HAL
open science

# Modélisations et simulations de structures vibrantes en CORDIS. Matériaux et paramètres pour la création musicale

Eric Incerti, Claude Cadoz

## To cite this version:

Eric Incerti, Claude Cadoz. Modélisations et simulations de structures vibrantes en CORDIS. Matériaux et paramètres pour la création musicale. Deuxièmes Journées d'Informatique musicale, LAFORIA-Institut Blaise Pascal, Apr 1995, Paris, France. pp.173-183. hal-00910545

**HAL Id: hal-00910545**

**https://hal.science/hal-00910545v1**

Submitted on 10 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.

# MODÉLISATIONS ET SIMULATIONS DE STRUCTURES VIBRANTES EN *CORDIS*

# MATÉRIAUX ET PARAMÈTRES POUR LA CRÉATION MUSICALE

**Eric INCERTI - Claude CADOZ**

ACROE-LIFIA
Institut IMAG
46 Av. Felix Viallet - 38031 GRENOBLE

## I. INTRODUCTION

L'informatique musicale a deux origines simultanées, quasiment contemporaines de celle de l'ordinateur lui-même : la Composition Automatique, avec les expériences de Hiller et Isaacson en 1956, et la Synthèse du son avec les premiers programmes de Mathews en 1957 [Mathews, 63] qui ont donné naissance au fameux programme MUSIC-V mondialement diffusé.
La Composition Automatique exploite les vertus d'infaillibilité de la machine face à des règles de construction préalablement formalisées et programmées [Hiller, 58], [Barbaud, 66], [Xénakis, 81]. Suivant un mouvement parallèle à celui de l'Intelligence Artificielle, elle devient par la suite "Composition Assistée par Ordinateur" (CAO). L'ordinateur, instruit d'un certain nombre de contraintes, est un vis-à-vis systématique au compositeur conduisant celui-ci dans toutes les conséquences de ses choix. Il reste au compositeur le choix de les retenir ou de les rejeter. La CAO, indissociable de l'analyse musicale (assistée par ordinateur) , après une période terne, liée sans doute à une confusion sur le rôle et les capacités de l'ordinateur, semble aujourd'hui s'ouvrir à de nouvelles perspectives [Riotte, 74], [Assayag, 84], [Chemillier, 89], [Courtot, 92], [Mouton, 94], [Ballesta, 94].
La Synthèse du son, apparue dans les "Bell Laboratories" avec les travaux de Mathews puis Risset [Risset, 69], pose quant à elle le problème de la production du phénomène sonore et de la maîtrise de ses paramètres perceptuels. C'est le premier convertisseur numérique-analogique, mis au point dans l'équipe de Mathews en 1957, qui a permis la naissance de la synthèse par ordinateur. Les techniques de synthèse se sont ensuite développées dans les années 60 et 70 [DePoli, 83] avec la Synthèse Additive, Soustractive [Risset, 69], [Moorer, 76], par Distorsion-Non-Linéaire [Arfib, 79], [Roads, 79], par Modulation de Fréquence (F.M.) [Chowning, 77], par Fonctions d'Onde Formantiques (FOF) [Rodet, 84], la Synthèse Granulaire [Roads, 78], [Truax, 88], par Ondelettes [Kronland-Martinet, 88], Lignes à Retard [Karplus, 83]), Guides d'Ondes [Smith, 92].

Malgré la simultanéité de leurs origines, ces deux courants sont distincts et n'ont pas encore aujourd'hui trouvé les véritables conditions de leur fusion. Les meilleurs systèmes de CAO sont souvent appliqués à des paramètres musicaux très classiques (hauteur, durée, etc.), et les dimensions nouvelles du son créées par les meilleurs procédés de synthèse restent inexploitées en composition.

Depuis le début de ses travaux, l'ACROE s'attache à une conception radicalement différente de la fonction de l'ordinateur dans la création artistique. Au centre de celle-ci, le système CORDIS-ANIMA [Cadoz, 90a], l'approche par modèle physique (initiée elle-même par l'ACROE en 1978 [Cadoz, Florens, 78]) et les Transducteurs Gestuels à Retour d'effort (TGR) [Cadoz, Luciani, Florens, 81], [Cadoz, 90b], permettent la production et l'organisation de sons (mais aussi d'images animées) par la simulation des objets physiques susceptibles d'en être la cause. L'importance est donnée non pas au phénomène mais à ce qui l'engendre, c'est-à-dire l'instrument, le geste qui s'y applique, la relation entre le créateur et l'instrument [Cadoz, 88]. Le terme "instrument" a ici un sens large. Il coïncide avec l'instrument de musique lorsqu'il s'agit de produire le son, mais il peut être aussi la marionnette lorsqu'il s'agit de créer une scène visuelle animée. Enfin, il peut être "macro" instrument lorsqu'il portera des contraintes à l'échelle non plus du phénomène sonore mais de la structure sonore complexe organisée.

Dans une perspective de création, c'est à l'objet producteur du phénomène sonore que nous nous intéressons dans cet article. Ses propriétés doivent en effet être connues et expérimentées avant que le processus compositionnel puisse se constituer ou se modéliser. Nous rappelons dans un premier temps les bases du formalisme CORDIS. Nous présentons ensuite une méthodologie d'expérimentation centrée sur la notion de Structure Vibrante. Les résultats mettent en évidence des propriétés sonores des objets simulés, mais également un espace de paramètres et de critères d'une nouvelle nature à mettre en jeu dans le processus compositionnel.

## II. CORDIS-ANIMA

## PRÉSENTATION DU CADRE INFORMATIQUE

### II.1. Modèle physique

Le formalisme CORDIS-ANIMA développé par l'ACROE, permet la modélisation et la simulation d'objets physiques audibles, visibles et manipulables. Tout objet est considéré comme un assemblage de *composants mécaniques élémentaires* auxquels sont associés des *algorithmes de simulation élémentaires.* L'assemblage informatique de ces algorithmes, isomorphe à celui des composants qu'ils simulent, constitue alors l'algorithme global de simulation de l'objet modélisé.
Une simulation est un calcul de tous les mouvements et circulations de forces à l'intérieur de la structure. Dans certaines conditions de construction et de valeurs des paramètres en jeu, les variables représentatives des forces ou déplacements peuvent correspondre à des phénomènes vibratoires acoustiques. La conversion numérique/analogique de ces variables et leur transmission à la membrane de haut-parleurs rend ces phénomènes audibles. Notons que la simulation d'un instrument n'est complète que lorsqu'elle en intègre tous les constituants : la structure vibrante, l'excitateur, le diffuseur, etc., mais aussi le milieu de rayonnement et le local dans lesquels il est plongé avec l'auditeur.

