

Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental

par Claude CADOZ, Annie LUCIANI, Jean-Loup FLORENS*

Résumé

Les travaux présentés dans cet article concernent l'utilisation de l'ordinateur comme outil de création musicale.

La démarche décrite se fonde sur une hypothèse déterminante : la nécessité d'aborder le problème à un niveau élémentaire, très en amont des seuls aspects compositionnels, soit au niveau de l'expérience instrumentale. La mise en œuvre des conditions de cette expérience s'appuie sur une représentation à l'aide de l'ordinateur, de l'instrument considéré comme « objet multi-sensoriel » où sont en cause trois canaux essentiels : le geste, l'ouïe, la vue. Le canal gestuel nécessitant une approche particulière dans la mesure où, à la différence des deux autres, il est simultanément émetteur et récepteur. Une première approche concrète a consisté en la réalisation d'un premier prototype de transducteur gestuel rétroactif (présenté dans cette revue en 1978 [1]). Nous reprenons ici les fondements de cette démarche et présentons deux fonctions du dispositif expérimental global réalisé dans notre laboratoire :

- la fonction transducteur déjà évoquée, qui a fait l'objet d'un second prototype.
- la fonction simulation concrétisée par le système CORDIS qui s'appuie sur une modélisation mécanique, traduite en algorithmes numériques, des constituants de l'instrument.

Abstract :

Man-machine communication is a very decisive point in digital synthesis of sounds used as a musical creation tool. We are concerned here with the instrumental gesture aspect of this problem where gesture is regarded as the most basic form of the relationship. Two complementary axes of study are necessary : 1 - Analysis of gesture in instrument-instrumentalist relationship. An all important class of gestures is based on the energetical exchange between the instrumentist and his instrument. In such a case, the instrumentist receives informations (by touch and dynamical perceptions) which determines his behaviour and his listening. So we have built a special device for sound control, with mechanical feed-back, taking into account the fact that the gesture is simultaneously a transmitter and a receiver channel. 2 - The carrying out of sound synthesis by means of concrete source simulation. The simulation system relies on a first analysis of the instrument as a combination of an exciter structure connected to a vibrating structure. The latter are then decomposed into elementary mechanical components. Algorithmic models for mechanical components then allow a representation by the computer programs that we have elaborated of the main types of phenomena encountered in traditional instruments.

* ACROE : Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression.
Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectrique
23, avenue des Martyrs - 38031 GRENOBLE CEDEX.

1. INTRODUCTION - PRINCIPES et HYPOTHESES

La synthèse numérique directe du son est, depuis la création des programmes MUSIC (4, 4B, 5, etc.) par MATHEWS aux laboratoires de la BELL TELEPHONE, [2] l'utilisation la plus significative et la plus développée de l'ordinateur pour la création sonore. La spectaculaire progression des circuits électroniques numériques a par ailleurs fortement déterminé son évolution sur le point essentiel du temps-réel, qui se traduit aujourd'hui par le développement de systèmes ayant comme base un processeur spécialisé de synthèse directe.

Il faut cependant relever le fait qu'au cours de ce développement les principes fondamentaux initiaux n'ont fait l'objet d'aucune remise en cause et demeurent donc permanents. On peut les caractériser schématiquement par le processus de tabulation numérique des formes d'ondes et d'enveloppes dont la lecture et le traitement dans des conditions variées conduisent à la production du signal sonore.

Le succès de ces principes est évident si l'on adopte comme critères la précision des synthèses, la richesse des événements sonores obtenus et l'intérêt des expériences psychoacoustiques réalisées.

Cependant, ce sont ces critères mêmes qu'il faut considérer comme insuffisants s'il s'agit de poser le problème d'un point de vue fondamental abordant l'ordinateur globalement comme un outil, un moyen de création, lequel n'a évidemment aucun équivalent antérieur.

D'autres considérations importantes doivent alors être prises en compte. L'analyse du rapport homme/machine est une des plûs déterminantes ainsi que celle des processus qui dans l'expérience, ont une incidence sur la genèse des codes et des langages signifiants.

1.1 Limites de la synthèse acoustique comme moyen de création musicale

Nous désignons sous le terme « synthèse acoustique » plutôt que ce qui procède des principes effectifs de la synthèse numérique directe, la démarche qui en découle dont le trait essentiel est qu'elle a pour objet central le signal sonore en soi. Ses pôles sont alors l'analyse et la synthèse selon les termes de l'acoustique : fréquence, spectre, forme d'onde, amplitude, modulation, etc.

Il nous semble que cette démarche, même avec les perfectionnements que l'on peut encore attendre, implique une

limite au développement de l'ordinateur comme outil de création musicale, inhérente à son principe.

Une explication précise serait ici nécessaire car cette assertion ne revêt en rien les caractères d'une évidence. Nous tenterons simplement d'évoquer en quelques points particuliers, en quoi résident, de notre point de vue, les limites de la synthèse acoustique.

La synthèse numérique est une étape fondamentale. En effet, l'analyse acoustique permet la caractérisation totale de tout événement sonore. Symétriquement, la « synthèse acoustique » est un outil total au sens où tout événement sonore peut être théoriquement recréé par ce moyen.

Ce n'est pas cet aspect qui est en cause. En fait, le premier acquis de l'informatique musicale réside bien dans cette preuve formelle que le champ théorique de la synthèse par ordinateur est illimité. Cependant, ceci n'est qu'une étape car le problème de la création musicale ne s'identifie pas au seul pouvoir d'investigation de tout l'univers sonore. En d'autres termes, le problème n'est pas tant de savoir de quoi est fait le son, mais, considérant les événements sonores comme réceptables, de se donner le pouvoir de leur conférer une charge signifiante. La fonction symbolique des sons n'est pas une donnée en soi mais le résultat d'un rapport expérimental dont les racines, pour l'individu et pour le collectif sont à rechercher jusqu'au niveau des expériences sensorielles les plus élémentaires.

L'analyse et la synthèse acoustiques sont des moyens de maîtriser la constitution objective du son mais pas son contenu symbolique.

Notre critique porte alors très précisément sur le fait que l'objet central de la synthèse acoustique soit l'objet sonore en soi et que par là même elle relègue au second plan les aspects du rapport expérimental. Celui-ci doit se définir en premier lieu comme un rapport INSTRUMENTAL.

En d'autres termes ce que nous mettons fondamentalement en cause est la possibilité de créer, dans un contexte où les matériaux ont a priori un caractère d'inouï, au sens éthymologique du terme, puisque produits à l'aide de processus nouveaux échappant à toute expérience antérieure, des structures sonores chargées de sens, sans un certain retour aux conditions de l'expérience instrumentale primitive.

Il est en effet indéniable que l'expérience du compositeur, dans la situation traditionnelle, où il fait appel à un matériau issu d'instruments réels, n'a rien, au départ, d'acousmatique.

Le compositeur traditionnel a une connaissance instrumentale des sons, indissociable de la genèse de ses facultés mêmes d'abstraction, de conception, de création.

Nous disons « connaissance instrumentale » qui ne s'identifie pas à « connaissance d'instrumentiste » : Dans cette connaissance, la pratique éventuelle d'un ou de plusieurs instruments n'est pas nécessairement la plus déterminante. Ce que nous appelons connaissance instrumentale est ce qui résulte d'expériences qui, pour être moins intensément spécialisées, n'en sont pas moins fondamentales. C'est par exemple la simple observation en de nombreuses circonstances d'instrumentistes en action, mais beaucoup plus simplement encore, l'expérience quotidienne, ceci depuis quasiment la naissance, des corps sonores, c'est-à-dire d'objets simples ou complexes de l'environnement, dont la propriété privilégiée est de répondre acoustiquement à des sollicitations physiques actives du sujet.

Dès ce stade, le processus de connaissance est fondé sur la confrontation des comportements sensibles de l'objet, en particulier acoustiques pour l'objet sonore, aux conduites qui lui sont appliquées.

Or, précisément, lorsque le compositeur est placé devant une machine susceptible de lui donner à entendre des événements inouïs, c'est cette expérience qui fait défaut.

Les « chances de survie » de l'événement sonore inouï en tant que signe musical sont alors liées à une seule ligne : celle qui, par la seule écoute acousmatique, peut le rattacher à un événement antérieurement connu.

Nous pensons que cette ligne est mince en regard de la variété potentielle des objets sonores que la génération numérique permet d'envisager.

Le point de vue que nous adoptons alors consiste à considérer l'ordinateur non plus comme un moyen de représenter (au sens originel) des objets sonores, mais comme un moyen de représenter ce qui le produit.

Ce qui signifie en d'autres termes que nous rejetons l'objet sonore comme objet d'étude, pour nous attacher, quitte à limiter le champ d'événements sonores à un domaine plus restreint, à l'instrument dans toutes ses déterminations, c'est-à-dire celles qui posent toutes les conditions de son expérimentation active et sensorielle.

Ce sont ces dernières que nous commencerons par expliciter dans ce qui suit.

1.2 Représentation Multisensorielle de l'instrument

Il convient tout d'abord d'observer quels sont, sur le plan informationnel, les différents canaux en cause dans la situation d'expérimentation instrumentale.

En premier lieu, et dans le prolongement des remarques précédentes, nous mettons en avant deux hypothèses :

- la perception est, à tous les niveaux, un processus actif, essentiellement mental au niveau de l'écoute élaborée, physique au niveau élémentaire lorsqu'elle s'inscrit dans une boucle sensori-motrice où sont étroitement corrélées l'action corporelle ou gestuelle, sa perception propre et la perception de ses effets.
- la perception est en premier lieu globale. L'intégrité de l'objet étant postulée, l'ensemble de ses manifestations constitue un tout, leur distinction selon les canaux sensoriels correspond à un premier recul analytique où, dans le cas du corps sonore, on privilégie le canal acoustique.

