signaux F' et X' qui sont comparés à ceux X et F issus des capteurs. Les signaux d'erreur S et S' appliqués l'un aux servomoteurs, l'autre à (1) (figure 2) imposent la convergence de (F, X) — (F', X') vers (0). Ceci dans certaines conditions.

Le problème de la stabilité se pose alors. Il peut être étudié dans le cas où le modèle est linéaire, c'est-à-dire se ramenant à une équation linéaire à coefficients constants, mais il est également nécessaire pour étudier la stabilité de connaître un modèle linéaire du système extérieur (que l'on a appelé S_1). Pratiquement, on pourra considérer que ces systèmes sont linéaires au voisinage de chaque état sauf d'éventuelles singularités qui seront étudiées à part. Pour ce qui est du système S_1 ses caractéristiques (coefficient des équations linéaires par lequel on le représentera) devront être déterminées

expérimentalement. On peut alors ouvrir la boucle au niveau des lignes S et S' et s'intéresser à la matrice de transfert H (p) qui aura été déterminée au préalable à partir des modèles linéaires des 2 systèmes. Lorsque la matrice H (p) est diagonalisable, le problème se ramène à celui de 2q boucles indépendantes et il suffit que chacune des valeurs propres λ_k (p) satisfasse le critère de Nyquist (q étant le nombre de degrés de libertés de la liaison.

En effet, si P est une matrice inversible, les deux boucles suivantes sont équivalentes du point de vue de la stabilité.

Si H (p) est diagonalisable, il existe alors une matrice P (p) telle que $D(p) = P^{-1}(p)\ H(p)\ P(p)$ soit diagonale.

$$D(p) = \begin{pmatrix} \lambda_1(p) & & 0 \\ & \ddots & \\ & & \lambda_{2q}(p) \\ 0 & & \end{pmatrix}$$

La stabilité sera assurée si les équations $\lambda_k(p) + 1 = 0$ n'ont aucune racine à partie réelle positive.

L'étude détaillée des problèmes de stabilité sera développée par ailleurs.

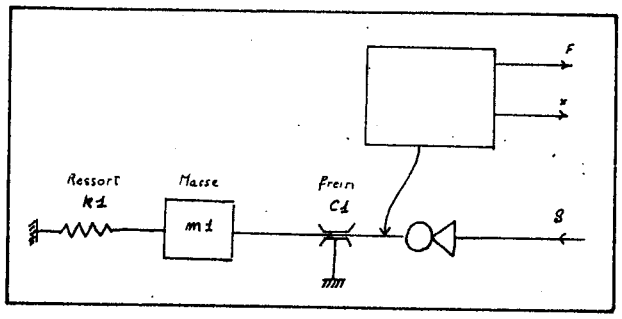
2.2.2 Modèle linéaire

Dans ce cas l'incrément ΔY est l'image par une application linéaire de Y, S' et la programmation de (1) consiste alors à fixer les coefficients d'une matrice rectangulaire (n + q) x (n).

Remarquons au passage que dans le schéma synoptique proposé la simulation se fait par intégration d'équations aux différences, ce qui dans le cas linéaire équivaut à un filtre numérique classique (ceci afin d'être plus proche de la réalisation pratique dans laquelle les signaux sont échantillonnés). La fonction du calculateur (1) et du registre Y peut également être considérée comme l'intégration pas à pas d'un système différentiel linéaire caractéristique du modèle. On peut donc raisonner à ce niveau, supposant pour le moment cette intégration parfaite pour des exemples de modèles caractérisés par leur équation différentielle. Mais il sera plus intéressant de définir des modèles directement par des équations aux différences ; dans le cas linéaire, le calcul effectué par (1) revient alors à un produit matriciel — (1 matrice carrée par 1 vecteur colonne).