La notion la plus importante, qui permet la simulation d'objets et phénomènes complexes, est celle de modularité. Tout objet est considéré comme assemblage en réseau de composants élémentaires choisis parmi un nombre limité de types. Ces 'briques' sont représentées par des algorithmes très simples, et la simulation de la structure ainsi constituée se résume alors à une combinaison d'algorithmes élémentaires. La combinaison qui en résulte peut être extrêmement complexe et susceptible d'engendrer des phénomènes physiques qu'il serait très difficile de décrire analytiquement.

### II.2. Éléments de base et règles de construction

#### II.2.1. Points de communications

La représentation des interactions physiques, qu'il s'agisse des interactions entre l'opérateur et l'instrument ou des interactions entre les composants de l'instrument n'est pas la même en mathématiques mécaniques continues et en informatique.
En mécanique continue, la liaison entre deux objets physiques est non orientée, instantanée et met en jeu deux variables duales, l'une intensive (force, pression...), l'autre extensive (position, déplacement, déformation). Dans les processus informatiques (algorithmes de calcul et transmission de données), la communication est par essence unidirectionnelle. Pour représenter une liaison mécanique entre deux objets, il est nécessaire de faire appel à des paires d'entrées/sorties orientées en sens inverses. On les appellera *points de communication..*

Il existe alors deux types de points de communication : l'un, nommé *point M* dans la terminologie CORDIS-ANIMA, qui prend en entrée une variable intensive (force) et rend en sortie une variable extensive (position), et l'élément dual, nommé *point L* qui reçoit une position et rend une force.

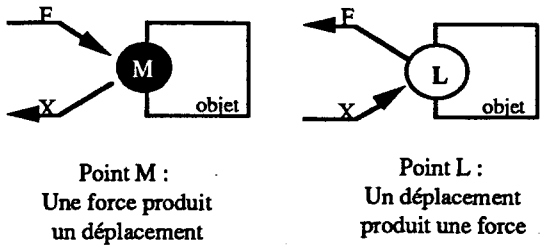


*Fig. 1 : Les points de communications de CORDIS-ANIMA*

Notons enfin qu'à l'instantanéité de la relation F(X) ou X(F) est substitué un temps d'élaboration, jamais réductible à 0, de la variable de sortie à partir de la variable d'entrée.

#### II.2.2. Atomes et connexions

Construire un objet, c'est assembler un certain nombre de composants de base en connectant leurs points de communication. Les règles de constructions apparaissent alors naturellement :
- La connexion entre deux points consiste à associer la sortie de l'un à l'entrée de l'autre et réciproquement. En conséquence, on ne peut connecter que des points de types opposés, un point M avec un point L.
- On peut connecter plusieurs points L à un même point M. La force totale reçue par le point M étant la résultante des forces issues des différents point L, chacun d'eux recevant la même position : celle émise par le point M.
- On ne peut pas connecter plusieurs points M à un même point L.

Un atome sera alors un objet minimal simulable que l'on pourra associer à d'autres par combinaison générique pour former des objets aussi complexes qu'on le souhaite. Une rapide investigation des possibilités montre qu'une telle généricité est obtenue avec un minimum de deux atomes :

- L'atome à un point M, qui a une localisation ponctuelle dans l'espace et constitue la "granulation" de la matière. Il est nommé *Point Matériel* ; son algorithme calcule une position à partir des forces appliquées par son environnement.

- L'atome à deux points L associés, qui n'a pas de localisation spatiale autre que celle des deux points matériels auxquels il est connecté. Son algorithme calcule deux forces à partir des deux positions qu'il reçoit et les renvoie vers chaque point M. Cet atome réalisant un transfert de forces entre deux éléments matériels est nommé *Élément de Liaison* . Le respect du principe fondamental d'*action-réaction* implique que les deux forces calculées sont coaxiales, de même intensité et de sens opposées.

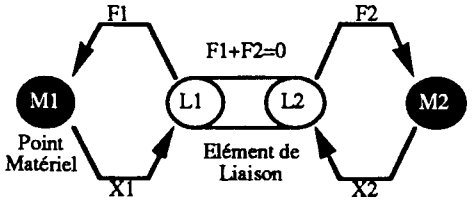


*Fig.2 : Atomes et connexions*

Parmi ces atomes élémentaires citons les trois principaux, à la base de la construction de toutes les structures vibrantes qui seront présentées par la suite :
- La *masse libre* : constituée d'un point matériel auquel est associé un paramètre de masse m (en kg) représentant l'inertie du système et dont l'algorithme renvoie une position spatiale caractérisée par l'équation fondamentale de la dynamique.
- La *liaison viscoélastique* : élément de liaison auquel sont associés un paramètre de raideur k (N/m), un paramètre de viscosité z (Ns/m) et éventuellement un paramètre de longueur l (m) et dont l'algorithme calcule une force en fonction des deux positions qu'il reçoit.
- La *liaison conditionnelle* : élément de liaison tel que ses paramètres caractéristiques k, z et l dépendent de conditions sur les variables de position en entrée. Ce type de liaison permet la modélisation de non linéarités. L'utilisation typique est la modélisation de percutions.

## II.3. Les algorithmes et leur implantation

### II.3.1. Discrétisation temporelle et T-simulation

Si le formalisme de CORDIS, tel qu'il vient d'être présenté, correspond à une discrétisation spatiale de la matière physique (supposée continue à l'échelle des phénomènes qui nous intéressent), la simulation proprement dite de ces modèles à l'aide d'une machine informatique (quelconque) impose la prise en compte d'une discrétisation temporelle dans la conception et l'implantation des algorithmes de simulation. Ainsi les signaux sont des suites de mots binaires et il existe entre les entrées et les sorties un temps d'élaboration incompressible T.
On définit ainsi la notion de T-simulation comme une situation dans laquelle un algorithme traite en entrée et produit en sortie des signaux échantillonnés aux conditions de Shanon à la période T constante. Les instants d'entrée et de sortie sont synchrones, une seule période T s'écoule entre ces deux instants.