La perception globale lie en fait étroitement trois canaux sensoriels principaux : l'ouïe, la vue et ce que nous appellerons dès maintenant « la perception gestuelle » qui recouvre le toucher et les différents aspects proprioceptifs.

En conséquence immédiate, donner au sujet les possibilités de cette expérience instrumentale primitive suppose la mise en œuvre, en termes de configuration informatique, des différents transducteurs capables de supporter chacun de ces trois aspects sensoriels.

Les deux premières fonctions du dispositif répondant au propos de représentation de l'instrument sont alors, d'une part cette fonction transducteur, appliquée aux trois canaux principaux, d'autre part la fonction simulation.

La première correspond essentiellement à une mise en œuvre matérielle de trois périphériques spécialisés :

- périphérique gestuel,
- périphérique sonore,
- périphérique visuel.

La seconde est plus particulièrement logicielle.

Nous aborderons principalement ici, en deux parties distinctes :

- le problème des dispositifs gestuels,
- la simulation, au travers du système CORDIS, dont nous donnerons les bases.

2. LES PÉRIPHÉRIQUES GESTUELS « RÉTROACTIFS »

2.1 Analyse du geste instrumental

Le canal gestuel se distingue des deux autres canaux en cause par le fait qu'il est à double sens : l'émission d'infor-

mation par le geste est de manière indissoluble associée à une perception d'un certain nombre d'informations de formes plus complexes sur les propriétés mécaniques de cet objet : poids, articulations, résistance au déplacement, etc..

Le canal gestuel est à ce titre émetteur et récepteur simultanément. En conséquence immédiate, le transducteur gestuel doit d'emblée être conçu selon cette fonction double.

Nous accorderons une importance privilégiée à cet aspect, et, en particulier, dans les réalisations concrètes, limitées par de nombreuses contraintes technologiques, c'est celui qui nous préoccupera en premier lieu.

On imagine aisément qu'un système unique et général soit, en tout cas dans l'état actuel de la technologie, de réalisation impossible. On est contraint d'emblée d'envisager la conception d'un ensemble de système différenciés et donc, si possible complémentaires. Ceci justifie alors la nécessité d'une caractérisation du champ des comportements gestuels.

Nous donnerons pour commencer quelques points de repère dans le cas du jeu instrumental :

- ce que nous appellerons le geste d'excitation d'une part,
- le geste de modulation d'autre part.

Le geste d'excitation se caractérise par le fait qu'il a un support énergétique. Dans tous les instruments traditionnels (sauf quelques cas particuliers comme l'orgue), le rapport instrumentiste/instrument peut être observé comme une chaîne énergétique simple (c'est-à-dire sans source annexe) où l'instrumentiste est lui-même la source de l'énergie rayonnée acoustiquement par l'instrument. Le geste d'excitation est typiquement celui qui permet cette émission d'énergie de la part de l'instrumentiste vers l'instrument. Il est alors soumis à certaines lois déterminées par les modes possibles de transmission de cette énergie.

Le geste de modulation, à l'opposé s'accompagne généralement d'une faible dépense d'énergie. Il ne tient en fait qu'à l'élaboration du dispositif de rendre cette énergie à la limite nulle. En tout cas lorsqu'elle ne l'est pas, elle ne participe pas, au bout de la chaîne, à l'énergie sonore. Le geste de modulation a pour fonction de modifier certaines caractéristiques qualitatives ou quantitatives de la structure de l'instrument.

Un exemple simple nous permettra d'explicitier cette distinction : dans le jeu du violoniste, la main droite agissant avec l'archet, effectue un geste d'excitation. C'est bien en effet le coup d'archet qui sollicite la corde pour la mettre en vibration. La main gauche, par contre, n'a pour rôle que de modifier la, ou les longueurs des cordes excitées. La structure est ainsi « modulée » et, en liaison, la hauteur du son.

Trois autres critères peuvent être mis en avant, concernant cette fois non plus la fonction du geste, mais sa nature.

2.1.1 Le champ spatial

Il nous semble intéressant de considérer deux situations de jeu opposées, d'une part celle où l'implication du corps est relativement importante (prenons le geste du timbalier à titre d'exemple), d'autre part celle où le geste se développe dans un espace restreint et implique essentiellement la main (le pincement digital d'une corde). Il est bien évident qu'il s'agit de cas limites entre lesquels peuvent être observés de nombreux intermédiaires. Nous réserverons le terme de gestes à « caractère corporel » aux premiers, de gestes à « caractère digital » aux seconds.

L'espace balayé dans le premier cas est aux dimensions du corps humain, dans le second il est plus concentré et pourrait-on dire, par opposition, aux dimensions du corps vibrant.

2.1.2 Les directions d'actions privilégiées

Considérée d'un point de vue purement mécanique, en fonction du nombre de degrés de liberté que présente le

système (doigts-main-poignet-bras-etc.), la diversité des comportements, des trajectoires, est très grande. Cependant, bien que l'analyse mécanique soit nécessaire pour la détermination précise des caractéristiques du système transducteur, il est plus adapté de partir de considérations plus qualitatives et globales. On considérera en effet, que le comportement gestuel se développe selon des axes principaux en nombre limités à partir desquels des variations sont possibles grâce à la souplesse de l'organe. Le problème se simplifie beaucoup par le fait que ces variations n'ont pas toujours un rôle fondamental.

Nous distinguerons alors trois directions d'actions privilégiées :

- *action frontale* : où le fait d'éloigner ou de rapprocher l'objet, établit une sorte de rapport de vis-à-vis et revêt donc un caractère signifiant élémentaire.

- *action verticale* : la signification élémentaire peut être présentée ici comme résultant du rôle de la pesanteur, intervenant en opposition ou comme une accentuation du geste.

- *action latérale* : elle se distingue des deux autres par sa relative neutralité vis-à-vis d'une signification élémentaire de cette nature.

La séparation en ces trois cas n'est, bien sûr, qu'une méthode d'approche, la réalité pourra correspondre à une combinaison de deux d'entre eux ou des trois. Ceci nous semble être cependant un guide intéressant dans la mesure où il autorise une simplification technologique appréciable.

2.1.3 Les modes de manipulation

A nouveau il est possible de séparer deux cas selon que le contact avec l'objet est permanent, ou simplement unilatéral. Dans le premier cas il y a saisie permanente d'un élément qui suivra toutes les évolutions du mouvement (ex : manipulation de l'archet, d'une baguette de percussion, etc.), dans le second, que nous caractérisons donc par l'absence de saisie, l'objet n'est entraîné que dans un espace en général limité et dans un sens privilégié du geste (action sur une touche par exemple).

2.2 Les transducteurs gestuels

2.2.1 Les transducteurs gestuels passifs

Le premier critère introduit permet de prévoir deux catégories de dispositifs :

- *les dispositifs non rétroactifs* dont l'application correspond au cas du geste de modulation.

- *les dispositifs rétroactifs*, nécessaires dans le cas du geste d'excitation.

Nous avons remarqué que le geste de modulation impliquait généralement une dépense d'énergie faible. Considérant alors le cas idéal où elle est nulle, la systématisation est simple : l'échange d'énergie suppose que les deux catégories de variables en cause — force et déplacements — ne soient pas nulles simultanément. En conséquence, deux types de systèmes non rétroactifs sont envisageables : les systèmes capteurs de déplacement (à effort nul), et les systèmes capteurs d'effort (à déplacement nul). La réalisation technique ne pose ici aucun problème particulier, les dispositifs tels que curseurs, « joy sticks », etc., correspondent tout à fait à ce premier type.

Pour le second, la technologie de base est celle des systèmes à jauges de contraintes, qui peuvent être réalisés selon des besoins spécifiques précis avec peu de difficultés.

Nous ne nous attarderons pas sur cette catégorie pour évoquer plus longuement celle des systèmes rétroactifs, qui comme on le prévoit aisément recouvre des procédés et des moyens d'un autre ordre.

2.2.2 Deux prototypes de transducteurs gestuels rétroactifs

Réunir dans un dispositif unique toutes les fonctions du transducteur gestuel le plus général est, comme nous l'avons dit, illusoire.

En second lieu, en maintenant comme prioritaire la fonction du retour rétroactif, c'est la diversité des trajectoires et le nombre de degrés de liberté que nous avons limités, comptant sur une relative faculté d'adaptation de l'opérateur à ces conditions restreintes. Remarquons à ce propos, l'utopie d'une analyse du geste qui ferait totalement abstraction de toute spécificité des objets auxquels il s'applique. Le geste et son champ d'application forment un « dipôle dialectique » et se définissent dans une mesure importante relativement l'un par rapport à l'autre.

Au travers d'une approche nouvelle comme celle qui nous occupe, déterminée par un contexte technologique nouveau, ce sont les directions et les limites de l'adaptation qui se transforment.

Dans les deux systèmes présentés ici la contrainte essentielle se concrétisera par la réduction de l'effet rétroactif à un seul degré de liberté.

Les deux systèmes correspondent à deux cas d'utilisation distincts que nos critères précédents permettent de préciser :

- pour le premier, geste d'ambitus important (50 cm), trajectoire rectiligne horizontale, avec saisie.
- pour le second, geste à caractère « digital » (5 cm), trajectoire rectiligne verticale, sans saisie.

a) le premier prototype

Le premier a été réalisé par J.L. FLORENS en 1978 [3] et se compose d'un « stick » porté par un chariot se déplaçant sur deux guides horizontaux. Un capteur de position à effet inductif permet la détection de l'information de déplacement à chaque instant. Un capteur de force à jauges de contrainte donne l'information relative à l'effort exercé par l'opérateur sur le « stick ».

