



**HAL**  
open science

# Etude et simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique

Patrick Fourcade

► **To cite this version:**

Patrick Fourcade. Etude et simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique. Modélisation et simulation. Université de la Méditerranée, 2001. Français. NNT: . tel-01263758

**HAL Id: tel-01263758**

**<https://hal.science/tel-01263758>**

Submitted on 28 Jan 2016

**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.

UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

THÈSE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE**

*Discipline : ATIAM*

présentée et soutenue publiquement

par

**Patrick FOURCADE**

le 19 janvier 2001

**Etude et simulation des phénomènes percussifs**  
**dans les instruments de musique**

—————  
*Directeur de thèse : Claude Cadoz*  
—————

**JURY**

M. Jean-Luc Schwartz  
M. Giovanni De Poli  
M. Jean-Claude Risset  
M. Jean-Charles François  
M. Claude Cadoz

Rapporteur  
Rapporteur  
Président  
Examineur  
Directeur

Beaucoup de personnes ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'élaboration de la thèse.

Mes premiers remerciements s'adressent aux enseignants du DEA ATIAM. Je leur suis reconnaissant d'avoir étanché ma soif aiguë de connaissance dans le domaine du son. En particulier, je remercie Messieurs Steve MC ADAMS, Philippe DEPALLE, Jean-Claude RISSET et tous les compositeurs invités de la deuxième promotion.

Je remercie également Messieurs les responsables du ministère de l'éducation et de la recherche qui ont attribué une allocation de recherche à la formation doctorale ATIAM pour ce projet de recherche.

Je remercie Monsieur Claude CADOZ, mon directeur de thèse, qui m'a accueilli au sein de l'Acroe. Je lui suis redevable de l'attrance inconditionnée vers Grenoble, du goût de la rigueur méthodologique et de la naissance d'une passion très belle : la recherche. Merci à lui pour avoir honoré l'invitation de Saint-Germain-en-laye.

Ce projet s'est enrichi de la participation de Monsieur Alain LAFUENTE, percussionniste. Je le remercie pour sa disponibilité, ses compétences et sa gentillesse. Je remercie également Sylvain MANGIAROTTI pour sa collaboration sur la percussion multiple, il a été un stagiaire d'un enthousiasme exemplaire. J'ai eu grand plaisir à travailler avec Patrick REBOUD. Je lui dois des discussions acharnées sur les feutres, les 5 min 33 de John CAGE, nos nombreux piano-tandems improvisés. Je lui suis reconnaissant pour la rigueur exceptionnelle dans son travail, pour tous les sons enregistrés in vivo de la thèse. Merci à Nicolas CASTAGNE pour la confection d'une version sur mesure du logiciel *Génésis*.

J'exprime ma gratitude envers Dominique MARINO, Alexis LE PICHON et Eric INCERTI qui ont donné de leur temps et de leurs compétences pour relire le manuscrit.

Je salue l'ensemble des compositeurs, chercheurs, ingénieurs, administratifs, stagiaires et thésards qui ont animé l'Acroe durant ces quatre années de travail. Merci en particulier à Martial BARRACO, à qui je dois nos discussions sur l'Histoire, sur Martin HEIDEGGER, sur « de l'existence ou non d'une philosophie fasciste ». Merci à Olivier GIRAUD pour sa gentillesse inébranlable devant un bébé de l'informatique qui demandait toujours quelque chose, pour ses explications claires et ses immersions sereines dans le cambouis de mes programmes. Merci à Nicolas SZILAS pour son amitié, pour ses précieux conseils de thésard aîné. Merci à Jean-Christophe BECQUET, pour les rayons lumineux de son regard de chercheur, pour une introduction à sa discipline merveilleuse : la psychologie expérimentale. Merci à Maria GUGLIELMI, je lui dois d'être à l'école de la vie. Merci à Guy DIARD, je suis redevable de la sérénité de sa personne, de sa patience pour les 36 formats de fichiers transférés et incompatibles, de sa double patience pour les méli-mélos dans l'archivage des sons. Merci à Jean-Loup FLORENS pour sa douceur, pour nos discussions de sciences en toute liberté, nos rêves au pays de l'abstrait, pour son art de dénouer la supercherie scientifique. Merci à Sylvain GUBIAN, pour m'avoir appris que les hommes sont des Cordés. Merci à Claire GUILBAUD, Nicolas TIXIER, Ambroise LECLERC... Merci à l'Acroe pour avoir bénéficié du plus joli bureau de la maison, toujours emprunt de soleil.

J'exprime ma reconnaissance envers les directeurs de l'Acroe, Annie LUCIANI, Claude CADOZ, qui m'ont associé à des opérations simplement géniales : le premier "workshop" autour de *Génésis* et *Mimésis* à Karlsruhe en 96, celui de Turin en 99, les *Semaines de la Science* 98 et 99, l'atelier pédagogique mobile au collège de Saint-Ismier.

Je remercie affectueusement mes parents, Alain et Claude, qui m'ont inlassablement encouragé dans l'accomplissement de cet ouvrage. Merci tout plein à mes amis Marie-Josèphe, Piero et Patrick qui sont des rocs.

Patrick FOURCADE

# SOMMAIRE

INTRODUCTION	11
--------------	----

## PREMIÈRE PARTIE TRAVAUX PASSÉS ET PRÉSENTS, MOTIVATIONS

I. L'ORDINATEUR POUR FAIRE DE LA MUSIQUE	19
1. L'approche instrumentale	19
2. Le transducteur gestuel rétroactif	20
3. Cordis-Anima	21
II. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE	29
1. Finalité	29
2. L'excitateur percussif	29
3. Reformulation de la problématique : connaître et simuler	32
III. LA PERCEPTION DES SONS PERCUSSIFS	33
1. Espace de timbres	33
2. Des casseroles percutées par des maillets de différentes raideurs	34
3. Etude sur les applaudissements	35
4. Conclusion sur la perception des sons percussifs	38
IV. QUELQUES TECHNIQUES DE SYNTHÈSE DE PERCUSSIONS	37
1. Un modèle empirique à partir des tables d'onde	37
2. Synthèse par modèle spectral	37
3. Analyse par poursuite adaptative	38
4. Synthèse par modèle physique	39
V. LES INSTRUMENTS À PERCUSSION USUELS	43
1. Les métaux	43
2. Les bois	44
3. Les peaux	44
4. Les cordophones	44
5. Les aérophones	45
6. Les excitateurs percussifs	45
VI. CONTEXTE D'EXPÉRIMENTATION : L'OUTIL CORDIS-OFF	49
1. Le vecteur d'état	49
2. Représentation des Points M et des Points L	50
3. Représentation d'un module	50
4. Schéma d'une simulation Cordis-off	50

## DEUXIÈME PARTIE EXCITATION PAR CHOCS VISCO-ÉLASTIQUES

VII. UN MODÈLE ÉLÉMENTAIRE DE PERCUSSION	55
1. Description du modèle	55
2. Investigation	57
3. Expérimentations et résultats	57
Conclusion	64
VIII. PERCUSSIONS MULTIPLES	65
Introduction	65
1. Percussions successives sur un oscillateur harmonique	66
2. Percussions successives sur des structures vibrantes riches	69
Conclusion	69
IX. UNE PASSERELLE VERS LES CONSONNES /p/, /t/ ET /k/.	
Introduction	71
1. Construction des voyelles	72
2. Modèle physique de percussion pour la synthèse des consonnes plosives /p/, /t/ et /k/	75
3. Reconnaissance des percepts de synthèse /p/, /t/ et /k/	79
Conclusion	79

# SOMMAIRE (SUITE)

## TROISIÈME PARTIE DISSIPATION ET AMORTISSEMENT

X.	UN MODÈLE D'EXCITATEUR DISSIPATIF : LE MARTEAU FEUTRÉ	83
	Introduction .....	83
1.	Notations .....	84
2.	Etude bibliographique sur les marteaux de piano .....	85
3.	Un modèle de relaxation pour la percussion : expression intégrale .....	88
4.	Un modèle de relaxation pour la percussion : formulation différentielle .....	94
5.	Alternative à la liaison de MAXWELL : une inertie intermédiaire .....	102
6.	Analyse sonore du modèle de marteau feutré .....	108
	Conclusion .....	1117
XI.	COMPARAISON DU RÉSEAU DE KIRCHHOFF ET DU RÉSEAU CA	119
	Introduction .....	119
1.	Une formalisation des réseaux de KIRCHHOFF restreint .....	119
2.	Une formalisation du système Cordis-Anima restreint .....	121
3.	Une formalisation de la mécanique Newtonienne dans un espace 1D .....	124
4.	Les réseaux CA restreint et la mécanique de Newton sont pseudo-isomorphes .....	126
5.	Cordis-Anima du point de vue de KIRCHHOFF .....	126
6.	KIRCHHOFF du point de vue de Cordis-Anima et de NEWTON .....	127
7.	Un ensemble de propositions pour une approche synthétique .....	128
8.	Sur l'éventualité de simuler une masse nulle .....	128
	Conclusion .....	129
XII.	PERCUSSION DE PEAUX : PERCEPTION ET MODÉLISATION DE TIMBRES STRESSÉS	131
	Introduction .....	131
1.	De la perception des sons stressés .....	131
2.	Un modèle de synthèse pour la percussion stressée .....	133
3.	Quelques simulations .....	137
CONCLUSION		
	1. Bilan de la première partie .....	143
	2. Bilan de la deuxième partie .....	147
	3. Bilan de la troisième partie .....	148
	4. Eléments de réponse aux objectifs de la thèse .....	150
	5. Perspectives .....	151
		154
ANNEXES		
A.	Bibliographie .....	159
B.	Méthode d'analyse des excitateurs percussifs par isorésonance .....	165
C.	Suppléments divers .....	171
D.	Tables des figures et des tableaux .....	177
E.	Index des mots clés .....	179
F.	Table des matières .....	180
G.	Livret du cédé audionumérique .....	187

# **INTRODUCTION**

## DANS LES INSTRUMENTS

L'art est lié intimement à la nature humaine. Il révèle une profonde aspiration de l'être humain à exprimer, à dire, à crier, à célébrer, à dévoiler ; un profond désir de représenter, de symboliser, de traduire, de figurer et d'incarner. La découverte récente de peintures rupestres de la grotte CHAUVET<sup>1</sup> datant de 30 000 ans avant notre ère nous le rappelle avec force.

La matière se présente comme une limite. La biologie du corps humain, limitée dans l'espace et dans le temps, rappelle constamment les contraintes et les limites du monde physique. Les artistes et les artisans se confrontent à la matière et développent des trésors d'ingéniosité pour concevoir et fabriquer des outils. Les outils ou instruments sont des moyens pour travailler la matière : exercer sur elle un effort et provoquer un mouvement.

Dans les dernières décennies, la technologie a fortement changé le paysage des sociétés à haute valeur ajoutée. Des avancées notables ont eu lieu dans le domaine de l'automatisme, de la numérisation, de la conversion analogique-numérique, de l'informatique et des réseaux. Ce changement bouleverse-t-il notre rapport à la matière ? Peut-on envisager des nouveaux instruments qui s'affranchissent des lois perceptives, des lois physiques de la nature ? Doit-on envisager une autre réalité à venir ?

## DE MUSIQUE,

La musique est une discipline dans laquelle ces questions prennent corps. La musique peut être définie comme l'art des sons qui se destinent à être écoutés et qui portent en eux la signature de leur auteur. La musique est ainsi un travail d'écriture sur les sons. Est-ce suffisant ? D'où vient la musique ? Elle vient des sons, les sons des instruments, les instruments qui sont matières mises en mouvement par l'homme. Est-ce que toutes les musiques sont instrumentales ? Non. Mais de tout temps, comme le remarque Harry PARTCH [PARTCH, 49], la musique est tiraillée par deux concepts antagonistes : - le *corpo-réel* qui donne la primauté à la relation instrumentale, - l'*abstrait-expressionniste* qui donne la primauté à l'écriture. Contrairement à une toccata de Jean-Sébastien BACH, faire jouer une ballade de Frédéric CHOPIN sur un clavier de synthétiseur dénature profondément l'œuvre. La toccata est de type abstrait-expressionniste, la ballade est de type corpo-réel. Dans la thèse, le mot musique résonne désormais (par sympathie) avec le mot instrument.

Au début du 20ème siècle, l'instrument-de-musique implique trois types de musiciens : le luthier, l'instrumentiste et le compositeur. Vers le milieu du siècle, les catégories traditionnelles sont bousculées. Des sons et des musiques non-instrumentaux voient le jour. En 1939, John CAGE réalise la première œuvre musicale n'existant que sous forme d'enregistrement : *Imaginary Landscape n°1*. A New-York en 1950-1951, LUENING et USSACHEVSKY inaugurent la musique pour bande (music for tape). En 1948, en France, Pierre SCHAEFFER inaugure un nouvel art du son : la musique concrète. A l'instrument acoustique est substituée la bande magnétique. Dix-huit ans plus tard (1966), SCHAEFFER publie le « *traité des objets musicaux* » qui servira de base à l'enseignement d'une nouvelle discipline : l'électroacoustique [SCHAEFFER, 66]. En Allemagne à Cologne, EIMERT inaugure en 1950 une autre approche : la musique électronique. Les sons ne sont plus produits par un instrument physique ni par le biais de la bande magnétique : ils sont synthétisés. L'instrument acoustique était-il dépassé ou seulement déplacé ? La musique électronique proposait une virtuosité incomparable mais des sons pauvres, la musique concrète des timbres d'une richesse inouïe mais figés. Dans les années 70, certainement par réaction, le compositeur Harry PARTCH aux Etats-Unis écrivait des pièces uniquement à partir d'instruments acoustiques fabriqués par ses musiciens.

<sup>1</sup> Les peintures de la grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche) sont les plus anciennes connues à ce jour dans le monde entier. Elles bouleversent les notions admises sur l'apparition de l'art dans la préhistoire.

Aujourd'hui, il n'est pas rare d'écouter des pièces pour instruments et bande et des pièces pour bande dans lesquelles sons synthétiques, sons réels enregistrés et sons réels produits en direct se mêlent. L'instrument de musique en tant qu'outil d'inventions sonores et d'expressions musicales est un foyer privilégié sur lequel convergent toutes les tensions du monde moderne (rationnel / sensible, réel / virtuel) et autour duquel se joue l'avenir du corps physique et social. Sans vouloir réduire la musique à la pratique de l'instrument de musique, la relation instrumentale est choisie comme ligne directrice de ce travail de recherche.

## LES PHÉNOMÈNES

### PERCUSSIFS :

Construire une maison dont les quatre façades sont plein sud est une gageure sauf pour celui qui habite au pôle Nord. Un phénomène observé présuppose toujours un référentiel, un cadre dans lequel ce phénomène a lieu. Les instruments de musique sont le siège de phénomènes observables. Un phénomène n'a pas d'existence propre, un fait oui. Le phénomène est lié intrinsèquement au regard de celui qui l'observe. Nous porterons essentiellement deux regards : celui du physicien et celui du musicien.

Depuis le 20<sup>ème</sup> siècle, l'orchestre a été enrichi de nombreux instruments à percussion. L'intérêt pour ce type d'instrument est croissant. Les cultures africaine, indienne et asiatique nous montrent un instrumentarium riche en percussion. VARESE, compositeur qui vécut la révolution de l'électronique, dira : « Il faut que la percussion parle, qu'elle ait ses propres pulsations, ses propres systèmes sanguins. ». L'objet de notre attention n'est pas l'instrument de percussion en lui-même mais la manière dont l'instrumentiste produit le son de percussion. L'acousticien et l'instrumentiste distinguent deux manières : l'excitation par entretien et l'excitation par percussion. Nous nous intéressons à cette dernière catégorie : les excitateurs percussifs. Ce mode d'excitation se répercute au niveau de la construction de l'instrument, au niveau du jeu instrumental et au niveau de la composition. Pour exprimer ces différents aspects, nous parlons de phénomènes percussifs.

## ETUDE

La connaissance, scientifique ou autre, est illimitée. Elle se propage comme les rayons du soleil, dans le temps comme dans l'espace. Elle ne se dégrade pas, elle s'affranchit de la matière-support : elle est information.

Un des deux objectifs de la thèse est de contribuer à une meilleure connaissance des phénomènes percussifs. Pour réaliser cela, la méthode générale que nous adoptons est de prendre appui d'une part sur la connaissance scientifique : acoustique, traitement du signal, psychoacoustique et d'autre part sur l'outil informatique.

L'acoustique étudie la propagation des ondes sonores dans différents milieux physiques. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'acoustique des instruments de musique. Cette discipline donne une connaissance de la physique des processus.

Le traiteur de signal voit le phénomène sonore comme la variation d'un signal unidimensionnel par rapport au temps. Ce signal est de l'information brute ; l'information est postulée exhaustive. Cette discipline donne des outils théoriques puissants pour l'analyse et la synthèse du signal sonore : les vibrations de l'air qui arrivent à l'oreille de l'auditeur.

La psychoacoustique peut-être définie comme la science des relations entre la structure physique des sons et leur effet sur l'audition. La discipline est née vers 1920 aux Etats-Unis avec S.S. STEVENS. Il faut combattre l'idée courante que la représentation acousticienne du son est en adéquation avec nos attributs perceptifs. Par exemple, pour un même niveau d'énergie sonore, une phrase chuchotée sera perçue comme plus faible qu'une phrase dite normalement.

L'informatique, dont le mot est construit à partir de la concaténation des mots 'information' et 'automatique', est à la fois une science et une technique. Par ses exigences techniques, elle contraint à faire une économie de représentation. Cette discipline donne une



représentation, une modélisation formelle de ce que l'on veut modéliser : ici l'excitateur percussif.

Aborder le phénomène percussif à partir des théories et applications de ces différentes disciplines est un choix. Bien sûr, il existe d'autres formes de connaissances et nous ne prétendons pas réduire l'art musical à des équations. C'est faire de la mauvaise science que de croire que l'objet étudié se réduit à la connaissance que nous en avons.

## ET SIMULATION.

Le deuxième objectif de ce travail est de fabriquer des éléments logiciels pour les musiciens.

La photographie a profondément bouleversé le monde de la peinture. Il en est de même des techniques de stockage et de reproduction du son qui ont ouvert aux musiciens de nouveaux horizons. Se promener dans la rue, entendre une mélodie de saxophone à travers une fenêtre entrouverte ; probablement la mélodie résulte d'un appareillage électronique. Tout se passe comme si mais le joueur ne joue pas. C'est une des manières de simuler le phénomène saxophone. Depuis 1956, l'ordinateur a permis de créer un matériau sonore à partir de presque rien (quelques règles de calculs et un convertisseur numérique-analogique) : la synthèse sonore. Il permet également de transformer les sons. Il permet aussi d'envisager de nouvelles formes d'écritures : la composition assistée par ordinateur. Beaucoup de musiciens, d'ingénieurs et de chercheurs se sont lancés dans l'aventure de l'informatique musicale.

La synthèse sonore, processus qui génère à l'aide d'une machine informatique un signal comme une suite d'échantillons numériques, débute en 1957 avec l'invention du convertisseur numérique analogique. Les inventeurs sont une équipe de la Division Recherche des laboratoires *Bell Telephone*, dirigé par Max MATHEWS (Etats Unis d'Amérique). Au moins 40 000 valeurs d'amplitude doivent être données pour obtenir une seconde de son : soit 40 000 instructions élémentaires. Or il suffit de quelques instructions pour que le guitariste pince une des cordes de son instrument. On comprend la difficulté de mettre au point un logiciel de synthèse : celui-ci doit réduire la quantité d'information modifiable et générer l'autre partie de l'information automatiquement.

Le premier procédé de synthèse s'est appuyé sur le concept de table d'ondes. Remarquant que la hauteur d'un son est liée à la périodicité de son signal acoustique, le logiciel *Music III*, mis au point par l'équipe de Max MATHEWS en 1959, génère un ensemble de valeurs qui sont ensuite dupliquées dans le temps. La hauteur pure correspondant à un signal sinusoïdal, le logiciel utilise également comme élément de base la fonction *sinus*.

Les analyses du signal en termes de séries de FOURIER<sup>2</sup> donnent un cadre théorique puissant pour envisager la synthèse d'un son comme une somme de sinusoïdes de différentes fréquences. Le son est représenté non plus comme une suite d'échantillons ou une suite périodique (table d'ondes) mais comme une sommation de sons périodiques élémentaires : les partiels. On parle de synthèse additive. L'économie est d'un autre type que celle de la table d'ondes : l'avantage est que cette représentation du son est proche de la manière dont l'être humain perçoit les sons.

Plus tard, pour exprimer l'évolution du son dans le temps, des ingénieurs ont introduit le concept de transformée de FOURIER à court-terme.

La synthèse a permis et permet encore de pointer la complexité de la perception humaine du son ; elle souligne la finesse des attributs sonores que l'homme est capable de déceler. La synthèse a révélé une psychoacoustique des sons complexes.

D'autres techniques de synthèse ont vu le jour. A partir de 1969, est apparue la synthèse par modèle physique initiée par Claude CADOZ en France, par Pierre RUIZ aux Etats Unis d'Amérique. L'objectif est de construire un modèle algorithmique qui s'inspire de la modélisation des instruments de musique faite par le physicien. Dans cette perspective, on parle de lutherie informatique. L'instrument réel est une métaphore de modèles virtuels qui

<sup>2</sup>Le mathématicien Joseph FOURIER élabore en 1822 à Grenoble les « séries de FOURIER » : une modélisation mathématique des phénomènes vibratoires.

servent à la synthèse. De manière abrégée, le physicien décrit l'instrument en termes de processus de transformation de l'énergie. L'instrument se décompose en trois parties : le dispositif d'excitation ou exciteur, le dispositif vibrant ou structure vibrante, le dispositif résonant ou résonateur. Notre travail fait partie de cette approche et se focalise sur la simulation d'excitateurs percussifs.

L'ordinateur transforme profondément la technologie mais aussi la méthodologie. Le paradigme de la synthèse par modèle physique invite à *connaître pour simuler*, et à *simuler pour connaître* [CADOZ, 94]. Ainsi, la double thématique de la thèse, l'une théorique, l'autre appliquée, se justifient mutuellement.

Pour résumer, l'objet de notre travail est *l'étude et la simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique*. Cette étude sur l'excitation percussive a un double objectif :

- (i) contribuer à une meilleure connaissance des mécanismes physiques et psychoacoustiques ;
- (ii) proposer des modèles de simulation numérique pour la création musicale par ordinateur.

Elle s'inscrit dans le programme de recherche de l'Acroe (Association pour la création et la recherche d'outils d'expression), laboratoire d'accueil de la formation doctorale ATIAM (Acoustique, traitement du signal, informatique appliqués à la musique).

Dans la première partie, nous présentons un certain nombre de travaux passés et présents relatifs à ce thème et montrons les motivations qui sous-tendent ce travail de recherche. Le premier chapitre, « l'ordinateur pour faire de la musique », aborde trois thèmes et résultats de recherche réalisés à l'Acroe qu'il nous semble important de détailler : l'approche instrumentale, le transducteur gestuel rétroactif et le langage Cordis-Anima. Nous posons au chapitre suivant la problématique sur les excitateurs percussifs. Le troisième chapitre rappelle quelques travaux sur la psychoacoustique des sons percussifs. Au chapitre suivant, nous présentons des techniques de synthèse de sons percussifs. Le cinquième chapitre aborde brièvement les instruments à percussion usuels. Le sixième chapitre donne des précisions sur l'outil de synthèse et de modélisation utilisé.

La deuxième partie s'intitule « Chocs viscoélastiques ». Un modèle minimal de percussion est étudié au chapitre VII. Une application et un développement de ce modèle sur la percussion multiple figure au chapitre VIII. Une seconde application concernant les sons de voix parlées est donnée au chapitre IX.

La troisième partie se focalise sur les dissipations et les amortissements aux cours de la percussion. Le chapitre X étudie le comportement du feutre du marteau de piano. Le chapitre XI clarifie les concepts des réseaux utilisés en électricité et les concepts des réseaux particuliers. Le chapitre XII traite le phénomène d'amortissement dû aux frappes stressées.

Nous concluons par un bilan partie par partie, nous tentons de répondre aux questions posées dans la problématique et nous terminons par les perspectives ouvertes par ce travail.

Nous invitons le lecteur à découvrir en annexe une méthode originale pour analyser les modèles de percuteur : l'isorésonance. Nous invitons également le lecteur à écouter les sons du cédé audio joint à ce document ; un "livret" annexé à la fin d'ouvrage détaille le contenu du cédé.

Puisse ce travail apporter quelques rayons : - de lumière pour élargir et transformer notre regard sur les phénomènes percussifs ; - de chaleur pour enthousiasmer les faiseurs de sons.

# **PARTIE 1**

**TRAVAUX PASSÉS ET PRÉSENTS,  
MOTIVATIONS**

---

# CHAPITRE I

---

## L'ORDINATEUR POUR FAIRE DE LA MUSIQUE

---

Choisir l'ordinateur comme outil de création avec la perspective de la relation instrumentale est une démarche qui a des conséquences techniques et artistiques.

Nous précisons brièvement dans la première section l'approche instrumentale. Nous décrivons dans la section suivante l'outil matériel de l'Acroe qui permet la confrontation entre la dynamique du corps du musicien et les objets virtuels de l'ordinateur : le transducteur gestuel rétroactif. La troisième section présente le langage de synthèse et de simulation d'objets physiques visibles, audibles et manipulables : Cordis-Anima.

### 1. L'APPROCHE INSTRUMENTALE

« L'ordinateur peut se dire outil universel : instrument construit et concret sous la main, mais d'application ouverte et indéfinie comme un théorème. » - Michel SERRES

Faire de la musique par ordinateur est une intention louable mais comme le remarque Michel SERRES ne constitue pas dans le terme "faire" une application fermée et définie. Il faut ajouter à cette intention des contraintes, des hypothèses supplémentaires car sans cela le champ d'investigation est trop ouvert.

Ainsi, le travail de la thèse s'inscrit dans une approche de la musique par l'instrument. L'option fondamentale est de privilégier une relation au son la plus simple possible à l'image de l'enfant qui saisit des objets très divers et qui frappe dessus, faisant sa propre expérience du sonore par ses capacités motrices et auditives. La synthèse par modèles instrumentaux se propose de garantir de tels modes de communication, de compréhension et de perception. Pour des raisons technologiques, le corps avait été évincé de la musique par ordinateur. Pour certains musiciens cela est vécu comme une libération. Depuis 1950 la musique acousmatique donne à entendre de très belles pièces musicales diffusées par haut-parleur. Pour notre part, même si l'approche instrumentale n'est pas suffisante, nous la posons comme nécessaire.