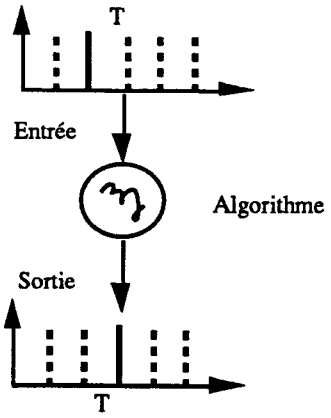


*Fig. 3 : T-Simulabilité*

### II.3.2. La masse et la liaison viscoélastique

La représentation informatique d'un mouvement se fait nécessairement sous la forme d'une suite de valeurs discrètes, positions successives, étant donnée une fréquence d'échantillonnage $F_e$. Les opérateurs élémentaires de la machine sont la mise en mémoire, l'addition et la multiplication. Sous ces conditions, la suite numérique oscillante la plus simple est une suite récurrente d'ordre deux définie par :

$$X_{n+1} = A.X_n + B.X_{n-1}$$

où les coefficients A et B vérifient

$$A^2 - 4B < 0$$

En exprimant la force viscoélastique fournie par une liaison (ressort-frein) entre deux points $X^1$ et $X^2$ avec l'expression de la vitesse retardée on obtient :

$$\Phi_n^{1,2} = -\Phi_n^{2,1} = -k.F_e.(X_n^1 - X_n^2) - z.F_e^2((X_n^1 - X_{n-1}^1) - (X_n^2 - X_{n-1}^2))$$

De même, en exprimant l'équation fondamentale de la dynamique $m\vec{a} = \sum \vec{\Phi}_{ext.}$ pour un point $X^i$ en utilisant l'expression discrète de l'accélération centrée, on obtient la suite :

$$m_i.(X_{n+1}^i - 2X_n^i + X_{n-1}^i) = \sum \Phi_n^{i,j}$$

soit :

$$X_{n+1}^i = 2X_n^i - X_{n-1}^i + \frac{1}{m_i}\sum \Phi_n^{i,j}$$

On peut ainsi calculer en bloc toutes les forces appliquées par l'ensemble des éléments de liaison, les distribuer vers leurs points matériels associés, puis

calculer l'ensemble des nouvelles positions c'est-à-dire le nouvel état de l'objet simulé.

### II.4. Deux versions du langage de simulation

Selon les phénomènes physiques que l'on souhaite simuler, on peut se limiter à une modélisation dans un espace à une ou deux dimensions. Cela permet de simplifier considérablement les algorithmes. Ainsi, l'étude des structures vibrantes a-t-elle été d'abord envisagée sous un aspect principalement topologique en considérant des réseaux éventuellement multidimen-sionnels quant à leur degré de connexité mais dont les vibrations sont repérées sur un axe unique. Ces structures seront qualifiées de *topologiques*. Le langage associé sera nommé *CORDIS_u*, par opposition à la forme *CORDIS* (ou *CORDIS_3d*) tridimensionnelle.

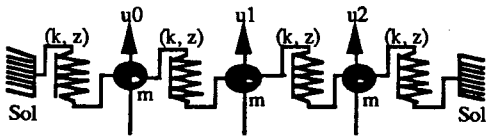


*Fig. 4 : Une structure topologique en CORDIS_u*

Dans cette forme topologique du langage, pour la construction et la simulation, on pose comme hypothèse de base que toute structure est définie par un réseau plan orthogonal à la direction de vibration et de côte nulle sur cet axe. Une conséquence immédiate est que la notion de distance géométrique entre deux points du réseau se réduit à l'écart de leur côte sur l'axe. La seconde conséquence est alors que si l'on parle de la *forme* de la structure ce n'est que par référence à *une* description graphique du réseau. Par exemple les deux structures suivantes sont parfaitement identiques, mais la *forme* retenue sera la première car plus explicite.

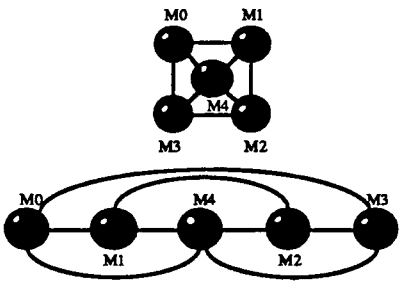


*Fig. 5 : Deux représentations d' une même structure en CORDIS_u*

La version générale tridimensionnelle, bien que très semblable dans la forme et l'implantation permet d'aborder la construction des structures sous un aspect plus naturel car plus véritablement géométrique. En effet la notion de distance spatiale prend ici tout son sens (les paramètres d'une liaison dépendent de sa longueur) et la topologie de connexion associée devient nécessairement celle du plus proche voisin ; seul le degré de connexité reste un paramètre significatif. Ainsi, les deux structures précédentes sont cette fois différentes. De plus il devient possible de construire des structures réellement tri-dimensionnelles susceptibles d'être déformées, tendues, vrillées, et possédant des propriétés intrinsèques de non linéarités dues au calcul des distances spatiales.

## III. PARCOURS AU TRAVERS D'UN ESPACE DE MATÉRIAUX SONORES

Notre objectif général est la construction d'un système informatique pour la création. Cela implique au moins deux niveaux : la production proprement dite du matériau sonore et son utilisation dans un cadre compositionnel. Nous nous attachons ici plus particulièrement au premier aspect : l'ordinateur comme outil de production de son.

Le formalisme CORDIS permet de modéliser la chaîne causale qui va de l'action humaine (geste) à l'émission du son selon une série de composants structurels :

- L'*excitateur*, élément intermédiaire qui, à partir d'un geste produit une action mécanique transmise aux autres éléments de la chaîne. Par ses propriétés spécifiques il conditionne le geste et détermine certains caractères morphologiques du phénomène sonore qui auront une incidence directe au niveau perceptuel.
- La *structure vibrante* (S.V.), objet matériel déformable, qui soumis à l'action de l'excitateur devient le siège de phénomènes vibratoires dissipatifs dont une partie des modes se situe dans le domaine audible.
- L'*environnement local*, (résonateur, structures couplées, etc.), organe intermédiaire de propagation du phénomène vibratoire.
- L'*environnement global*, qui détermine les conditions générales aux travers desquelles nous parviendra le son (spatialisation, réflexions, milieu de propagation).

En fait, seuls les deux premiers éléments, excitateur et S.V., sont indissociables. Ils constituent la 'matière' minimale pour la production de son. Nous nous intéressons ici plus particulièrement aux structures vibrantes avec quelques références indispensables aux différents excitateurs utilisés.

## III.1. Les structures

### III.1.1. Sélection et évolution

Un certain nombre de structures ont ainsi été étudiées. Il était nécessaire de fixer dès le départ une orientation précise, déterminer des critères de sélection. Ces structures étant définies par des réseaux, les choix se sont orientés naturellement vers des critères topo-logiques et géométriques. Parmi ceux-ci, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à ceux qui ont une incidence sur les propriétés purement physiques de propagation d'onde et de répartition spectrale. Ces structures, outre leurs caractéristiques topologiques, sont définies par une série de paramètres internes (masses, raideurs, viscosités, tailles...)