Le retour d'effort est assuré par un système moteur constitué de deux organes :

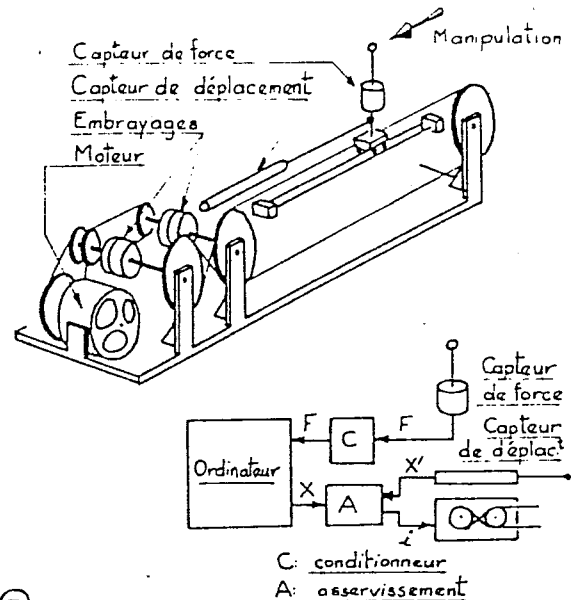
- moteur tournant en permanence à vitesse constante,
- couple d'embrayages électro-dynamiques commandés par une consigne issue du calculateur et régissant la transmission de l'effort du moteur au « stick » en fonction du modèle simulé.

La figure (1a) donne la configuration de ce dispositif.

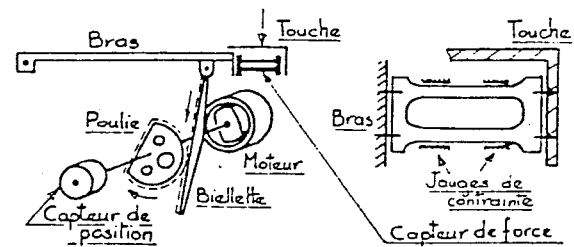
Anticipant sur la description du système de simulation que nous aborderons dans le chapitre suivant, signalons que la simulation de l'instrument se décomposera en deux parties, la simulation de la structure vibrante et celle de ce que nous appellerons « l'excitateur ». C'est cette dernière qui permet le contrôle de l'organe gestuel rétroactif selon des dispositions que nous décrirons alors. Notons cependant les quelques points suivants : dans la mesure où les comportements gestuels, comme les mécanismes apparaissant dans les excitateurs sont à bande passante faible (de 0 à 50 Hertz environ) le système de simulation, qui dans de nombreux cas peut fonctionner en temps réel sans processeur spécial, est directement intégré, ici, dans une boucle d'asservissement. Il reçoit les consignes caractérisant le geste effectué, et élabore la consigne de retour.

Dans le cas particulier de ce premier système, le fonctionnement de l'asservissement est le suivant :

Seul le signal issu du capteur de force est transmis au calculateur. Les modèles simulés se comportent comme des systèmes admettant en entrée une consigne de force et répondant par une sortie de position. La position calculée est alors l'entrée d'un asservissement intégré au transducteur lui-même, tel que l'effort transmis au « stick » ne s'annule que lorsque la consigne donnée par le capteur de position et celle que donne la simulation s'identifient.



a)

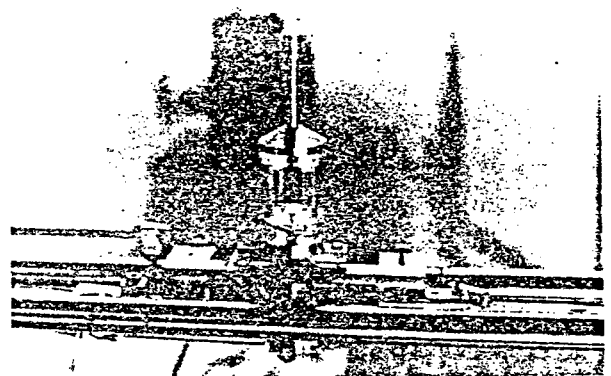


b)

Figure 1

Transducteurs gestuels rétroactifs :
a : 1^{er} prototype (1978)
b : 2^e prototype (1981)

Gestual transducer with mechanical feed-back.
a : 1st prototype (1978)
b : 2nd prototype (1981)



Capteur de force
Transducteur Gestuel Rétroactif N° 1
A.C.R.O.E.-1978

Force sensor
Gestual transducer with mechanical feed-back. 1st prototype
ACROE - 1978.

A l'aide de ce premier prototype nous avons effectué plusieurs simulations dont le but était avant tout d'évaluer ses performances, en fonction des choix adoptés au niveau mécanique.

De fait les simulations se sont limitées à des situations simples :

- simulation d'une percussion entre un élément de masse donnée ; tenu par l'opérateur, et un obstacle fixe déterminé par sa raideur.
- simulation analogue, mais avec un obstacle susceptible de se déplacer de sa position de repos, en fonction d'une liaison élastique avec un point fixe.
- pincement d'une corde, représentée par une cellule vibrante unitaire, à l'aide d'un plectre de raideur contrôlable.
- simulation d'obstacles franchis dans diverses conditions (attraction, répulsion, résistance, rupture, etc.).

Les diverses simulations se font à partir d'un modèle qualitativement déterminé, un certain nombre de coefficients peuvent être donnés au départ, puis modifiés au cours des différents essais, permettant ainsi une recherche des conditions optimales de représentation du modèle idéal. Notons cependant que nous nous sommes bornés, dans cette première série d'essais à une recherche essentiellement qualitative.

Les performances de l'appareil ne nous ont pas permis d'atteindre les conditions de précision correspondant aux situations du jeu instrumental réel.

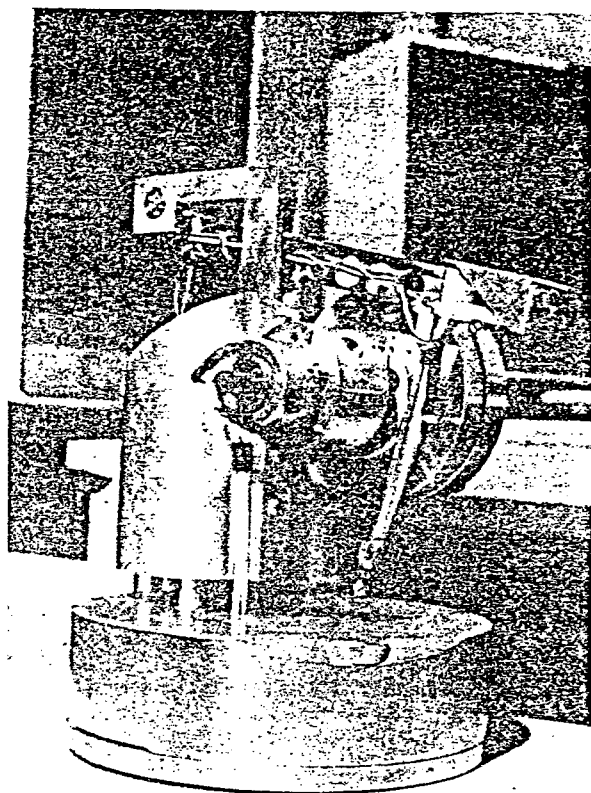
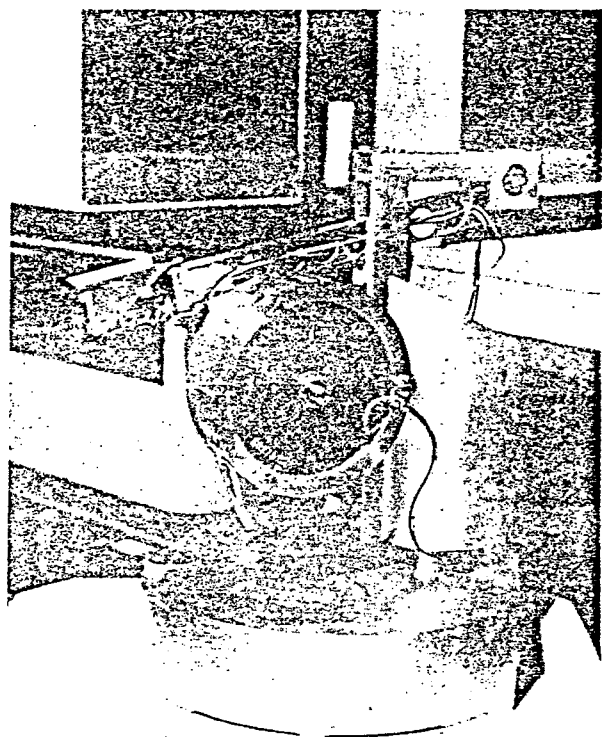
Néanmoins, malgré ces limites, la fonction de rétroaction s'avère démonstrative.

b) le second prototype (figure 1b)

Le second dispositif a été conçu et réalisé pendant l'année 1980. Le choix d'un espace d'évolution plus réduit a permis d'emblée de minimiser les difficultés purement mécaniques.

Il correspond à une touche unique dont les dimensions ont été inspirées de celles de la touche de piano, avec, cependant un enfoncement plus important (environ 5 cm). Il est bien certain que notre objectif n'est pas de reprendre rigoureusement les conditions du jeu sur clavier, bien que ce dernier entre dans une catégorie intéressante en soi. La conception, mécaniquement plus dense, de ce dispositif, et le recours à de nouveaux éléments moteurs et capteurs, lui confèrent d'emblée des performances sans comparaison avec celles du système précédent : absence de vibrations et de bruits dus à la rotation permanente de l'élément moteur, temps de réponse meilleur, précision de la mesure de position de l'ordre de la dizaine de microns, etc.