2.2.3 Exemple

Couplage suivant 1 d° de liberté de deux systèmes du 2ème ordre (linéaires), l'un étant simulé



Choix du modèle

Il s'agit d'un système analogue : il sera donc caractérisé par l'équation :

$$f' = m_2 \ddot{x}' + c_2 \dot{x}' + k_2 x'$$

On prendra pour Y : $Y = \begin{bmatrix} x' \\ \dot{x}' \\ f' \end{bmatrix}$

Équation différentielle en Y (qui sera intégrée par le calculateur (1))

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} & \frac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ \dot{x}' \\ f \\ s' \end{bmatrix} \quad Y$$

avec $s = x - x'$ ce qui correspond pour (3) à la transformation :

$s' = f' - f$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Ces choix ne constituent pas une solution unique — Cherchons A et B (supposés des coefficients constants) pour que la stabilité soit assurée.

Matrice de transfert en boucle ouverte —

Ouvrons la boucle sur les lignes s et s' et désignons par s_0 et s'_0 les signaux issus des comparateurs.

Cherchons la matrice H (p) telle que :

$$\begin{bmatrix} s_0(p) \\ s_0'(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(p) \\ s'(p) \end{bmatrix}$$

On a $x' = As \Rightarrow px(p) = As(p)$ (1)

$$f(p) = (p^2 m_1 + c_1 p + k_1)\, x(p) \quad (2)$$

D'autre part on aura

$$f'(p) = (m_2 p^2 + c_2 p + k_2)\, x'(p) \quad (3)$$

et $pf'(p) = B\, s'(p)$ (4)

$$\text{or} \begin{cases} s_0(p) = x(p) - x'(p) \\ s_0'(p) = f'(p) - f(p) . \end{cases}$$

Donc d'après (4) et (3)

$$\begin{cases} s_0(p) = \dfrac{A}{p} s(p) - B \dfrac{s'(p)}{p(m_2p^2 + c_2p + k_2)} \\ s'_0(p) = \dfrac{B}{p} s'(p) - A \dfrac{p^2m_1 + c_1p + k_1}{p} s(p) \end{cases}$$

D'où

$$H(p) = \begin{bmatrix} \dfrac{A}{p} & -\dfrac{B}{p} \dfrac{1}{m_2p^2 + c_2p + k_2} \\ -\dfrac{A}{p} p^2m_1 + pc_1 + k_1 & \dfrac{B}{p} \end{bmatrix}$$

On remarque que $H(p) = 0$ lorsque le système S_1 et le système simulé sont identiques.

Pour simplifier le problème, prenons $B = A$ et cherchons une condition suffisante de stabilité sur A.

On a $\lambda_1(p)\ \lambda_2(p) = H(p) =$

$$\frac{A^2}{p^2} \left[1 - \frac{m_1p^2 + c_1p + k_1}{m_2p^2 + c_2p + k_2} \right]$$

$$\lambda_1(p) + \lambda_2(p) = \frac{2A}{p}$$

Soit $\Delta = \dfrac{A^2}{p^2} - 1_1\ 1_2 = \left[\dfrac{A^2}{p^2} \dfrac{m_1p^2 + c_1p + k_1}{m_2p^2 + c_2p + k_2} \right]$

Étudions $\lambda_1(j\omega)$ et $\lambda_2(j\omega)$, ω réel.

$$\Delta = -\frac{A^2}{\omega^2} \mu \frac{R_1\ e^{-2j\theta_1}}{R_2\ e^{-2j\theta_2}}$$

avec $\mu = \dfrac{m_1}{m_2}$

avec $R_1 \cos 2\theta_1 = (p_1p_1 - \omega^2)$

$R_1 \sin 2\theta_1 = \omega(p_1 + p_1)$

$R_2 \cos 2\theta_2 = p_2p_2 - \omega^2$

$R_2 \sin 2\theta_2 = \omega(p_2 + p_2)$

$p_1\ \bar{p}_1$ étant les racines du numérateur

$p_2\ \bar{p}_2$ étant les racines du dénominateur

On a alors :

$$\lambda_1(j\omega) = -\frac{A}{j\omega} - j \frac{A}{\omega} \mu \frac{R_1\ e^{-j\theta_1}}{R_2\ e^{-j\theta_2}}$$

$$= \frac{A}{\omega} \left[1 - \mu \frac{R_1}{R_2} e^{+j(\theta_2 - \theta_1 + \frac{\pi}{2})} \right]$$

$$\lambda_2(j\omega) = \frac{A}{\omega} [\ 1 + \quad " \qquad " \quad]$$

On montre que l'expression de R_1 est donnée par : $R_1^2 = \omega^4 + \omega^2 (p_1^2 + p_1^2) + p_1^2\ p_1^2$ et idem pour R_2

Donc pour $\omega \in]-\infty, +\infty[$ $\dfrac{R_1}{R_2}$ est inférieur ou égal à $\sup\left(1, \dfrac{p_1p_1}{p_2p_2}\right)^2$).