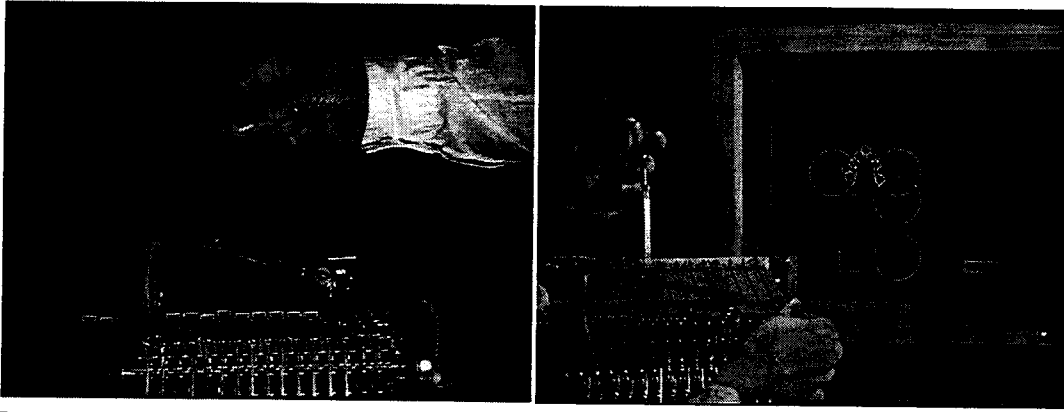
Il est clair que la relation instrumentale dépasse le cadre de la musique. Elle pose la problématique de l'interaction de l'homme avec son environnement proche. On parle d'outils.

Nous recherchons des outils d'expression pour la création artistique. Il s'agit d'ouvrir à l'homme la possibilité : - de communiquer à l'aide de son corps ; - d'accéder à un monde de pure représentation : l'ordinateur.

Ces préoccupations rejoignent selon nous les propos du philosophe Emmanuel LEVINAS qui analyse l'art en deux tendances : l'art comme représentation et l'art comme expression.

L'expressivité s'inscrit dans un rapport de personne à personne et par extension de la personne aux objets du monde. Elle ne dissocie pas support et message. Elle est vecteur de sens. Elle transcende la matière sans jamais la dépasser. Elle tend vers le particulier. A l'inverse, la représentation se suffit à elle-même. Elle peut se ranger, se compiler, s'accumuler. Elle est autonome vis-à-vis du support. Elle est affranchie des contraintes matérielles. Elle se détache du sensible nécessairement. Elle tend vers l'universel.

Il y a dans l'approche artistique et instrumentale par ordinateur un fort antagonisme conceptuel entre expressivité et représentation qui motive les recherches menées à l'Acroe.



Ima. 1.1 - *Transducteur Gestuel rétroactif pour la création sonore et d'images animées, une interface pour un dialogue homme-machine.*

## 2. LE TRANSDUCTEUR GESTUEL RÉTROACTIF

Afin de simuler la relation instrumentale et de rendre "réels" les simulacres informatiques, une interface mécanique a été développée à l'Acroe. L'interface est munie de capteurs de positions et de forces. Elle permet de transformer un phénomène gestuel en information électrique. Elle est munie également d'effecteurs (ou moteurs). L'interface transforme ainsi de l'information électrique de position ou de force qu'elle reçoit de l'ordinateur en information mécanique destinée à l'opérateur. L'interface possède également un convertisseur analogique-numérique qui transforme les flux entrant et sortant électrique en signaux numériques traités par ordinateur. Le principe est illustré à la figure 1.1. L'image 1.1 donne un aperçu du dispositif. Cette interface est appelée *transducteur gestuel rétroactif* ou TGR. Le premier dispositif, mis au point en 1978 par Jean-Loup FLORENS était constitué d'un stick à un degré de liberté porté par un chariot [FLORENS, 78]. Le deuxième dispositif se présentait sous la forme d'une touche (type touche de piano) à un degré de liberté [CADOZ&al., 81]. Enfin, le troisième modèle consiste en un clavier à 16 touches : le CRM, Clavier Rétroactif Modulaire [CADOZ&al., 88], [NOURI, 95]. Le tableau 1.1 donne les caractéristiques techniques du dernier modèle.

TAB. 1.1 - *Caractéristiques techniques du Clavier Rétroactif Modulaire.*

Espace de travail	30 mm par axe
Force transitoire max	80 N
Résolution en position au point de manipulation	2 $\mu$ m
Force permanente max	40 N
Distance minimale entre les points de manipulation	13,75 mm
Temps de réponse à la commande en force	0,2 ms
Résolution en force	1,3 $10^{-3}$ N
Force de frottement résiduelle	5 $10^{-3}$ N
Accélération maximale à vide	660 m/s <sup>2</sup>
Vitesse maximale	1,8 m/s
Fréquence de coupure de la réponse en force	5 kHz

Parallèlement aux travaux sur l'interface spécifique au jeu instrumental, il a été développé un système de représentation formelle des instruments de musique : Cordis-Anima. Tous les travaux de synthèse et de simulation instrumentale se font à l'Acroe avec le formalisme Cordis-Anima.

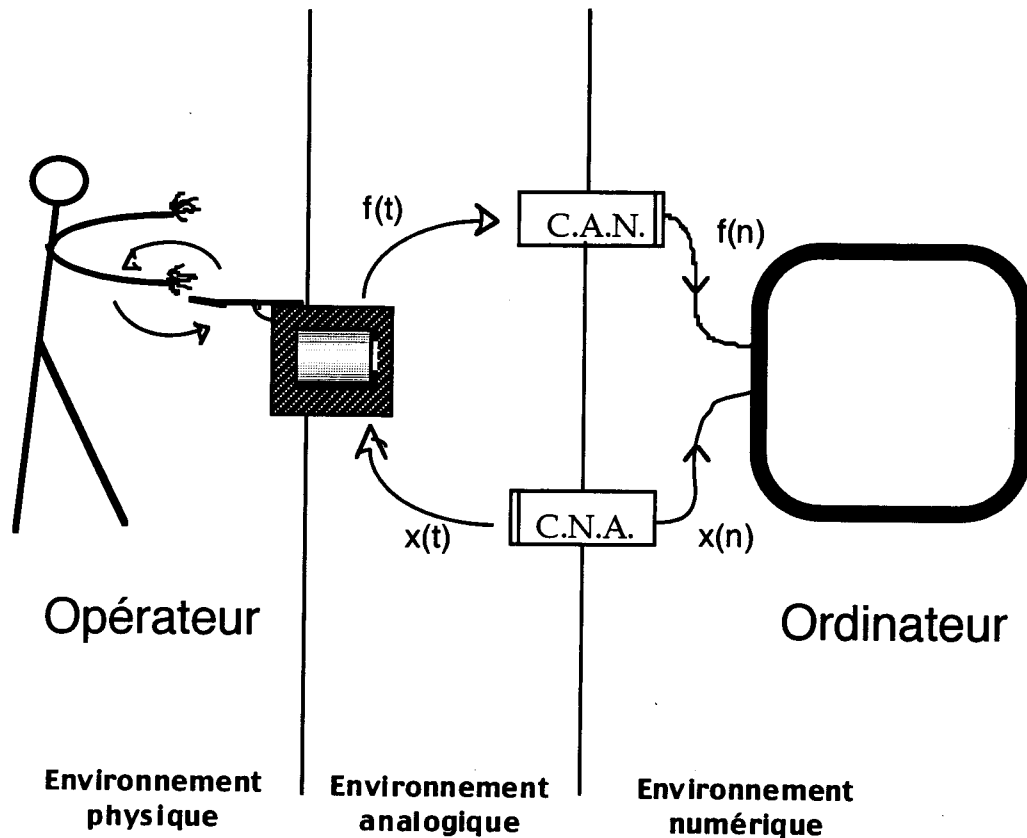


FIG. 1.1 - *Le transducteur gestuel rétroactif, une passerelle entre l'ordinateur et le geste humain.*

### 3. CORDIS-ANIMA

#### 3.1. PRÉSENTATION

Cordis-Anima (CA) est un système de modélisation et de simulation en temps réel d'objets physiques audibles, visibles et manipulables. Mis en œuvre et expérimenté par étapes depuis 1978 [CADOZ, 79], il constitue le noyau d'un outil informatique pour la création musicale et la création d'images animées. Nous présentons ici quelques éléments fondamentaux de ce formalisme et du langage associé. Pour une présentation complète on se référera aux publications suivantes de l'Acroe [CADOZ&al., 81], [CADOZ&al., 90], [CADOZ&al., 93].

Le formalisme répond à trois requêtes :

- (i) Il doit intégrer les processus de communication avec l'opérateur par l'intermédiaire des transducteurs [intrinsèquement communicant].
- (ii) Il doit être modulaire. Un sous-ensemble d'un objet doit être un objet [assemblage structurel].
- (iii) Tout objet, décrit par le formalisme, obéit aux principes de la dynamique du point (ou mécanique de Newton) : conservation de la masse, de l'énergie, principe d'action-réaction...[propriétés internes]

### 3.2. LES POINTS DE COMMUNICATION DE TYPE M ET DE TYPE L

La technologie des transducteurs impose que la communication physique entre un opérateur et un objet simulé par ordinateur soit discrète et de dimension finie. On doit alors adopter une représentation spatiale ponctuelle de la communication.

A la différence des canaux visuel et auditif, le canal gestuel est le produit d'une interaction entre l'opérateur et le transducteur. Cette interaction existe au cœur de la théorie de la dynamique du point. Pour représenter l'interaction, l'information entre deux entités de CA est véhiculée par une paire de signaux.

Le phénomène physique est représenté par Newton en termes d'actions. Il y a nécessairement deux grandeurs physiques en cause : l'une intensive qui est source de mouvement (la force par exemple), l'autre extensive qui manifeste ce mouvement (la vitesse ou la position par exemple). Ces deux grandeurs sont dynamiques ; elles varient en fonction du temps.

L'ordinateur et ses transducteurs imposent une réduction fondamentale : traduire un phénomène physique en termes de signaux. Les transducteurs sont de deux natures : soit ils imposent une grandeur intensive et mesure la variation d'une grandeur extensive ; soit ils imposent une grandeur extensive et mesure la variation d'une grandeur intensive. Les premiers sont appelés effecteurs, les seconds capteurs.

En généralisant ce point de vue, on définit deux types de points de communication :

les *points M* qui émettent un signal extensif et reçoivent un signal intensif et les *points L* qui émettent un signal intensif et reçoivent un signal extensif (cf. figure 1.2).

Un objet Cordis-Anima communique avec l'extérieur par un ensemble de points de communication (cf. figure 1.3).

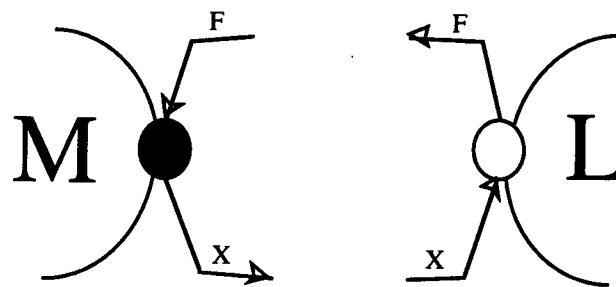


FIG. 1.2 - Point M et point L, représentation des variables dynamiques. F, forces ; X, positions.

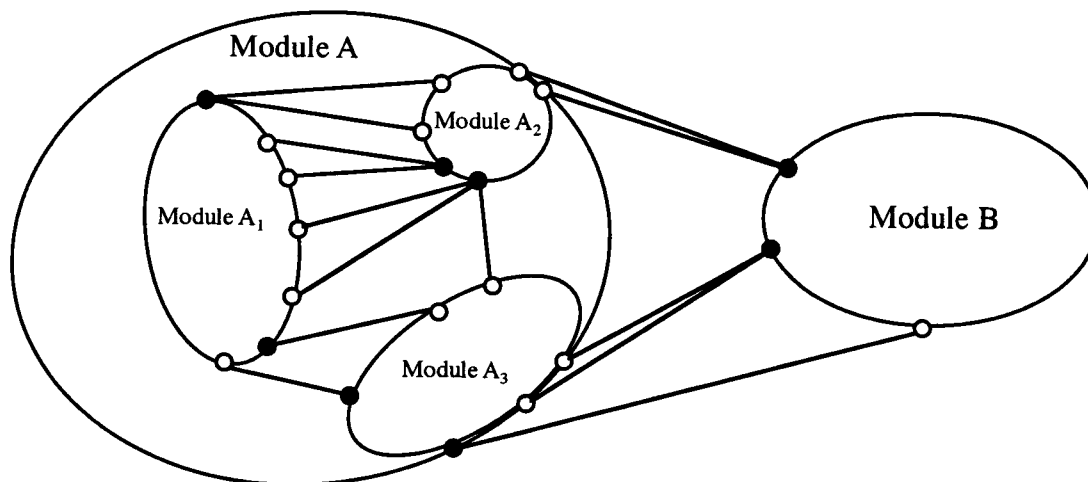


FIG. 1.3 - Exemple d'un objet Cordis-Anima : disques blancs, points L ; disques noirs, points M ; additivité de la grandeur intensive, plusieurs points L se connectent à un point M.

### 3.3. LE POINT MATÉRIEL ET L'ÉLÉMENT DE LIAISON

On cherche à construire les plus petits objets qui comprennent des *points M* et des *points L*. Une propriété des grandeurs intensives est d'être additive. Il est donc possible de connecter plusieurs *points L* à un *point M*.

La plus petite décomposition possible donnant lieu à un système générique est donnée par deux objets ou atomes : le *point matériel* qui comporte un point de communication *M* et l'*élément de liaison* qui comporte deux points de communication *L* (cf. figure 1.4).

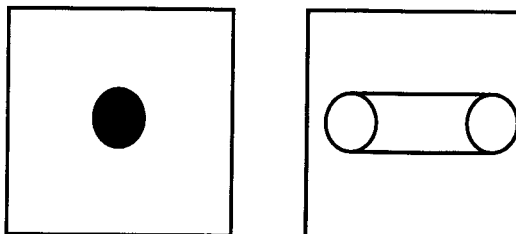


FIG. 1.4 - Les deux atomes de Cordis-Anima : le point matériel (un point *M*) et l'élément de liaison (deux points *L*).

Le *point matériel* émet une position et reçoit une résultante de forces ; il est localisé dans l'espace. Il représente un élément de matière.

L'*élément de liaison* émet des forces à partir du mouvement de deux points matériels connectés à ses extrémités ; il représente une interaction. Le principe d'action et de réaction implique que les deux forces émises soient des vecteurs égaux en norme, coaxiales et de sens opposés.

### 3.4. MODULES ÉLÉMENTAIRES CA

La représentation Newtonienne des interactions entre éléments est fondamentalement différente de la représentation des interactions permises par la technologie.

En physique Newtonienne, une action sur un corps est décrite par un couple de variables (extensive-intensive). L'action consiste à effectuer un travail de la variable intensive sur un corps qui manifeste un changement d'état (variable extensive). La variation dans le temps de l'une et de l'autre s'effectue simultanément (un exemple est la relation fondamentale de la dynamique  $F(t) = m \cdot \ddot{x}(t)$ ).

Du fait de la discrétisation temporelle des opérations de calcul, la simultanéité ne peut avoir d'équivalent en informatique. Les algorithmes des modules sont construits à partir d'un pas temporel incompressible *T*. Lorsque *T* tend vers 0, les algorithmes tendent vers l'expression des lois de Newton.

Un module CA est ensemble fonctionnel décrit par un algorithme et par des variables d'entrées-sorties.

Parmi les modules élémentaires citons les quatre principaux à la base de la construction de tous les objets qui sont présentés par la suite (cf. figure 1.5) :

- **La Masse libre**, *point matériel* qui représente le comportement inertiel. Son algorithme décrit la relation fondamentale de la dynamique. Il renvoie une position spatiale au temps *n* à partir d'une entrée en force au temps *n-1*. L'atome a un seul paramètre : la masse inertielle *m* (en kg) impliquée dans l'algorithme.
- **Le Sol ou Point fixe**, *point matériel* qui renvoie une position constante quelle que soit la force appliquée en entrée. Le module est dégénéré. Il a un seul paramètre : une position dans l'espace.
- **Le Ressort ou la Liaison élastique**, *élément de liaison* dont l'algorithme décrit une interaction élastique linéaire. Il a deux paramètres : - la raideur de l'interaction élastique *k* ( $\text{Nm}^{-1}$ ) ; - la distance *l* (m) entre les deux points matériels connectés pour laquelle la force est nulle (Ressort au repos). Il renvoie une force au temps *n* à partir des positions au temps *n*.
- **Le Frein ou la Liaison visqueuse**, *élément de liaison* dont l'algorithme décrit une interaction visqueuse linéaire. Le paramètre est la viscosité de la liaison. Il renvoie une force au temps *n* à partir des positions au temps *n* et au temps *n-1*.



- **La liaison conditionnelle**, *élément de liaison* dont la nature de l'interaction (viscoélastique linéaire par morceau) dépend de conditions sur les deux positions des deux points matériels connectés. Il est possible de modéliser ainsi des non-linéarités.

Remarque :

Les variables circulant par les points de communication peuvent être uni- ou multi-dimensionnelles, coordonnées de points ou de forces, linéaires, planaires ou spatiales.

### 3.5. UN OBJET CORDIS-ANIMA

Un objet Cordis-Anima (CA) est un assemblage de modules. Cet assemblage se fait suivant les règles de construction permises par la nature des modules (*point matériel* ou *élément de liaison*). En d'autres termes, un objet CA est un réseau dont les nœuds sont des *points matériels* et dont les arcs sont des *éléments de liaison*. Les règles de connexion assurent la cohérence de la simulation.

### 3.6. LE LANGAGE INFORMATIQUE

En tant qu'ensemble d'éléments et de règles de composition, Cordis-Anima est un langage. Il permet de décrire des objets du monde physique (modéliser) et de les mettre en scène dans l'espace virtuel des simulations (simuler). Ainsi il est possible avec Cordis-Anima de construire dans cet espace virtuel des objets Newtoniens qui n'ont pas de référent réel. Il peut alors devenir, comme tout langage, un moyen de création.

#### 3.6.1. DIMENSION DE L'ESPACE MODÉLISÉ/SIMULÉ : TOPOLOGIE ET GÉOMÉTRIE

Selon le type de phénomène que l'on souhaite simuler, on peut se limiter à une modélisation dans un espace à une ou deux dimensions. Cela permet de diminuer considérablement le coût des algorithmes. Ainsi, dans le cas d'une simulation pour la synthèse sonore, on sait que le signal électrique transmis aux haut-parleurs est unidimensionnel. Nous pouvons donc nous limiter dans une première approche à modéliser et simuler des objets dont les *points matériels* se meuvent dans un espace unidimensionnel. La position d'un *point matériel* est donnée par une seule coordonnée sur un axe, la distance entre deux points matériels est donnée par la valeur absolue de la différence de leurs coordonnées respectives. Cette réduction de l'espace des mouvements n'impose rien sur le degré de connexité d'un point matériel : il faut donc distinguer la dimension topologique (les connexions) de la dimension géométrique (le mouvement).

#### 3.6.2. MATIÈRE DISCRÈTE

Le formalisme CA représente un système physique comme un ensemble d'atomes ; il n'y a pas de représentation continue de la matière. Cette discrétisation spatiale peut se faire avec une échelle telle que les phénomènes physiques synthétisés paraissent à nos sens continus.

#### 3.6.3. TEMPS DISCRET

On appelle *T-simulation* la situation dans laquelle un algorithme vérifie que les signaux échantillonnés reçus et produits satisfont d'une part les conditions de SHANNON à la période T ; d'autre part sont synchrones. Ils vérifient en outre que le temps de calcul entre un échantillon d'entrée et un échantillon de sortie est exactement T.

Les algorithmes implantés satisfont trois exigences :

- (i) Ils s'identifient aux lois de la dynamique Newtonnienne pour une période de simulation T négligeable par rapport à toutes autres grandeurs temporelles du système.
- (ii) Ils obéissent aux principes de causalité temporelle. Le calcul doit être explicite quel que soit l'assemblage des modules.
- (iii) Ils sont les plus économiques possible. Ils comportent le nombre minimum d'opérations machine.

Les opérateurs élémentaires de la machine sont la mise en mémoire et le transfert de données d'une part, les opérateurs logiques d'addition et de multiplication d'autre part. Le processus algorithmique linéaire le plus simple, de structure permanente, est une suite numérique définie par :

$$X_n = \sum_{1 \leq p \leq n} a_{n-p} X_{n-p} + \sum_{0 \leq p \leq n} a_{n-p} Y_{n-p} + \mu$$

où  $(X_n)$  est le processus et  $(Y_n)$  représente un influence extérieure.

Ce processus est capable d'évoluer de lui-même ou sous une influence extérieure. Les variables d'états caractérisant l'évolution d'un système mécanique peuvent être décrites par les processus suivants :

position :	processus d'ordre 0,	$X_n = \mu$
déplacement :	processus d'ordre 0,	$X_n = \alpha Y_n + \mu$
:		
vitesse :	processus d'ordre 1,	$X_n = aX_{n-1} + \alpha Y_n + \beta Y_{n-1} + \mu$
accélération :	processus d'ordre 2	$X_n = aX_{n-1} + bX_{n-2} + \alpha Y_n + \beta Y_{n-1} + \gamma Y_{n-2} + \mu$
:		

On choisit les schémas de processus correspondant à la vitesse retardée et à l'accélération centrée (1.01).

Dans la suite, nous notons X, les variables positions, V, les vitesses et A, les accélérations.  $T_e$  est la période d'échantillonnage choisie }

$$V_n = \frac{X_n - X_{n-1}}{T_e} \text{ et } A_n = \frac{V_n - V_{n-1}}{T_e} = \frac{X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1}}{T_e^2} \quad (1.01)$$

Vitesse retardée et accélération centrée

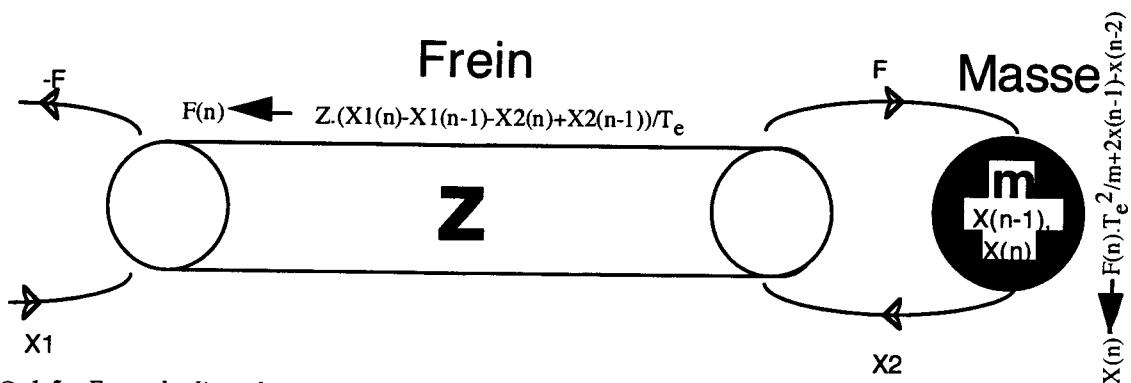


FIG. 1.5 - Exemple d'un objet CA, aspect algorithmique d'un module Frein connecté à un module Masse.

Les forces produites par la liaison élastique linéaire ou ressort et par la liaison visqueuse linéaire ou frein entre deux points matériels de coordonnées  $X^1$  et  $X^2$  s'écrivent par (1.02) :

ressort  $F^{1,2} = -F^{2,1} = \alpha(X_n^1 - X_n^2)$  avec  $\alpha \geq 0$  (1.02)

$$\text{frein} \quad F^{1,2} = -F^{2,1} = \beta(V_n^1 - V_n^2) \text{ avec } \beta \geq 0$$

On note  $F^{1,2}$  la force exercée par le point matériel 1 sur le point matériel 2.

On peut alors écrire les algorithmes des trois modules élémentaires CA : le Ressort, le Frein et la Masse (1.01) :

Ressort de raideur  $k$  (Nm-1) entre deux points (i) et (j) :

$$F^{i,j}(n) = -F^{j,i}(n) = -k(X_n^i - X_n^j)$$

Frein de viscosité  $z$  (Nsm-1) entre deux points (i) et (j) :

$$F^{i,j}(n) = -F^{j,i}(n) = -\frac{z}{T_e}(X_n^i - X_{n-1}^i - X_n^j + X_{n-1}^j)$$

Masse (i) d'inertie  $m$  (Kg) :

$$\frac{m}{T_e^2}(X_{n+1}^i - 2X_n^i + X_{n-1}^i) = \sum_j F_{res}^{j,i}(n) + F_{fro}^{j,i}(n) + \dots$$

$$\text{ou encore : } X_n^i = 2X_{n-1}^i - X_{n-2}^i + \frac{T_e^2}{m} \left( \sum_j F_{res}^{j,i}(n-1) + F_{fro}^{j,i}(n-1) + \dots \right)$$

#### 3.6.4. AUTRES MODULES

**Module intégré :** Dans certaines circonstances, il est parfois utile d'encapsuler plusieurs algorithmes élémentaires afin de réduire le coût de la simulation. On appelle module intégré ce type de module. Ses paramètres sont constitués de la réunion des paramètres de chaque composant. Cette utilisation de module intégré se fait au détriment de la modularité du langage.

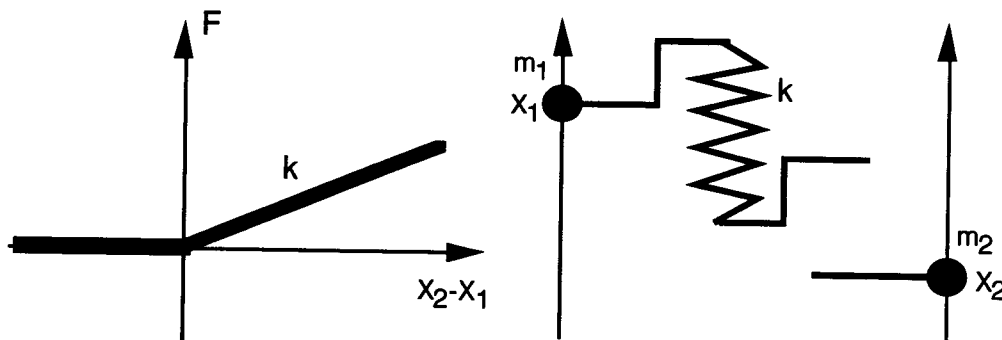


FIG. 1.6 - Butée élastique dans un espace des mouvements unidimensionnel : haut, caractéristique force-distance ; bas, représentation schématique.

**La butée élastique unidimensionnelle à seuil nul :** *Élément de liaison*, la butée élastique est caractérisée par deux états : - un état où la butée se comporte comme une liaison viscoélastique linéaire ; - un autre état où la butée n'émet aucune force. La condition de passage d'un état à un autre porte sur une inéquation sur les positions des deux *points matériels*  $M_1$ ,  $M_2$  connectés. Soit la butée unidimensionnelle connectée à droite par  $M_1$  et à gauche par  $M_2$  ; si la position de  $M_1$  est supérieure à la position de  $M_2$ , la butée est dans l'état viscoélastique (cf. figure 1.6). La butée est toujours repulsive.