Cependant, la puissance mise en jeu dans l'élément moteur est également moindre, se pose alors la question des limites des représentations possibles. Du point de vue du retour d'effort, la représentation la plus difficile à effectuer est celle d'un obstacle parfaitement rigide. En effet, l'amplitude de la force transmise peut atteindre, bien que pendant des temps très courts une valeur très importante (de l'ordre de plusieurs centaines de Kgf). Ici se détermine un axe d'expérimentation et de tests concernant « la perception gestuelle » au niveau élémentaire : détermination des seuils de sensibilité aux déplacements, aux variations d'effort, etc.



Transducteur Gestuel Rétroactif « Touche »
 Prototype N° 2
 A.C.R.O.E.-Janvier 1981
Gestual transducer with mechanical feed-back. 2nd prototype
 ACROE - January 1981

Nous n'entrerons pas plus dans le détail à propos de ces deux dispositifs dans la mesure où cette première mise en œuvre a surtout eu comme objectif de poser le problème convenablement et dans son ensemble. Le second prototype constitue le point de départ d'expérimentations essentielles qui porteront successivement sur les perceptions gestuelles seules :

- seuils de perception de déplacements,
- seuils de perception des variations d'effort,
- identification d'objets élémentaires,
- etc.

et sur la corrélation entre perceptions gestuelles et perceptions sonores élémentaires, ainsi que sur la corrélation entre perceptions gestuelles et visuelles élémentaires. Un nombre important d'informations est en effet à extraire de telles situations simples avant de pouvoir aborder le problème du transducteur gestuel sur un plan tout à fait général.

Au cours de cette première partie, nous avons tenté de montrer, partant de la nécessité de prendre en considération ce nouvel aspect du contrôle gestuel, d'une part que le problème pouvait être posé fondamentalement, d'autre part qu'il nécessite le recours à des dispositions technologiques beaucoup plus ardues que les simples dispositifs d'accès jusque là utilisés. Cependant le plus important réside dans la démarche adoptée au cours de cette approche. En effet, notre problème n'est pas la représentation réaliste, non pas que nous la considérons comme dénuée d'intérêt en soi, mais parce que nous disposons d'un outil, d'un système matériel qui, pour « tout puissant » qu'on le présente parfois, a ses propres limites ; nous devons tenter de déjouer ces limites plutôt que de les transgresser.

L'investigation qui nous semble la plus riche est alors, pour cette seule question des accès, celle qui pose le principe d'une symbolisation du rapport geste/instrument. Elle implique une réduction de l'objet tout en essayant de préserver ses caractéristiques jugées déterminantes.

3. LE SYSTÈME DE SIMULATION - CORDIS

Tablant sur l'efficacité de la synthèse pour la production des sons, on pourrait envisager l'usage pur et simple des dispositifs rétroactifs comme systèmes d'accès des processeurs temps réel existants.

Bien que ceci semble réalisable, il faudrait assumer l'indéquation entre les paramètres concrets du geste et les paramètres de contrôle propres à la synthèse acoustique. Il faudrait mettre alors spécialement en jeu les moyens de contrôle des transducteurs avec un système particulier et distinct de celui de la synthèse sonore. Entre les dispositifs de l'instrument correspondant à ce que nous avons appelé l'excitateur et ceux qui constituent la structure vibrante, il n'existe qu'une différence de nature qui ne justifie pas le recours à deux algorithmiques distinctes :

- les premiers sont « lents » et non vibratoires,
- les seconds « rapides » (bandes passante acoustique) et vibratoires.

Mais les processus mécaniques, sont fondés sur les mêmes éléments. Cette identité se traduira directement au niveau algorithmique ; aussi le système de simulation constitue un tout, la distinction entre excitateur et structure vibrante, bien qu'elle implique, à terme, une séparation matérielle est interne au système général.

Nous avons envisagé la conception du système CORDIS non pas comme un dispositif de synthèse isolé mais en tenant compte d'un contexte expérimental dans lequel il doit s'insérer.

De ce fait, au premier niveau, cette attitude a impliqué trois approches distinctes et dépendantes :

- analyse et modélisation des mécanismes instrumentaux,
- traduction des fonctions mécaniques de base en un SYSTÈME d'algorithmes élémentaires,
- constitution d'un langage cohérent permettant, par la description de l'instrument selon ses fonctions mécaniques, la mise en œuvre du calcul.

Le système CORDIS a fait l'objet d'une première réalisation (C. CADOZ 1979 [4]). Nous présentons ici les principes de base de la modélisation et leur traduction algorithmique.

3.1 Analyse mécanique des dispositifs instrumentaux

Reprenons en premier lieu la distinction « macroscopique » en mécanisme excitateur et structure vibrante.

De fait, cette distinction pose trois aspects à analyser : chacune des deux parties, d'une part, la jonction spécifique entre elles d'autre part. A propos de la structure vibrante, l'observation rapide du cas des instruments les plus courants nous fournira des points de repère. Les catégories de corps vibrants essentielles sont :

- les cordes,
- les colonnes d'air,
- les lames solides ou fluides,
- les membranes,
- les volumes solides ou fluides,

ces divers éléments sont en général associées à des résonateurs dont il faut remarquer que, s'ils sont le plus souvent analysés comme des éléments passifs intervenant pour modifier la vibration de base, ils sont tout aussi bien constitués de volumes, surfaces, etc. Nous les considérons comme parties intégrantes de la structure vibrante.

Afin d'aller d'emblée au général, nous nous représenterons la structure vibrante comme réductible dans tous les cas à l'un, ou à un assemblage des trois éléments suivants :

- la ligne vibrante,
- la surface vibrante,
- le volume vibrant.

Ce sont des caractéristiques qualitatives (de forme) et quantitatives (la nature des matériaux, réductible à un ensemble de paramètres) qui apportent toute la diversité observable dans les instruments connus.

L'excitateur adopte des formes très variées. Il peut être réduit au point d'être quasiment inexistant, dans le cas des cordes pincées manuellement, par exemple, ou au contraire très élaboré dans le cas du piano.

Donnons, simplement pour nous situer, quelques exemples d'excitateurs : pour les instruments à cordes : le mécanisme du piano, l'archet, le plectre, le mécanisme du clavier, etc. Pour les instruments à vents : le flux d'air canalisé dans les embouchures de formes diverses... Pour les instruments à percussion : les baguettes et mailloches, etc.

La liaison excitateur/structure vibrante détermine la nature de l'échange énergétique entre les deux organes.

Elle est conditionnée par l'opposition des comportements de l'un et de l'autre (continu et vibratoire).

Nous avons considéré quatre modes clés pour cet échange, regroupés en deux types :

- échange instantané,
- échange étalé.

Dans le premier, le geste prend fin au moment précis où la structure vibrante entre en action, c'est-à-dire au moment où le son se manifeste. La communication de l'énergie de l'excitateur à la structure vibrante a lieu quasiment instantanément.

Les deux modes complémentaires sont alors ce que nous désignerons par la percussion, d'une part, le pincement de l'autre.

Dans la percussion, le transfert d'énergie est dynamique et résulte d'un choc. Dans le pincement, la structure vibrante est déplacée de sa position de repos dans un geste quasi statique, puis, à partir de cet état, livrée à elle-même.

Dans le second type, le geste et l'émission du son sont essentiellement simultanés.

Nous avons isolé ici le cas type du frottement d'archet. Pris comme modèle, il peut être retrouvé dans d'autres situations que nous regrouperons sous le terme d'oscillations entretenues.

Enfin les autres cas d'entretiens continus peuvent être très divers. Le recours à un modèle unique est ici difficile. Nous donnerons simplement comme exemple concret le frottement d'un corps sonore quelconque à l'aide d'un objet aux propriétés moins spécifiques que le crin colophané.

3.1.1 Modélisation de la structure vibrante

Nous partons de la caractérisation précédente qui nous permet de nous attacher aux éléments de réduction principaux : la ligne, la surface, le volume.

Notre modélisation repose sur le choix initial de trois éléments constituant une base possible des systèmes qui peuvent être décrits par des équations différentielles linéaires : masse, élément de raideur, élément de frottement.

Le traitement numérique, comme on le sait, impose, d'une manière générale la discrétisation de toutes les variables en jeu. L'échantillonnage temporel constitue le contexte inévitable en synthèse numérique, quelle que soit la méthode envisagée. Ce fait se traduit directement au niveau de la mise en algorithmes. La discrétisation spatiale, par contre, qui s'avère également indispensable, intervient nécessairement dès le niveau de la modélisation.

La discrétisation spatiale constitue la seconde caractéristique du système que nous allons développer. Les éléments constitutifs sont alors la masse ponctuelle, l'élément de rappel et l'élément de frottement.

3.1.1.1 La ligne vibrante

a) description de la modélisation

La modélisation d'une corde vibrante est relativement complexe : il faudrait tenir compte, dans le cas général, d'au moins trois types de déformations : transversale, longitudinale, en rotation. On peut simplifier de manière appréciable le problème en considérant qu'il n'y a pas de couplage mécanique entre chacun des trois degrés de liberté. On peut se ramener ainsi à l'étude séparée de chaque type de vibrations : une approche de la corde réelle pourra être obtenue en juxtaposant trois modèles unidimensionnels, différenciés par leurs paramètres.

Le modèle théorique que nous prenons comme référence est alors une ligne possédant un seul degré de déformation et une direction de propagation. La discrétisation consiste à introduire un certain nombre de points matériels possédant une direction unique de déplacement, indépendante a priori de la direction de propagation : figure (2a).

Nous représentons, par simple convention, la direction de propagation par l'axe oP et les axes de déplacement par oX_i , oX_j ,..., perpendiculaire à oP .

Remarquons que les déplacements sur les axes oX auront une signification réelle, tandis que les distances sur l'axe oP sont arbitraires, et n'auront une signification pratique que si nous définissons une période d'échantillonnage spatiale.

Les caractéristiques mécaniques de la ligne continue, déterminant les modes de vibration sont : sa masse, sa longueur, sa tension, les coefficients de perte par frottements dans l'air et internes à la matière.