Les conditions de stabilité seront toujours satisfaites si ce majorant est inférieur à $\dfrac{1}{\mu}$. Sinon on cherche les valeurs de λ_1 et de λ_2 lorsque ceux-ci sont réels et l'on détermine A pour qu'elles soient supérieures à $\underline{-1}$.

Ces calculs déjà complexes pour un cas cependant très simple seront avantageusement remplacés par des simulations (en temps non réel).

Il est bien évident que la précision de l'asservissement, ceci est vrai dans le cas général, est également fonction du choix de ces coefficients. Les problèmes posés par les compromis qu'il faut trouver entre la précision et la stabilité, sont malheureusement difficiles à surmonter dans le cas de systèmes non linéaires.

2.2.4 Formalisme pour un modèle linéaire

La programmation d'un modèle linéaire consiste à fixer un certain nombre de coefficients, le nombre de d° de libertés de la liaison et le nombre de variables d'état étant fixés à l'avance (et étant pratiquement limités par la taille du calculateur).

Pour simplifier les opérations de programmation, le modèle linéaire pourra être ramené à un assemblage d'éléments dipolaires, chacun de ceux-ci étant défini par une équation aux différences liant les 2 variables de la liaison dipolaire.

$$av_n + bi_n + cv_{n-1} + di_{n-1} = 0 \quad v(z) = i(z) \frac{b + dz^{-1}}{-(a + cz^{-1})}$$

• La programmation consiste alors à définir à partir d'éléments de ce type un certain réseau, et le doter d'un

nombre de points de branchement égal au nombre de degrés de libertés de la liaison. Ceci suppose que le choix des variables de liaison est tel que la matrice Φ soit diagonale. Il est également nécessaire de fixer un vecteur Y_0 état initial du système.

A partir de ce formalisme, il est possible de créer expérimentalement un fichier de réseaux du même genre pouvant être assemblés suivant des liaisons dipolaires de façon à constituer le modèle. La programmation consiste alors à manipuler des structures déjà élaborées.

On aurait aussi bien pu définir le modèle linéaire à partir d'un circuit à variables continues et chaque élément par son équation différentielle ou sa transformée de Laplace. Ceci complique la compilation qui devra à partir du modèle continu générer un modèle à variables échantillonnées, or cette transformation n'est pas biunivoque et implique certaines approximations que l'utilisateur ne pourrait plus maîtriser simplement (puisqu'elles seraient alors effectuées automatiquement). Il paraît préférable même s'il semble a priori qu'un modèle continu soit plus abordable (ce qui reste à prouver) que l'utilisateur manipule directement des modèles échantillonnés et s'y habitue.

2.2.5 Limitation du modèle linéaire

Pour le problème des manipulations simulées, ces limitations sont évidentes ne serait-ce que parce qu'elles ne peuvent recouvrir qu'un domaine restreint de l'expérience courante.

Si nous nous limitons à la structure du simulateur proposé (p. 20) on peut définir le modèle de la façon suivante :

L'espace des états (esp. de définition de Y) est un espace topologique et le choix d'un modèle consiste alors à décomposer cet espace en zones complémentaires telles qu'à l'intérieur de chacune des zones, on se ramène à un modèle linéaire. Au formalisme proposé pour les modèles linéaires il faut adjoindre pour chaque réseau (composant le modèle) un certain nombre de paramètres topologiques (définition des frontières...).

Remarque :

La structure proposée pour le simulateur permet la généralisation suivante. Au vecteur d'état du modèle, on adjoint un vecteur caractéristique de l'état topologique (paramètres topologiques constants dans le cas précédent). Ceci suppose que l'on décompose l'espace de définition de Y en sous-espaces supplémentaires (dont l'un serait l'espace des vecteurs d'état et l'autre l'espace des paramètres topologiques).