Bien évidemment, les possibilités de construction sont encore immenses. Il était donc indispensable dans un premier temps de se fixer un cadre d'étude restreint : apprendre à 'faire des gammes' avant d'envisager la composition. La démarche qui s'est imposée d'elle mê-me repose sur un va et vient permanent entre analyse et expérimentation. D'une part l'étude rigoureuse des modèles sélectionnés, démarche *poïetique** (description des stratégies de production) selon la terminologie de Molino reprise par Nattiez [Molino, 75], [Nattiez, 87], [Cadoz, 91]. D'autre part une série d'expérimentations empiriques et systématiques à la recherche d'îlots pertinents d'un point de vue *esthésique**, (description des stratégies de percep-tion) dans un espace de paramètres de dimension souvent supérieure à quatre. Molino introduit un troisième niveau, le niveau *neutre* ou *matériel* situation d'analyse qui sert d'ancrage aux approches poïetiques et esthésiques.

La première limitation que l'on s'est imposé a consisté à ne considérer que des S.V. linéaires homogènes définies par leur taille (nombre de masses et répartition), leur connexité et leurs paramètres (masses unitaires, raideurs et viscosités uniformes).

### III.1.2. Structures topologiques - Description

Nous présentons ici quelques unes de ces structures et les principales propriétés qui ont motivé ces choix. Il y aurait beaucoup à dire sur chacune d'elle, mais cela dépasse le cadre de cet exposé. Précisons néanmoins quelques points généraux.

- Les structures définies en CORDIS_u sont purement topologiques ; la géométrie présentée n'est qu'une aide pour une meilleure représentation mentale et est guidée par les critères de sélection cités ci-dessus.

- La seule représentation correcte serait celle de la *fig.4* mais les schémas deviendraient vite confus.

- De même, les tailles présentées ainsi que le nombre et la disposition des points fixes sont arbitraires. Toutes les variantes sont envisageables, chacune ayant sa spéci-ficité, parfois pertinente, parfois non.

#### a) La cellule

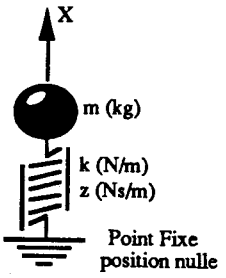


*Fig.6 : Cellule simple*

C'est la structure vibrante minimale, constituée d'une masse ponctuelle *m* reliée à un point fixe par un ressort de raideur *k* et un frein de viscosité *z*.

L'objet physique réel auquel correspond un tel montage est un oscillateur amorti qui, déplacé de sa position d'équilibre y revient suivant deux régimes possibles :

- Régime oscillant amorti avec une fréquence $f_c$ et une fonction d'amortissement $\gamma_c(t)$ données par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{z}{2m}\right)^2} \quad \text{et} \quad \gamma_c(t) = \exp(-\frac{z}{2m}t)$$

sous la condition paramétrique $z \leq 2\sqrt{km}$.

- Régime apériodique si la condition précédente n'est pas vérifiée.

L'objet simulé sous le formalisme CORDIS *(cf. II-3-2)* est défini par la suite récurrente d'ordre 2 suivante :

$$X_{n+1} = AX_n + BX_{n-1}$$

$$\text{où } A = 2 - \frac{k}{mFe^2} - \frac{z}{mFe} \quad \text{et} \quad B = \frac{z}{mFe} - 1$$

Cette suite peut évoluer selon trois régimes distincts :
- régime apériodique,
- divergence numérique,
- régime oscillant amorti avec une fréquence $f_d$ et une fonction d'amortissement $\gamma_d(n)$ données par :

$$f_d = \frac{Fe}{2\pi}.\text{ArcCos}\left(\frac{A}{2\sqrt{-B}}\right) \quad \text{et} \quad \gamma_d(n) = \left(\sqrt{-B}\right)^n$$

---

* *poïétique : du grec ποιειν : faire.*
* *esthésique : du grec αισθησις : faculté de percevoir. Introduit par P. Valery en 1945.*

Les zones de paramètres correspondant aux différents régimes sont données par le diagramme suivant :

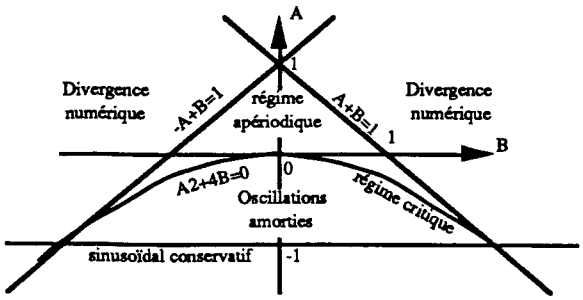


*Fig.7 : Zones paramétriques pour la cellule CORDIS*

Il est ainsi possible de construire, sur ce principe, des oscillateurs numériques n'ayant aucun équivalent physique. Parallèlement, le choix des paramètres algorithmiques doit se faire dans la zone de non divergence. On peut aussi noter l'effet de la discrétisation temporelle sur les caractéristiques de l'objet simulé ($f_d$ légèrement supérieure à $f_c$).
Toutes ces propriétés et limitations se retrouveront pour les autres structures et constituent des paramètres supplémentaires dont il faudra tenir compte.

Sur le plan *esthésique*, le son produit par cette structure élémentaire est un "son simple", de hauteur définie. Cette dernière est déterminée par la fréquence propre de la cellule. Les caractéristiques dynamiques d'attaque, maintient, dépendent du mode d'excitation choisi.

## b) Chapelets

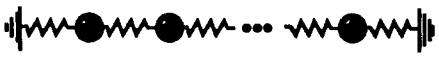

*Fig.8 : Chapelet fixé aux deux extrémités : 'corde'*

Ils permettent de modéliser des structures en ligne. L'exemple le plus naturel est le chapelet fermé (i.e.. fixé par ses deux extrémités) qui, si on le prolonge infiniment, tend vers un modèle de ligne vibrante, au sens mathématique. Celle-ci, sans épaisseur, infiniment déformable, possède une infinité de modes répartis harmoniquement. L'objet effectivement simulé ne comportera bien sûr qu'un nombre limité de masses et par conséquent un nombre limité de modes (autant que de masses). L'analyse mathématique à temps continu n'impose aucune limitation quant au nombre de masses et au choix des paramètres. La répartition spectrale pour une famille de chapelets homogènes de différentes tailles toutes réglées pour un fondamental de 220Hz est du type suivant :

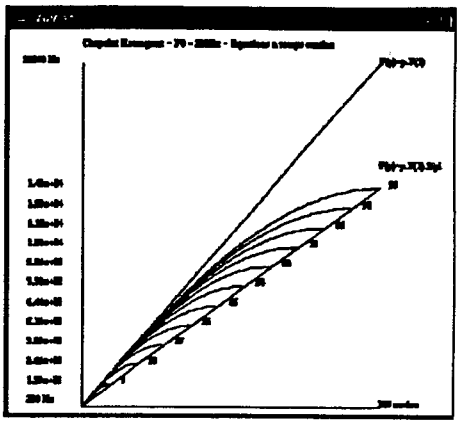

*Fig.9 : Répartition spectrale pour le modèle mathématique*

Mais, de même que pour la cellule, l'effet de la discrétisation temporelle se traduit par des conditions supplémentaires liant les paramètres internes de masse, raideur et viscosité, et le nombre de masses. Ainsi, lorsque l'on s'approche des limites de validité, le spectre des modes tend vers une répartition harmonique. Au delà de ces limites l'algorithme produit une divergence numérique.