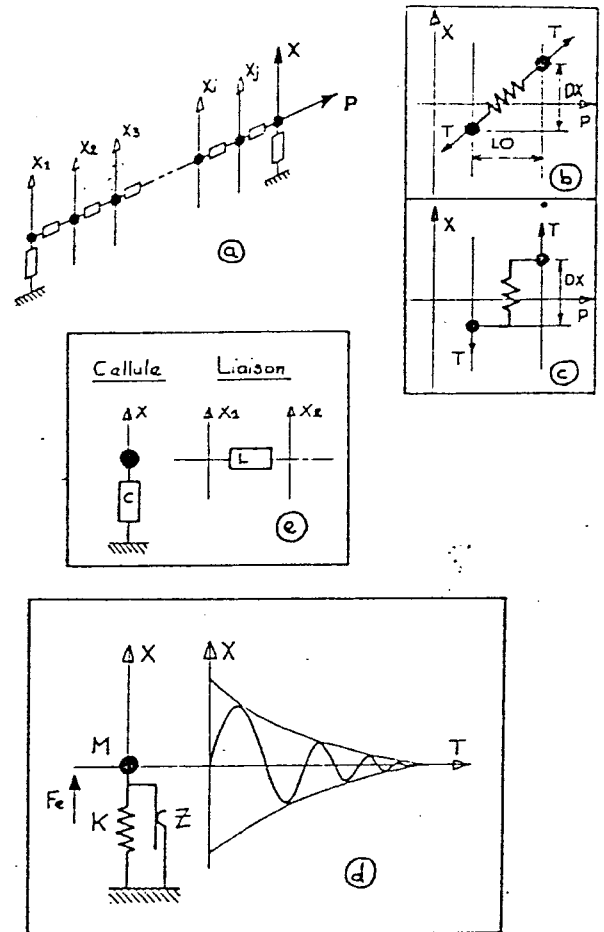


Figure 2

a : ligne vibrante
b : liaison bidimensionnelle
c : liaison unidimensionnelle
d : cellule
e : symboles graphiques

a : vibrating string
b : bidimensional link
c : unidimensional link
d : « cellule »
e : graphic symbols.

La correspondance entre la masse de la ligne et celle des points matériels est simple. la valeur des dernières est égale à la masse de la ligne divisée par le nombre de points.

Pour les autres caractéristiques, le problème est plus délicat et suppose clairement définie la représentation des liaisons entre les points consécutifs.

Signalons que le modèle que nous adoptons ici est en de nombreux points semblable à celui employé par P.M. RUIZ (P.M. RUIZ - 1969 [5]) pour sa simulation des cordes vibrantes par ordinateur. Cependant P.M. RUIZ s'est surtout préoccupé de mettre en évidence la correspondance avec la corde réelle au niveau des phénomènes de propagation, sans relever le fait que le recours à un modèle discontinu contient deux sources d'écart :

- le nombre des composantes sinusoïdales, égal au nombre de points mis en œuvre, est limité,
- le rapport des fréquences des composantes obtenues n'est harmonique que lorsque ce nombre devient très grand.

Notre modélisation comportera ces mêmes sources d'écart mais nous adopterons une attitude spécifique vis-à-vis de ce problème.

Poursuivant la discrétisation, il faudrait en toute rigueur faire intervenir, pour représenter l'élasticité de la ligne, entre

chaque point matériel, un élément de rappel actif dans la direction définie par les deux points consécutifs : figure (2b).

L'élément R a ici une définition bidimensionnelle (P, X), qui impliquerait, dans les algorithmes un calcul lourd (calcul de distances dans le plan). Une simplification importante apparaît si l'on considère un couplage où n'interviennent que les positions relatives des éléments dans la direction X.

On peut représenter cette liaison par le schéma figure 2c.

Il convient alors de montrer en quoi les deux situations sont différentes. Supposant, en première approximation que, dans le premier cas, les points se déplacent perpendiculairement à la direction oP, la tension T, due à la participation du ressort R a pour expression :

$$T = K \cdot DL \quad K : \text{constante du ressort}$$

avec $DL : \text{élongation du ressort}$

$$(DL + LO)^2 = DX^2 + LO^2$$

soit : $DL \approx DX^2/2LO$

La composante Tx, perpendiculaire à oP, est égale, en supposant DL faible à :

$$Tx = T \cdot DX/LO$$

soit : $Tx = K \cdot DX \cdot DX^2/2LO^2$

alors que dans le second cas elle s'écrit simplement :

$$Tx = K \cdot DX$$

L'écart introduit entre le modèle de référence et cette solution simplifiée apparaît directement dans ce rapide calcul. On pourrait envisager, pour une meilleure approche, tout en conservant une seule variable (X) d'utiliser une loi de la forme :

$$Tx = K' \cdot DX^3$$

Nous écarterons cette solution, tout au moins jusqu'au moment où notre modèle simple se révélera trop limitatif.

Notre ligne vibrante, pour être complétée, doit maintenant intégrer les éléments de perte par frottement :

- le frottement interne peut être représenté par un élément placé en parallèle avec le ressort K,
- le frottement dans l'air par un élément de même nature introduit entre chaque point matériel et une origine fixe sur les axes oX.

L'élément de frottement est défini simplement par la relation :

$$F_f = Z \cdot VR$$

Z : constante de frottement
VR : vitesse relative des deux points
Ff : force de frottement.

Enfin, la liaison des points extrêmes à une origine fixe, par des ressorts et frottements, déterminera les « conditions aux extrémités » de notre ligne : ligne ouverte, ligne fermée, impédance adaptée...

Nous avons déterminé par le calcul (T. BERBEYRIAN 1979 [6]), le comportement d'un tel système, dans le cas correspondant à une ligne homogène (constantes de raideurs égales, masses égales, constantes de frottement égales).

Sur le plan purement qualitatif, on obtient naturellement les aspects fondamentaux : vibration complexe, propagation, réflexions aux extrémités. Quantitativement, les écarts sont essentiellement ceux que l'on a évoqués plus haut. L'attitude vis à vis de ce point est de même nature que celle que nous avons adoptée pour les dispositifs gestuels. En effet, ici non plus, notre propos n'est pas de simuler de manière réaliste, au sens des mesures physiques, les éléments vibrants. Nous accorderons plus d'importance, dans un pre-

mier temps, à un équilibre judicieux entre ce qui, dans l'évènement sonore procède des différentes manières de le provoquer et de le moduler, et sa microstructure intrinsèque, qu'à cette dernière étudiée isolément. Ce qui subsiste dans notre représentation peut s'analyser au niveau d'une part des dispositions qui permettent l'expérimentation concrète, d'autre part à partir d'un simple critère de « richesse » de la microstructure sonore relié quantitativement à la complexité de la structure vibrante. L'étude quantitative de la composition harmonique n'est cependant pas exclue des possibilités de cette approche, nous ne la considérons pas comme nécessairement préalable, du moins sur un plan analytique précédant l'expérimentation.

b) cas limite d'une ligne à un seul élément

Dans ce système, le plus petit élément vibratoire est une « cellule » constituée des trois éléments de base dont le schéma peut être donné par la figure 2d.

Le déplacement de la masse M, soumise à une impulsion de force Fe est une sinusoïde amortie dont les paramètres sont reliés aux constantes mécaniques K, M, Z ainsi qu'à l'amplitude de l'excitation.

On remarquera que ce plus petit élément répond aux critères « concrets » que nous nous sommes fixés. En effet il y a dès ce niveau une relation complète, aussi simple soit-elle, entre excitation et évènement sonore. Ce dernier est entièrement déterminé. On ne peut pas faire la même remarque pour ce qui concerne l'oscillateur ou le générateur d'enveloppe de la synthèse acoustique, qui n'ont de détermination sensible que dans une nécessaire combinaison. Cette cellule peut être prise comme unité pour la mesure de ce que nous avons appelé plus haut la complexité de la structure. Remarquons qu'une combinaison d'éléments de cette nature (par couplages divers...) ne donne pas accès directement à une combinaison des caractères acoustiques propres à chaque élément, c'est en ce sens que notre synthèse n'est pas une synthèse acoustique.

Cette cellule constitue la particule élémentaire du système de représentation de la structure vibrante.

En lui associant un module élémentaire de couplage regroupant l'élasticité et le frottement, on dispose alors d'un système permettant de constituer des objets vibrants selon un premier niveau de généralité.

Pour la suite, nous représentons ces deux éléments par des symboles graphiques : figure 2e.

Au travers de plusieurs exemples, on montrera maintenant les possibilités et les limites de ce système.

Ces dernières sont facilement prévisibles : nous ne considérons en effet que des processus linéaires, et, par ailleurs chaque élément ne possède qu'un seul degré de liberté. On peut cependant, sans autres dispositions donner un caractère multidimensionnel aux structures.

c) approche d'une corde vibrante réelle

Considérons trois lignes vibrantes indépendantes. On peut, par construction les exciter par trois composantes de force (à condition de disposer d'un capteur à trois degrés de liberté), correspondant respectivement à une excitation transversale, longitudinale, et en rotation. Les paramètres de chacune des lignes peuvent être choisis de façon à restituer les conditions quantitatives propres à chaque dimension de vibration d'une corde réelle. Enfin, on peut restituer, au moins qualitativement, le couplage éventuel entre chaque direction de vibration par une liaison établie entre plusieurs points appartenant aux lignes différentes. Le schéma en figure 3a, montre le principe d'une telle simulation.

3.1.1.2 Représentation des surfaces et des volumes

a) surfaces

En toute rigueur, ne considérant que la discrétisation spatiale, chaque élément d'une surface devrait être représenté par un élément matériel relié à au moins quatre éléments adjacents de même nature, possédant chacun six degrés de liberté.