2.3 SYSTEME DE COMMANDE A UN DEGRÉ DE LIBERTÉ

La machine en cours de réalisation au L.C.P.I.M. est une préfiguration des systèmes dont nous avons donné les caractéristiques générales. Son domaine d'utilisation est toutefois limité, du fait qu'il ne possède qu'un seul degré de liberté.

Des mesures préliminaires ont montré que la plage des efforts et vitesses mises en jeu lors de manipulations simples était très étendue ; la réalisation de transducteurs complexes couvrant ces plages avec une précision suffisante nécessite donc une étude préalable de ce problème particulier en ce qui concerne la partie mécanique, c'est-à-dire le servomoteur et les capteurs.

C'est pourquoi nous avons été amenés à concevoir un système élémentaire à une voie de couplage, pour laquelle un compromis acceptable entre les diverses contraintes (dynamique, précision, rapidité) aura été trouvé. Les solutions technologiques retenues après une série d'essais, seront alors exploitées sur des systèmes plus complexes dont le premier possèdera 6 voies de couplages (1 liaison solide).

La conception modulaire de la structure mécanique du transducteur nous permettra de compléter largement les mesures de grandeurs mécaniques mises en jeu lors de manipulations par un opérateur humain, lesquelles étaient nécessairement limitées par l'utilisation de systèmes mécaniques passifs (non programmables) et dont les caractéristiques étaient peu maitrisables.

Nous envisageons enfin d'utiliser le système à une voie de couplage en tant que dispositif de contrôle de synthétiseurs de signaux acoustiques et là s'offre un grand nombre de possibilités.

- commande de synthétiseur analogique,
- commande d'un oscillateur harmonique (voir annexe),
- élaboration de paramètres de contrôles de systèmes de synthèse digitale type MUSIC V (fréquence, amplitude, choix de forme d'ondes, etc...).

LE TRANSDUCTEUR

Le transducteur est constitué par une touche mobile suivant un degré de liberté et présente donc la particularité de ne pas être en liaison forcée avec l'opérateur. La trajectoire de l'extrémité de la touche peut être modifiée par des réglages et grâce à la conception modulaire du mécanisme de transmission entre le servomoteur et la liaison.

Actuellement deux types de montages peuvent être utilisés : le premier permet un déplacement rectiligne de la touche suivant une direction quelconque, le second correspond à une trajectoire quasi circulaire dans un plan vertical (figure 3).

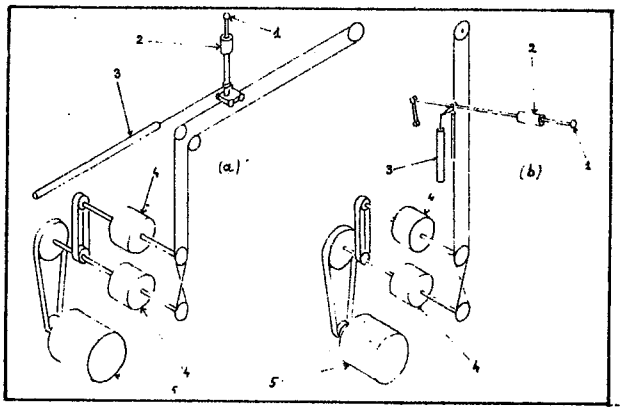


Figure 3 — Deux types de montages :
(a) trajectoire rectiligne
(b) trajectoire quasi circulaire
1 touche mobile — 2 capteur de forces — 3 capteurs de déplacement — 4 coupleurs électromagnétiques — 5 moteur.

LE SERVOMOTEUR

Il utilise deux coupleurs électromagnétiques à poudre, matériel couramment utilisé sur des machines industrielles, machines outils, machines à papier, périphériques d'ordinateur. Les coupleurs électromagnétiques ne per-

mettent pas des performances que l'on pourrait attendre d'un servomécanisme équipé de moteurs hydrauliques, notamment en ce qui concerne le poids et l'encombrement des pièces motrices. Ce problème ne se pose pas pour notre premier projet dans lequel l'unique servomoteur peut être fixe.