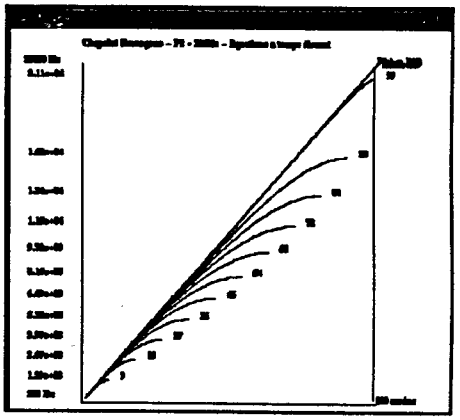

*Fig.10 : Répartition spectrale pour le modèle informatique implanté*

Ces caractéristiques harmoniques se retrouvent lors de l'écoute, principalement lorsque le mode d'excitation est un entretient continu.

*Fig.11 : Chapelet fixé à une extrémités : ligne ouverte*

De même, la structure de ligne ouverte que constitue le chapelet fixé par une seule de ses extrémités peut, par ses déformées modales, être assimilé à un modèle de colonne d'air dans un tuyau.

## c) Anneau

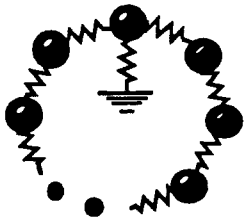

*Fig.12 : Chapelet fermé ou Anneau : 'cloche'*

Là encore, le choix d'une telle structure s'est fait par référence à un type particulier de corps sonore du monde instrumental : la cloche. Il est facile de montrer qu'un tel réseau présente, dans sa répartition spectrale, des modes doubles. L'intérêt est alors qu'en perturbant légèrement l'homogénéité du réseau il est possible de faire apparaître des battements.

## d) Structures produits - Membranes

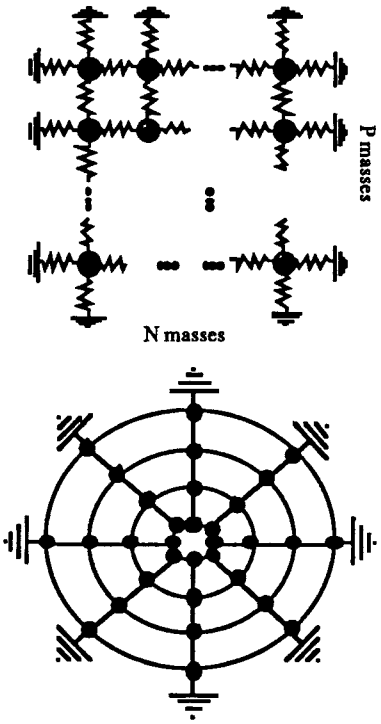


*Fig.13 : membranes rectangulaire et circulaire à maillage carré*

Ces réseaux sont de bons représentants d'une certaine classe de S.V. : les structures produits (ici produit de deux chapelets fermés, l'un à N masses, l'autre à P masses pour la membrane rectangulaire, produit chapeletXanneau pour l'autre). L'intérêt de ce type de structures est qu'elles sont relativement simples à construire et à étudier analytiquement à partir de leurs constituants. Bien sûr, une de leurs caractéristiques principale est la multiplicité de certains modes propres, d'où, comme dans le cas de l'anneau, la possibilité de faire apparaître des battements. D'autre part, la simulation de telles structures ne devient pertinente du point de vue de l'écoute que pour des réseaux de taille relativement importante (une centaine de masses au moins).
En revanche, il semblerait que la forme générale du réseau (connexité), n'ait pas une grande influence sur le plan esthésique. En effet seul le caractère fortement inharmonique émerge. Des membranes rectangulaires, circulaires, voire toriques (au sens topologique) donnent des résultats certes différents mais cette différence n'apporte rien au niveau de l'analyse perceptive, en situation non contextuée tout au moins. Les nuances intéressantes qui peuvent apparaître en première analyse sont surtout liées au choix des paramètres et des types d'excitation. Ceux-ci jouent sur la matière que l'on attribue à l'objet évoqué par le son perçu.

## e) Structures en spirales

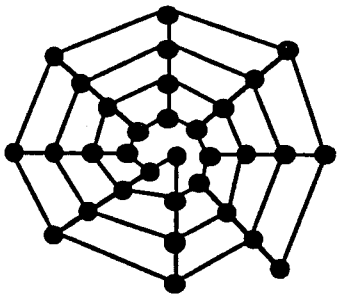

*Fig.14 : Spirale simple homogène*

Après l'étude des réseaux strictement homogènes et isotropes (toutes les directions de propagation sont équivalentes), l'étude s'est portée vers une autre classe de structures. L'orientation consistant à se baser sur des critères de propagation des ondes mécaniques nous à conduit à envisager des réseaux possédant des directions privilégiées, moyennant l'introduction d'inhomogénéïtés partielles. L'exemple le plus immédiat de telles structures est une construction en spirale à partir d'un chapelet homogène, constituant la *trame*, direction privilégiée. Les liaisons radiales sont définies comme étant *moins conductrices*. En pratique elles possèdent des raideurs inférieures et des viscosités supérieures à celles de la trame. On peut remarquer que, si le réseau tel qu'il est présenté à la *Fig.14*, ressemble beaucoup à la membrane circulaire précédente, les topologies inhérentes à chacune des deux structures sont très différentes. Là encore, ces caractères d'anisotropie ne sont pertinents que pour un nombre suffisant de masses.

f) Structures doubles

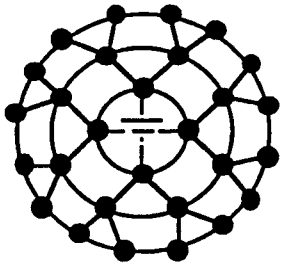

*Fig.15 : Membrane circulaire double inhomogène*

Le même cheminement de pensée nous à ensuite conduit à étudier des réseaux plus complexes encore, pour lesquels les caractères inhomogènes sont dus à une répartition non uniforme des points matériels. Le fil conducteur de ces dernières séries d'expérimentations sur les réseaux complexes était une tentative d'approche de la cymbale, même si l'on sait que cet instrument est le siège de phénomènes non linéaires complexes (ici, les structures étudiées sont toujours strictement linéaires).