Il faudrait alors pour chaque cellule, six variables de position et pour les éléments de liaison entre elles, un calcul de distance dans l'espace. On imagine aisément la complexité des algorithmes qui en résulteraient. On peut alors généraliser la méthode adoptée pour la ligne seule, et ne considérer pour la cellule qu'une variable de déplacement (que nous représenterons toujours dans la direction verticale) et pour les liaisons un effet ne résultant que des différences de hauteurs entre points consécutifs. On peut alors construire un réseau à deux dimensions comme le montre la figure 3b.

b) volumes

Le même principe peut être appliqué pour donner une représentation spatiale approchée. Reprenant les mêmes symboles graphiques que pour le cas précédent on obtiendrait le réseau à trois dimensions : figure 3c.

Nous nous limitons, dans ce premier système, à ces dispositions pour la représentation des structures vibrantes. On peut résumer les directions d'investigation possibles dans ce cadre aux aspects suivants : quantitativement le critère déterminant sera celui de la complexité, mesurée en nombre de points matériels mis en œuvre, avec comme corollaire la richesse spectrale de l'évènement sonore.

Qualitativement, on disposera de deux latitudes :

- le choix des différents paramètres mécaniques associés à chaque élément,
- le choix de l'organisation en réseau.

Du point de vue spectral, ces deux dispositions déterminent les valeurs relatives des fréquences et des amplitudes des composantes.

Cependant le mode opératoire consistera plus en une approche globale où l'on tentera d'établir une relation entre la « géométrie » de la structure et ce qui, dans le timbre obtenu, est indépendant du mode d'excitation. Le son final n'est en effet que partiellement déterminé par la définition de la structure vibrante. La « facture » du son dépend du mode d'excitation pour lequel interviennent la nature de la liaison exciteur/structure vibrante et celle de l'exciteur proprement dit.

3.1.2 Modélisation de l'excitateur

La même analyse mécanique est adoptée, avec cependant deux particularités qui la distinguent de celle du corps vibrant.

L'élément matériel minimal était précédemment la cellule du second ordre.

Le caractère non vibratoire de l'excitateur nous conduit alors simplement à reprendre, en amont de cet élément les premiers constituants élémentaires introduits : la masse ponctuelle, l'élasticité et le frottement.

L'excitateur, par ailleurs, se caractérise par certains comportements discontinus. Le processus d'échappement entre la touche et le marteau, dans le piano, est un exemple typique. Il faut alors introduire une nouvelle catégorie d'éléments permettant de rendre compte de cas particuliers de discontinuités.

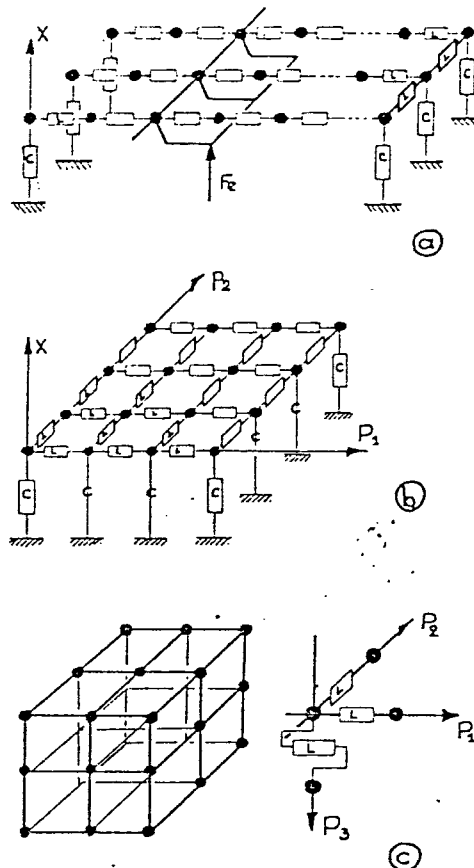


Figure 3
a : approche d'une corde réelle
b : surface vibrante
c : volume vibrant

a : an approach of a real vibrating string
b : vibrating surface
c : vibrating volume

Pour l'excitateur comme pour la structure vibrante, la « spatialité » effective des constituants implique un ordre de complexité important des calculs numériques. Aussi nous adoptons le même artifice que précédemment pour obtenir, le cas échéant, une pseudo spatialité.

Dans la mesure où la représentation de la liaison exciteur/structure vibrante fera également appel à des dispositifs discontinus, et où d'autre part, le problème peut être entièrement ramené au niveau des liaisons entre éléments matériels, nous aborderons immédiatement le dernier point : la représentation de la jonction.

3.1.3 Modélisation de la jonction exciteur/structure vibrante

Nous introduirons les dispositions générales caractéristiques du « sous-système » propre à la représentation de ces liaisons discontinues en présentant quelques solutions particulières pour les quatre cas types que nous avons pris en compte :

- la percussion,
- le pincement,
- l'oscillation entretenue,
- le frottement,

Soit X_1 et X_2 les deux points appartenant respectivement à l'excitateur et à la structure vibrante, entre lesquels on veut établir une liaison particulière.

On considère alors les deux axes X_1 et X_2 : figure 4a.

D'une manière générale, la liaison sera assurée par l'élément banal (ressort et frottement en parallèle) qui pourra présenter plusieurs états caractérisés par les valeurs de constantes K et Z . Si K et Z sont nulles simultanément on obtiendra l'état type de « non liaison ». Le passage dans un état donné est déterminé par un certain nombre de conditions sur les variables $X1$ et $X2$ en fonction de l'état précédent.

a) La percussion

La percussion fait appel au dispositif le plus simple dans cette approche. La liaison est « unilatérale » et manifeste deux états : liaison établie et liaison rompue. La condition s'exprime directement dans la comparaison de $X1$ et $X2$. Par exemple :

$$\begin{aligned} X1 &\geq X2 \Rightarrow \text{liaison} \\ X1 &< X2 &\Rightarrow \text{non liaison} \end{aligned}$$

On aura naturellement la situation symétrique en inversant le rôle de $X1$ et $X2$.

Remarque : la liaison entre les deux éléments matériels au moment du choc fait intervenir un coefficient d'élasticité. Ceci correspond bien à la situation réelle. Cependant dans cette dernière, ce coefficient résulte des caractéristiques combinées de l'un et de l'autre des deux éléments en contact. Ici nous l'attribuons à un troisième élément (la liaison), indépendant des deux autres. L'intérêt immédiat réside en une diminution du nombre de paramètres à définir sans que le principe en soit altéré. Ceci permet l'étude de la liaison en soi, indépendamment de ce qui est lié.

b) le pincement

Plusieurs méthodes sont envisageables. Nous donnerons deux exemples correspondant aux plus simples.

1) Le point $X1$ entraîne le point $X2$ à partir d'une position relative donnée, prenons par exemple pour $X1 >$ ou $= X2$.

Au delà d'une certaine hauteur H de $X2$ la liaison est rompue de sorte que le système lié à $X2$ évolue selon ses modes propres.

On retrouve les conditions initiales lorsque d'une part $X2$ est inférieur à H , d'autre part $X1$ inférieur à $X2$.

H constitue le paramètre de contrôle extérieur caractéristique de cette liaison.

On peut caractériser le dispositif par le graphe figure 4b.

On voit ici que la vibration du système 2, pour peu que le déplacement de $X1$ soit relativement lent (quasi statique), est entièrement déterminée par les conditions initiales : vitesse nulle, élongation initiale égale à H .

Les latitudes de variation pour l'excitation ne résident que dans une variation de la vitesse de $X1$ pendant l'entraînement.

Un dispositif plus élaboré peut consister à substituer à la condition $X2 > H$, une condition portant sur la distance relative $X2 - X1$: soit alors le paramètre L , et la seconde condition : $X1 - X2 > L$.

Le graphe devient : figure 4c.

Avec un déplacement quasi statique de $X1$ on voit alors que l'élongation de $X2$ au moment du décrochage dépend de la raideur globale du système 2 vu du point $X2$. Contrairement au système précédent, l'énergie potentielle (toujours en supposant le déplacement de $X1$ quasi statique) est indépendante de la structure vibrante, et ne dépend que des caractéristiques de la liaison.

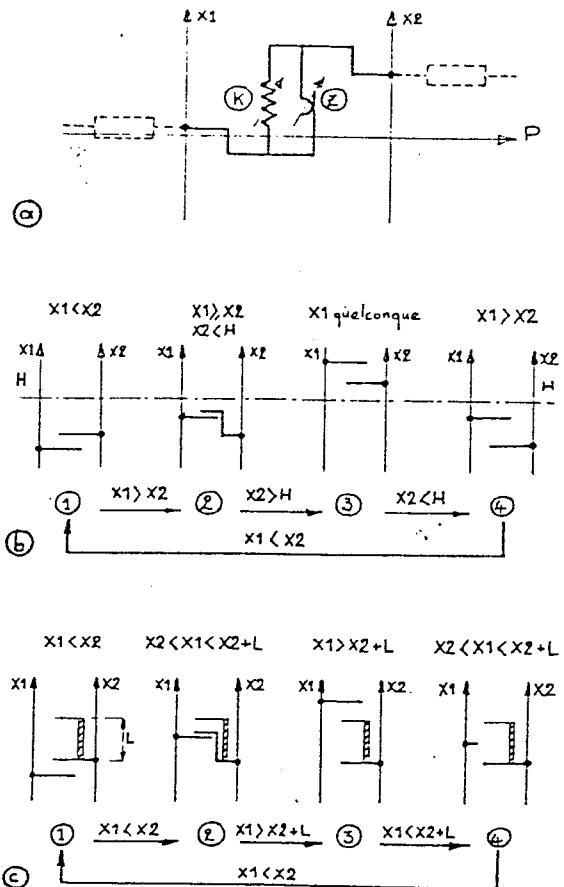


Figure 4
Liaison conditionnelle
a : liaison conditionnelle
b : « échappement »
c : « pincement »

Conditional links
a : conditional link
b : « escapment »
c : « plucking »

c) l'oscillation entretenue

Les modèles peuvent être très diversifiés pour ce cas particulier d'entretien permanent. Nous donnerons à titre d'exemple un modèle simple permettant d'approcher le frottement d'archet. Remarquons incidemment qu'il ne s'agit pas d'une modélisation de la vibration des cordes frottées, mais d'une approche physique du phénomène concret au contact du crin colophané et de la corde.