Dans le cas de géométries plus complexes, style bras articulés, l'emploi de moteurs hydrauliques simplifie considérablement la conception mécanique de l'ensemble, limitant l'utilisation de câbles, bielles ou tringles, nécessaires sur un mécanisme équipé de coupleurs à poudre.

Les performances d'un servomécanisme équipé de coupleurs électromagnétiques sont toutefois très supérieures à celles obtenues avec des servomoteurs électriques classiques.

L'ensemble servomoteur est donc constitué par deux coupleurs à poudre Jaeger de couple nominal 5 mN dont les cages sont entraînées à vitesse constante. Un jeu de poulies et de courroies permet de choisir 4 vitesses différentes entre 500 et 1450 t/mn. Un volant permet d'amener le moment d'inertie totale en amont des coupleurs à 10^{-2} kg m^2. Le moteur (0,25 ch) ne présente aucune caractéristique particulière sinon d'être silencieux.

L'ensemble mécanique est suffisamment soigné pour n'entraîner qu'un minimum de vibrations (silent-blocs, équilibrage des pièces tournantes, utilisation d'accouplements élastiques et de courroies crantées). Chacun des deux coupleurs entraîne un tambour sur lequel s'enroule un câble d'acier relié au chariot porte touche dans le cas du premier montage, au bras mobile dans le cas du second.

LES CAPTEURS

Capteurs de déplacement : nous utilisons des capteurs de déplacement rectilignes inductifs de grande précision (0,3 %). La fréquence porteuse de 5 kHz permet de couvrir largement la bande passante nécessaire pour les signaux de déplacement.

Capteurs de forces : nous avons étudié un capteur de force à jauges extensiométriques à 3 composantes. Dans le cas d'une trajectoire rectiligne, le choix n'est pas justifié puisque une seule composante est nécessaire. Par contre, dans d'autres cas, l'élaboration de la composante tangentielle à la trajectoire ne peut s'effectuer directement au niveau du capteur que si la tangente à celle-ci occupe une direction constante dans un repère lié au capteur, ce qui dans certains cas peut être réalisé grâce à un mécanisme auxiliaire. Nous avons préféré utiliser un capteur plus complexe et un calculateur auxiliaire élaborant la composante tangentielle à partir des 3 signaux issus de ce capteur ainsi que des signaux de déplacement.

SIMULATION ENVISAGÉE

Nous utilisons un LSI 11 muni de 20 K (1) de mémoire et d'un tiroir d'entrée (sortie analogique à 8 voies d'entrée et 4 de sortie). Nous nous limiterons dans un premier temps à la simulation de mécanismes linéaires et de mécanismes à seuils simples. Après une première phase de mise au point de la partie mécanique du transducteur, nous envisageons d'étudier des modèles de certains aspects mécaniques, instruments traditionnels (glissement d'archet, chocs d'instruments à percussion, etc...).

(1) 20 K mots de 16 bits.

ANNEXE

SYSTEME DE SYNTHESE DIGITALE

Le module de synthèse sonore associé, par l'intermédiaire de l'unité centrale de l'ordinateur (PDP 11) au système d'entrée gestuelle précédemment décrit, peut être considéré comme un premier élément de synthétiseur digital.

Dans un premier temps, il sera utilisé comme élément unique permettant la synthèse de sons très élémentaires, l'importance étant accordée plus au divers contrôles et variations possibles à partir du système d'entrée qu'à la richesse «microscopique» ou microstructurelle de l'évènement sonore autonome. L'extension de ce système consistera en l'adjonction de modules identiques au premier, avec la définition de règles de couplage et de combinaison déduites de son mode de fonctionnement. Le principe du module de base met en œuvre un processus digital simple créant une suite d'échantillons correspondant à une onde acoustique. Il s'agit d'un oscillateur numérique fournissant une onde sinusoïdale amortie échantillonnée. Le choix de ce type de signal a été guidé par plusieurs facteurs.