III.1.3. Structures géométriques

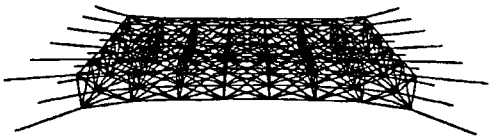

*Fig 16 : Plaque épaisse définie en CORDIS_3d*

On qualifie de *géométriques* (par opposition à *topologiques*) les structures définies en CORDIS_3d, c'est-à-dire dont les mouvements sont repérés dans un espace à trois dimensions. La construction et la simulation de ces objets se font de manière analogue aux précédentes. Il existe toujours une topologie de connexion sous-jacente mais on la considère cette fois comme secondaire. Cette topologie est, sauf indication contraire, celle de voisinage immédiat, selon le degré de connexité choisi. A chaque élément de liaison est associé un paramètre supplémentaire : sa longueur à vide, définie comme la distance entre ses deux points M associés lors de l'initialisation. Il est donc primordial de bien contrôler la disposition des points matériels lors de la construction (des outils de visualisation associés à la simulation permettent cette vérification). L'introduction de ce nouveau paramètre de longueur implique une dimension supplémentaire dans l'espace des simulations. Cette situation géométrique impose également une rigueur plus importante lors de la construction et de la connexion des systèmes excitateurs pour assurer un contact correct avec la S.V. : les positions relatives des éléments structurels de la chaîne deviennent également des paramètres de la simulation.

Il est à noter que si l'étude mathématique précise des modèles était envisageable (plus ou moins facilement) dans la situation topologique, elle devient très complexe, voire irréalisable pour les modèles géométriques.

De ce fait, l'étude de ces structures est plus délicate (d'autant que les paramètres sont plus nombreux). Pour l'instant quelques structures ont été construites mais l'essentiel des simulations ont porté sur le chapelet, pendant géométrique de la structure définie au *II-1-2-b*.

La principale observation déduite de ces expériences concerne les phénomènes de non-linéarité : si l'on percute un chapelet orthogonalement à sa direction, selon l'intensité de cette excitation les variations micro-scopiques des tensions internes dues à la déformation seront ou non perceptibles dans le son résultant sous la forme de glissements de hauteur caractéristiques. De même, les vibrations de compression du chapelet feront apparaître des modes supplémentaires, toujours présents si l'on fait une analyse précise du modèle, mais pas toujours perceptibles à l'écoute. C'est la combinaison générale des paramètres de simulation qui fera que ces phénomènes (inhérents à la structure) seront ou non perceptibles : la nature de l'excitation, le point d'attaque, et tous les paramètres internes de l'objet sont en jeu.
Une autre caractéristique importante de ces structures est qu'elles peuvent être précontraintes (c'est-à-dire tendues ou déformées) avant l'excitation proprement dite. Il suffit pour cela d'imposer sur les longueurs à vide des liaisons des conditions initiales différentes de celles données par la disposition des points matériels. L'excitation peut alors être appliquée après une phase de stabilisation des mouvements dus à la recherche du nouvel état d'équilibre. Mais les effets de ces contraintes sur le plan esthésique ne sont pas encore clairement observés.

III.1.4. Conclusions sur les structures

De ces observations générales découle une constatation importante. La définition topologique (au sens de construction mathématique) des structures semble un leurre : la complexité d'un réseau, ou même certaines propriétés topologiques de première importance sur le plan mathématique, ou encore des références à certaines structures fondamentales en physique des matériaux (quasi-cristaux) ne constituent généralement pas des critères de qualité en ce qui concerne la production sonore (encore faut-il s'entendre sur ce terme de 'qualité'). La plupart des structures complexes testées ont été très rapidement éliminées : cette complexité au niveau *poïetique*, que l'on retrouvait intacte au niveau *neutre* de l'analyse spectrale, se perdait totalement au niveau *esthésique*.

Ces constatations sont plus manifestes encore lorsque l'on étudie des structures réellement tridimensionnelles. Si les caractéristiques géométriques et topologiques des objets simulés (densité de matière, structures rigides, etc.) ont un sens très fort dans une simulation pour l'image, elles ne constituent pas forcément des critères pertinents lors de la synthèse de sons (en première analyse et en contexte esthésique élémentaire tout du moins). Il est important de déterminer, pour un paramètre, si son rôle lors de la simulation se traduit par des phénomènes macroscopiques ou microscopiques. Dans un cas il sera pertinent pour l'image, non pour le son, et inversement.
Par exemple, la structure présentée à la *fig.16*, constitue un bon modèle de structure rigide pour l'image, mais n'apporte rien pour une simulation sonore. De manière générale, ce type de structure présente une répartition spectrale logarithmique (modes bas quasi harmoniques, modes élevés tassés) d'où un résultat sonore confus.
Un nouvel axe d'expérimentation consiste à déterminer les caractéristiques topologiques et géométriques pour une répartition spectrale en îlots, par exemple.

Ces observations se retrouvent dans le monde instrumental réel : les structures utilisées pour la fabrication des instruments, de tout horizon et de toute époque, peuvent se regrouper en quelques grandes familles : les cordes, les peaux tendues, les tuyaux percés, les gongs. Certes à l'intérieur de chaque groupe, des siècles d'expérience accumulée ont apporté une multitude de variantes. Mais cette diversité tient surtout au choix des matériaux, à la finesse de leur agencement, c'est-à-dire au réglage des paramètres.

### III.2. Les paramètres

Comme on l'a vu, si la topologie, la géométrie et la connexité des réseaux servant de base à l'élaboration de structures vibrantes sont déterminantes pour séparer ces structures en grandes classes, les paramètres physiques internes ouvrent quant à eux l'univers de la diversité. Il serait trop long de s'attacher en détail à chaque paramètre, aussi nous nous contenterons de présenter ici un aperçu à grands traits de ce qu'ils sont et de ce qu'ils font.

Outre les caractéristiques de taille qui ont déjà été abordées, les principaux paramètres sont :
- la masse $m$ associée à chaque point matériel.
- la raideur $k$ associée à chaque ressort et la longueur à vide $l_0$ dans le cas tridimensionnel.
- la viscosité $z$ associée à chaque frein.