**La liaison conditionnelle :** Plus généralement, on définit également une liaison déterminée par des automates d'état. La liaison se caractérise par un ensemble d'états  $E_i$ . Un état de la liaison est défini par un ensemble de variables d'états, un ensemble de paramètres,

des conditions de passage de cet état vers les autres états et des dispositions à prendre lorsque la condition de passage est remplie.

Pour une présentation complète de Cordis-Anima le lecteur se référera à la publication de base de l'Acroe : [CADOZ&al., 90].

Nous venons de décrire brièvement le formalisme CA ; ajouté à l'interface gestuelle capable de restituer des comportements mécaniques, le paradigme de la relation instrumentale prend tout son sens et ouvre des champs d'expérimentation vastes. Nous pouvons maintenant développer la problématique de la thèse.



---

## CHAPITRE II

---

# PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE

---

### 1. FINALITÉ

Construire un outil numérique qui fait des sons synthétiques est de nos jours relativement aisé. Obtenir une variation à partir de ces sons est accessible dès lors que le système possède des paramètres numériques.

En revanche, obtenir une variation de timbre ou une variété de timbres qui offrent du sens pour nos sens est une entreprise ardue. Nous posons le problème de l'expressivité des modèles de synthèse.

Une forme est expressive dès lors que placée dans un contexte sonore elle est perçue comme émergente. Elle peut impliquer des processus bas-niveau. La modulation d'amplitude d'un vibrato vocal au sein d'un orchestre peut illustrer cette définition. De même, dans un ensemble instrumental, à intensité sonore identique, les instruments synthétiques (ceux existants sur le marché) sont toujours perçus comme "jouant moins fort" que les instruments traditionnels. La forme expressive peut impliquer des processus haut-niveau comme la personnalité d'un interprète, la technique gestuelle en jeu ou les caractéristiques physiques de l'interprète.

A ce niveau, l'objectif de la thèse est d'exploiter les potentialités d'un outil de synthèse pour obtenir des variations et des variétés de timbres qui génèrent des formes expressives.

Cette recherche de l'expressivité des modèles de synthèse ne peut se faire sans une recherche sur la façon de recevoir le sonore, une recherche sur les processus perceptifs qui nous amènent à structurer notre écoute. La thèse vise à mieux connaître les invariants perceptifs en jeu dans les sons percussifs. Existents-ils des invariants perceptifs liés à la relation percuteur-percuté ?

Il est important de souligner que la variation sur un timbre donné n'est pas une fantaisie de chercheur ou de luthier. La variété (de timbre) ne remplacera jamais la variation. On sait que la plupart des invariants perceptifs obéissent au principe de continuité : l'unité d'une forme acoustique (pattern) repose sur une apparition/disparition progressive d'attributs comme l'intensité, le timbre, la hauteur, le synchronisme des composantes...

L'expressivité dans le cadre de la relation instrumentale s'opère à plusieurs niveaux. La forte hypothèse de la thèse est qu'une grande partie de l'expressivité des timbres sonores est déterminée par le système exciteur.

### 2. L'EXCITATEUR PERCUSSIF

Dans le chapitre premier nous montrons que l'Acroe étudie la relation instrumentale. Pour étudier ce qui se passe du geste humain au phénomène sonore il est nécessaire de décomposer le processus en éléments catégoriels. Puisque nous cherchons à simuler des phénomènes physiques, il est naturel d'introduire une analyse de l'instrument de musique en termes d'énergies reçues, produites et transformées.

Ainsi, la chaîne instrumentale se décompose en cinq maillons fonctionnels : le geste, l'excitateur, la structure vibrante, l'environnement local et l'environnement global (cf. figure 2.1 et tableau 2.1).

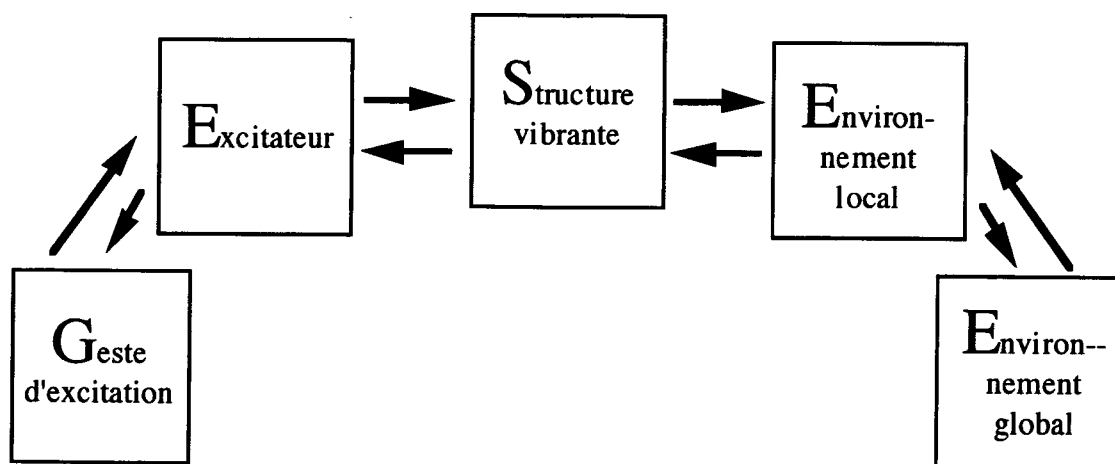


FIG. 2.1 - Chaîne causale du geste au son, interaction entre les différents éléments . Il peut y avoir d'autres interactions mais elles sont faibles.

Le geste est ce que l'instrumentiste communique par son corps à l'instrument : il peut être un geste d'excitation comme le pincement d'une corde de guitare, la frappe d'une timbale avec une mailloche ; il peut être un geste de modification comme le déplacement de la main sur la frette d'une guitare, l'enfoncement de la pédale douce pour un pianiste... Nous ne traitons dans la thèse que les gestes d'excitation. Dans tous les cas la bande passante d'une succession de gestes d'excitation est faible, inférieure à 16 Hz. Le geste est la source d'énergie de tout phénomène sonore dans un instrument traditionnel.

La structure vibrante (SV) est constituée d'un élément qui vibre dans le spectre audible. C'est un élément passif énergétiquement. Il dissipe de l'énergie très lentement dans le temps. Une grande partie de l'énergie vibratoire est transmise à l'environnement local progressivement. Les propriétés structurelles de cet élément vont constituer la matière spectrale du son en fin de chaîne. Nous pouvons citer à titre d'exemple les cordes pour le violon, la colonne d'air pour la clarinette, la membrane pour une caisse claire.

L'environnement local, élément passif, transmet l'énergie vibratoire de la structure vibrante (SV) à l'environnement global. Seul, l'élément est fortement dissipatif. Il filtre l'information spectrale. A une extrémité, il collecte la vibration de l'ensemble des SV impliquées dans l'instrument ; à l'autre extrémité, il interagit avec l'environnement acoustique global. Le son se propage dans un milieu solide. L'environnement local du violon est l'ensemble chevalet, âme et caisse de résonance ; celui du piano, la table d'harmonie.

TAB. 2.1 - Analyse de quelques instruments en termes d'éléments catégoriels.

Instruments	Geste	Excitateur	Structure vibrante	Environnement local	Environnement global
violon	continu	archet	corde	caisse en bois	air
timbale	impulsif	mailloche	membrane	cavité acoustique	air
clarinette	continu (souffle)	anche	colonne d'air	pavillon	air
trompette	continu (souffle)	lèvres	colonne d'air	pavillon	air
maracas	pseudo-périodique	graines	non	calebasse	air

L'environnement global est caractérisé par le milieu physique de propagation. Le son se propage dans l'air. Avant d'atteindre l'oreille, le son se colore suivant la disposition de la salle, de l'espace extérieur, du gradient de température ou de la vitesse du vent de la masse d'air. Il se réfléchit sur le sol, les parois ... ; le déplacement de l'instrument et son orientation modifient le mécanisme de rayonnement du son. L'ensemble de ces aspects sont pris en compte par l'environnement global. Comme le son se propage dans un gaz, il est très peu

atténué. L'environnement global peut privilégier certaines bandes de fréquences ou générer un écho.

L'excitateur (EX) lorsqu'il est présent est un élément intermédiaire entre le geste et la SV. D'une part, il reçoit de l'information gestuelle basse fréquence ; d'autre part, il interagit avec la SV dans la bande de fréquence audible. Il est passif. Il transmet une partie de l'énergie gestuelle d'excitation, l'autre partie étant soit réfléchi soit absorbée par l'excitateur. Un exemple est donné par l'ensemble touche-mécanique d'échappement-marteau pour le piano. Nous distinguons deux catégories d'excitateurs : - ceux qui entretiennent continuellement l'apport en énergie, nous les appelons excitateurs à entretien ; - ceux qui communiquent de façon brève l'énergie, nous les appelons excitateurs percussifs.

Le thème de la thèse étant l'étude des phénomènes percussifs, nous ne nous intéressons qu'aux excitateurs percussifs.

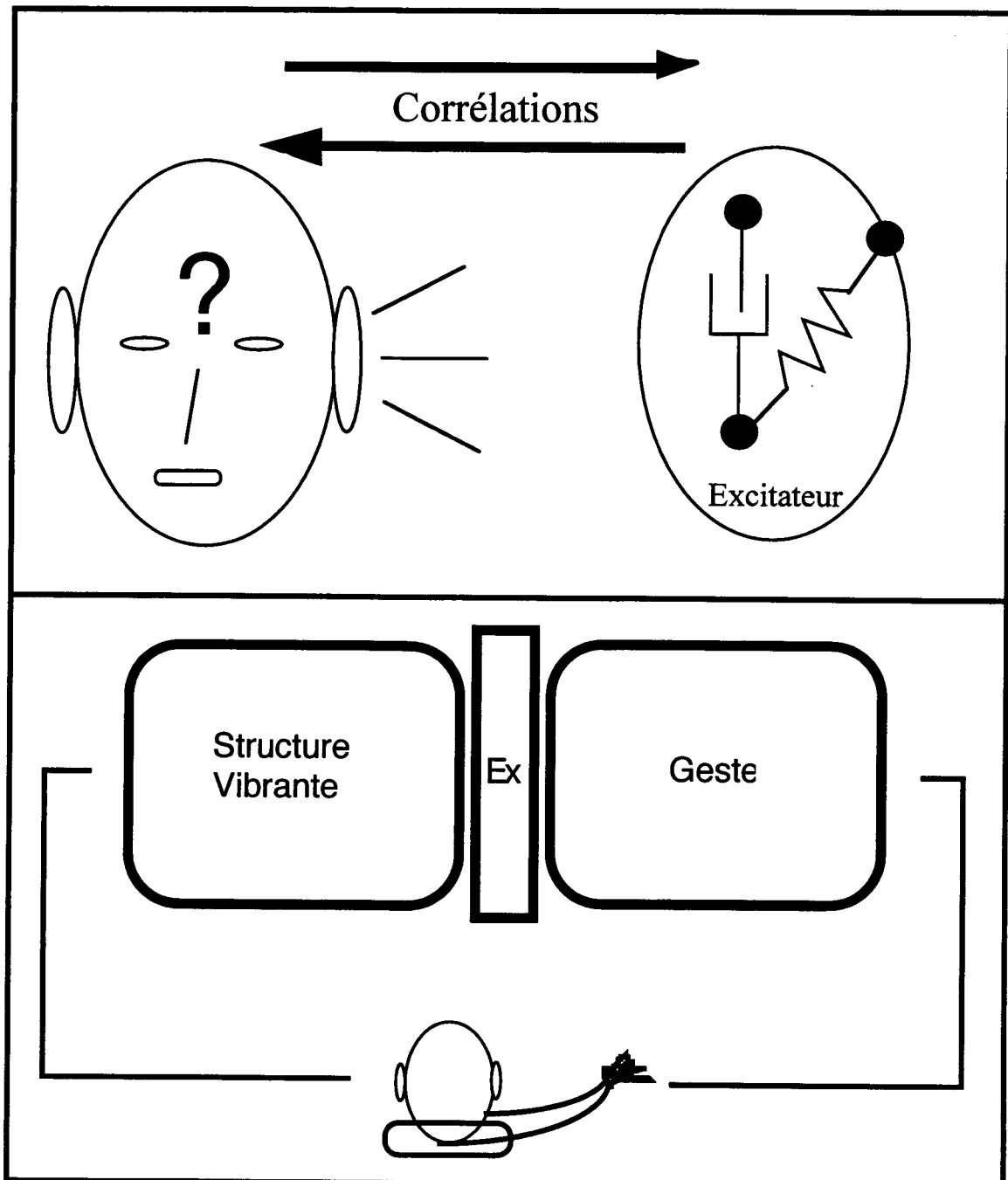


FIG. 2.2 - Objectifs de la thèse : connaître et simuler.



### 3. REFORMULATION DE LA PROBLÉMATIQUE : CONNAÎTRE ET SIMULER

Après des considérations générales sur l'expressivité des outils de synthèse et une analyse catégorielle de l'instrument de musique, nous énonçons les deux objectifs de la thèse.

Le premier objectif est de contribuer à l'étude psychoacoustique des sons percussifs. Quels sont les attributs esthétiques<sup>1</sup> spécifiques à la percussion ? Existe-t-il des invariants liés à l'excitateur indépendamment du timbre de percussion ? Quelles corrélations peut-on faire avec la représentation newtonienne du mécanisme d'excitation ? Dans quelles mesures pouvons-nous inférer la nature et les caractéristiques de l'excitateur percussif indépendamment de la structure vibrante ?

Le deuxième objectif, plus appliqué, est de mettre en œuvre des algorithmes informatiques qui simulent des excitateurs percussifs pour la création musicale. Les excitateurs virtuels doivent offrir une variété pertinente d'une part en référence aux excitateurs usuels dans les instruments à percussion, d'autre part dans le cadre de l'instrumentarium CA. Tout en offrant une stabilité à tout type de geste et à tout type de SV, l'excitateur doit offrir une variation structurelle et dynamique qui donne sens à la relation instrumentale. Étant donnée une SV, quelle est sa palette sonore percussive ? Enfin, les modèles d'excitateurs doivent potentiellement s'adapter à la plate-forme temps réel de Cordis-Anima (cf. figure 2.2).

Les critères pour évaluer un bon excitateur sont difficiles à déterminer car ce qui est visé est la qualité de la relation instrumentale et non la qualité du ou des sons en eux-mêmes. De plus, un outil de création par ordinateur ne peut être exploré exhaustivement car le système est ouvert sur le monde extérieur par le geste de l'opérateur.

Se focalisant sur les sons percussifs et les excitateurs percussifs, nous indiquons dans les pages suivantes des travaux en psychoacoustique (chapitre III) et des travaux en synthèse sonore (chapitre IV) qu'il nous paraît important de détailler.

---

<sup>1</sup>Nous adoptons la terminologie de Jean MOLINO (MOLINO, J. : *Fait musical et sémiologie de la musique, Musique en jeu*, 17, 37-62) cité dans [NATTIEZ, 76], p. 50. Le processus de symbolisation selon J. MOLINO implique trois pôles : (i) le message lui-même dans sa réalité matériel - niveau neutre, (ii) les stratégies de production du message - niveau poétique, (iii) les stratégies de réception du message - niveau esthétique.

---

## CHAPITRE III

---

### LA PERCEPTION DES SONS PERCUSSIFS

---

Nous présentons quelques travaux qui concernent de près la problématique des sons percussifs. Premièrement, nous nous intéressons aux sons d'origine instrumentale. Il n'existe pas jusqu'à présent de travaux sur l'élaboration d'un espace de timbre de sons strictement percussifs. Nous nous contentons de l'analyse multidimensionnelle la plus récente effectuée sur 98 sujets. Deuxièmement, nous décrivons deux expériences sur des sons percussifs d'origine non-instrumentale : des sons d'applaudissements humains et des sons de percussions de casseroles.

#### 1. ESPACE DE TIMBRES

De nombreux chercheurs ont tenté de décrire la perception des timbres instrumentaux. Par timbre, ils s'accordent à définir tout ce qui différencie deux sons de même hauteur, de même sonie et de même durée. Il est généralement admis que le timbre est constitué de plusieurs attributs perceptifs. En faisant l'hypothèse qu'un jugement perceptif de dissimilarité entre deux stimuli peut être interprété comme une distance géométrique dans un espace à N-dimension, les auteurs [GREY, 77], [KRUMHANSL, 89], [KRIMPHOFF&al., 94] et [DONNADIEU&al., 94] ont cherché à mettre en évidence des invariants acoustiques prédisant l'organisation perceptuelle des timbres par règle de proximité. Les résultats des deux dernières références sont relatés dans les sections qui suivent.

##### 1.1. ANALYSE MULTIDIMENSIONNELLE [DONNADIEU&AL., 94]

L'étude comprenait 18 stimuli de sons synthétiques fabriqués au moyen d'un synthétiseur *Yamaha TX802*. Il y avait 12 imitations de timbres instrumentaux traditionnels et 6 timbres hybrides. Parmi les imitations, il y avait les timbres de piano, clavecin, violon, violoncelle, clarinette, hautbois, trombone, trompette, cor anglais, saxophone, flûte, basson. Tous les stimuli étaient égalisés en sonie, en hauteur et en durée. Quatre-vingt-dix-huit sujets ont participé à l'expérience. Ils devaient juger 153 paires. A partir de la matrice des distances 18x18, une représentation géométrique optimum a été proposé : un espace euclidien à 3 dimensions avec spécificités. La spécificité est un artifice pour prendre en considération des traits discrets de la perception. Une spécificité implique qu'un stimulus se distingue de tous les autres par un trait qui lui est propre. Tout se passe comme si on ajoutait une dimension supplémentaire : nulle pour tous les timbres sauf celui désigné par le trait.

Les axes principaux de l'espace des timbres ont été caractérisés verbalement par les mots « brillance », « qualité d'attaque » et « flux » .

Par ailleurs, bien que la moitié des sujets étaient des musiciens, l'analyse des différentes stratégies employées par les sujets ne montra pas de différence entre les sujets musiciens et les sujets non-musiciens.

## 1.2. CORRÉLATS PHYSIQUES DES AXES PERCEPTIFS [KRIMPHOFF & AL., 94]

A partir des mêmes stimuli de l'expérience de DONNADIEU, KRIMPHOFF poursuit l'analyse acoustique. Pour chaque timbre, le sonagramme fut extrait à partir d'une transformée de FOURIER à court-terme (TFCT). Il n'a été retenu que les parties harmoniques (jusqu'à la 30<sup>ème</sup> harmonique). La fenêtre d'analyse était de 6,4 ms (2 périodes) et le pas de déplacement de 6,4/4 ms. Les auteurs ont trouvé un paramètre acoustique très bien corrélé à l'axe « brillance » ; déjà mis en évidence par des travaux antérieurs, il s'agissait du *centre de gravité spectrale* (cgs). A partir d'un spectre harmonique ( $A_k$ ) au temps  $t_\Delta$ , ils ont calculé la fréquence

moyenne pondérée par la distribution des amplitudes sur les harmoniques  $cgs(t_\Delta) = \frac{\sum_k k \cdot A_k}{\sum_k A_k}$ . La

valeur du cgs retenu pour un timbre consistait à moyenner tous les cgs dérivés des spectres de chaque fenêtre temporelle de la TFCT.

De même, pour le deuxième axe perceptif « qualité d'attaque » ou « rapidité d'attaque », les auteurs proposèrent le paramètre acoustique *Logarithme du temps de montée* (LTM). Pour chaque timbre, on construisit une enveloppe temporelle ; une possibilité fut de prendre

$Env(t_\Delta) = \frac{\sum_k A_k(t_\Delta)}{\text{nombre total d'harmoniques}}$ . Le *temps de montée* était l'intervalle entre l'instant  $t_{seuil}$ , instant où l'enveloppe passe le seuil de perception, et l'instant  $t_{max}$ , instant où l'enveloppe atteint son maximum  $E_{max}$ . Le seuil de perception n'est pas le seuil d'audition absolue ; il dépend linéairement de  $E_{max}$ . Ainsi, le paramètre logarithme du temps de montée s'exprimait par :  $LTM = \log_{10}(t_{max} - t_{seuil})$ .

Nous n'évoquons pas le corrélat acoustique qui a été proposé pour le troisième axe car il nous semble peu fiable.

Cette étude très intéressante sur la perception des timbres instrumentaux est cependant à prendre avec circonspection si on veut l'appliquer aux sons percussifs. D'une part, le corpus contenait très peu d'instrument à percussion. D'autre part, les instruments à percussion sont une petite partie des timbres percussifs.

## 2. DES CASSEROLES PERCUTÉES PAR DES MAILLETS DE DIFFÉRENTES RAIDEURS [FREED, 90]

FREED s'est intéressé à la perception de la dureté de l'excitateur. Il a constitué un corpus de 24 stimuli : 4 casseroles de tailles différentes étaient percutees respectivement par six baguettes de duretés physiques différentes. Le type de tête de baguette par ordre de dureté physique croissante était : feutre sur caoutchouc, feutre, tissus sur bois, caoutchouc, bois, métal.

L'auteur a fait l'hypothèse que la sensation de *dureté perçue par l'auditeur* (DPA) se représente par un espace monodimensionnel. La tâche pour les 9 auditeurs consistait à écouter chaque son et à évaluer la dureté du maillet utilisé sur une échelle de 1 à 9.

Les résultats ont montré une bonne corrélation du DPA avec la dureté réelle de l'excitateur. Ce qui est remarquable est que les auditeurs ont eu la capacité d'inférer une propriété physique sur l'excitateur indépendamment de la taille de la casserole. Bien que la taille de la casserole soit liée à un invariant perceptif fort, le cgs, le système auditif a pu faire abstraction de la taille pour réaliser la tâche.

Ce résultat vient appuyer la thèse de la perception écologique [GIBSON, 66].

Souhaitant une représentation du DPA en termes de signaux, l'auteur donna 4 paramètres acoustiques a priori pertinents pour décrire la variation esthétique du timbre. L'auteur a extrait des 325 premières millisecondes de son un pseudo-sonagramme discrétisé en temps et en fréquence  $A(f,t)$  en appliquant la transformée de STAUNTER<sup>2</sup>. Cette transformée prend en compte certaines données physiologiques de la cochlée (en amont du codage neuronal). L'information sur la phase n'est pas pris en compte. Dans un deuxième temps, il calcula, à partir de la réponse en amplitude  $A(f,t)$ , la variation temporelle de l'amplitude du signal  $A(t_\Delta) = \int A(f, t_\Delta) . df$  et la variation temporelle du centre de gravité spectrale  $cgs(t_\Delta) = \int f . A(f, t_\Delta) . df$ .

TAB. 3.1 - Descripteurs acoustico-esthétique dans l'expérience de FREED sur le DPA.

<u>Paramètres acoustiques</u>	$\overline{cgs} = \frac{\int cgs(t_\Delta) dt}{\int dt}$	$\frac{\Delta cgs(t_\Delta)}{\Delta t_\Delta}$	$\bar{I} = \frac{\int \log(A(t_\Delta)) dt}{\int dt}$	$\frac{\Delta A(t_\Delta)}{\Delta t_\Delta}$
<u>attributs perceptifs</u>	brillance	assombrissement dynamique	intensité sonore	amortissement dynamique

FREED n'a pas trouvé un paramètre acoustique simple pour décrire la dureté de la baguette.

Ainsi, il proposa 4 grandeurs pour décrire le DPA à partir du signal (cf. tableau 3.1). Ces grandeurs étaient respectivement les moyennes temporelles et les pentes de l'enveloppe en amplitude et du cgs en fonction du temps (interpolations d'ordre 0 et d'ordre 1). Celles-ci correspondaient approximativement à l'attribut de brillance (1) défini plus haut, au degré d'assombrissement dynamique du timbre (2), à l'attribut d'intensité sonore (3) et au degré d'amortissement dynamique de cette dernière (4).

A partir de ces quatre paramètres, l'auteur effectua une analyse par régression multiple pour obtenir une courbe proche du DPA.

La critique principale est que les 4 paramètres utilisés, entre autres le cgs, dépendent de la structure vibrante (taille des casseroles). Pour conclure, bien que l'appareil auditif ait su extraire une information sur le type d'excitateur, la caractérisation en termes acoustiques se révèle peu pertinente.

### 3. ÉTUDE SUR LES APPLAUDISSEMENTS [REPP, 87]

L'expérience de REPP effectuée en 1987 fut la première à s'intéresser à la perception des applaudissements humains : des timbres percussifs non-instrumentaux. Il s'agit de percepts brefs et inharmoniques. Nous désignons par *claquement* le son d'un choc main-main et par *applaudissement* une série de claquements. Considérant le timbre des claquements, l'auteur s'interrogea : quelle (type d') information portant sur le mécanisme de production est présente dans le signal acoustique ? A quoi sont sensibles les auditeurs ?

Nous sommes dans la problématique de GIBSON [GIBSON, 66] qui recherche les principes généraux éclairant la relation perception-production. Il s'agissait dans cette étude moins de montrer la pertinence de la représentation poétique par rapport à la représentation neutre mais plus de montrer qu'une représentation poétique existe et fait sens pour la perception.

Une base de données fut constituée par l'enregistrement de 10 secondes d'applaudissements par 20 personnes, 10 hommes et 10 femmes. L'auteur a extrait 200 échantillons de claquements. Il effectua des TFCT à fenêtre temporelle de 20 ms et à pas de glissement de 10

<sup>2</sup>La transformée consiste à effectuer les étapes suivantes : - filtrage du signal par 60 filtres passe-bande en parallèle de fréquence centrale  $F_i$  (largeur  $B_i$  telle que  $B_i = 0,6.(6,106.F_i^2+93,103F_i+28)$ ), - ne retenir que le module de la transformée de Hilbert, - sous-échantillonner en fonction de la fréquence centrale  $F_i$  de chaque filtre, - exprimer en décibel le module au carré, - pondérer les amplitudes par la courbe isosonique, - convertir les fréquences en Bark.

ms sur chacun des claquements. La partition fréquentielle était linéaire. Pour chaque individu, un spectre moyen des claquements a été extrait .

Une autre corpus sonore fut constitué par l'applaudissement d'un seul sujet dans huit configurations de production manuelle : décalage des mains suivant l'axe longitudinal, angle et courbure des mains (cf. figure 3.1).

### 3.1. ANALYSE ACOUSTIQUE

A partir des 20 spectres moyennés des individus, l'auteur réalisa une analyse en composantes principales (diagonalisation de la matrice 20x20 d'intercorrélations). Quatre formes spectrales constituèrent une base vectorielle représentant 88% de la variance. On ne distingua au niveau spectral aucune différence entre un claquement masculin et un claquement féminin. L'auteur en déduisit que la taille des mains était une information peu représentée dans le spectre. L'auteur a programmé un automate qui ayant les 20 spectres individuels de claquement en mémoire a pu identifier l'applaudisseur à partir d'un seul spectre de claquement. Le taux de reconnaissance était de 90%. L'auteur affirma ainsi l'existence d'une signature acoustique de l'individu, présente dans le spectre du claquement.