— **L'analyse de FOURIER** sur laquelle se fonde la synthèse additive, mise en œuvre en synthèse analogique ainsi que dans Music V, implique un partage des caractères de l'évènement sonore, même au niveau le plus élémentaire, en deux classes qui correspondent en fait à la distinction faite par P. SCHAEFFER en «forme» et «matière». On sait qu'en deçà d'une certaine finesse d'analyse, la distinction entre l'enveloppe et la forme d'onde devient problématique : elle repose sur le choix arbitraire d'une fréquence délimitant deux zones : l'une correspondant aux paramètres de hauteur, aux fréquences «acoustiques», l'autre à des variations plus lentes. Il est très difficile dans un son naturel de séparer de manière unique l'enveloppe de l'onde, la forme de la matière.

Pour un son synthétisé, il pourrait être intéressant dans le cadre de ce formalisme, d'expérimenter les deux parties indépendamment l'une de l'autre, d'effectuer une étude sur l'enveloppe de manière isolée, puis sur la matière..., or l'enveloppe n'est pas en elle-même un évènement acoustique, c'est-à-dire que son étude ne peut se faire qu'en l'associant à une «matière» (éventuellement variable), ou bien purement visuellement par des tracés oscilloscopiques ou graphiques. D'autre part, la matière ou la forme d'onde contient elle aussi un côté abstrait par le fait, essentiellement, que sa définition temporelle n'existe pas. Elle nécessite l'intervention d'une enveloppe déterminée pour être expérimentée. Pour les deux parties, l'expérience élémentaire n'est pas acoustique, elle demeure abstraite (elle fait appel en fait à une autre expérimentation, une analyse préalable).

Cette première remarque est, de notre point de vue, de première importance, dans la mesure où il nous semble nécessaire de définir dès le niveau «microscopique» du son, les conditions d'une expérimentation concrète qui mette effectivement en jeu les canaux sensoriels définissant l'expérience globale : le geste et l'ouïe. La sinusoïde amortie permet de ne pas se fonder à la base sur cette séparation abstraite : elle contient, en tant qu'évènement élémentaire toutes les déterminations d'un évènement acoustique accessible à l'expérience sensorielle : elle est définie en durée, en hauteur, en amplitude. De plus, le degré d'élémentarité de l'objet est adapté à celui du dispositif matériel qui permet de le mettre en œuvre.

L'algorithme ci-dessous défini à partir de suites récurrentes d'ordre 2 ne fait appel qu'à quatre mémoires et une combinaison simple (addition, multiplication)

$$U_n = a\,U_{n-1} + b\,U_{n-2}$$

que l'on peut écrire pour la simplicité des expressions

$$U_n = 2\,A\,U_{n-1} - B\,U_{n-2}\,.$$

La suite (U_n) qui correspond en fait à la suite des échantillons fournis au convertisseur de sortie est en effet entièrement déterminée par la donnée des quatre paramètres, A, B, n_0 et n_1 . Moyennant une transformation portant simultanément sur les quatre, on peut les définir en fonction de quatre paramètres acoustiques :

la fréquence	f
l'amplitude	E
le temps d'amortissement	τ
la phase à l'origine	φ .

On a alors :

$$A = \exp\left(-\frac{T_e}{\tau}\right) \cos 2\pi \frac{f}{f_e}$$

$$B = \exp\left(-2\frac{T_e}{\tau}\right)$$

$$U_0 = E \sin \varphi$$

$$U_1 = \exp\left(-\frac{T_e}{\tau}\right) E \sin\left(2\pi\frac{f}{f_e} + \varphi\right)$$

f_e et T_e étant respectivement la fréquence et la période d'échantillonnage.

Le signal analogique correspondant est :

$$u(t) = E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \sin(2\pi ft + \varphi)\,.$$

Si l'on compare ce module au générateur de base de Music V ou à sa version « hardware » telle qu'elle est réalisée déjà dans plusieurs cas (par DI GIUGNIO à l'IRCAM), il faut faire les remarques suivantes :

La première, évidente, concerne la variété des signaux obtenus. L'oscillateur de Music V produit des signaux dont la forme d'onde peut varier dans les proportions que permet sa définition sur 512 échantillons de 14 bits soit en principe 14^{512} formes différentes (ce qui ne signifie pas qu'elles correspondent à 14^{512} formes distinctes à l'audition).