On peut montrer que, ces paramètres étant liés par plusieurs relations, il est possible de se ramener à une répartition uniforme et unitaire des valeurs de masses (i.e. toutes les masses égales à 1). Alors, naturellement, l'analyse montre que $k$ ($km$ en réalité) est le paramètre associé à la fréquence fondamentale du spectre, et $z$ ($z/m$ en réalité) est associé au temps d'amortissement en oscillation libre. Le nombre et la répartition des modes étant définis respectivement par le nombre de masses et la connexité (les modes sont les valeurs propres du réseau).

Des séries d'expérimentations ont montré d'autre part que, indépendamment des autres paramètres, la sensation de permanence de durée était associée au paramètre $\beta=z/k$.
Dans le cas tridimensionnel, le paramètre de longueur $l_0$ à un effet analogue à celui de $k$, dans le cas où la tension de la structure n'implique pas de déformations (le chapelet fermé par exemple, ou l'équivalent 3d de structures telles que la membrane rectangulaire présentée à la *Fig.13*).

Les principales conclusions sont que les paramètres peuvent être couplés par paires : masse et raideurs associées au caractère de fréquence fondamentale, masse et viscosité à la durée, taille du réseau et connexité aux caractéristiques spectrales (richesse et répartition). Les nombreuses expérimentations montrent en outre qu'une forte connexité n'est significative que pour un grand nombre de masses et qu'alors la topologie (forme globale du réseau) n'est plus un caractère très significatif (des membranes rectangulaires ou circulaires, fermées ou non, donnent des résultats sonores très proches).

### III.3. Solutions et perspectives

Une étude plus approfondie des propriétés des structures vibrantes et de leurs conséquences sur les phénomènes sonores dont elles peuvent être la source, suppose avant tout de bons outils d'expérimentation. Plusieurs critères sont alors importants :
- la possibilité de concevoir, décrire et mettre en œuvre facilement un grand nombre de simulations en conservant une bonne maîtrise de leur représentation, de leur caractérisation et de leur classification. Ce critère renvoie à la définition des fonctionnalités et des qualités spécifiques d'une interface d'aide à la conception des structures. Sorte d'atelier de lutherie, c'est le projet GENESIS, qui, à l'ACROE, s'attache particulièrement à cette question ;
- la possibilité de décrire analytiquement et d'analyser les phénomènes physiques produits par ces simulations. Nous avons plusieurs fois souligné la difficulté a priori de donner des solutions analytiques rigoureuses des phénomènes dans le cas général. Pour cette analyse, qui correspond au *niveau neutre* de Molino, il est indispensable de disposer de moyens d'analyse du signal performants. De nombreux outils d'analyse du signal performants et standards sont disponibles ; il est intéressant de leur adjoindre des outils plus particulièrement adaptés au contexte de modélisation physique CORDIS-ANIMA. Nous développons actuellement des outils d'analyse conçus eux-mêmes

comme des instruments modélisés à l'aide de CORDIS-ANIMA ;
- la possibilité enfin, de mener de manière efficace et signifiante l'analyse esthésique. Il faut cette fois disposer de moyens de placer les sons en contexte. Les conclusions que l'on peut tirer au niveau de l'écoute élémentaire sont utiles et permettent d'éliminer a priori des pistes d'investigations manifestement sans issue. Il convient cependant de garder une certaine prudence car de nombreuses propriétés des événements sonores ne sont perceptibles, identifiables ou exploitables que lorsqu'ils se rattachent à un contexte, soit par leur mode de production lui-même, soit par leur position dans une structure musicale. Par exemple, certaines caractéristiques d'inharmonicité n'ont aucune pertinence si l'on écoute les sons isolément. Si, par contre, on construit des séries de sons dans lesquelles une permanence causale est assurée, la variation permet de mieux identifier la permanence. Les inharmonicités liées à des faits causaux différents deviennent alors distinctes. Ainsi est-il nécessaire d'une part de restituer un contexte de production de plus en plus complet (incluant en particulier le geste instrumental et l'excitateur en amont de la S.V. et le rayonnement en aval), d'autre part de mettre en œuvre, avant la composition elle-même, des outils d'agencement des événements à un niveau structurel évolué.

## IV. CONCLUSION

Ces expériences et les résultats qu'elles produisent montrent tout d'abord qu'un univers riche et fin s'ouvre à l'expérimentation grâce à la synthèse par modèle physique et plus précisément avec le formalisme CORDIS-ANIMA. Mais elles confirment également les fondements de l'approche : la production du matériau pour la musique n'est pas qu'une affaire de son, de synthèse du son, dans laquelle on ne se préoccurerait que des propriétés du son en soi. On vérifie, grâce à cette distinction féconde entre les trois niveaux de l'analyse proposée par Molino que les stratégies de productions et de perception ne s'identifient pas. Mais on vérifie aussi qu'elles sont indissociables, c'est-à-dire que si l'on ne peut espérer trouver l'explicitation de la façon dont "fonctionne" un élément sonore dans une structure en considérant les caractéristiques de son processus de production, on ne peut espérer non plus ignorer ces dernières. Plus précisément, les circonstances de la production du matériau sont parties intégrantes du processus de création et leur fonction sémantique est susceptible de se propager jusqu'aux niveaux les plus macrostructurels de l'œuvre.

Un outil de "création" (qu'il vaut mieux d'ailleurs désigner ainsi que par le terme restrictif de "composition") à l'aide de l'ordinateur, doit permettre de travailler de manière coordonnée et non exclusive, au niveau poïetique et au niveau esthésique. Concrètement, cela signifie qu'il doit permettre de passer souplement de la conception de la représentation de l'instrument (GENESIS) à son utilisation (jeu instrumental en temps réel ou approché en temps-différé) et enfin au traitement a posteriori des matériaux créés, soit en agissant sur leur cause (modèle de l'instrument et geste) soit en les transformant par divers artifices. L'informatique permet précisément cela : il est possible d'être à la fois concepteur, luthier, compositeur, instrumentiste et interprète, ou tout au moins que ces différents protagonistes se regroupent autour d'un même outil intégrant toutes les étapes d'une démarche de création.

Enfin, pas plus que l'on ne peut dissocier poïetique et esthésique, on ne peut non plus dissocier microstructurel et macrostructurel. Un outil de création musicale à l'aide de l'ordinateur doit certes permettre d'isoler et de travailler avec les processus élémentaires et des éléments de matériau simples, mais il doit permettre également de gérer l'articulation entre les différents niveaux de complexité structurelle. En termes d'outils d'aide à la "composition", il est alors clair, compte tenu de la première partie de cette conclusion, que ceux-ci devraient intégrer de nouveaux paramètres : précisément les paramètres poïetiques.