L'analyse spectrale des différentes configurations manuelles de claquement permit d'affirmer que la présence d'un pic basse-fréquence était due à une percussion paume-paume et que la présence d'un pic moyenne fréquence était due à une percussion paume-doigts.

A partir de ces deux analyses acoustiques, l'auteur affirma que la configuration manuelle du claquement expliquait 50% de l'information spectrale. Il suggéra que l'autre moitié concernait des propriétés sur la dynamique des articulations (mains raides ou charnues, doigts serrés, type de force appliquée...).

### 3.2. ETUDE SUR LA PERCEPTION

Les stimuli comprenaient les applaudissements en entier. Une tâche fut de reconnaître le sexe de l'applaudisseur. Les résultats montrèrent que les sujets étaient incapables de détecter la propriété. Par contre, il y eut un consensus sur le type de réponse : les applaudissements jugés masculin étaient acoustiquement de fréquence plus lente et d'intensité plus forte que les applaudissements jugés féminins. Il y avait donc un stéréotype.

Une autre tâche était de demander aux sujets d'identifier la personne qui applaudissait, les sujets partageaient le même lieu de travail. Les résultats ont montré que le sujet ne pouvait identifier l'applaudissement de ses collègues<sup>3</sup> mais qu'il identifiait ses propres applaudissements à 46%.

Enfin, une troisième tâche consistait à inférer la configuration des mains pour un seul applaudisseur. Les sujets étaient nouveaux et au nombre de 22. Trois photographies étaient présentées (A1,A2,A3 ou P1,P2,P3 ou A1,A1+,A1-) (cf. figure 3.1). Les sujets ont montré leur capacité à prédire la bonne configuration 1, 2 ou 3. Par contre, la tâche devenait impossible pour des stimuli provenant des 20 applaudisseurs.

Ici, nous remarquons que la reconnaissance du type d'excitation s'est faite par un processus de différenciation sur les applaudissements d'un seul auditeur et non par un processus d'identification.

<sup>3</sup>Identification légèrement supérieure au hasard (13%)

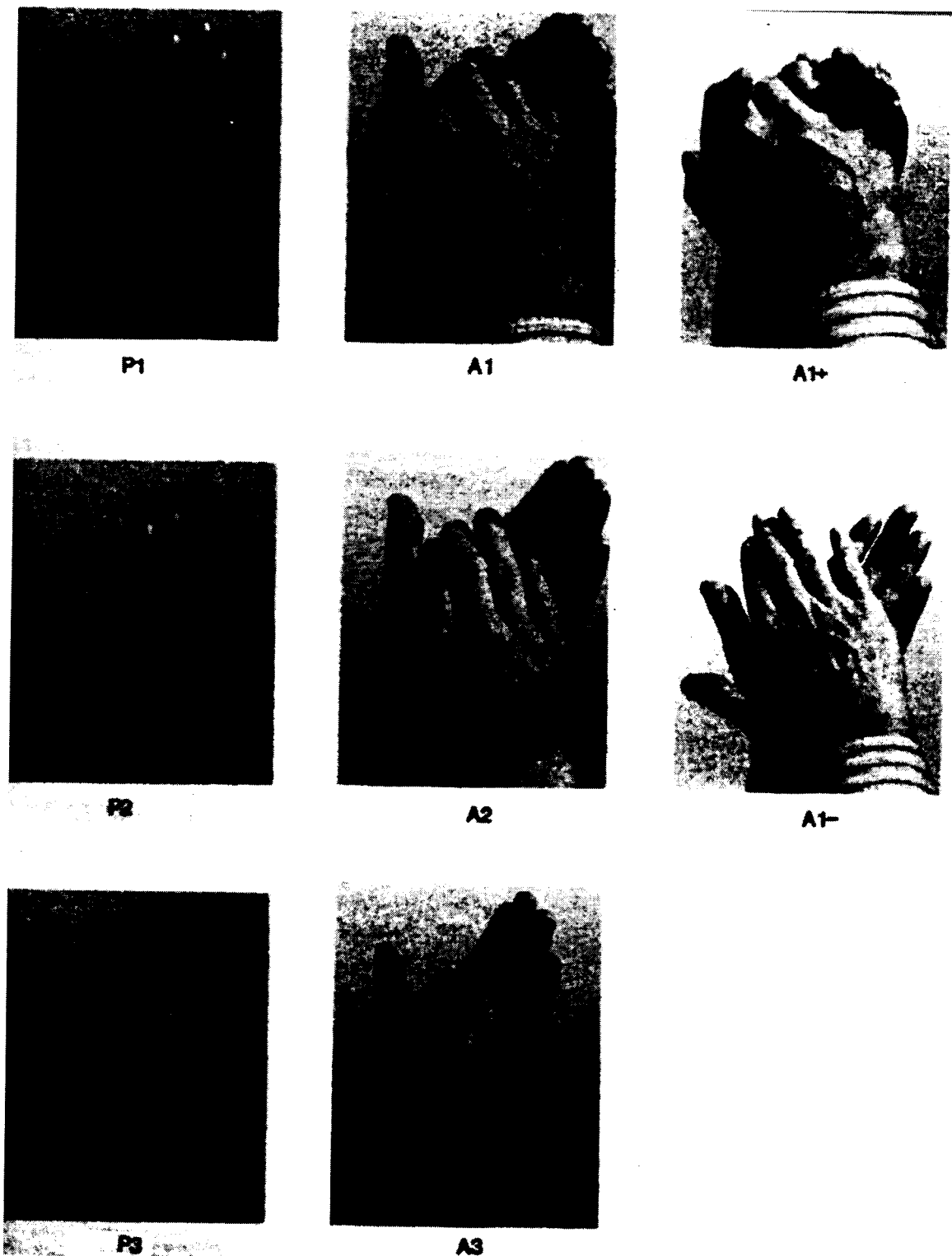


FIG. 3.1 - Huit configurations pour produire des claquements dans l'expérience de REPP. Les mains sont gardées parallèles dans les modes P1-P3 mais l'alignement vertical change de paume-paume (P1) à doigts-paume (P3), avec l'intermédiaire (P2). Les variations suivant l'alignement sont identiques pour les modes A1-A3 mais les mains font un angle. Les modes (A1+), (A1) et (A1-) sont des applaudissements avec les mains de plus en plus relâchées. D'après [REPP, 87]. Les stimuli proviennent d'un seul sujet. Nous nous excusons pour la mauvaise qualité de la reproduction.

### 3.3. CONCLUSION

En conclusion, il existe une signature individuelle de l'applaudisseur ; tant au niveau du spectre du claquement (analyse acoustique) qu'au niveau de l'applaudissement global (test

perceptif). L'auteur s'interrogea sur l'origine de cette signature : était-elle fonction de l'anatomie ou induite d'un processus d'apprentissage ? Les 20 sujets n'ont pas reconnu le sexe de l'applaudisseur (ou la taille des mains) ; en revanche, ils ont montré la capacité à induire la configuration des mains d'un applaudisseur (décalage, angle et courbure). Ces deux constatations ont été confirmées au niveau spectral.

Nous concluons pour notre part que l'expérience décrite ne permet pas (comme la plupart) de départager la position Gibsonnienne de la position traiteur de signaux. Mais elle permet d'affirmer que l'être humain a développé la capacité de : - discriminer des timbres d'applaudissement qui ne diffèrent que par le mode de production (il consiste à varier la position des mains (paume-paume, paume-doigts, doigts-doigts)) ; - corrélérer l'image de la production d'applaudissement d'avec le timbre résultant. De plus, la mise en évidence d'une signature individuelle permet d'envisager l'existence de processus plus fins dans le mode de production.

## 4. CONCLUSION SUR LA PERCEPTION DES SONS PERCUSSIFS

Les quelques expériences menées sur les timbres percussifs en contexte isolé permettent de poser des marques. Elles faisaient toutes appel pour l'analyse à une transformée de Fourier à court-terme et ne retenaient que l'information sur le module de la transformée. Les fenêtres temporelles étaient de l'ordre de 6 ms, le pas temporel de l'ordre de 2 ms.

Il s'agissait donc d'analyser autant les propriétés temporelles que fréquentielles du signal mais en supprimant l'information sur la phase et en intégrant l'information temporelle sur une période de l'ordre de 5 à 10 ms.

Les sons percussifs sont soit résonants soit non résonants. Dans un contexte résonant, la partie résonante est-elle toujours décroissante en amplitude, décroissante en cgs ? Les variations du cgs sont-elles importantes dans l'attaque ?

Nous suggérons une classification des critères en trois catégories : ceux portant sur l'attaque du son, ceux portant sur la partie décroissante, ceux portant sur le rapport entre les deux critères précédents.

### 4.1. SONS PERCUSSIFS BREFS

Nous remarquons que le système perceptif peut inférer des propriétés fines sur la configuration des mains lors de l'applaudissement. De plus, nous relevons l'importance de l'inertie de l'excitateur (paume-doigts  $\diamond$  paume-paume). Cela justifie l'approche de l'excitation par modèle physique.

### 4.2. SONS PERCUSSIFS AVEC RÉSONANCE

De même, les têtes de baguette sont classifiées correctement bien que les propriétés équivalentes sur le signal soient difficiles à décrire. L'hypothèse d'un espace des timbres multidimensionnel semble pertinente. L'axe principal « qualité d'attaque » est certainement primordial pour les sons percussifs.

Après avoir rappeler quelques travaux scientifiques sur la perception des timbres percussifs, nous décrivons dans le prochain chapitre des méthodes de synthèse sonore. Il est admis que les techniques de synthèse sont de trois types : celles basées sur une représentation spectrale du son, celles basées sur une représentation physique des instruments et celles qui reposent sur une formule mathématique abstraite. Nous n'évoquons que les deux premières.

---

# CHAPITRE IV

---

## QUELQUES TECHNIQUES DE SYNTHÈSE DE PERCUSSIONS

---

Il existe beaucoup de procédés pour la synthèse du son : la synthèse additive, la distorsion non-linéaire, le vocodeur de phase, la synthèse soustractive, le codage par prédiction linéaire, les fonctions d'onde formantique, la synthèse multiplicative, par modulation de fréquence, granulaire, par ondelettes. Nous exposons dans ce chapitre quelques techniques qui se sont révélées pertinentes pour la synthèse de sons percussifs. Le niveau de représentation du phénomène sonore percussif est variable suivant la technique de synthèse.

### 1. UN MODÈLE EMPIRIQUE À PARTIR DES TABLES D'ONDE

[KARPLUS&STRONG, 83] ont proposé un algorithme qui permet de synthétiser des sons de percussion avec peu de moyens informatiques. Considérant une suite de  $p$  échantillons de départ, la technique consista à dupliquer les échantillons de départ (table d'onde) en modifiant légèrement le contenu : le son était quasi-périodique. Les échantillons suivants furent calculés de proche en proche selon l'algorithme suivant :

$$y_n = \begin{cases} +\frac{1}{2}(y_{n-p} + y_{n-p-1}) & \text{probabilité } b \\ -\frac{1}{2}(y_{n-p} + y_{n-p-1}) & \text{probabilité } (1-b) \end{cases}$$

Le son résultant était perçu comme un son de percussion à condition que les  $p$  échantillons de départ aient une distribution d'amplitude aléatoire. L'algorithme transforme petit à petit la table d'onde initiale. Les auteurs montrèrent que le temps de décroissance de la  $n^{\text{ème}}$  harmonique est proportionnel à  $p^3/n^2$ . Ainsi, les harmoniques élevées s'atténuent rapidement. Les auteurs ne justifèrent pas l'algorithme autrement que par l'effet sonore résultant. Pour  $b=1$ , l'algorithme  $y_n = +\frac{1}{2}(y_{n-p} + y_{n-p-1})$  engendre des sons de cordes de guitare pincées. Il y a donc un continuum accessible par la synthèse pour un timbre de percussion et un timbre de corde pincée. On peut se demander dans quelle mesure le transitoire de la percussion par ce procédé n'est pas artificiel ?

### 2. SYNTHÈSE PAR MODÈLE SPECTRAL

Une méthode pertinente pour l'analyse et la synthèse de sons de percussion est la méthode proposée par [LAROCHE, 89], [LAROCHE, 94]. Cette méthode utilise l'algorithme de PRONY ; elle fait l'hypothèse que le signal est une somme de sinusoides amorties. Chaque composante a 4 paramètres : la fréquence, le coefficient d'amortissement, l'amplitude et la phase. Ainsi,



$s(t) \approx \sum_{r=1}^N A_r e^{-\lambda_r t} \sin[\omega_r t + \varphi_r]$ . Pour analyser un son réel de percussion, on commence par

déterminer les pulsations et les coefficients d'amortissement des composantes à partir de la matrice de covariance. L'étape suivante compte tenu des résultats précédents détermine les phases et les amplitudes des différentes composantes. Cette méthode est bien adaptée aux sons très amortis. La résolution est meilleure qu'avec la technique de la transformée rapide de FOURIER.

En faisant des hypothèses moins fortes sur le signal, [SERRA&SMITH, 90] proposèrent de modéliser le signal en deux parties très différentes. La première est une somme de composantes sinusoïdales dont la fréquence et l'amplitude relatives évoluent lentement dans le temps. Les auteurs parlent de partie déterministe. La deuxième partie est assimilée à un bruit blanc filtré par un filtre monofréquence à bande large variant lentement dans le temps.

Cette technique prolonge les investigations en synthèse additive. Ainsi on écrit le son comme un signal  $s(t)$  tel que :  $s(t) = \sum_{r=1}^R A_r(t) \cos[\theta_r(t)] + e(t)$  avec  $A_r(t)$  et  $\theta_r(t)$  amplitude et

phase instantanées de la  $r$ ème sinusoïde, et  $e(t)$  bruit rose tel que  $TFCT(e(t)) = b.b. * H(f,t)$ , b.b. est un bruit blanc,  $H(f,t)$  un filtre, monofréquence à bande large, variant lentement dans le temps. Pour l'analyse d'un son réel, les auteurs utilisèrent pour estimer la partie déterministe un algorithme de TFCT à fenêtre temporelle relativement longue. Le son original a été soustrait de sa partie déterministe. A partir du son résiduel, ils ont extrait la partie stochastique en tenant compte de l'enveloppe en amplitude du son résiduel sur de très courtes fenêtres temporelles. Cette méthode donne de bons résultats pour des sons de percussions.

Nous remarquons que dans toutes ces méthodes l'aspect transitoire pour un timbre percussif ne fait pas l'objet d'un traitement particulier. On objectera que sur certains sons percussifs comme la note grave d'un piano, le transitoire n'a pas d'importance [SCHAEFFER 67 (p. 36)].

### 3. ANALYSE PAR POURSUITE ADAPTATIVE

Les stratégies d'analyse des sons musicaux sont partagées entre : - d'une part les signaux avec transitoires pour lesquels la TFCT s'applique bien, - d'autre part les signaux qui offrent une continuité harmonique pour lesquels la transformée de FOURIER est très efficace. Les premiers sont décomposés suivant une base de signaux élémentaires localisés en temps mais peu en fréquence. Les deuxièmes sont décomposés suivant une base de signaux élémentaires localisés en fréquence mais peu localisés en temps.

Une solution qui propose de résoudre cet inconvénient est la méthode d'analyse par poursuite adaptative. Il s'agit de donner la meilleure représentation temps-fréquence possible. L'idée de la méthode est de décomposer le signal non pas à partir d'une base, pour laquelle il existe une et une seule décomposition possible du signal, mais à partir d'une famille redondante, pour laquelle, il existe une infinité de décompositions possibles. La famille contient aussi bien des sinusoïdes que des pics de DIRAC et des atomes temps-fréquence (signaux élémentaires localisés en temps et en fréquence). Un algorithme adaptatif permet de choisir la meilleure de ces décompositions en fonction des caractéristiques du signal.

La resynthèse du son à partir de l'analyse est secondaire. L'objectif est de construire une représentation temps-fréquence qui extrait du son des traits acoustiques pertinents pour le musicien.

[MALLAT&SHANG, 93], [CHEN&DONOHO, 95] ont contribué à développer cette méthode en traitement du signal. Nous exposons brièvement le principe à partir du travail de [GRIBONVAL, 96] qui adapte et perfectionne la méthode pour les sons musicaux.

Un ensemble de signaux élémentaires ou grains sont constitués, le dictionnaire de GABOR. Les grains sont de la forme :  $g_\gamma(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) e^{i\xi t}$  avec  $\gamma$ , une famille redondante (cf. figure 4.1).

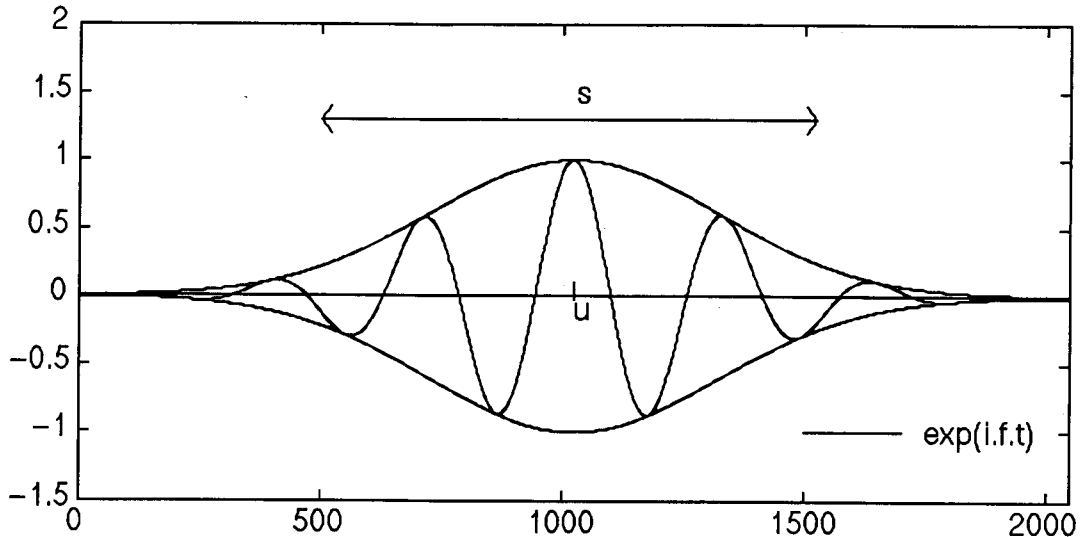


FIG. 4.1 - Un exemple d'atome temps-fréquence de la méthode de poursuite adaptative.  $s$ , facteur d'échelle ;  $u$ , position temporelle du centre de l'atome ;  $f$ , pulsation fréquentielle.

Ils ont trois paramètres, un facteur  $s$  de dilatation, un paramètre  $u$  de translation sur l'axe des temps, un paramètre  $\xi$  de pulsation (axe des fréquences). Étant donné une fonction  $f$  à analyser,  $\gamma$ , un dictionnaire de GABOR sur l'espace de HILBERT  $\Gamma$ , une première étape consiste à calculer les fonctions de corrélations  $C$  avec les différents grains  $g$  issu de  $\gamma$  :  $C(f, g_\gamma)$ ,  $C(f, g'_\gamma)$ ,  $C(f, g''_\gamma)$ , .... Est retenu le grain qui obtient la meilleure corrélation :  $\exists g^{[i]}_\gamma / |C(f, g^{[i]}_\gamma)| = \sup_{g \in \Gamma} |C(f, g_\gamma)|$ . Le résidu est égal à la différence entre  $f$  et la composante due à ce grain :  $Rf = f - C(f, g^{[i]}_\gamma) \cdot g^{[i]}_\gamma$ . On réitère en remplaçant  $f$  par son résidu  $R$  puis par le résidu du résidu  $R^2f$  et ainsi de suite jusqu'à ce que l' $n$ ème résidu,  $R^n f$ , converge vers 0. Ainsi,  $f$  se décompose suivant :  $f = \sum_{n=0}^{+\infty} C(R^n f, g_\gamma) \cdot g_\gamma$ .

Nous ne détaillons pas la fonction de corrélation qui met en jeu une sous-décomposition des grains sur l'axe des temps. Ce raffinement dans la fonction de corrélation permet d'éviter le phénomène de pré-écho, un artefact qui se traduit par la présence d'énergie avant un transitoire d'attaque.

Les grains étant des fonctions complexes de l'espace de HILBERT, l'analyse consiste à représenter l'énergie de la décomposition en grains dans le plan temps-fréquence.

Cette méthode s'applique bien à l'analyse d'une note de piano par exemple. La représentation met en évidence à la fois le transitoire d'attaque, les harmoniques de la corde, les partiels de la table d'harmonie et le transitoire d'extinction provoqué par l'étouffoir.

## 4. SYNTHÈSE PAR MODÈLE PHYSIQUE

Dans la synthèse par modèle physique, la différence principale par rapport aux autres techniques de synthèse est de distinguer une source d'énergie excitatrice et une structure vibrante passive.

Une façon classique de modéliser une percussion est de considérer un système vibrant linéaire ( $S$ ) au repos. De la percussion, on retient un signal excitateur temporel en force de support fini  $F(t)$ . Ce signal excitateur s'applique en  $x_0$ . La réponse de ( $S$ ), observée au point  $x_1$ , est obtenue par convolution temporelle de l'excitation par la réponse impulsionnelle  $h(x_0, x_1, t)$  du système.

$$\text{Ainsi, } u(x_1, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x_0, x_1, t - t') \cdot F(t') dt' \quad (4.01)$$

Si (S) dissipe de l'énergie suffisamment et que globalement l'amplitude suit une loi de décroissance exponentielle, le son résultant est perçu comme une percussion. Une première approche consiste à appliquer sur (S) un signal de force vraisemblable :

$$F(t) = \begin{cases} F_0 \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{\tau}\right) & \forall t, 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \forall t, t > \tau \text{ et } t < 0 \end{cases} . \text{ En transposant la formule (4.01) dans le domaine}$$

fréquentiel, on peut en première approximation assimiler l'excitation à un filtre passe-bas sur la réponse en fréquence de (S).

#### 4.1. MODÈLE D'EXCITATEUR POUR LA PERCUSSION D'INSTRUMENTS À CLAVIER

[DOUTAUT, 96] dans son ouvrage de thèse : « Étude expérimentale et simulations numériques d'instruments de percussion à clavier » expose un modèle d'excitation qui affine le modèle précédent. L'excitateur est cette fois-ci pris en compte à partir de ses caractéristiques physiques : l'ensemble maillet-musicien est assimilé à une sphère d'inertie  $m$ , de raideur  $K$  dotée d'une vitesse de translation  $V_0$ . On note  $X(t)$  son mouvement suivant un seul axe. Il propose à partir de la théorie de HERTZ sur le contact de deux corps élastiques l'équation suivante :  $F(t) = K|u(x_0, t) - X(t)|^{3/2}$  (4.02) avec  $u(x_0, t)$ , mouvement unidimensionnel de la SV au point  $x_0$  et  $F(t)$ , force d'interaction. Il est important de souligner que la formulation du problème par DOUTAUT ne tient pas compte de l'effet rétroactif de la structure vibrante sur l'interaction excitateur-structure vibrante. Ajoutons que l'auteur justifie cette simplification : pour la plupart des lames d'instruments de percussion à clavier, la durée d'interaction maillet/lame est inférieure à la période du fondamental de la lame. Ainsi, le front d'onde généré ne vient pas par réflexion perturber l'interaction.

Le piano, instrument à percussion, a été l'objet de nombreux travaux scientifiques. L'étude bibliographique par commodité figure au début du chapitre X consacré à la modélisation du marteau feutré de piano.

#### 4.2. MODÈLE D'EXCITATEUR POUR LA PERCUSSION D'INSTRUMENTS À MEMBRANE

[FONTANA&ROCCHESO, 98] décrit un modèle physique de membranes vibrantes pour les instruments à percussion. L'auteur utilise un réseau tri-dimensionnel par guide d'onde pour modéliser la membrane. Le modèle d'excitateur est basé sur la non-linéarité masse-ressort définie par la relation :

$$\begin{cases} F(t) = -k(\Delta x(t))^p \\ F(t) = m_p \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \end{cases}$$

Avec  $\Delta x$  la compression du ressort,  $k$  sa raideur,  $m_p$  l'inertie du percuteur et  $p$  un réel.

Les valeurs des paramètres de l'excitateur figurent dans le tableau 4.1.

TAB. 4.1 - Paramètres de l'excitateur pour le modèle de percussion de membrane de FONTANA.

type d'excitateur	inertie	raideur	puissance
marteau raide	40 g	$10^7$ N/m	2
marteau doux	70 g	$3.10^6$ N/m	2

### 4.3. MODÈLE D'EXCITATEUR POUR LA TIMBALE

La timbale est un instrument de percussion constitué d'une fine membrane circulaire tendue au-dessus d'une cavité acoustique. [RAMDANE, 91] a consacré une thèse à cette instrument. Son ouvrage constitue un point de départ pour la synthèse sonore par modèle physique de la timbale. Plus récemment, [RHAOUTI&al., 99] expose un modèle physique très complet de la timbale. Le percuteur, appelée mailloche, est une masse libre frappant la membrane avec une vitesse initiale. L'interaction est non-linéaire ; elle est semblable aux précédents modèles, la constante  $\delta$  exceptée (cf. équation (4.03)). On retrouve un paramètre de raideur, un exposant  $p$  appelé exposant phénoménologique. Le terme  $\Delta$  est égale à la différence entre la position de la tête du percuteur et la position de la membrane. La position de la membrane est une position moyennée sur un élément de surface. La masse du percuteur est une masse équivalente ; son inertie est plus grande que l'inertie de la masse statique d'une mailloche car l'auteur prend en compte le fait que le musicien tient la tige de la mailloche au cours de la frappe.

$$\begin{cases} F(t) = -k(\delta + \Delta x(t))^p & \text{si } \Delta x \geq 0, 0 \text{ sinon} \\ F(t) = m \frac{d^2 X}{dt^2} \end{cases} \quad (4.03)$$

L'auteur néglige le cycle hystérétique dû à la relaxation du feutre de la tête de la mailloche. Il néglige l'élasticité du manche de la mailloche ainsi que la variation de la surface de contact avec la membrane au cours de l'impact. Les valeurs usuelles des paramètres de la mailloche au cours des simulations de RHAOUTI figurent dans le tableau 4.2.

Le modèle de membrane prend en compte entre autres la tension, la pression acoustique et l'amortissement interne.

TAB. 4.2 - Valeurs types des paramètres de la mailloche dans les simulations de la timbale d'après [RHAOUTI&al., 99].

$V_0 = 1,4$ m/s	$K = 1,6 \times 10^8$ N/m	$p = 2,54$	$\delta = 25$ mm	$m = 28$ g
-----------------	---------------------------	------------	------------------	------------

Dans la conclusion, l'auteur remarque que le modèle de mailloche est similaire au modèle d'excitateur utilisé pour le piano [CHAIGNE&ASKENFELT, 94] et le xylophone [CHAIGNE&DOUTAUT, 97]. L'auteur énonce que du fait de la taille de la tête de la mailloche (plus importante) et de ses propriétés de relaxation (plus importante), il est fort probable que la surface de contact durant l'impact varie. Est-ce un paramètre pertinent ? Selon l'auteur, la question reste ouverte.