En fonction de son appartenance à l'excitateur, le point $X1$ est soumis à un déplacement dont le sens peut être considéré comme constant dans une plage de temps importante vis à vis des variations de $X2$.

Ce dernier par contre, appartenant à la structure vibrante, aura, quelle que soit sa forme précise, un mouvement alternatif, donc avec des changements de sens fréquents.

Il suffit alors, dans le principe, pour que le système 2 reçoive de l'énergie, que la liaison entre $X1$ et $X2$ soit telle que la force appliquée à $X2$ soit de même sens que son déplacement.

Une approche de cette situation peut être obtenue en considérant deux états pour la liaison par frottement visqueux lorsque la vitesse relative de $X1$ par rapport à $X2$ est inférieure à une certaine valeur.

ricure à une vitesse seuil V_s , liaison rompue lorsqu'elle est supérieure à cette vitesse. On peut démontrer que le système 2 reçoit alors de la part du système 1 une énergie qui dépend de la vitesse X_1 , et que l'oscillation atteint une amplitude maximum dépendant de cette vitesse.

Ce modèle est le plus rudimentaire que l'on puisse donner pour la liaison archet/corde, l'analyse des phénomènes pour une représentation plus satisfaisante est à poursuivre. Celle que nous venons de donner présente cependant les premiers caractères essentiels sur le plan de la relation énergétique entre le geste et la vibration.

Le « sous-système » évoqué plus haut doit alors permettre la représentation d'un certain nombre de situations qui, comme on le voit à partir de ces premiers exemples peuvent être assez diversifiées.

On peut s'arrêter cependant sur un dispositif relativement général en considérant les aspects essentiels introduits au début du chapitre :

- la liaison présente plusieurs états conditionnels définis par les valeurs des coefficients K et Z .
- les conditions s'expriment à partir des variables X_1 et X_2 et de paramètres caractéristiques.

Ces conditions peuvent porter sur :

- les valeurs de X_1 et de X_2 séparément,
- la valeur de $(X_1 - X_2)$,
- le signe de $(X_1 - X_2)$,
- les variations de X_1 et X_2 , de $(X_1 - X_2)$,
- etc...

d) le frottement

Nous entendons cette fois par frottement, sans autre précision, le cas très général où l'on obtient une vibration de la structure vibrante par une excitation continue mais dont la loi n'est pas aussi régulière et spécifique que dans le frottement visqueux simple ou même dans le frottement d'archet.

On peut évoquer les frottements « rugueux » qui se caractérisent par une irrégularité de la liaison entre les deux éléments en cause. Les paramètres K et Z pouvant alors être des fonctions aléatoires des variables X_1 et X_2 . La mise en œuvre ne pose pas de problèmes de principe.

3.2 Algorithmes du système CORDIS

Le système d'algorithmes est la traduction en processus de calculs numériques de chacun des éléments définis précédemment. Il doit répondre à des conditions bien particulières :

- représentation fidèle des modèles considérés,
- modularité identique à celle des éléments de base introduits,
- optimisation des temps de calcul.

La principale difficulté provient alors de l'aspect contradictoire que peuvent présenter ces conditions.

Nous commencerons par les algorithmes attachés aux éléments simples, masse ponctuelle, ressort et frottement visqueux.

3.2.1 Masse ponctuelle

Le calcul doit déterminer le comportement d'un point matériel soumis à une action extérieure.

La relation entre le système interne (la masse) et le système extérieur se traduit par l'évolution corrélée des deux variables : force et position.

On dispose alors de deux manières duales de poser le problème :

- Considérant l'algorithme comme un dispositif à une entrée et une sortie, on peut prendre la variable de force comme entrée, la réponse du système est alors son évolution en position.

On peut symétriquement imposer la position (ou la vitesse) et considérer en sortie la force opposée en réponse au système extérieur.

Les deux approches sont équivalentes, nous avons adopté la convention suivante :

- Les éléments comportant une masse, appelés alors d'une manière générale « éléments matériels » seront « attachés » en force et fourniront une réponse de position. Les divers éléments de liaison seront décrits selon le mode dual. Ceci permet d'emblée une systématisation de la combinatoire élémentaire.

Nous reviendrons dans le paragraphe suivant sur ce point.

Le calcul relatif à la masse doit alors, pour une valeur de la force à chaque instant, fournir une valeur correspondant à sa position.

On le détermine très simplement par une transposition dans le contexte de discrétisation temporelle, de la relation fondamentale de la dynamique :

$$F(t) = M \cdot X''(t)$$

F : force appliquée à la masse,
 M : masse,
 X'' : accélération

soit, en prenant $t = n \cdot T$, pour représenter la discrétisation temporelle, et $T = 1$:

$$F(n) = M \cdot X''(n)$$

$F(n)$ est la valeur de la force appliquée à chaque instant d'échantillonnage n .

$X''(n)$ peut être déduite des variations de $X(n)$, position de la masse à chaque instant.

On peut écrire :

$$X'(n) = X(n) - X(n-1)$$

qui est une approximation simple de la valeur de la vitesse à l'instant n .

On obtient alors :

$$X''(n) = X'(n) - X'(n-1)$$

soit :

$$X''(n) = X(n) + 2X(n-1) - X(n-2)$$

d'où :

$$F(n) = M (X(n) + 2X(n-1) - X(n-2))$$

et :

$$X(n) = \frac{F(n)}{M} - 2X(n-1) + X(n-2)$$

Cette dernière expression est alors l'algorithme représentant les évolutions de la masse M soumise à une force extérieure F .

Le calcul montre que les approximations introduites dans les expressions de X' et X'' n'ont pas d'incidence appréciable sur la nature des réponses aux différentes excitations types (T. BERBEYRIAN 1979).

3.2.2 Ressort et frottement

Soient $X_1(n)$ et $X_2(n)$ les positions respectives de deux éléments matériels M_1 et M_2 liés par un ressort ou un frottement.

Soient $F1(n)$ et $F2(n)$ les forces, de modules identiques et de sens opposés, appliquées respectivement par l'élément de liaison à $M1$ et à $M2$, à l'instant n .

Le ressort fait intervenir un coefficient de raideur K , de telle façon que :

$$Fr2(n) = K \cdot (X1(n) - X2(n))$$

et

$$- Fr1(n) = Fr2(n)$$

Ces deux expressions simples définissent l'algorithme du ressort.

Pour le frottement, la force dépend de la vitesse relative de $M1$ et $M2$:

$$Ff2(n) = Z \cdot [X1(n) - X1(n-1) - X2(n) + X2(n-1)] \quad (3)$$

$$- Ff1(n) = Ff2(n)$$

Les expressions (3) définissent l'algorithme de l'élément de frottement. La constante Z est le coefficient de frottement visqueux.

Nous aborderons alors, dès ce premier niveau, le problème posé par la nécessité de définir une combinatoire des modules élémentaires.

La combinaison de plusieurs modules fait apparaître un système d'équations aux différences :

soit par exemple le système simple correspondant à notre cellule vibrante : la combinaison de trois équations (1), (2) et (3) donne :

$$F(n) = Fe(n) + Fr(n) + Ff(n)$$

où $Fe(n)$ est la force extérieure appliquée au système. Pour le ressort et le frottement, reliés au sol, on aura $X2 = 0$.

D'où :

$$Fr1(n) = K \cdot X(n)$$

$$\text{et } Ff1(n) = -Z \cdot [X(n) - X(n-1)]$$

L'expression permettant de calculer les positions de la cellule pour une excitation $Fe(n)$ donnée est alors en supposant, pour simplifier, que $M = 1$:

$$X(n) = Fe(n) - K \cdot X(n) - Z \cdot [X(n) - X(n-1)]$$

$$+ 2X(n-1) - X(n-2)$$

soit :

$$X(n) = (1 + K + Z)^{-1} \cdot [Fe(n) + (2 + Z) \cdot X(n-1) - X(n-2)] \quad (4)$$

Cette expression constitue un nouvel algorithme, or la combinaison de plusieurs éléments doit pouvoir se faire en fonction directe de la représentation mécanique du dispositif. Il est exclu en effet d'imposer, pour chaque cas particulier une résolution du système comme celle que nous venons de faire, qui, de plus nous contraindrait à définir autant d'algorithmes que de cas particuliers de simulation.

Il serait par ailleurs fort complexe de mettre en œuvre un système de résolution formelle des équations aux différences.

Il faut alors que le calcul relatif à chaque élément demeure indépendant des autres et qu'une interaction des uns sur les autres puisse s'effectuer. L'interaction, comme on peut l'observer dans les systèmes mécaniques réels, ou comme on pourrait la mettre en œuvre avec un calculateur analogique, est contradictoire avec la nature essentiellement séquentielle des calculs dans l'ordinateur.

Ceci nous a alors conduit à mettre en œuvre une méthode spécifique, que nous introduisons ici et généraliserons ensuite.

Considérons la cellule comme combinaison des trois éléments : masse, ressort et frottement. On conserve pour chacun d'eux l'algorithme défini par les expressions (1), (2) et (3).

Supposons que pour chaque instant n , le calcul en séquence corresponde à celui de ces trois expressions, dans cet ordre.

L'entrée $F(n)$ du premier algorithme est alors la somme :

$$Fe(n) + Fr(n-1) + Ff(n-1)$$

où Fr et Ff résultent du calcul effectué précédemment dans les expressions (2) et (3).