## BIBLIOGRAPHIE


[Arfib, 79] ARFIB D. : *Digital synthesis of complex spectra by means of multiplication of non linear distorded sine waves.* - JAES 27(10) (757-768) 1979.

[Assayag, 84a] ASSAYAG, CASTELLENGO, MALHERBE : *Nouvelles techniques instrumentales : composition et formalisation.* - Rapport d'activité IRCAM, Atelier de Recherche Instrumentale - 1984

[Assayag, 84b] ASSAYAG, MALHERBE : *Manipulation et représentation d'objets musicaux.* - Musical Editing & Printing Sessions - IRCAM - 1984

[Ballesta, 94] BALLESTA P.:*Contraintes et objets : clef de voute d'un outil d'aide à la composition musicale ?* - Thèse de doctorat - Université du Maine - 1994.

[Barbaud, 66] BARBAUD P. : *Initiation à la composition musicale automatique.* - Paris Dunod 1966.

[Bonnet, 94] BONNET A. : *Situation : logiciel de programmation par contrainte pour l'assistance à la composition.* - J.I.M.94 - Bordeaux - Mars1994.

[Brown, 82] BROWN F. : *La musique par ordinateur* - PUF Que sais-je n°2011 - 1982

[Cadoz, Florens, 78] CADOZ C., FLORENS J.L. : *Fondements d'une démarche de recherche informatique/musique.* - Revue d'Acoustique N°45 (86-101) Paris 1978.

[Cadoz, Luciani, Florens, 81] CADOZ C., LUCIANI A., FLORENS J.L. : *Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental.* - Revue d'Acoustique N° 59 (279-292) Paris 1981.

[Cadoz, 88] CADOZ C. : *Informatique et outil de création musicale.* - Revue Marsyas n°7 - Sept.1988.

[Cadoz, 90a] CADOZ C, LUCIANI A, FLORENS JL *CORDIS-ANIMA : Système de modélisation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale* . - Colloque Modèles Physiques Création Musicale et Ordinateur Vol.II (583-628) Grenoble 1990.

[Cadoz, 90b] CADOZ C. : *Commande instrumentale et synthèse sonore; simulation de l'univers instrumental* - dans *"La Machine perceptive, les moyens de communication entre l'ordinateur et l'homme"* , 12e J. francophones sur l'informatique, Grenoble, 1990.

[Cadoz, 91] CADOZ C. : *Timbre et causalité* - In *"Le Timbre, métaphore pour la composition "* - J.B. Barriere - IRCAM - Christian Bourgeois Editeur - 1991.

[Chemillier, 89] CHEMILLIER M. : *Structures et méthodes algébriques en informatique musicale.* Thèse de doctorat - Université de Paris VII - 1989.

[Chowning, 77] CHOWNING J. :*The synthesis of complex audio spectra by means of Frequency Modulation* - JAES - 21/09/1973 - (526-534) et CMJ Vol.1 n°2 (46-54) 1977

[Courtot, 92] COURTOT F. : *CARLA : Aquisition et induction sur le matériau compositionnel.* - Thèse de doctorat - Université de Rennes I - 1992.

[DePoli, 83] DePOLI G. : *A tutorial on digital sound dynthesis techniques* - CMJ Vol.7 n°4 (8-26)- 1983

[Hiller, 58] HILLER, ISAACSON : *Musical composition with a high speed digital computer.* - JAES - Vol.6 n°3 (154-160) - 1958.

[Hiller, 81] HILLER : *Composing with computers : a progress report.* - CMJ Vol.5 n°4 - 1981.

[Karplus, 83] KARPLUS K., STRONG A. : *Digital synthesis of plucked string and drum timbre.* - CMJ Vol.7 n°2 - 1983.

[Kronland-Martinet, 88] KRONLAND-MARTINET R. : *The wavelet transform for analysis, synthesis and processing of speech and music soun.* - CMJ Vol.12 n°4 (11-20) - 1988.

[Mathews, 63] MATHEWS M.: *The digital computer as a Musical Instrument.* - Science Vol.142-1963.

[Mathews, 74] MATHEWS M., RISSET J.C., MOORE F.R. : *Computers and Future Music* Science Vol.183 n°4122 - 1974

[Molino, 75] MOLINO J. : *Fait musical et sémiologie de la musique.* - Musique en jeu Vol.17 - 1975.

[Moorer, 76] MOORER J.A. : *The synthesis of complex audio spectra by means of discrete summation formulae.* - JAES Vol.24 n°2 (717-727) - 1976.

[Mouton, 94] MOUTON R., BROWN F. : *L'automate musical en temps réel KANTOR.* - J.I.M.94 - Bordeaux - Mars1994.

[Nattiez, 87] NATTIEZ J.J : *Musicologie générale et sémiologie* - Christian Bourgeois Editeur - 1987

[Riotte, 74] RIOTTE A. : *Informatique musicale : jonction nouvelle entre art et science* - Euro Spectra 13 (1-27) - Mars 1974.

[Risset, 69] RISSET J.C., MATHEWS M. : *Analysis of musical instrument tones* - Physics Today - February 1969.

[Risset, 90] RISSET J.C. : *Modèle physique et perception - Modèle physique et composition* . - Colloque Modèles Physiques Création Musicale et Ordinateur Vol.III (711-720) - Grenoble 1990.

[Risset, 81] RISSET J.C. : *The musical developpement of dgital sound techniques* - UNESCO Computer Music - Conseil des art du Canada - 1981.

[Roads, 79] ROADS C. : *A tutorial on non linear distorsion or waveshaping synthesis* - CMJ Vol.3 n°2 - (21-34) - 1979

[Roads, 78] ROADS C. : *Automated granular synthesis of sound* - CMJ Vol.2 n°2 - 1978.

[Rodet, 84] RODET X. : *Time domain formant wave function synthesis.* - CMJ Vol.8 n°3 (9-14) - 1984

[Shaeffer66] SHAEFFER P. : *Traité de objets musicaux.* - Paris, Le Seuil - 1966.

[Smith, 92] SMITH J.O. : *Physical modeling using digital waveguide* - CMJ Vol.16 n°4 (74-87) - 1992

[Truax, 88] TRUAX B. : *Real time granular synthesis with a digital signal processing computer* - CMJ Vol.12 n°2 (14-26) - 1988

[Xenakis, 81] XENAKIS Y. : *Musiques formelles* - Stock Musique 1981.