Après l'étude bibliographique des travaux scientifiques concernant le domaine de la psychoacoustique et le domaine de la synthèse des sons et des instruments percussifs par ordinateur, nous éprouvons le besoin de décrire dans le chapitre qui vient brièvement l'ensemble des instruments à percussion. Nous les présentons dans la mesure du possible avec le regard du musicien



---

## CHAPITRE V

---

### LES INSTRUMENTS À PERCUSSION USUELS

---

L'ensemble des instruments à percussion est très vaste. On peut relever différents critères de classement :

- par origine ethnique : Orient, Afrique, Amérique latine, Occident ;
- par type de musique : symphonique, militaire, Jazz, danse, marche ;
- par type de structures vibrantes : cordes, barres, membranes, plaques, colonnes d'air, chambres d'air ;
- une classification alliant SV et résonateur : idiophones (SV sans résonateur), membranophones, cordophones et aérophones ;
- par type de son : résonant / non résonant, hauteur déterminée / hauteur indéterminée, intensité faible / intensité forte ;
- par type de jeux : frappé, agité, raclé, frotté, usage des mains, usage de baguettes...
- par type d'attaques : sèche (caisse claire), ronde (blocs chinois), tintée (triangle), éclatante (cymbale), lourde (timbale) ;
- par type de formes et de matières : corps solide quasi-indéformable, flexible, capable de tension, à air vibrant ;
- par type de matière de la SV : métaux, bois et peaux.

La classification par type de matière percutée nous semble la plus adaptée à notre étude. D'une part, elle se base sur un critère causal en accord avec la méthode de synthèse employée ; d'autre part, la plupart des percussionnistes l'utilisent. Il est intéressant de remarquer que les métaux, les bois et les peaux sont respectivement d'origine minérale, végétale et animale. Dans l'antiquité, en Asie, la classification par matière se faisait en huit groupes : la terre cuite, la pierre, les métaux, les bois, le bambou, la calebasse, les peaux, la soie.

#### 1. LES MÉTAUX

Les métaux sont des idiophones ; c'est-à-dire que la vibration est produite par l'objet, fait d'un matériau choisi pour sa résonance propre. Ils sont percutés par une baguette ou une mailloche. Parmi les métaux, on trouve le gong symphonique ou tam-tam chinois, le triangle, la cymbale, les cloches, le vibraphone. Le gong a une particularité : il atteint sa pleine puissance sonore quelques secondes après l'impact. Aussi, en orchestre, il n'est pas rare de "chauffer" l'instrument par des petites frappes régulières pour que la frappe principale déclenche instantanément le seuil en puissance. Le vibraphone comporte une pédale pour actionner des étouffoirs car le son d'une lame d'aluminium a une résonance très longue.

## 2. LES BOIS

Les bois sont des idiophones. Le marimba, le xylophone, le wood-block, les maracas et le guïro sont des bois. Les deux premiers sont des instruments à clavier. Ils sont constitués de barres en bois de roseau de différentes longueurs. Le marimba est doté de résonateurs cylindriques fermés à un bout sous les lames vibrantes. En général, le premier partiel est accordé à quatre ou trois fois la fréquence du fondamental soit un intervalle de deux octaves ou de une octave plus une quinte. Le timbre de ces bois est sec et clair.

## 3. LES PEAUX

Les peaux ou membranophones sont des instruments faits d'une ou de deux peaux tendues sur un cadre ou une caisse de résonance. Il existe toutes sortes de formes de caisse de résonance : cylindriques, coniques, en tonneau, en cuvette... Nous remarquons que la matière de la caisse de résonance influence peu sur le timbre de l'instrument. La peau - qui peut être naturelle ou synthétique - ne produit par elle-même qu'un son faible. Mais tendue, sur une caisse de résonance, la peau engendre des vibrations dans la caisse qui prend alors la fonction de résonateur.

Toutes les peaux produisent des sons à hauteurs indéterminées, à l'exception des timbales qui s'accordent. La hauteur du son est fonction du diamètre et de la tension de la peau.

Les instruments à percussion dont la SV est constituée d'une peau sont les instruments de prédilection des percussionnistes. Même si la hauteur varie très peu, les modes de jeux et les variations de timbres des peaux sont nombreux. On peut jouer ces instruments avec une ou deux mains, baguettes ou mailloches. Pour faire sonner au mieux l'instrument, les frappes s'exécutent au milieu ou à un tiers du rayon en partant du bord. La sonorité est meilleure vers le bord.

A titre d'exemple, pour le bongo il y a trois frappes principales à main nue :

- (i) la percussion au centre qui requiert la participation de tout le bras. Les doigts sont regroupés. La surface de contact est constituée par l'extrémité des doigts ;
- (ii) la percussion au bord qui implique le poignet et la main, seules les deux premières phalanges entrent en contact ;
- (iii) la percussion claquée, avec un appui de la main sur le bord de l'instrument, les doigts frappent à grande vitesse avec toute leur surface.

Des exemples de percussion à peau sont la timbale, le bongo, le conga, la tabla, la caisse claire, le tambourin.

La séquence (CD01) fait entendre la percussion d'un bongo (x2), d'un xylophone (x2) et d'un gong (x2).

## 4. LES CORDOPHONES

Les instruments dont une ou plusieurs cordes vibrantes, tendues entre deux points, sont couplées à une caisse de résonance sont des cordophones. Les cordophones du fait qu'ils produisent des sons à hauteur bien déterminée ne sont pas considérés en général comme des instruments à percussion. Néanmoins, comme le mode d'excitation est percussif, ils entrent dans le cadre de notre étude.

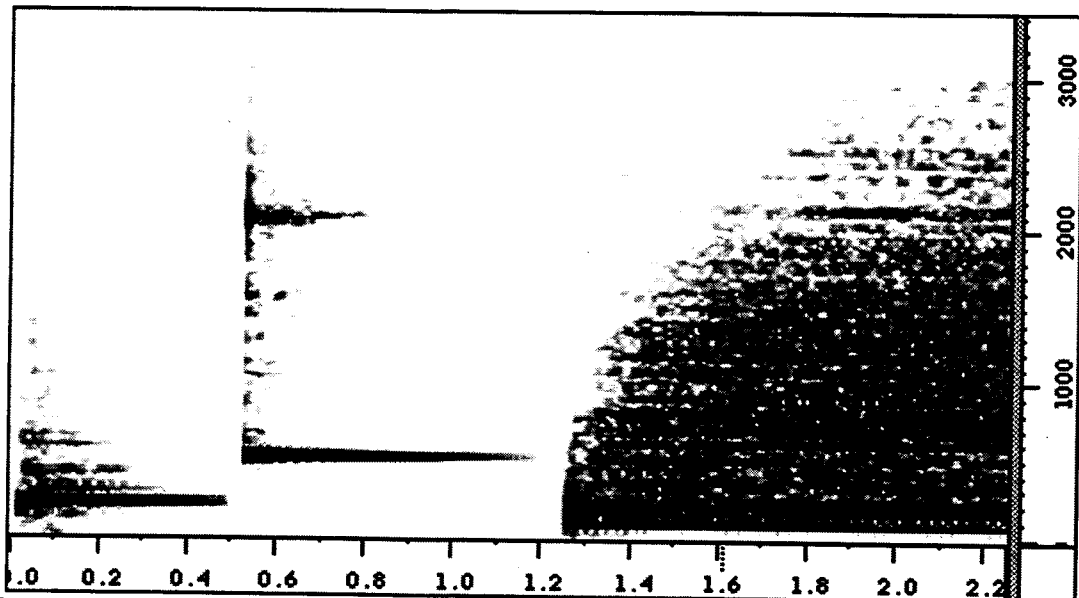


FIG. 5.1 - Comparaison des sonogrammes respectifs de la percussion d'un bongo, d'un xylophone et d'un gong. En abscisse, le temps en secondes. En ordonnée, la fréquence en Hertz. Les sons sont échantillonnés à 44,1 KHz. Le sonogramme est réalisé à partir d'une fenêtre d'analyse de 2048 échantillons de fréquence fondamentale 107,7 Hz ; le pas du glissement de la fenêtre est de 256 échantillons. Le type de fenêtre est la fenêtre de HANNING.

## 5. LES AÉROPHONES

Les instruments qui mettent en résonance une colonne d'air circulant dans un conduit de forme donnée sont des aérophones. Tous les aérophones sont excités par un excitateur de type frottement sauf pour une utilisation singulière qui consiste à percuter le bec de l'instrument (Sur le saxophone, ce mode de jeu s'appelle jeu en "slap" ou "slapping").

TAB. 5.1 - Classification des principaux instruments à percussion.

	Bois	Métaux	Peaux	Autres
hauteur déterminée	xylophone (clavier) marimba (clavier)	vibraphone (clavier) glockenspiel	timbale	piano cymbalum lithophone
hauteur indéterminée	wood-block claves tambour à lèvres	gong tam-tam cloches cymbales	bongo congas caisse claire	maracas guiro

## 6. LES EXCITATEURS PERCUSSIFS

La frappe sur les instruments à percussion se fait soit avec de petits bâtons appelés baguettes, battes, mailloches, maillets, marteaux, etc... soit à mains nues. Nous utilisons le terme générique baguette. La baguette est constituée d'une tige et d'une tête. La tige agit sur le confort de jeu du musicien. La tête de la baguette est soit en bois, soit recouverte d'une autre matière : caoutchouc, laine, fourrure, feutre, etc. La forme de la tête est sphérique exceptée lorsque la baguette est en bois ; on appelle olive la forme plus ou moins allongée de l'extrémité de la baguette en bois. Les caractéristiques de la baguette sont essentiellement la raideur à la déformation et l'inertie de la tête. Pour la raideur, les percussionnistes utilisent une échelle de nuance à cinq degrés : très doux, doux, moyen, dur, très dur.



A partir de ces deux caractéristiques, le musicien s'appuie sur quelques lois empiriques :

- (i) Pour assurer un volume sonore suffisant, l'inertie de la baguette doit être proportionnée à l'inertie de la SV ;
- (ii) A inertie petite et raideur forte de la baguette, les partiels de la SV sont excités.
- (iii) A inertie grande et raideur faible, le fondamental de la SV est excité.
- (iv) A inertie grande et raideur forte, l'ensemble du spectre est excité.

Généralement il existe un type de baguette spécifique à chaque instrument. Un aperçu de quelques excitateurs percussifs est donné à la figure 5.2. Le xylophone est joué avec des maillets rigides ; la tête est en bois ou Bakélite. Le son est sec et clair. Le marimba et le vibraphone sont utilisés par des maillets souples ; la tête est en feutre ou caoutchouc. Le son est chaud et moelleux.

Certains instruments sont excités par entrechoque (claves, cymbales).

Un type d'excitateurs particulier sont les balais. Ils s'emploient par frottement sur la peau mais aussi par percussion. La tension du faisceau peut être paramétrable.

L'effet "Rimshot" est une percussion sur un instrument à peau dans laquelle deux attaques se superposent. La baguette percute simultanément le bord de l'instrument par son manche et le plein de la membrane par sa tête.

L'effet de roulement s'obtient par la percussion alternée de deux baguettes. La fréquence maximale est de l'ordre de 16 Hz. Sur un instrument à peau, le musicien doit adapter la cadence du roulement ; pour une cadence trop rapide, la vibration de la peau peut être annihilée de manière aléatoire.

Il existe d'autres formes d'excitation dans les instruments à percussion. Il y a les excitations par secousse (maracas), par frottement-raclement (guiro).

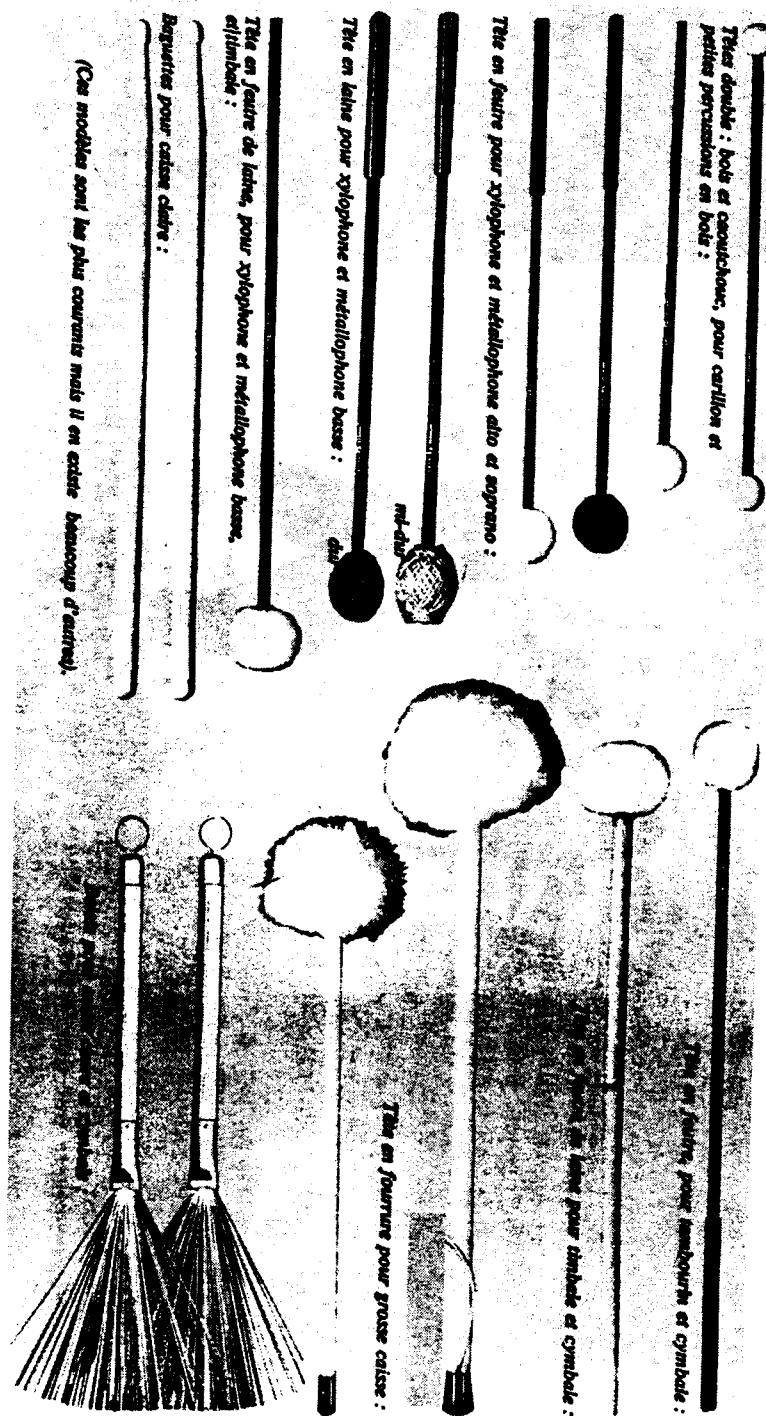


FIG. 5.2 - Quelques baguettes et mailloches d'après [GROSSER, 0000]. La frappe sur les instruments à percussion se fait avec de petits bâtons appelés baguettes, battes, mailloches, maillets, marteaux, etc. A chaque instrument correspond plus particulièrement une baguette ou une mailloche avec tête de feutre ou de laine, mais on peut en utiliser d'autres pour obtenir d'autres effets, d'autres couleurs.



---

# CHAPITRE VI

## CONTEXTE D'EXPÉRIMENTATION : L'OUTIL CORDIS-OFF

---

Les instruments, structures vibrantes et excitateurs, sont décrits et simulés à l'aide du modéleur-simulateur Cordis-Anima (CA). Pour la phase de recherche et de développement, un outil logiciel Cordis-off basé sur le C-ANSI est développé sur machine *Silicon Graphix*. Il est constitué essentiellement d'une bibliothèque de fonctions. La simulation avec cet outil se fait en temps différé. La version actuelle a été initialisée en 1991 par [RAOULT, 91], ingénieur système, à partir des fondements théoriques de CA. Les différents chercheurs ont ensuite développé des modules, types et fonctions spécifiques au gré de leurs besoins, tant pour l'image que pour le son. Quelques modules Cordis-off ont été développés au cours de la thèse et sont décrits au chapitre X et au chapitre XII.

Le contenu de ce chapitre s'appuie sur la présentation de Cordis-Anima faite au chapitre I. Nous décrivons brièvement le fonctionnement de Cordis-off ci-après.

### 1. LE VECTEUR D'ÉTAT

Un système Newtonien est par essence un système qui peut se saisir à un instant donné. On parle alors d'état ; la description est diachronique. Étant donné un objet CA (Cordis-off), sont stockées à chaque pas temporel de simulation les positions et positions retardées des *points M* de l'objet et l'ensemble des forces instantanées par les *points L*. Ces valeurs sont centralisées dans un vecteur appelé *Vecteur d'état* (VE) (cf. figure 6.1).

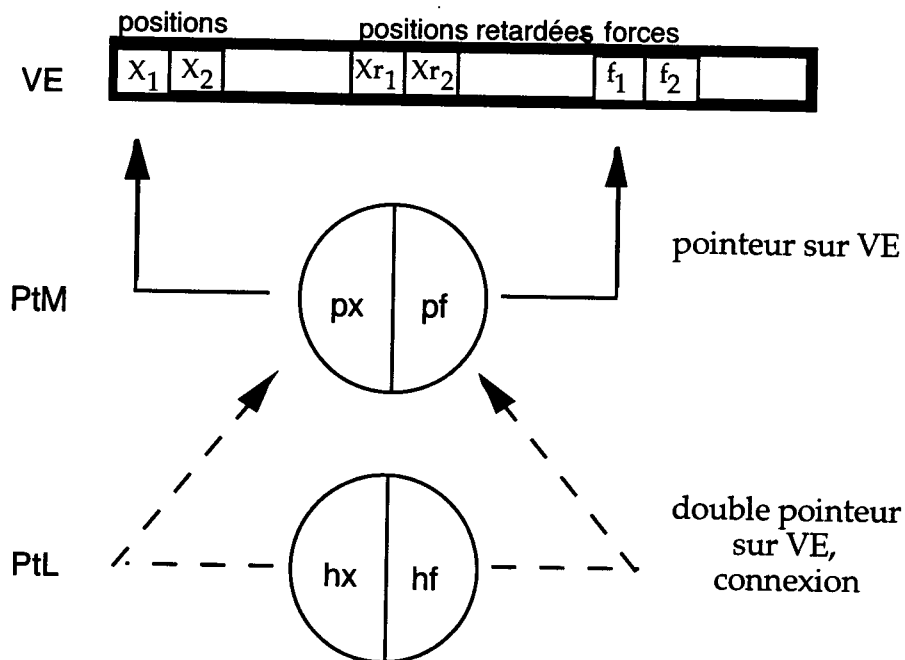


FIG. 6.1 - Vecteur d'état et représentation des points de communication en machine.

Ce vecteur de taille constante évolue au cours de la simulation en réactualisant à chaque pas l'état des différents *points M* et l'intensité des forces. Il est initialisé en début de simulation. Vers ce vecteur viennent pointer toutes les autres entités. Le VE constitue le niveau le plus bas de la structure informatique.

## 2. REPRÉSENTATION DES *POINTS M* ET DES *POINTS L*

Un *point M* est représenté par un type structuré à deux champs : un pointeur vers une position du VE et un pointeur vers une force du VE. Le *point L* ne pointe pas directement sur le VE mais sur le *point M* auquel il est connecté. Ainsi, le *point L* est un type structuré à deux champs qui sont des doubles pointeurs sur le VE. Seuls les *points L* contiennent l'information relative à la topologie du réseau d'interconnexion.

## 3. REPRÉSENTATION D'UN MODULE

Le module est représenté par un type structuré à plusieurs champs : - un nom, - un tableau de *points M*, - un tableau de *points L*, - un tableau de paramètres (élasticité, viscosité...), - un pointeur sur une fonction d'exécution MAT, - un pointeur sur une fonction d'exécution LIA. A ce module sont associées au moins trois fonctions : une fonction d'allocation qui réserve la zone mémoire nécessaire et instancie les paramètres du module, une fonction d'exécution pour les éléments MAT du module, une fonction d'exécution pour les éléments LIA.

Deux modules étant définis, la fonction *Connect* réalise la connexion entre un *point M* du premier module et un *point L* du deuxième.

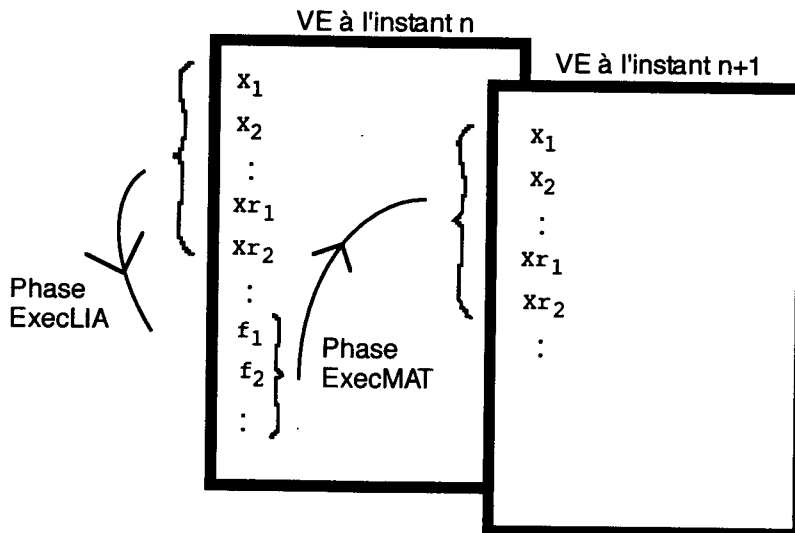


FIG. 6.2 - Principe de simulation d'un objet CA. L'information de connexion est contenue dans les éléments de liaisons. Exécution de l'algorithme principal, une itération: `for (i=1;i++;nombre de MAT) ExecMat(i); for (i=1,i++;nombre de LIA) ExecLIA(i).`

## 4. SCHÉMA D'UNE SIMULATION CORDIS-OFF

Un programme Cordis-off comporte 4 étapes. La première est une étape d'allocation des modules. La deuxième est une étape de connexion MAT-LIA (connexion des *points L* avec les *points M*). La troisième étape spécifie l'état dynamique initial du VE. La dernière étape exécute itérativement 44 100 fois le processus de la figure 6.2 pour une seconde de simulation si la fréquence de simulation est de 44 100 Hz.

La première partie de la thèse s'achève sur la description de l'outil quotidien de programmation. C'est le signe que nous rentrons dans le vif du sujet : la modélisation de modèles de percussion avec Cordis-Anima. Enrichi du contexte scientifique reformulé, nous abordons le thème des chocs viscoélastiques. Le terme choc suggère de la non-linéarité et donc des difficultés. Le terme viscoélasticité est familier à nos équations. L'association du premier et du second est-elle génératrice de formes sonores ?



# **PARTIE 2**

**EXCITATION PAR CHOCS  
VISCOÉLASTIQUES**



---

# CHAPITRE VII

---

## UN MODÈLE ÉLÉMENTAIRE DE PERCUSSION

---

Le modèle de percussion minimal proposé [FOURCADE, 95], [FOURCADE&CADOZ, 96a] et [FOURCADE&CADOZ, 96b] est basé sur une interaction à deux états entre deux masses ponctuelles. Étudié selon toutes les possibilités de variations offertes par ses paramètres, le modèle permet de mettre en évidence des catégories sonores bien distinctes. L'étude de ces catégories a été effectuée en mettant en correspondance les trois formes de représentation : - le modèle physique générateur, - le signal numérique, - le phénomène sonore résultant et sa perception.

### 1. DESCRIPTION DU MODÈLE

Le phénomène de percussion résulte du choc physique entre une structure vibrante et un percuteur ; l'interaction a par essence un caractère fortement non-linéaire et concerne au moins deux objets. La loi de Hertz stipule que le contact normal entre deux corps hookéens est du type  $F=A.U^{1,5}$  ou  $F$  est la force exercée,  $A$  une constante et  $U$  la compression des deux corps. [Doutaut, 94] ont modélisé la percussion d'une barre vibrante avec ce type d'interaction.

Par ailleurs, d'après les études menées sur le piano par [BOUTILLON, 88], le contrôle par le pianiste de la percussion d'une note isolée se réduit à la communication d'une vitesse au marteau. Enfin, souvent la tête du percuteur est recouverte par un matériau déformable comme le feutre ou le caoutchouc. Le feutre des marteaux de piano joue un rôle important lors du contact percuteur / structure vibrante. Il se déforme élastiquement et absorbe une partie de l'énergie. Un modèle simple est de considérer une interaction de type  $F = A.U^p$  ou  $p$  est un réel (GHOSH<sup>1</sup>). Expérimentalement,  $p$  est compris entre 2 et 3 d'après [STULOV, 95]. Deux modèles plus raffinés proposés par [STULOV, 95] et par [BOUTILLON, 88] prennent en compte le comportement hystérétique du feutre.

De ces études sur la percussion pianistique et sur la percussion de lames vibrantes, nous retiendrons l'aspect non-linéaire du processus d'excitation mais nous garderons la linéarité des propriétés viscoélastiques du corps intermédiaire.

Partant de ces considérations nous avons mis en œuvre un modèle de percussion élémentaire. Il nous semble intéressant d'explorer le potentiel sonore d'une relation linéaire traduisant la compression d'un élément ad'hoc entre le percuteur et l'objet percuté. Le percuteur est une masse ponctuelle  $M_p$  dotée d'une vitesse initiale  $v_{p0}$ . La structure vibrante est une masse ponctuelle  $M_c$  reliée à un point fixe par une liaison viscoélastique linéaire de raideur  $K_c$  et de viscosité  $Z_c$ . Nous l'appelons Cellule. Le son obtenu est issu de la variation de la position de la masse  $M_c$  au cours du temps. Le corps intermédiaire est modélisé par une liaison viscoélastique linéaire de raideur  $K_l$  et de viscosité  $Z_l$  effective lors du contact percuteur-Cellule. Tous les mouvements sont unidimensionnels selon l'axe  $y$ . On remarquera que dans ce modèle volontairement simplifié, la prise en compte du geste instrumental se réduit à la donnée d'une vitesse initiale.

---

<sup>1</sup>Indian Journal of Physics, vol. 7, pp. 365-382 (1932), d'après [Stulov, 95]

L'interaction est telle que lorsque la position  $y_p$  du percuteur est inférieure à la position  $y_c$  de la masse de la Cellule, la liaison viscoélastique établit une force  $F$  telle que  $F = K_l(y_p - y_c) + Z_l(\dot{y}_p - \dot{y}_c)$  entre les deux masses. La notation  $\dot{x}$  désigne la dérivée de  $x(t)$  par rapport au temps. Dès que le percuteur est au-dessus de la masse de la Cellule, la liaison disparaît. Le percuteur est alors une masse libre. Nous appelons « butée viscoélastique » ce type de liaison (cf. figure 7.1).