Au même instant n , le calcul relatif à ces dernières est par contre exact puisque l'entrée $X(n)$ vient d'être élaborée, le résultat ne sera cependant utilisé qu'à l'instant $n+1$.

Cette méthode évite, pour toute combinaison, la redéfinition d'une expression spécifique.

On peut évaluer la nature de l'approximation introduite ainsi en résolvant le nouveau système obtenu qui peut s'écrire :

$$X(n) = F(n) + 2X(n-1) - X(n-2)$$

avec

$$F(n) = Fe(n) - K \cdot X(n-1) - Z \cdot [X(n-1) - X(n-2)]$$

soit

$$X(n) = Fe(n) + (2-K-Z) \cdot X(n-1) - (1-Z) \cdot X(n-2) \quad (5)$$

On a pu vérifier, par le calcul et par la mise en œuvre, que l'erreur introduite est négligeable, vis à vis des conditions d'expérience qui nous concernent (T. BERBEYRIAN 1979),

La méthode peut être généralisée à tout ensemble complexe de modules. Pour tout module donné, dans la suite séquentielle, certaines de ses entrées seront exactes (celles qui auront été élaborées, pour l'instant n considéré, par des modules situés en amont), d'autres seront entachées d'une approximation définie par un retard de une période d'échantillonnage (celles qui sont élaborées dans un module situé en aval).

On conçoit que, sauf dans quelques situations bien particulières, cet écart n'est pas de nature à entraîner une dérive fondamentale sur le plan du comportement physique.

3.2.2 La cellule

Dans la mesure où l'on dispose maintenant d'une combinatoire et que, sauf pour le cas particulier des liaisons non linéaires, tout notre système est construit sur les trois éléments de base plusieurs fois évoqués, on peut se demander s'il est intéressant d'introduire le module « cellule » comme un élément en soi.

Il faut alors observer un nouvel aspect :

L'expression (5) est le résultat condensé des trois expressions premières. Si l'on prend en considération le nombre d'opérations arithmétiques nécessaires, qui entre en ligne de compte pour l'évaluation du temps de calcul, c'est la succession de ces trois expressions effectives qu'il faut considérer :

$$(1) \quad X(n) = F(n) + 2 \cdot X(n-1) - X(n-2)$$

$$\begin{array}{ll} \text{multiplication} & : 1 \\ \text{addition/soustraction} & : 2 \end{array}$$

$$(2) \quad Fr1(n) = -K \cdot X(n)$$

$$\begin{array}{ll} \text{multiplication} & : 1 \end{array}$$

$$(3) \quad Ff(n) = Z \cdot [X(n) - X(n-1)]$$

$$\begin{array}{ll} \text{multiplication} & : 1 \\ \text{addition} & : 1 \end{array}$$

soit au total : 3 multiplications

addition : 3 additions/soustractions

Dans l'expression rigoureuse (4) on aurait :

- 1 inversion
- 2 multiplications
- et 5 additions

(l'inversion est a priori beaucoup plus coûteuse en temps qu'une multiplication).

Par contre l'expression (5) nécessite :

- 2 multiplications
- et 5 additions

Le temps d'une multiplication est plus grand que celui de deux additions, à cela s'ajoute le fait que dans le procédé numéro 1, un certain nombre de transferts de variables est nécessaire d'un algorithme à l'autre. La troisième formule est donc de loin la plus rapide.

Il apparaît ici une nouvelle source de compromis : la modularité, nécessaire dans le mode opératoire est en partie contradictoire avec la rapidité des algorithmes.

Ceci représente un point sur lequel notre étude a dû s'arrêter soigneusement. L'attitude consiste alors à proposer, d'une part les algorithmes « élémentaires » et, d'autre part à déterminer les systèmes « primaires » qui apparaîtront le plus fréquemment ou systématiquement et à donner pour chacun d'eux un algorithme spécifique.

La ligne vibrante, avec en paramètre le nombre de points matériels qui la constitueront, est un des « modules primaires » les plus élaborés auxquels nous aurons recours. L'expression numérique qui lui correspond ne pose pas de problèmes fondamentalement différents de ceux que nous venons d'évoquer.

Nous ne présenterons pas ici les algorithmes relatifs aux éléments de liaison discontinus qui ne posent en fait aucun problème de calcul.

4. LE LANGAGE CORDIS

Du point de vue de l'utilisateur, les procédés de calcul internes doivent être transparents. Entre les deux, s'interposent un « langage » dont la structure doit être l'image du système d'analyse. Il est important de souligner ici, l'interdépendance lors de la conception d'un outil de création, de trois niveaux : choix de la modélisation, mise en algorithme, langage.

Les différentes étapes de la pratique musicale étant décrite selon trois axes : lutherie, expérience instrumentale, composition musicale, le langage CORDIS se propose d'être, dans son état actuel un système de conception et d'expérimentation instrumentale où le créateur puisse être tour à tour luthier, instrumentiste, et de manière embryonnaire compositeur.

CORDIS se développe en deux phases :

- la première dite « de prestructuration », consiste à déterminer la structure de l'instrument et la nature des conduites que l'on peut avoir à son égard,
- la deuxième dite « de jeu instrumental », consiste en un jeu, décomposable comme nous l'avons montré ci-dessus, en jeu de modulation et jeu d'excitation et dont la condition la plus importante est de se réaliser en temps réel.

Dans la phase de prestructuration, l'utilisateur élabore :

- une modélisation de l'instrument par assemblage de modules mécaniques, déterminant ainsi une structure, dont il fixe les valeurs des paramètres. Un cas particulier est fait pour la conception de liaisons conditionnelles (du type corde/archet par exemple).
- une structuration des entrées pour le jeu : il établit ainsi différentes relations entre les organes de commande

rétroactifs ou non et les entrées de jeu de la structure simulée,

- une structuration des sorties, sorties sonores, ou d'observation.

5. EXEMPLES DE SIMULATION

Nous avons pu réaliser ainsi diverses simulations :

a) Simulation d'un mécanisme d'excitation à percussion-échappement

Le système se compose de trois éléments :

- une MASSE représentant la touche,
- une MASSE représentant le marteau,
- une CELLULE représentant la corde.

Nous avons réalisé la simulation des comportements mécaniques lents du dispositif en temps réel : le manipulateur agit sur la touche du transducteur gestuel rétroactif et reçoit dans le même temps, l'information gestuelle sur le comportement de celle-ci, et une image sur écran, de la touche, du marteau et de la corde.

b) Modulation de raideur

L'équivalent, dans CORDIS de la modulation de fréquence est la modulation de raideur. Ce procédé correspond davantage à la réalité physique du geste de l'instrumentiste modulant la tension ou la longueur d'une corde. Les fluctuations manuelles sont rendues par le jeu réel. La cohérence énergétique qui se traduit par une relation entre les variations de fréquence et d'amplitude, est préservée. La synthèse sonore, obtenue en temps différé grâce à un enregistrement préalable du geste, possède alors la particularité intéressante d'évoquer un son « naturel ».

c) Modélisation simplifiée d'une liaison corde/archet

La liaison est définie à partir d'un « frottement solide » obtenu par un module ressort-frottement pendant la phase d'accrochage de la corde par l'archet. Nous retrouvons les formes d'oscillations triangulaires observées sur les cordes frottées réelles. L'approche est cependant approximative, la corde étant réduite à une seule cellule.

6. CONCLUSIONS

Nous avons posé, dans le système CORDIS, des bases pour une étude du rapport instrumental, le considérant comme un préalable à la création musicale. Nous tentons par là, d'établir un équilibre judicieux entre ce qui, dans l'événement sonore, procède du geste et ce qui procède de l'instrument. Cette dissociation permet d'aborder deux problèmes :

- la notion de timbre peut prendre un sens bien défini : c'est tout ce qui dans l'événement sonore est la traduction, de l'information contenue dans la structure-instrument. Une problématique à développer est alors l'étude du parallélisme entre différentes catégories perceptives de timbres et différentes structures de réseaux physiques tels que nous les avons définis.
- les articulations dynamiques macroscopiques sont directement liées à l'information relative au geste. La mémorisation des fonctions gestuelles permet d'aborder les aspects compositionnels. Une direction d'investigation nous paraît séduisante : celle d'une recherche de continuité de processus entre la phase instrumentale et la phase compositionnelle.

Des expériences psychoperceptives sont par ailleurs à mener, tentant d'établir l'intercorrélation entre les diffé-

rents canaux sensoriels : de l'émission gestuelle à la perception gestuelle, de l'émission gestuelle à la perception sonore, de l'émission gestuelle à la perception visuelle, dans le but de mieux cerner leur participation spécifique dans la modélisation d'objets multisensoriels et d'évaluer qualitativement et quantitativement leurs caractéristiques propres dans le jeu instrumental.

BIBLIOGRAPHIE

[1] CADOZ C., FLORENS J.L. (1978) - Fondement d'une démarche de recherche informatique/musique. *Revue d'Acoustique* n° 45, 1978, p. 86.

[2] MATHEWS M.V., MILLER J.E., MOORE F.R., PIERCE J.R., RISSET J.C. (1969) - *The Technology of Computer Music*. The M.I.T. Press.

[3] FLORENS J.L. (1978) - Coupleur gestuel interactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés. Thèse de 3ème cycle - I.N.P. Grenoble.

[4] CADOZ C. (1979) - Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires. Thèse de 3ème cycle - I.N.P. Grenoble.

[5] RUIZ P.M. (1969) - A technique for simulating the vibrations of strings with a digital computer. Department of Music - University of Illinois.

[6] BERBEYRIAN T. (1979) - Application des processus récursifs à la synthèse sonore. Rapport D.E.A. - I.N.P. Grenoble

(Manuscrit reçu le 15 juillet 1981, Revu le 9 septembre 1981)