L'oscillateur à suite récurrente ne fournit qu'une forme d'onde : la sinusoïde.

Cependant, le nombre de mémoires mises en jeu est de 512 pour 4 dans le deuxième cas. Pour que la comparaison ait un sens, il faut remarquer cependant que les deux cas correspondent à des processus de structuration différents.

Dans le premier cas, la donnée des 512 échantillons de la forme d'onde correspond à cette structuration qui s'effectue donc en amont de l'utilisation de l'oscillateur.

Dans le deuxième cas, la structuration qui permettra d'obtenir une certaine richesse du son est renvoyée en aval de cette expérience élémentaire.

L'hypothèse principale de la démarche réside ici dans le fait que nous considérons cette expérience comme première et nécessaire pour une accessibilité et une maîtrise plus grande de la richesse structurelle (« microscopique ») du son.

Le développement de cette complexité structurelle des objets sonores simples, indépendamment du contrôle de leur occurence et de leur évolution, s'appuie sur la multiplication des cellules élémentaires tout en conservant les conditions définies précédemment. L'expérimentation est à faire dans ce domaine et pour cette raison, nous ne prétendons aucunement produire d'emblée avec le dispositif élémentaire décrit ici, des sons musicaux. D'ailleurs nous nous garderons bien aussi, au niveau d'expérience qu'impose l'abord de l'ordinateur, de penser que l'esthétique puisse y être « mise en équation ». Ce qui nous semble important est bien plutôt de créer à partir du contexte technologique dont on dispose aujourd'hui, les conditions d'une réelle expérience instrumentale, l'esthétique n'étant pas une valeur en soi, figée mais aussi peut-être l'émanation d'un rapport communicationnel efficace.

Cette expérience instrumentale doit alors être définie en quelque sorte dès la « particule élémentaire » comportant toutes les caractéristiques de l'expérience globale.

Enfin, comme dernière remarque, il était primordial d'envisager dès le départ, la production en temps réel des signaux. Le système mis au point répond d'autant mieux à cette condition qu'il s'appuie sur un processus très simple. Il peut fonctionner actuellement dix fois plus vite qu'en temps réel, ce qui permet d'ores et déjà, d'envisager la duplication des cellules sous la forme d'un multiplexage à partir d'une cellule de base unique.

REMERCIEMENTS

Nous remercions, d'une part, le Ministère de la Culture et de l'Environnement, dont l'aide depuis 1976 a rendu possible ces travaux de recherche, et

d'autre part, Monsieur BUYLE-BODIN, Directeur de l'École Nationale Supérieure d'Électronique et de Radioélectricité de GRENOBLE, établissement qui accueille notre équipe de recherche,

ainsi que Monsieur R. LANCIA, Directeur du Laboratoire et tous les membres du Laboratoire de la Communication Parlée et de l'Instrumentation de Mesure, avec qui nous avons la possibilité de développer activement ce programme de recherche. Par ailleurs, nous sommes reconnaissants à la ville de Grenoble pour l'intérêt qu'elle porte à ce programme.

BIBLIOGRAPHIE

[1] MOLES A. — Théorie de l'Information et perception esthétique. Flammarion Paris 1958.

[2] SCHAEFFER P. — Traité des Objets Musicaux. Seuil 1966.

[3] Cahier «Recherche Musique» N° 2 — INA/GRM 1976.

[4] MATHEWS M.-W — The technology of computer music. M.I.T. Press 1969.

[5] An Introductory Catalogue of Computer Synthesized Sounds — J.C. RISSET. Bell Laboratories, 1969.

[6] The Synthesis of Complex Audio-Spectra by means of frequency modulation — J. CHOWNING — J. Audio. Eng. Stg. Vol. 21 n° 7 — Sept. 1973.

[7] The Electronic Sound Studio of the 1970's — M. MATHEWS — Music and technology — Unesco — La Revue Musicale 1971.

[8] DUBOIS M. — Réalisation de dynamomètres à jauges extensiométriques de grande précision. Mesure - Régulation - Automatismes — Juin 1974.