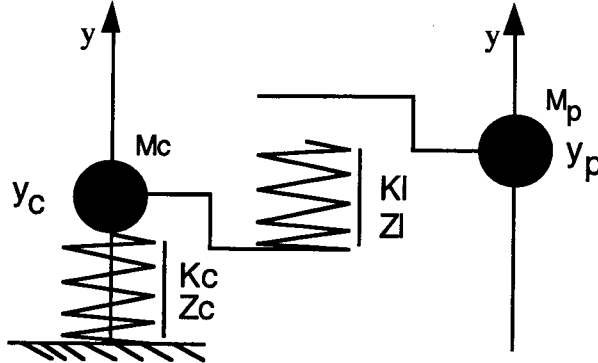


FIG. 7.1 - Modèle élémentaire de percussion.  $M_c$ ,  $K_c$ ,  $Z_c$  : inertie, raideur et viscosité de la Cellule.  $M_p$  : inertie du percuteur.  $K_l$ ,  $Z_l$  : raideur et viscosité de la butée viscoélastique.

$y_{p0}$  et  $y_{c0}$  étant les positions initiales respectives du percuteur et de la masse de la Cellule, le système est décrit suivant l'approche fonctionnelle ci-dessous :

état libre

$$\begin{cases} y_p > y_c \\ m_c \ddot{y}_c = -k_c y_c - z_c \dot{y}_c & \text{(I)} \\ m_p \ddot{y}_p = 0 \end{cases}$$

état lié

$$\begin{cases} y_p \leq y_c \\ m_c \ddot{y}_c = -k_c y_c - z_c \dot{y}_c + k_l (y_p - y_c) + z_l (\dot{y}_p - \dot{y}_c) & \text{(II)} \\ m_p \ddot{y}_p = -k_l (y_p - y_c) - z_l (\dot{y}_p - \dot{y}_c) \end{cases}$$

Les conditions initiales s'écrivent :

$$\begin{cases} \dot{y}_c = 0, y_c = y_{c0} = 0 \\ \dot{y}_p = v_{p0}, y_p = y_{p0} \end{cases} \quad \text{(III)}$$

Ce système d'équations bien que trivial n'admet pas de solution analytique. La simulation en Cordis-Anima du système (I, II, III) s'appuie sur une discrétisation temporelle des équations. Nous notons  $T_e$  le pas temporel de la discrétisation. Les vitesses et les accélérations issues des signaux discrets des positions respectives du percuteur (indice p) et de la masse de la Cellule (indice c) sont décrites de la façon suivante :

$$\begin{cases} v_{p,c}(n) = \frac{y_{p,c}(n) - y_{p,c}(n-1)}{T_e} \\ a_{p,c}(n) = \frac{y_{p,c}(n) - 2y_{p,c}(n-1) + y_{p,c}(n-2)}{T_e^2} \end{cases}$$

Le signal de force discret  $F_{p,c}(n)$  de la butée viscoélastique entre le percuteur et la masse de la Cellule est tel que :

$$\begin{cases} F_{p,c}(n) = -F_{c,p}(n) \\ F_{p,c}(n) = -k_l \cdot \frac{y_p(n) - y_c(n)}{T_e} - z_l \cdot \frac{(y_p(n) - y_p(n-1)) - (y_c(n) - y_c(n-1))}{T_e^2} \end{cases}$$

## 2. INVESTIGATION

Nous explorons le modèle à partir des paramètres physiques. Six paramètres constituent l'espace des simulations de percussions : l'inertie de la Cellule  $M_c$ , la raideur  $K_c$  et la viscosité  $Z_c$  de la Cellule, l'inertie du percuteur  $M_p$ , la raideur  $K_l$  et la viscosité  $Z_l$  de la butée viscoélastique.

Le paramètre  $V_{p0}$ , vitesse initiale du percuteur, n'est pas pris en compte. Il a été fixé à  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . En effet, ce paramètre contrôle exactement l'amplitude du signal sonore. Il suffit de remarquer : - que le système (I, II, III) est invariant par une transformation de coordonnée

$y' = \lambda \cdot y$  ou  $\lambda \in \mathbb{R}$  ; - que la modification de la vitesse initiale du percuteur revient à faire ce type de transformation. On sait que la sensation d'intensité sonore est relativement bien corrélée avec l'amplitude du signal sonore. Elle varie à peu près suivant le logarithme de l'amplitude. Dans un contexte sonore pauvre comme celui de la percussion simple (son isolé) la relation se vérifie d'autant mieux.

Chaque son simulé est l'objet d'une analyse en termes de signaux. En particulier, nous nous sommes intéressés aux grandeurs suivantes :

- le *temps de montée*, qui caractérise la durée entre l'instant où la Cellule est au repos et l'instant où la Cellule atteint une amplitude maximale ;

- le *nombre de contacts*, lors de la percussion, défini par le nombre d'aller-retour du percuteur vers la masse de la Cellule ;

- l'*énergie transmise*, au système Cellule-butée par le percuteur, égale à la différence entre l'énergie cinétique du percuteur à l'instant initial et l'énergie cinétique du percuteur après la percussion ;

- le *rapport d'attaque*, défini par le rapport entre l'amplitude maximale de la Cellule lors de l'attaque et l'amplitude maximale de la Cellule après le dernier contact.

Nous disposons des trajectoires temporelles du percuteur et de la masse de la Cellule. L'analyse des sons par spectrogramme est réalisée à l'aide du logiciel *Audiosculpt* développé à l'Ircam<sup>2</sup>.

Nous avons procédé à une analyse esthétique des sons produits. Ils sont échantillonnés à 44,1 KHz et ont été calibrés préalablement. L'écoute se déroule en deux étapes. Premièrement, les sons, dont l'identification est masquée, sont groupés suivant leur similarité perceptive. Deuxièmement, les groupes ainsi construits sont réécoutés, réarrangés si nécessaire, et font l'objet d'une description verbale. Nous caractérisons l'attaque et la résonance des sons de percussion à l'intérieur de chaque groupe.

<sup>2</sup>Ircam : Institut de recherche et de coordination acoustique musicale.

### 3. EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

#### 3.1. VARIATION DE $M_p$ , $K_l$ , $Z_l$ À CELLULE FIXE

Nous avons fixé les paramètres de la Cellule pour une fréquence de résonance de 503 Hz, un taux d'amortissement de 2 s et une inertie  $M_c$  de  $10^{-5}$  Kg. Nous appelons taux d'amortissement la grandeur  $\tau$  homogène à un temps telle que l'amortissement de la Cellule est du type  $\exp(-t/\tau)$ . On en déduit  $K_c$  et  $Z_c$  ; soit  $K_c = 100 \text{ N.m}^{-1}$  et  $Z_c = 10^{-5} \text{ Ns.m}^{-1}$ . Nous avons exploré de manière systématique les trois paramètres restant  $M_p$ ,  $K_l$ ,  $Z_l$ . Les zones de divergences des simulations numériques déterminent les frontières de l'espace d'expérimentation. La capacité à discriminer deux sons voisins à l'écoute gouverne le degré de résolution de ces expérimentations.

Ainsi, nous avons mené deux séries d'expérimentations. La première est constituée de l'ensemble des combinaisons ( $M_p$ ,  $K_l$ ,  $Z_l$ ) des grandeurs suivantes :

$$\begin{aligned} M_p &= 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} \text{ Kg,} \\ K_l &= 1, 10, 100, 10^3, 10^4 \text{ Nm}^{-1}, \\ Z_l &= 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1} \text{ Nsm}^{-1}; \end{aligned}$$

soient 125 sons de deux secondes.

La deuxième est constituée de l'ensemble des combinaisons ( $M_p, K_l$ ) des grandeurs ci-après :

$$\begin{aligned} M_p &= 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 3.16 \cdot 10^{-7}, 3.16 \cdot 10^{-6}, 3.16 \cdot 10^{-5}, 3.16 \cdot 10^{-4}, 3.16 \cdot 10^{-3}, \\ &3.16 \cdot 10^{-2}, 3.16 \cdot 10^{-1} \text{ Kg,} \\ K_l &= 1, 10, 100, 10^3, 10^4, 3.16, 3.16 \cdot 10^1, 3.16 \cdot 10^2, 3.16 \cdot 10^3 \text{ Nm}^{-1}, \end{aligned}$$

pour une valeur de frottement de liaison fixe,  $Z_l = 10^{-5} \text{ Nsm}^{-1}$  ;  
soient 90 sons.

##### 3.1.1. VARIATIONS DE L'INERTIE $M_p$ DU PERCUTEUR ET DE LA RAIDEUR $K_l$ : RÉSULTATS

L'étude des différentes formes d'attaque des signaux met en évidence quatre configurations de courbe :  $\delta$ ,  $\delta_p$ , L et M. La figure 7.2 illustre les quatre configurations. Les évolutions au cours du temps des positions du percuteur et de la masse de la Cellule sont représentées ainsi que la variation de la force d'interaction entre les deux masses.

En analysant les différents timbres produits, nous avons identifié six catégories et deux qualités sonores. Les lettres A, A', B, B', C et C' désignent les catégories, les mentions attdbl et attsrd les qualités. La qualité attdbl correspond à une sensation d'attaque percussive double. La qualité attsrd est liée à l'impression de hauteur subjective grave du transitoire. Il s'agit de l'attribut de hauteur spectrale correspondant au centre de gravité spectrale<sup>3</sup> (cgs).

La catégorie A semble être représentée par un seul candidat, un son de "sinusoïde amortie" sans identité d'attaque perceptible (cf. séquence sonore (CD02)).

La catégorie A' contient des sons A avec une attaque plus sèche ; on remarque un léger effet de pincement (CD03).

Les attaques de la catégorie B évoquent un choc "massique" comme la percussion de deux boules de billard. On a l'impression que les objets percutes sont lourds.

Les timbres B', proche de B, se caractérisent par le fait que la sensation d'attaque double se situe au seuil de l'acuité temporelle. Un référent possible est le bruit d'un sabot de cheval sur des pavés (cf. séquence sonore (CD04) pour les catégories B et B').

Les attaques de la catégorie C s'apparentent aux consonnes labiales comme le "B" ou le "P". Les sons C peuvent évoquer le bruit que fait un bouchon de liège au sortir d'une bouteille ou encore celui d'un ballon sous-gonflé percutant un sol en ciment (CD05).

<sup>3</sup> Valeur moyenne des composantes du spectre pondérées par l'enveloppe spectrale.

La figure 7.3 montre la répartition des catégories à l'intérieur de l'espace des paramètres physiques ( $M_p$ ,  $K_l$ ).

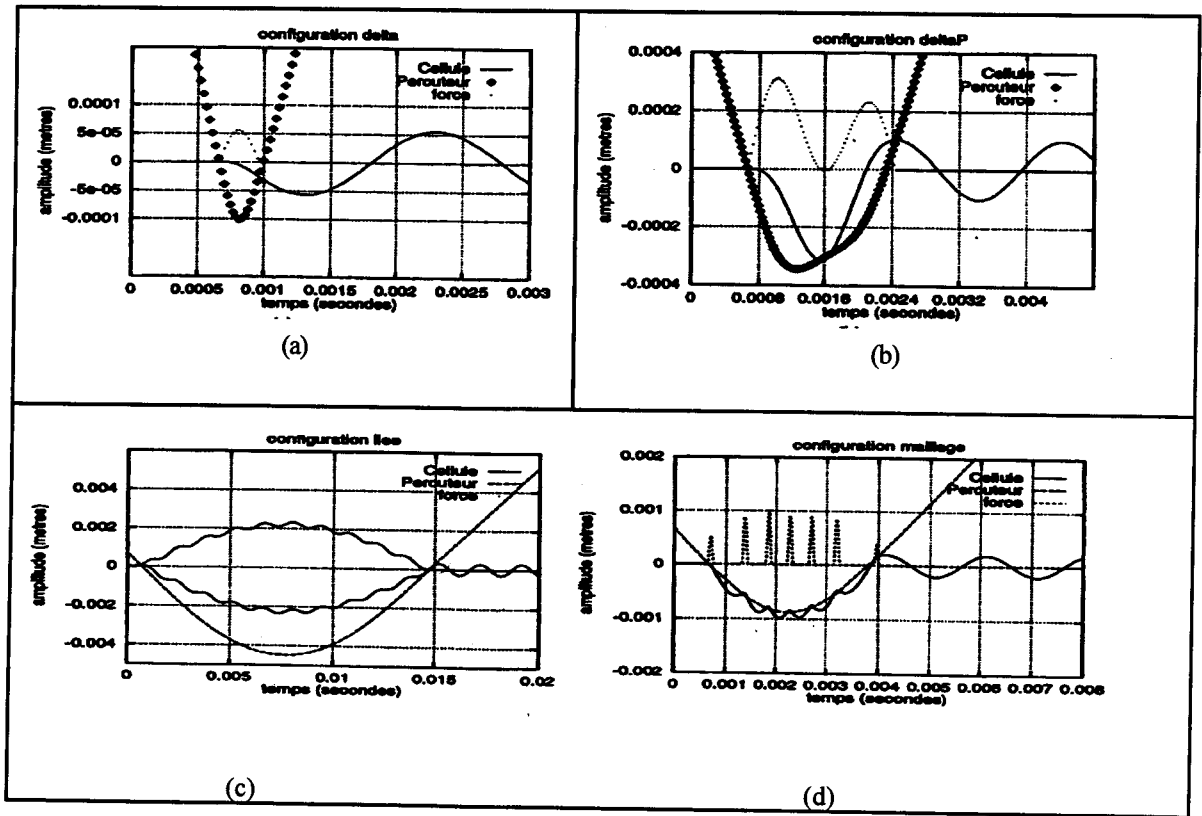


FIG. 7.2 - Quatre configurations de signal : - delta ( $\delta$ ), interaction limitée à la communication d'une force, - delta-p ( $\delta p$ ), similaire avec rapport d'attaque  $>1$ , - liée (L), un seul contact, - maillage (M), contacts multiples.

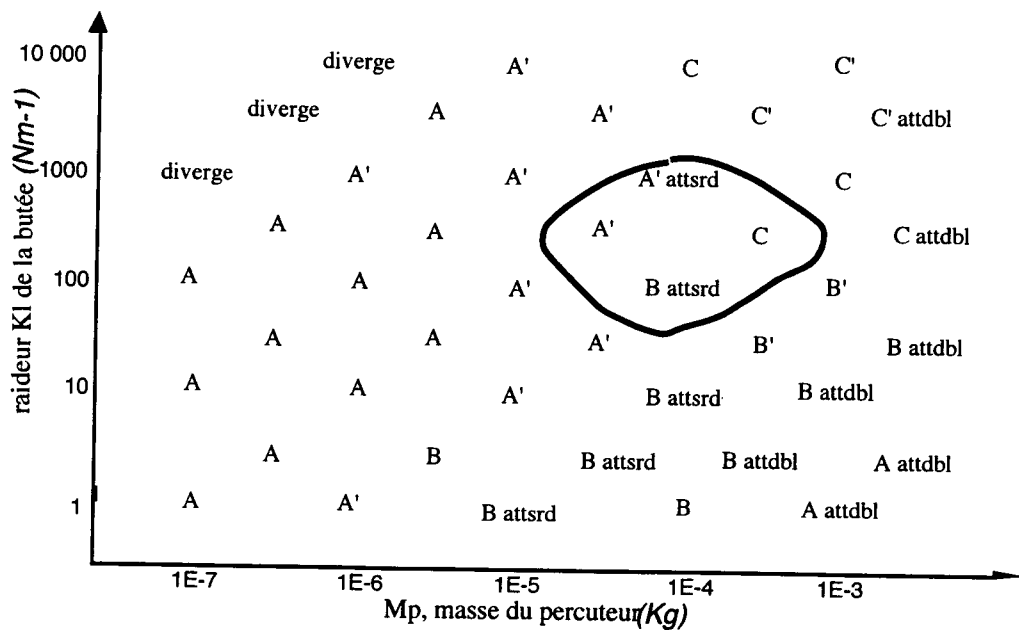


FIG. 7.3 - Correspondance poétique-esthétique du percuteur à Cellule fixe. A: son de "sinusoïde amortie", percussion neutre, A': son A très sec, effet de pincement, B: son "massique", choc de boules de billard, B': son B au seuil de fusion de la qualité attdbl, C: labiale, évoque la consonne "P", C': labiale, évoque la consonne "B", attdbl: qualité, sensation d'une attaque double, attsrđ: qualité, sensation de hauteur spectrale grave.

En mettant en correspondance l'analyse des configurations et l'analyse des catégorisations (figure 7.4) nous remarquons une forte corrélation entre les deux espaces de représentation. Il est clair que l'attaque du signal contient potentiellement toute l'information esthétique mais la sensibilité et la complexité esthétique sont en général différentes de la sensibilité et de la complexité dans l'espace du signal. Ici elles sont comparables. Trois zones principales se dégagent avec un axe tangible à inertie du percuteur importante. Les paramètres de production (paramètres poiétiques) varient beaucoup puisque l'échelle est logarithmique. Le maillage réalisé décrit à peu près la sensibilité auditive des opérateurs. En effet, des explorations plus fines des paramètres  $M_p$  et  $K_l$  rendent difficile la caractérisation esthétique. On remarquera une zone particulière (encerclée dans la figure 7.3) qui contient les catégories A', B et C.

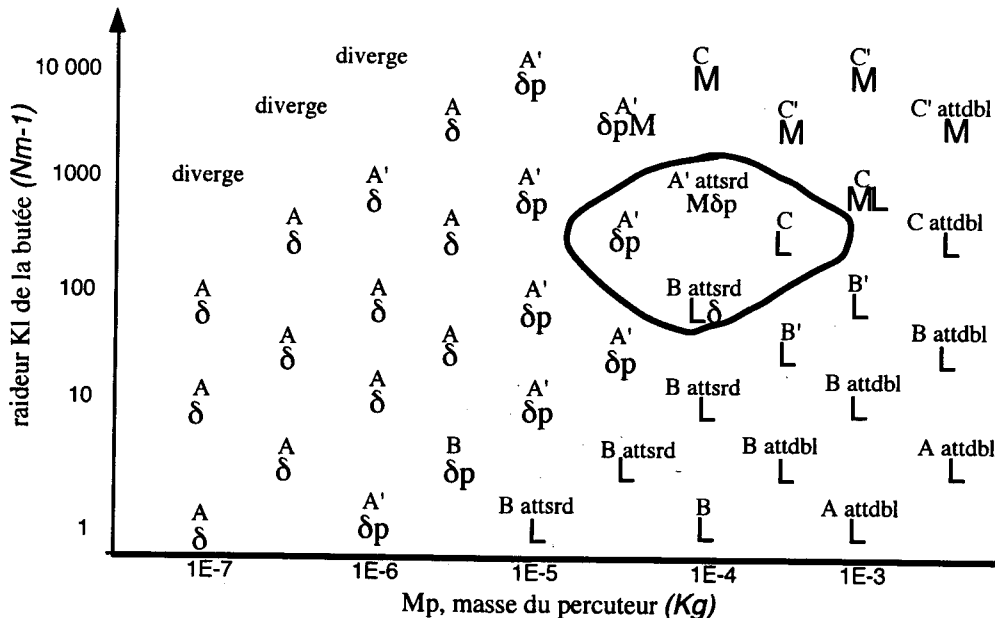


FIG. 7.4 - Correspondance poiétique-neutre-esthétique du percuteur à Cellule fixe. Les quatre configurations de signal combinées aux catégories sonores nous ont conduit à parler de forme percussive.

#### DESCRIPTION DES QUATRE FORMES GÉNÉRATIVES (CF. tableau 7.1)

##### La forme $\delta$ :

Elle est la plus représentée. Identifiable facilement, elle ne comporte aucune nuance. Bien que l'espace des paramètres poiétiques soit vaste, deux sons  $\delta$  ne pourront être différenciés. Ceci se conçoit bien puisque l'interaction percuteur-percuté se réduit à une force communiquée durant environ  $1/3$  de la période de la Cellule. De plus, la Cellule se comporte vis-à-vis du percuteur comme un point fixe (inertie importante). Il y a identité entre l'information esthétique A et l'information sur la configuration  $\delta$  du signal.

##### La forme $\delta p$ :

Elle est très similaire à la précédente. Deux contacts la caractérisent. La différence au niveau du signal est dans le rapport d'attaque. Le percuteur est renvoyé par la Cellule au cours du deuxième contact ; la Cellule perd ainsi une grande partie de son énergie. Ce phénomène est analogue au renvoi du marteau par le front d'onde de la corde du piano. L'amplitude de l'attaque est donc grande vis-à-vis de celle de la résonance.

forme L :

Elle est caractérisée par une phase de contact relativement longue. Elle illustre le comportement du système lié (II). L'inertie du percuteur est grande. Les catégories B, B' et A sont présentes. À inertie du percuteur importante, quelle que soit la raideur de liaison, la perception d'une attaque double intervient. Il ne s'agit pas d'un rebond réel du percuteur sur la structure. L'effet diminue lorsque  $Z_c$  diminue. Durant la phase de contact, la Cellule qui oscille a le temps de dissiper de l'énergie. Lorsque le percuteur "refait surface", il se comporte comme un générateur de force. La Cellule est de nouveau excitée et s'amortit de nouveau. Un effet similaire est obtenu lorsque  $Z_l$  augmente (cf. section 3.1.2. et annexe, figure AN.4). Cette qualité influence la tâche d'identification uniquement lorsqu'il y a ambiguïté entre la perception d'une attaque simple et la perception d'une attaque double ; c'est la catégorie B'. Nous remarquons des sons de la catégorie A à faible raideur  $K_l$  et inertie  $M_p$  importante. Cela s'explique par le fait que les attaques de forme L ne constituent plus une unité perceptive. L'excitation revient à appliquer deux forces ponctuelles, l'une en début de contact, l'autre en fin de contact, entre deux instants grands par rapport à la période de la structure vibrante.

TAB. 7.1 - Caractéristiques des formes percussives génératives, les grandeurs en italiques sont moyennées sur l'ensemble des sons.

	forme $\delta$	forme $\delta_p$	forme <u>L</u>	forme <u>M</u>
inerties	$M_p \sim M_c / 10$	$M_p \sim M_c$	$M_p \sim 100.M_c$	$M_p \sim 100.M_c$
raideurs	$K_l \sim 4.K_c$	$K_l \sim 16.K_c$	$K_l \sim K_c / 2$	$K_l \sim 40.K_c$
catégories sonores	A neutre	A' pincement	B et B' choc massique	C et C' "B" et "P"
<i>Temps de montée</i>	0,7ms	1ms	15ms	5ms
<i>nombre de contacts</i>	1	1,8	1	9
<i>énergie transmise</i>	50%	8%	0,2%	1%
<i>rapport d'attaque</i>	1	12	60	10

forme M :

Ici, la non-linéarité du processus intervient de façon prépondérante. La raideur de liaison et l'inertie du percuteur sont importantes. Les contacts sont multiples. Deux catégories sonores correspondent à ce mode d'interaction. Les sons C' sont provoqués par un nombre de contacts importants. Les sons C ont une propriété remarquable : ils sont le siège d'une modulation de fréquence durant l'attaque. Le sonagramme d'un son C avec une fenêtre d'analyse très courte exprime clairement cet effet (cf. annexe figure AN.3). Par filtrage, nous avons vérifié que les hautes fréquences sont responsables de cette identité.

Les formes génératives  $\delta$ ,  $\delta_p$ , L, M sont bien décrites par la connaissance du *temps de montée* et du *nombre de contacts*. Un graphe à deux entrées décrit par les critères *nombre de contacts* et *temps de montée* permet de regrouper les formes percussives (cf. figure 7.5).

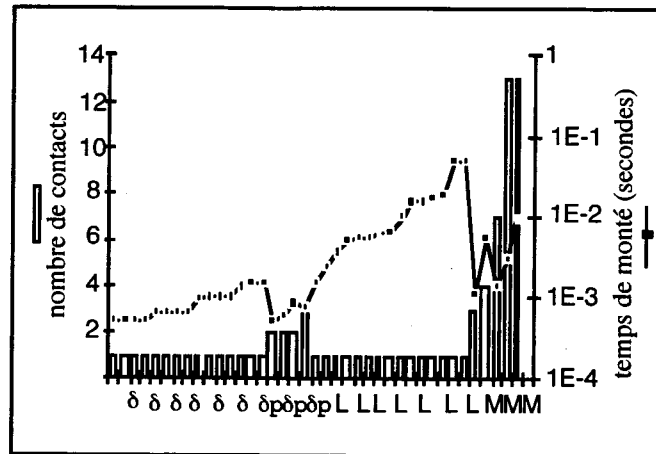


FIG. 7.5 - Variation du temps de montée et du nombre de contacts par rapport aux formes percussives. Ces deux critères permettent de grouper les formes percussives.

### 3.1.2. EFFET DE LA VISCOSITÉ DE LIAISON ( $Z_L$ )

D'une manière générale, ce paramètre modifie très peu la percussion tant sur le plan physique que sur le plan esthétique. Lorsque  $Z_L$  est inférieur à  $10^{-2}$  N.s.m<sup>-1</sup>, aucune observation supplémentaire par rapport à la viscosité nulle apparaît. Lorsque  $Z_L$  est supérieur à  $10^{-2}$  N.s.m<sup>-1</sup>, pour les percussions dont l'attaque est courte (inférieur à 1ms) aucune observation supplémentaire se manifeste. En revanche, pour les percussions dont l'attaque est longue (supérieur à 10ms), typiquement la forme L et la forme M, la sensation de l'attaque devient double sans altérer les caractéristiques du timbre ; la figure AN.3 en annexe illustre cet effet sur la forme L. Lorsque l'on filtre les énergies à basse fréquence de ce son, on obtient deux sinusoïdes amorties successives et la perception des deux attaques reste identique. Certes la sensation de hauteur pour la première n'existe pas mais son énergie, qui s'atténue au cours du temps, provoque la sensation d'une attaque. Les oscillations à basses fréquences sont donc responsables de ce phénomène. Dans le cas de percussion à un contact, ce dédoublement correspond au choc et à l'anti-choc du percuteur sur la Cellule. Il est une illustration de la symétrie approchante du signal de force (cf figure 7.2b).

Au-delà, pour un  $Z_L$  plus important on observe que sur les trois formes L, M,  $\delta$ , l'augmentation de ce paramètre provoque : - la diminution puis la suppression des oscillations durant l'attaque, - la diminution du nombre de contacts, - l'augmentation de l'énergie transmise, - la diminution légère du temps de montée.

Enfin, un phénomène très original apparaît à percuteur léger ( $M_C/10$ ) et à raideur de liaison très faible ( $K_C/100$ ) (CD10). Il s'agit d'un changement de fréquence à l'attaque. Le percuteur reste très longtemps au-dessous de la masse de la Cellule et vibre de concert avec elle (pendant 50 millisecondes). Cette faible masse attachée à la Cellule diminue la fréquence de résonance de l'oscillateur. Bien que faible physiquement, la masse additionnelle représente 1/10 de la masse de la Cellule. Cela correspond à un intervalle de hauteur de 70 cents ; cet intervalle se perçoit tout de suite. Le timbre évoque une goutte d'eau (cf. figure 7.6).



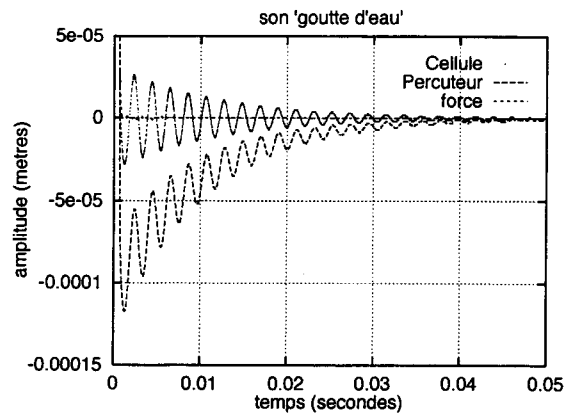


FIG. 7.6 - Forte viscosité, faible raideur de la Butée viscoélastique et percuteur léger : le percuteur vibre de concert avec la Cellule durant 50 ms.

Lorsque  $Z_1$  est de l'ordre de  $0,1 \text{ N.s.m}^{-1}$ , on atteint rapidement une zone de divergence numérique. De cette section, cinq sons ont été retenus.

### 3.2. VARIATION DE LA CELLULE ( $M_C$ , $K_C$ , $Z_C$ ) À PERCUTEUR ( $M_P$ , $K_L$ , $Z_L$ ) FIXE

Afin d'évaluer globalement l'effet de la structure sonore sur notre analyse, nous avons été conduits à expérimenter les variations des paramètres de la Cellule pour un percuteur donné. Soit  $M_P = 10^{-5} \text{ Kg}$ ,  $K_L = 100 \text{ Nm}^{-1}$ ,  $Z_L = 10^{-5} \text{ Nsm}^{-1}$  et  $V_{p0} = 1 \text{ ms}^{-1}$ .

Nous avons expérimenté l'ensemble des combinaisons ( $M_C$ ,  $K_C$ ,  $Z_C$ ) des grandeurs suivantes :

$$M_C = 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} \text{ Kg},$$

$$K_C = 1, 10, 100, 10^3, 10^4 \text{ Nm}^{-1},$$

$$Z_C = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1} \text{ Nsm}^{-1};$$

soient 125 sons de deux secondes.

La caractérisation esthétique est assez difficile. L'objectif initial était de montrer la faiblesse de la méthode d'expérimentation basée sur une Cellule vibrant à  $503 \text{ Hz}$ . Cette expérience n'a pas permis de dégager des relations intéressantes.

Cependant, la variation de l'amortissement de la Cellule  $Z_C$  provoque du point de vue perceptif trois phénomènes très connus que nous rappelons. À amortissement moyen, la modification du paramètre est liée exactement à la perception de la durée de la résonance du son. Elle ne modifie aucunement la perception de l'attaque. À fort amortissement, la résonance disparaît. La perception de l'attaque devient très différente. Il est possible que notre système auditif se focalise alors sur la hauteur spectrale<sup>4</sup> de l'impact. À faible amortissement, nous avons remarqué que l'identité de l'attaque se perdait au profit de la résonance. Les détails qui peuvent nous guider dans la ségrégation des attaques se noient si l'amortissement de la Cellule diminue. Ceci est une évidence pour un analyseur temps-fréquence. Plus le signal de percussion présente un faible amortissement, plus sa réponse en fréquence est étroite ; donc l'aspect temporel de ce signal est occulté par la dualité temps-fréquence.

Par ailleurs, il est apparu, à l'issue du balayage en fréquence de la Cellule percutée, des identités sonores ponctuelles et très remarquables. Une forme  $\delta$  évoque fortement la percussion d'un Djembé. Des percussions d'objets en verre sont apparues également.

<sup>4</sup>L'attribut "hauteur spectrale" est lié au centre de gravité spectrale (c.g.s.). On l'appelle aussi degré de brillance (cf. chapitre III).

La séquence sonore (CD06) fait entendre quatre séries de sons ordonnés suivant les formes percussives  $\delta$ ,  $\delta p$ , L et M, constituées respectivement de 5, 4, 6 et 2 sons.

### 3.3. PERCUSSION DE CELLULES À FRÉQUENCE ET AMORTISSEMENT COMMUNS MAIS DE MASSES DIFFÉRENTES.

Si l'on décide de maintenir la Cellule à une fréquence et à un taux d'amortissement constants, d'après les équations I, II, III, un seul des trois paramètres  $M_c$ ,  $K_c$ ,  $Z_c$  est libre. Nous choisissons de faire varier  $M_c$ . En négligeant l'influence de  $Z_1$ , le système est constitué ainsi de trois variables indépendantes :  $M_p$ ,  $K_1$ ,  $M_c$  (la vitesse initiale du percuteur ne jouant aucun rôle). Nous avons étudié l'ensemble des combinaisons  $(M_p, M_c, K_1)$  des valeurs suivantes :

$$M_p = 10^{-7} ; 10^{-6} ; 10^{-5} ; 10^{-4} ; 10^{-3} \text{ Kg,}$$

$$M_p/M_c = 0,01 ; 0,1 ; 1 ; 10 ; 100,$$

$$K_1 = 1 ; 10 ; 100 ; 1\ 000 ; 10\ 000 \text{ Nm}^{-1},$$

$$Z_1 = 10^{-5} \text{ Nsm}^{-1} ;$$

soit 125 sons pour  $f_c = 503 \text{ Hz}$  et  $\tau = 2 \text{ secondes}$ .

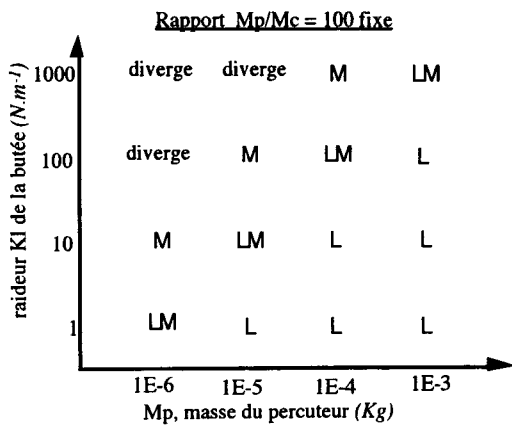


FIG. 7.7 - Continuité poïétique d'une forme liée vers une forme maillage

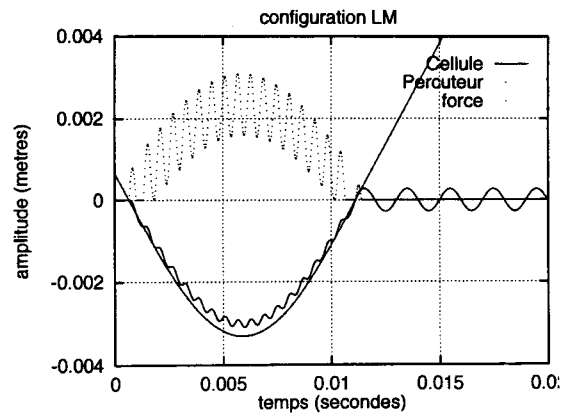


FIG. 7.8 - Forme LM,  $K_1 = 100 \text{ N.m}^{-1}$ ,  $M_p = 10^{-3} \text{ Kg}$ ,  $M_c = 10^{-5} \text{ Kg}$ .

L'analyse de ces sons donne les mêmes catégories esthétiques et les mêmes configurations de signal que l'analyse à percuteur variable. Nous retrouvons les formes M et L pour un rapport  $M_p/M_c$  grand, et la forme d pour un rapport faible. La différence est que le lien entre les formes percussives et l'espace poïétique est réalisé plus facilement. En effet, si on se place à rapport  $M_p/M_c$  constant et  $K_1$  fixent, la variation simultanée des inerties  $M_p$  et  $M_c$  génère l'ensemble des configurations de signal. Plus précisément, l'augmentation des deux masses, à  $f_c$ ,  $\tau$ ,  $M_p/M_c$  et  $K_1$  fixes, permet de passer de M à d (CD07), de  $\delta$  à  $\delta p$ , de  $\delta p$  à L (CD08) et cela suivant un ordre toujours respecté. Lorsque le rapport  $M_p/M_c$  devient grand (de l'ordre de 100), les formes percussives d,  $\delta p$  ne figurent plus ; le système passe continûment de L à M (cf. figures 7.7 et 7.8 et séquence sonore (CD09)). Ce passage est important : d'une part car la plus grande variété des identités sonores est située dans cette zone (percuteur lourd) ; d'autre part car la variation des inerties contrôle finement le nombre de contacts réalisés. Ceci constitue le résultat essentiel de notre étude.

## CONCLUSION

Proposant un modèle de percussion élémentaire pour la synthèse, nous avons exploré les potentiels sonores de ce dernier en essayant de comprendre les trois niveaux de connaissances en cause. Nous avons mis en évidence quatre formes percussives ( $\delta$ ,  $\delta_p$ , L, M) qui sont liées pertinemment à la perception des sons simulés. La première décrit une situation physique dans laquelle on peut négliger le caractère non-orienté de l'interaction percussive. La deuxième, proche de l'excitation ponctuelle, traduit le phénomène du renvoi du percuteur par la Cellule. La troisième est une percussion à un contact où les propriétés du système lié interviennent de façon prépondérante. La quatrième génère des contacts multiples et fait intervenir le caractère non-linéaire de la liaison. Les différents paramètres du modèle pour générer des variations de timbre audibles doivent varier suivant une échelle exponentielle. Nous remarquons que plus la durée de l'interaction est longue entre le percuteur et la Cellule, plus grande est la variété des timbres obtenus. Nous avons vu que :

- la vitesse initiale du percuteur contrôle explicitement l'intensité sonore ;
- la viscosité de liaison agit peu sur le timbre ;
- les inerties et la raideur de la liaison contrôlent le timbre ;
- le *temps de montée* et le *nombre de contacts* sont pertinents pour l'analyse esthétique.

Enfin la variation conjuguée des inerties  $M_p$  et  $M_c$ , à rapport  $M_p/M_c$  constant, pour une Cellule de résonance 503 Hz et d'amortissement 2 sec., permet de passer d'une forme à une autre de manière continue et d'ajuster finement le nombre de contacts. Cette étude préliminaire sur la percussion permet de mieux comprendre la non-linéarité de l'interaction percuteur-percuté qui est commune à tous les phénomènes de percussion. Un prolongement de ce travail consiste à enrichir la structure vibrante et à faire le lien avec la connaissance du modèle de percussion présenté.



---

# CHAPITRE VIII

---

## PERCUSSIONS MULTIPLES

---

### INTRODUCTION

Cette étude est inspirée de la synthèse granulaire. L'idée est de concevoir le son comme un ensemble de petits sons, un ensemble de grains sonores. L'objectif est de former des attaques de sons à partir d'un exciteur fait d'une multitude d'excitations percussives, plus précisément à partir d'une succession de percussions élémentaires. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Sylvain MANGIAROTTI au cours de son année de Maîtrise de Physique à l'Université Paul SABATIER (Toulouse) [MANGIAROTTI, 97]. Nous donnons les résultats les plus intéressants pour notre étude.

Nous espérons obtenir un meilleur contrôle esthétique sur l'attaque du son à partir de la sommation de contributions élémentaires. Le grain retenu est le percuteur élémentaire décrit au chapitre VII : une masse ponctuelle  $m$ , animée d'un mouvement de translation uniforme de vitesse  $V_0$ , liée à l'élément *butée élastique* de raideur  $k$ . On ne se préoccupe pas du renvoi du percuteur par la SV. Nous négligeons les phénomènes de dissipation dans la SV au cours de l'interaction de percussion. Nous ne modélisons pas l'environnement local et l'environnement global. Le geste d'excitation n'intervient sur l'instrument que pour communiquer une vitesse initiale aux masses ponctuelles de l'exciteur. Le but poursuivi est de former un type d'attaque percussive souhaité à partir d'éléments relativement indépendants et simples.

L'inconvénient de cette approche mi-analytique, mi-physique est une rupture poétique *a priori* entre le geste et le son. Il semble difficile d'élaborer un contrôle manuel musical pertinent sur une percussion faite d'une multitude de "micro-percussions". On peut citer un référent réel proche de ce modèle : la famille des balais employés sur les caisses claires.

Proposer un modèle de  $N$  percuteurs élémentaires plutôt qu'un modèle de percuteur  $N$ -complexe est une simplification sur le plan modal mais génère une succession de non-linéarités.

Nous verrons dans un premier temps l'excitation d'une Cellule par une série de percuteurs élémentaires. Nous nous intéresserons aux hauteurs perçues à l'attaque. Dans un deuxième temps, ces différents types d'excitation seront appliqués à deux SV riches harmoniquement : un Chapelet et une Membrane Carrée.

# 1. PERCUSSIONS SUCCESSIVES SUR UN OSCILLATEUR HARMONIQUE [FOURCADE&al., 99]

## 1.1. CONSIDÉRATIONS SUR LES HAUTEURS

### 1.1.1. EQUATIONS

Nous reprenons le modèle de la percussion élémentaire du chapitre VII. Lorsque la position de la masse du percuteur est inférieure à la position de la masse de l'oscillateur, le système est en phase transitoire : le système lié est en phase (cf. figure 8.1). En posant  $f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$  et

$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}$ , si on note  $F_+$  et  $F_-$  les fréquences propres du système lié, on a :

$$\begin{cases} F_+^2 = \frac{1}{2} [f_1^2 + \gamma f_2^2 + \sqrt{\Delta}] \\ F_-^2 = \frac{1}{2} [f_1^2 + \gamma f_2^2 - \sqrt{\Delta}] \\ \Delta = (f_1^2 + \gamma f_2^2)^2 - 4f_1^2 f_2^2 \\ \gamma = \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \end{cases}$$

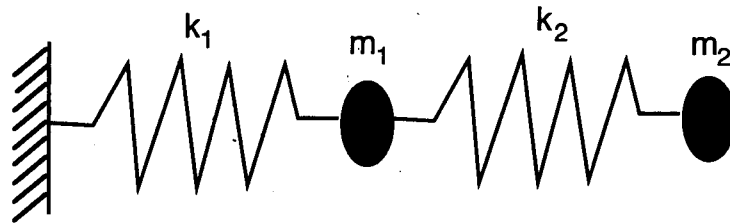


FIG. 8.1 - Couplage du percuteur et de la structure vibrante

Du fait de la condition de non-linéarité, le mode  $F_-$  ne sera pas perçu comme une hauteur. En effet si l'interaction est de type L ou  $\delta$  ( $k_2$  faible par rapport à  $k_1$ ), la durée de la phase liée est environ  $F_-/2$ , soit une demi-période d'oscillation. Ce mode influe sur le *temps de montée*.

Les paramètres  $m_1$ ,  $f_1$ ,  $F_+$  et  $F_-$  caractérisent le modèle structural du système sur le plan fréquentiel. Nous déterminons les paramètres du système à partir de  $m_1$ ,  $f_1$ ,  $F_+$  et  $F_-$ . Remarquant que  $f_1 f_2 = F_- F_+$  et que  $f_1^2 + \gamma f_2^2 = F_-^2 + F_+^2$ , en introduisant par commodité la variable  $\gamma$ ,  $\gamma = \frac{m_1 + m_2}{m_1}$ , on a :

$$\begin{cases} \gamma = \frac{f_1^2}{F_+^2} + \frac{f_1^2}{F_-^2} - \frac{f_1^4}{F_-^2 F_+^2} \\ f_2 = \frac{F_- F_+}{f_1} \\ m_2 = m_1 (\gamma - 1) \\ \frac{F_-}{F_+} > c \text{ ou } \frac{F_-}{F_+} < b \\ F_- < f_1 < F_+ \end{cases} \quad (8.1)$$

Les inéquations sont des contraintes sur les valeurs des fréquences.  $b$  et  $c$  sont des constantes fonctions de gamma :  $b = \sqrt{2\gamma - 1 - 2\sqrt{\gamma^2 - \gamma}}$  et  $c = \sqrt{2\gamma - 1 + 2\sqrt{\gamma^2 - \gamma}}$ .

## 1.1.2. APPLICATIONS.

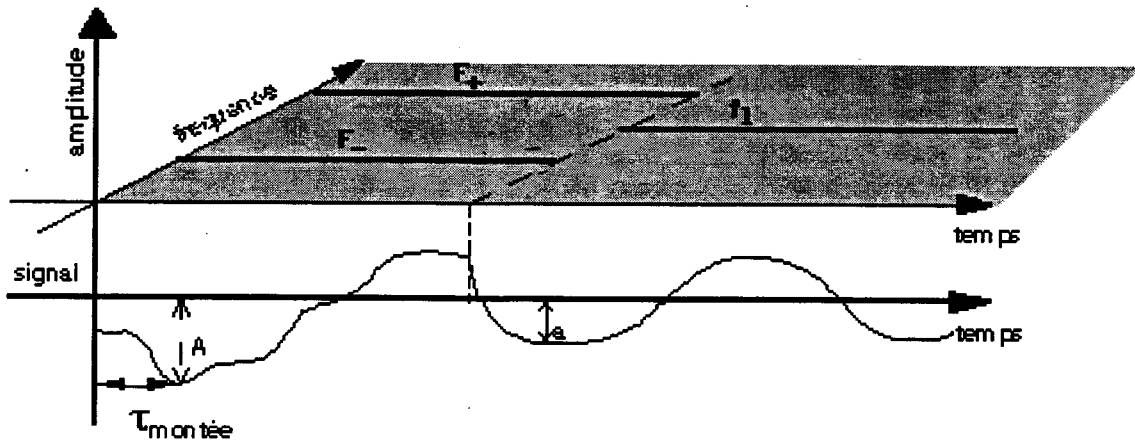
Plus concrètement, nous pouvons créer une attaque qui génère une sensation d'intervalle de hauteur à partir de : - la masse de l'oscillateur  $m_1$ , - la fréquence de la résonance  $f_1$ , - le rapport de fréquence entre  $F_+$  et  $f_1$  (intervalle), - le nombre  $N$  de périodes du mode  $F_+$  durant la phase transitoire.

Dans le cas d'une percussion à la quinte supérieure mi5-la4, on se donne  $m_1 = 1$  Kg,  $f_1 = 440$  Hz,  $N$  suffisamment grand pour percevoir une hauteur,  $N = 10$  et  $F_+/f_1 = 1,5$  (quinte de la gamme pythagoricienne). On veut  $f_- \approx f_+/2N$ . Ainsi,  $F_+ = 660$  Hz et  $F_- = 33$  Hz. D'après (8.1), on obtient  $\gamma = 20,1975$ ,  $m_2 = 19,1975$  Kg,  $f_2 = 49,5$  Hz. En termes de raideurs on a  $k_2 = 4\pi^2 f_2^2 m_2$ ; on obtient  $k_2 = 1,8573 \times 10^6$  Nm<sup>-1</sup>. De même, on obtient  $k_1 = 7,6412 \times 10^6$  Nm<sup>-1</sup>.

En appliquant la formule pour les paramètres algorithmiques de simulation prenant en compte l'effet de discrétisation, et en négligeant l'effet de la viscosité sur l'oscillateur, on a

$$f = \frac{F}{2\pi} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{K_{algo}}{2M_{algo}} \right), \quad m = M_{algo} \quad \text{avec } F_e = 44100 \text{ Hz (cf. chapitre 2 : Eléments$$

caractéristiques de l'oscillateur dans [INCERTI, 96]). Ainsi, on a finalement  $K_{1algo} = 0,003929$  et  $K_{2algo} = 0,000955$ . Le son résultant a pour référence (CD11).



F1

G. 8.2 - Exemple d'un grain d'attaque percussive sur un oscillateur harmonique : ici la percussion est une percussion à un contact (percussion L). Dans le plan de la page, est représenté le temps en abscisse, l'amplitude en ordonnée et la fréquence en profondeur de champs.

## 1.2. EXPÉRIMENTATIONS SUR LA CELLULE

Nous appelons excitateur le système global d'excitation et percuteurs les éléments. On met en œuvre une série de percussions élémentaires. En plus des 3 paramètres ( $m_i$ ,  $v_i$ ,  $k_i$ ) pour décrire un percuteur  $i$ , nous aurons  $T_i$  l'instant où le percuteur atteint l'altitude zéro en l'absence de SV. Nous notons  $N$  le nombre total de percuteurs.

Dans ce contexte, il est difficile d'évaluer le temps précis d'interaction entre la SV et un percuteur  $i$ . Il est donc difficile de connaître : - la phase et l'amplitude de l'oscillateur en fin d'interaction  $i$ , - la position de l'oscillateur au moment de la collision avec le prochain percuteur  $i+1$ .

## 1.2.1. JEUX DE HAUTEURS

À partir du système d'équations proposé en (8.1), il est possible, en négligeant l'influence des paramètres de viscosité, de construire des attaques qui suggèrent des variations de hauteurs.

Dans l'exemple sonore (CD12), nous percevons un arpège majeur; on entend successivement SI3, SOL#3, MI3.

De même, dans l'exemple (CD13), nous percevons une mélodie en arche à l'attaque ; on entend successivement à l'octave 3 : SOL#, LA, LA#, SI, LA#, LA, SOL#, MI.

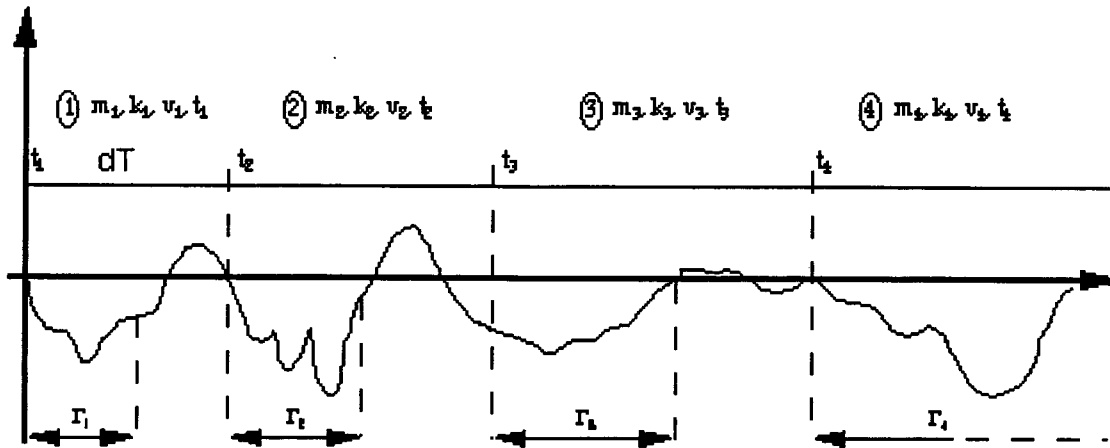


FIG. 8.3 - Exemple d'une série d'attaque percussive sur un oscillateur harmonique : ici les percussions ont un contact (percussion L). Au temps  $t_i$  environ, le percuteur  $i$  entre en contact avec la SV. Durant l'intervalle de temps  $\Gamma_i$ , la SV est liée au percuteur  $i$ .

### 1.2.2. VARIATIONS DU NOMBRE DE PERCUTEURS

Nous souhaitons faire varier le nombre  $N$  de percuteurs. On choisit de faire varier  $N$  comme suit : 1, 2, 4, 8 et 16. Nous imposons une durée du transitoire d'attaque constante : 100 ms. On choisit pour réaliser cela de modifier les raideurs des percuteurs. On obtient la série sonore (CD14).

### 1.2.3. VARIATIONS DE LA FRÉQUENCE DES PERCUSSIONS SUCCESSIVES

On note  $dT$  l'intervalle temporel entre deux impacts. Pour un  $dT$  important, chaque impact est perçu l'un après l'autre avec une phase de résonance de l'oscillateur. Lorsque  $dT$  décroît, les phases de résonance de la Cellule disparaissent ; il apparaît une granulation de hauteurs due aux différentes fréquences propres  $F_+$  des systèmes liés. Quand  $dT$  diminue encore, il apparaît une granulation d'amplitude. Chaque percuteur suivant la phase de la Cellule au moment de l'impact induit une variation d'énergie sonore imprévisible. Enfin, pour  $dT$  très petit, il n'y a plus de granulation, un seul percept d'attaque est perçu : il y a fusion ; les percuteurs s'accablent et interagissent en même temps sur la Cellule. Deux séquences sonores illustrent cela : (CD15) et (CD16). La première séquence présente l'exposition successive d'une série de percuteurs identiques avec des valeurs décroissantes de  $dT$ . La deuxième séquence présente l'exposition d'une série de percuteurs accordés suivant un motif mélodique. La série est simulée trois fois avec des valeurs de  $dT$  croissantes.

### 1.2.4. JEUX DIVERS

Il est difficile de prévoir le comportement de la SV après l'interaction. Une Cellule peut avec la dernière percussion s'arrêter de vibrer. Un exemple est donné en (CD17).

## 2. PERCUSSIONS SUCCESSIVES SUR DES STRUCTURES VIBRANTES RICHES

On fait l'hypothèse que le timbre perçu lors de la phase transitoire est peu différent du timbre en phase de résonance. Première hypothèse, la perturbation qui décale légèrement



chaque mode propre de la SV n'est pas perceptible. Deuxième hypothèse, le mode propre ajouté du fait de la liaison avec l'excitateur est noyé dans le contexte des autres modes propres actifs de la SV. Pour ce type de percussion, nous nous attendons à ce que seul le dosage harmonique de la résonance modifiée successivement par les percuteurs soit perçu.

### 2.1. SÉRIE D'UNE SUCCESSION DE PERCUTEURS DIFFÉRENTS

Nous reprenons la série des percuteurs qui donnait la forme en arche lorsqu'elle était appliquée à la Cellule. Les percuteurs élémentaires percutent toujours au même endroit sur la SV. On l'applique dans un premier temps à deux "cordes" de 18 éléments, l'une grave, l'autre aiguë. La hauteur fondamentale est stable. L'hypothèse ci-dessus est vérifiée (CD18).

Nous appliquons le même système d'excitation à une "plaque" inharmonique (membrane carrée, de 49 éléments, produit de deux chapelets). Cette fois, pour un lieu d'excitation spécifique (deuxième son de la séquence), on perçoit des jeux de hauteurs ; la fondamentale est instable (CD19).

### 2.2. VARIATION DU NOMBRE DE PERCUTEURS

Sur les SV riches, en augmentant le nombre de percuteurs, on voit que seules sont perçues les pondérations sur le spectre de la SV. Il n'y a pas de perturbation sur les modes de la SV (dus au couplage) qui soit perceptible, autrement dit de variations de hauteur. Ce paramètre n'offre pas d'effet autre que celui attendu, la répétition du phénomène de percussion au cours du temps.

### 2.3. VARIATION DE LA FRÉQUENCE DES PERCUTEURS

On retrouve les mêmes effets sonores que pour la Cellule : impacts indépendants, granulation de hauteur, granulation d'amplitude, fusion. La granulation de hauteur est ici une granulation de timbre. Cette dernière est accentuée par la proximité des percussions successives. Deux séries de 7 percuteurs, l'une sur une "corde", l'autre sur la "plaque" montrent l'effet de la variation de l'intervalle entre deux impacts successifs, de 800 ms à 12ms : séquences (CD20) et (CD21).

## CONCLUSION

Prenant le parti de synthétiser des attaques avec une succession de percussions élémentaires, nous montrons l'incidence sonore de quelques paramètres.

Premièrement, l'expérience consistant à faire varier la fréquence des percussions permet de passer d'une macro-forme de percussions perçues séparément à une attaque timbrée, objet perceptif insécable. Dans le cas de l'oscillateur, les étapes intermédiaires sont une granulation de hauteur suivie d'une granulation d'intensité. Dans le cas de la SV harmonique comme la corde ou inharmonique comme la plaque, les étapes intermédiaires sont une granulation de timbre suivie d'une granulation d'intensité.

Deuxièmement, nous avons considéré l'inertie et la raideur des percuteurs. Analysant les équations du système percuteur-SV lié, moyennant quelques hypothèses, il est possible sur une SV à un seul mode d'accorder la vibration du transitoire. Nous avons réalisé ainsi par synthèse des percussions qui dans leur structure évoquent un interval de hauteur. Appliqué à une série de percuteurs, ce procédé génère des mélodies de hauteurs.

En revanche, dans le cas de SV à plusieurs modes, il n'a pas été possible de faire varier la hauteur par percussion. Nous avançons deux raisons. D'une part l'accord de la fréquence du mode supplémentaire du transitoire est plus compliqué à mettre en œuvre (décomposition du système en modes propres). D'autre part le partiel ajouté se noie parmi les modes perturbés de la SV.

Pour faire varier la hauteur sur une SV harmonique, il faudrait un excitateur percussif qui perturbe tous les modes fréquentiels  $f_i$  d'un même  $\Delta f/f_i$ . Toutefois, la répartition harmonique varie suivant les paramètres de l'excitateur (granulation du timbre).

En outre, de façon empirique, sur une plaque, nous obtenons des variations de hauteurs par une série de percuteurs de différentes raideurs. Sur une SV inharmonique comme la plaque, l'oreille a du mal à inférer une série harmonique naturelle au sein d'une trame inharmonique ; une perturbation de la SV par percussion peut engendrer alors une variation de hauteur.

Enfin, CA porté aux usages des compositeurs a révélé que la démarche de synthèse additive s'intègre facilement dans le langage particulière. Parallèlement, cette étude prouve que la démarche de synthèse granulaire en synthèse par modèle physique peut être adoptée. Néanmoins, est-ce judicieux d'atomiser le transitoire percussif par une série d'éléments non perçus en eux-mêmes ? L'étude menée dans ce chapitre ne permet pas de savoir si cette démarche permet un meilleur contrôle de l'attaque percussive. Elle constitue cependant une exorde<sup>5</sup>.

Comme perspective, l'étude sur la multiplicité des percuteurs est novatrice car elle fait émerger une catégorie qui n'est ni de l'entretien ni de la percussion, et qui se rapproche des racles. Elle préfigure de nouveaux dispositifs gestuels capables d'interagir avec un ensemble de masses. En contrepartie la ductilité de cette démarche qui rejoint celle de la synthèse granulaire, peut faire oublier la contrainte gestuelle.

---

<sup>5</sup>Une entrée en matière

---

## CHAPITRE IX

### UNE PASSERELLE VERS LES CONSONNES /p/, /t/ ET /k/ [FOURCADE&CADOZ 99]

---

#### INTRODUCTION

« *Que la musique ait sa source dans le corps humain, cela paraît évident. [...] La musique se divise en musique vocale et en musique instrumentale. D'un côté, le chant, qui est produit par l'appareil vocal ; de l'autre, la musique des instruments, issue du mouvement corporel.* » - [SCHAEFFNER, 68], chapitre I, p. 13.

Une simple observation de la notation musicale montre que la musique vocale développe un ascendant sur la musique instrumentale. Une partition de musique instrumentale contient souvent des références à l'expression sonore du chant ou de la voix parlée. L'inverse est très rare.

Par ailleurs, dans l'apprentissage de la pratique d'un instrument de percussion, la prononciation de phonèmes en relation avec le timbre désiré joue un rôle important. De plus, la prononciation simultanée à la frappe peut faire l'objet d'un effet musical (cf. séquence (CD22), un percussionniste commente le jeu du tabla (Extrait de [Schaeffer 2]). Puisque la parole est un mode de communication privilégié et puisqu'une des fonctions de la musique est de communiquer, il convient de s'intéresser aux sons de voix parlées. Parmi les objets phonétiques nous avons retenu les plosives non-voisées : /p/, /t/ et /k/.

Dans ce chapitre, nous montrons que les percepts des consonnes /p/, /t/, et /k/ peuvent être évoquées dans un certain contexte (qu'il conviendrait de préciser) à partir de synthèses réalisées par modèle physique de percussion élémentaire.

Dans un premier temps nous étudions un modèle d'instrument CA pour la synthèse de voyelles : structure vibrante et excitateur par entretien. Dans un deuxième temps, nous proposons un modèle d'excitateur percussif qui suggère les percepts /p/, /t/, et /k/. Dans un troisième temps, par analogie avec la formation des phonèmes en parole, nous juxtaposons les deux types d'excitateurs sur la SV. Dans un quatrième temps, quelques rapides expériences psychoacoustiques soumettent ce modèle à la perception. Enfin, nous concluons sur les perspectives offertes par ce rapprochement entre l'art de la voix et la musique instrumentale.

# 1. CONSTRUCTION DES VOYELLES

Le problème à résoudre est le suivant : - créer d'une part des structures vibrantes passives sur lesquelles on connecte les points d'écoute ; - construire d'autre part des structures d'excitations actives ; - enfin assembler l'une et l'autre afin d'induire chez l'auditeur les percepts des voyelles /a/, /œ/, /i/ et /o/ de la langue française. Nous savons que la structure acoustique des voyelles est constituée d'un son stationnaire. Le son peut être représenté comme le filtrage d'une source d'énergie continue par une enveloppe spectrale. L'enveloppe spectrale est caractérisée par des zones stables d'amplitudes fortes, les formants. La configuration des formants dans le spectre caractérise une voyelle. La prise en compte de quatre formants permet une bonne restitution des voyelles par synthèse.

Utilisant le système CA, nous cherchons à construire une structure vibrante dont la réponse impulsionnelle fréquentielle est semblable à la structure formantique des spectres de voyelles. Nous nous limitons à la prise en compte des deux premiers formants pour chaque voyelle. Les amplitudes relatives et les largeurs de bande des formants sont négligées. Une fois la structure vibrante élaborée nous présentons un système d'excitation entretenu sur cette structure vibrante.

## 1.1. PRODUIT DE DEUX STRUCTURES VIBRANTES

Pour réaliser la structure vibrante, nous nous appuyons sur le concept des structures produits introduit par Pirouz DJOHARIAN [DJOHARIAN, 93], dans le cadre de ses travaux sur la synthèse modale ; concept développé et appliqué aux structures vibrantes par Éric

INCERTI [INCERTI, 96], partie C, section 3.3.

Le principe consiste à remarquer que, dans l'espace des mouvements unidimensionnels, l'opération topologique du produit de deux structures vibrantes génère une structure dont les modes vibratoires sont une fonction simple des modes des structures vibrantes de départ. L'opération 'produit d'une structure A par une structure B' consiste à générer un réseau en substituant à chaque nœud de A une version de B.

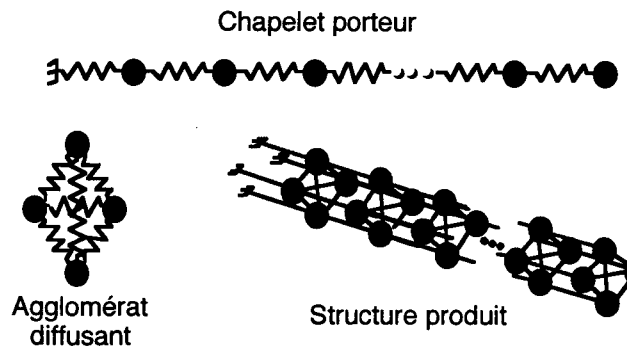


FIG. 9.1 - Exemple du produit d'un chapelet semi-ouvert par un agglomérat à quatre masses ; les liaisons de milieu ainsi que les liaisons visqueuses ne sont pas représentées.

Les connexions entre les différentes versions de B se font selon la topologie de A (cf. figure 9.1). L'intérêt est de construire par ce principe des structures vibrantes non homogènes tout en bénéficiant de l'avantage du formalisme des structures vibrantes homogènes.

## 1.2. PRODUIT D'UNE STRUCTURE PORTEUSE ET D'UNE STRUCTURE DIFFUSANTE

Éric INCERTI a montré que sous certaines conditions la composition par produit de deux structures permet de *diffuser* les modes de l'une par rapport à l'autre [INCERTI&CADOZ, 95]. Si la première possède des modes relativement étendus sur une large bande spectrale et si la deuxième possède à l'inverse une bande spectrale ramassée, alors les modes de la structure produit sont globalement répartis en paquets suivant la répartition modale de la première (structure porteuse) ; de plus chaque paquet de modes est réparti suivant la répartition modale de la seconde (structure diffusante).

### 1.3. APPLICATION AU PRODUIT D'UN CHAPELET SEMI-OUVERT PAR UN AGGLOMÉRAT

Dans un premier temps, nous considérons un chapelet homogène de trois masses, attaché à l'élément Sol par une de ses extrémités. Chaque masse, en plus de ses voisines, est reliée à l'élément Sol par une liaison ressort-frottement appelé *liaison de milieu*. L'objet décrit a sur le plan modal quatre degrés de liberté : deux pour les liaisons internes (homogènes), deux pour les liaisons de milieu (homogènes). En première approximation, le conduit vocal est assimilé pour les voyelles concernées à un tube ouvert à une extrémité, fermé à l'autre extrémité. Le mode d'attache requis (chapelet semi-ouvert) pour modéliser le comportement sonore d'un tube vibrant a donc été choisi ici. Nous appelons "Tube" le chapelet ainsi défini.

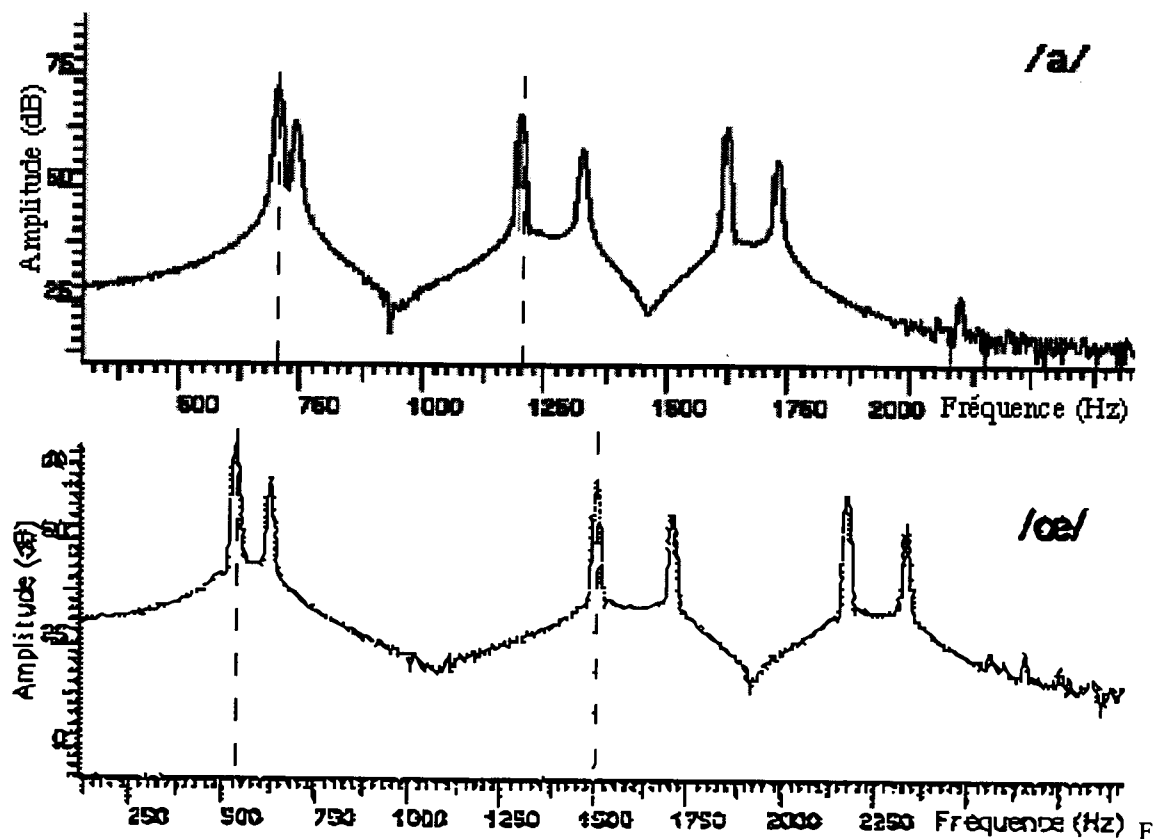


FIG. 9.2 - Transformées de FOURIER des réponses des SV /a/ (courbe du dessus) et /œ/ (courbe du dessous) à une impulsion. L'analyse est effectuée sur les 250 premières millisecondes. Les fréquences des deux premiers formants sont indiquées par les traits grisés verticaux.

Le spectre de la structure vibrante "Tube" est constitué de trois pics qui sont l'expression fréquentielle de ses modes propres. Nous imposons à la structure la fréquence et l'amortissement des deux premiers modes propres ; les deux fréquences sont telles que leurs valeurs respectives représentent le premier et le deuxième formant d'une voyelle. C'est la structure porteuse. Dotés d'une excitation continue explicitée à la section 1.5, en (CD23) nous écoutons respectivement les vibrations sonores résultantes des "Tubes" accordés suivant les voyelles /a/, /œ/, /i/ et /o/.

Dans un deuxième temps, nous considérons un agglomérat "A" homogène à 10 masses (chaque MAT est lié à tous les autres par un élément REF). L'agglomérat est relié à l'élément Sol en chacun de ses éléments MAT par une liaison ressort-frottement (liaison de milieu). L'agglomérat nous intéresse car c'est un objet inharmonique dont le spectre est très ramassé. Nous imposons les paramètres des modes extrêmes 1 et 10 de sorte que l'étendue spectrale soit comprise entre 10 et 100 Hz. La structure est choisie fortement dissipative par rapport au chapelet. Un agglomérat complètement homogène vérifie que tous ses modes sont dégénérés, l'étendue spectrale est réduite à une fréquence. Ici ce n'est pas le cas car les liaisons de milieu (homogènes) comporte une raideur et une viscosité différentes de celles des liaisons internes.

Dans un troisième temps, la structure vibrante résultant du produit de l'agglomérat "A" par le chapelet "Tube" (cf. figure 9.1) possède une réponse fréquentielle proche de la structure acoustique formantique d'une voyelle. La stabilité des formants est assurée par les paquets de modes regroupés autour des pics fréquentiels du chapelet "Tube" accordé suivant les deux premiers formants de la voyelle. Dotées de la même excitation continue que pour l'exemple sonore précédent, en (CD24) nous écoutons les sons issus des structures produits correspondants à /a/, /œ/, /i/ et /o/. Les réponses en fréquence des structures induisant les voyelles /a/ et /œ/ sont données par le graphe 9.2 ; les réponses temporelles sont données respectivement par les sons (CD25). Les double-pics n'existent pas dans les structures formantiques naturelles ; ils sont dus à la diffusion par l'agglomérat. Nous n'avons pas cherché à les éliminer.

TAB. 9.1 - Paramètres modaux des structures produits.

type de la structure	Tube homogène à 3 masses	Agglomérat homogène à 10 masses
Amortissements	mode 1 : 5 s	mode 1 : 0,2 s
	mode 2 : 9 s	mode 10 : 0,1 s
fréquences	mode 1 : 1er formant	mode 1 : 10 Hz
	mode 2 : 2nd formant	mode 10 : 100 Hz

#### 1.4. PARAMÈTRES DES STRUCTURES CA DE VOYELLES

Pour construire les Tubes nous avons pris les deux premiers formants indiqués par les travaux de [APPELMAN, 67] sur les voyelles chantées par des voix masculines (cf. tableau 9.2). On remarquera que nous ne prenons pas en compte les amplitudes relatives et les largeurs fréquentielles des deux formants. Les paramètres modaux de l'agglomérat ont été déterminés empiriquement (cf. tableau 9.1).

TAB. 9.2 - Les deux premiers formants de voyelles chantées chez la personne masculine d'après [APPELMAN, 67].

voyelle	premier formant (Hz)	deuxième formant (Hz)
/ a /	700	1 200
/ œ /	530	1 500
/ i /	300	1 950
/ o /	350	640

#### 1.5. LE SYSTÈME EXCITATEUR POUR GÉNÉRER LES VOYELLES : UNE SÉRIE DE PERCUSSIONS

La percussion est par essence un apport bref d'énergie. On sait que la représentation en termes de structures formantique nécessite une source d'énergie pour générer la perception de voyelle. Cette source est nécessairement continue dans le temps. Chez le commun des mortels, en frappant la joue avec l'index, il est possible d'évoquer les voyelles en configurant convenablement le conduit vocal. Cela revient à frapper un résonateur. Le percept de voyelle est tenu mais présent.

Toutefois, nous avons besoin de mettre au point une excitation entretenue. La technique consiste à envoyer à intervalle régulier des masses en mouvement qui percutent la SV en un même point suivant la loi de la butée simple avec viscosité. Le principe de cette percussion est exposé au chapitre VII et la succession des percussions est expérimentée au chapitre VIII. L'intervalle entre deux percussions est suffisamment petit pour que l'oreille de l'auditeur ne perçoive pas l'effet de percussion mais un continuum. L'intervalle est de 10 ms. On peut remarquer que ce type d'excitation est comparable à l'application d'un peigne sur un objet vibrant. L'excitateur n'est nullement influencé par le comportement de la SV contrairement à un excitateur de type archet. Ce type d'excitation est comparable à celui des instruments à percussion appelés "racles" - (cf. Appendice de [SCHAEFFNER, 68]: Classification des instruments de musique). Proposant une typologie du geste instrumentale d'excitation, [CADOZ, 99] remarque que dans les "racles" intervient une catégorie spécifique: le geste est continu et la mise en vibration instantanée.

## 2. MODÈLE PHYSIQUE DE PERCUSSION POUR L'ÉVOCATION DES CONSONNES PLOSIVES /p/, /t/ ET /k/

Les consonnes plosives ont fait l'objet de recherches actives dans le domaine de la parole. On peut distinguer dans le signal sonore d'une syllabe consonne-voyelle une partie bruitée et une partie voisée. De nombreux travaux optent pour une description spectrale, soit sur une durée constante, soit à partir de la comparaison de deux spectres, l'un calculé sur les premiers instants, l'autre sur le début du voisement; d'autres encore ont une approche évolutive du spectre. Dans les travaux anciens et bien connus, nous nous sommes arrêtés à ceux de COOPER bien que largement dépassés depuis. Ils nous ont donné des points de repères simples et suffisant par rapport à notre objectif. Le concept de "locus equation" élaboré par [LINDBLOM, 63] a succédé à l'approche de Cooper. Ce concept suppose que la fréquence des formants du côté de la consonne est liée à la fréquence dans la zone stable de la voyelle par une équation affine. Les coefficients des équations affines pour chaque formant vont spécifier la consonne. Aujourd'hui, de nombreux travaux sur les syllabes consonne-voyelle montrent l'interdépendance entre le type de voyelle et la consonne associée au sein du système phonatoire [NEAGU, 98].

### 2.1. L'EXPÉRIENCE DE COOPER: UNE CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE DES PLOSIVES /p/, /t/ ET /k/

Dès la conception des premiers outils d'analyse et de synthèse temps-fréquence pour le son, des chercheurs se sont intéressés à la reconnaissance des consonnes. La variation spectro-temporelle des consonnes est forte. Les voyelles en revanche ont une stabilité fréquentielle plus importante. Une langue comporte un nombre beaucoup plus important de consonnes que de voyelles. Une expérience de synthèse des consonnes plosives anglaises /p/, /t/ et /k/ réalisée par [COOPER&al., 52] a permis de dégager des formes acoustiques pour la reconnaissance auditive. L'appareil de synthèse était une table traçante qui représentait un sonagramme sur laquelle on dessinait des patterns arbitraires. Un point sur la table produisait un "pop" que l'auditeur reconnaissait comme une consonne plosive mais il ne pouvait l'identifier. F. COOPER présenta à un ensemble de sujets ce type de pattern à différentes fréquences suivi par des sons de voyelles. Les transitoires avaient une durée de 15 ms. Deux formants constituaient la synthèse des voyelles. L'essentiel des résultats est illustré par la figure 9.3.

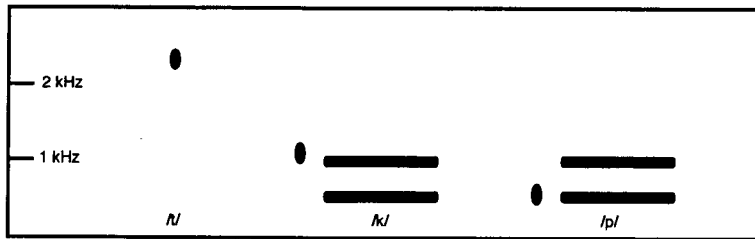


FIG. 9.3 - Configurations des stimuli pour la production des sons /t/, /k/, et /p/ sur la table à sonagramme de COOPER. L'axe des temps est de gauche à droite. L'axe des fréquences est du bas vers le haut. Un simple éclatement à haute fréquence est perçu comme un /t/. Un éclatement à la fréquence du deuxième formant de la voyelle qui suit est perçu comme un /k/ ; un éclatement en dessous du deuxième formant est perçu comme un /p/ (D'après les résultats de [COOPER&al., 52]).

L'éclatement à haute fréquence était perçu comme un /t/ pour toutes les voyelles. Mais les éclatements à basse fréquence pouvaient être perçus comme un /p/ ou un /k/ ; cela dépendait du type de voyelle qui suivait. L'éclatement était perçu comme un /k/ lorsque sa fréquence était à la hauteur du deuxième formant ou légèrement au-dessus. Autrement, les éclatements étaient perçus comme un /p/.

Une autre expérience avec la même technique de synthèse a permis de montrer que la modification du deuxième formant durant la phase transitoire (trajectoire continue du formant) permettait de synthétiser les consonnes /p/, /t/ et /k/, et cela sans faire intervenir des éclatements (cf. [DELATTRE&al., 55]). Cependant, nous n'exploitons que les résultats de l'expérience de F. COOPER.

## 2.2. EVOCATION DE PHONÈMES AVEC /p/, /t/ ET /k/

Dans la mesure où l'objectif n'est pas de réaliser une véritable synthèse des phonèmes issus des plosives /p/, /t/ et /k/ mais de seulement les évoquer, nous appelons "pseudo-phonèmes" les objets synthétisés présentés dans la suite.

### 2.2.1. LA CONSONNE, UN TRANSITOIRE D'ATTAQUE PERCUSSIF

Le transitoire d'attaque est réalisé par un modèle physique d'excitateur par percussion. Le modèle de percussion utilisé est décrit dans le chapitre VII. La butée visqueuse est nulle. Nous ajustons les paramètres de raideur de la butée de sorte que l'excitation crée un éclatement dans une zone de fréquence donnée. Avant l'impact la SV est au repos.

Pour approcher la consonne /p/ nous utilisons la technique des transitoires de hauteur définie au chapitre VIII [MANGIAROTTI, 97], [FOURCADE&al., 99]. La SV est assimilée à un oscillateur d'ordre 1,  $O_1$ .

On considère le système EX-SV couplés : masse du percuteur  $M_p$ , ressort  $K_l$  ; oscillateur  $O_1$ . On impose à ce système à deux modes : - une fréquence pour le mode le plus élevé égale à celle du premier formant, - une fréquence pour le mode le plus grave telle que la demi-période soit égale à 15 ms, durée des transitoires proposée dans l'expérience de COOPER. Ainsi, on détermine la masse  $M_p$  et la raideur  $K_l$  du percuteur.

Pour approcher la consonne /t/ la technique ne convient pas. L'approximation sur la SV est incorrecte. Nous avons ajusté empiriquement la fréquence paramétrique du percuteur  $f_p$  ( $f_p = \sqrt{k_l/M_p}$ ) afin d'obtenir une fréquence de couplage très supérieure au deuxième formant (cf. [COOPER&al., 52]). La masse de l'excitateur est ajustée empiriquement et conduit à un transitoire de 2 ms.

Pour approcher la consonne /k/, on ajuste le mode paramétrique de la butée pour que la fréquence de couplage soit légèrement supérieure au deuxième formant (cf. [COOPER&al., 52]). Le percept /k/ n'apparaît que pour une masse faible du percuteur. Le transitoire a une durée de 1 ms. Cependant, si cette masse est trop faible, le son résultant se confond avec une impulsion instantanée ; la durée du transitoire tend vers 0.



La série de sons de (CD26) à (CD29) illustre le résultat de la synthèse des consonnes sans la partie excitatrice entretenue du corps de la voyelle. Nous écoutons successivement les synthèses des pseudo-phonèmes /pa/, /ta/, /ka/, /pœ/, /tœ/, /kœ/, /pi/, /ti/, /ki/, /po/, /to/ et /ko/.

### 2.2.2. RÉALISATION DES PSEUDO-PHONÈMES : EXCITATION PAR PERCUSSION SUIVI D'UNE EXCITATION PAR ENTRETIEN

Nous faisons précéder la série d'excitations qui engendre la voyelle (cf. section 1.5) par une excitation percussive dont les paramètres permettent d'induire le transitoire des consonnes plosives non-voisées.

L'excitation à l'attaque communique une plus grande énergie à la structure vibrante que l'excitation d'entretien. Même s'il y a toujours 10 ms entre le premier impact et le second, la nature de l'excitation à l'attaque se distingue de l'excitation par entretien. L'impédance des percussions à l'entretien est faible par rapport à celle de l'impact de la première percussive qui traduit l'attaque d'une consonne plosive.

Pour toutes les simulations, le rapport entre la masse des percuteurs successifs,  $M_s$ , et la masse de l'excitateur du transitoire,  $M_p$ , contrôle le rapport d'attaque. La masse  $M_s$  est ajustée de sorte que le transitoire ait un rapport d'attaque "naturel". La fréquence paramétrique des percuteurs successifs,  $f_s$ , est telle que la succession des impacts soit perçue comme un continuum. L'amortissement visqueux dans ce cas est non nul.

TAB. 9.3 - Paramètres de l'excitateur percussif et de l'excitateur par entretien :  $M_p$  et  $f_p$ , inertie et fréquence modale lors de la première percussive ;  $M_s$  et  $f_s$ , inertie et fréquence modale lors des percussions successives qui suivent.

	/pa/	/pœ/	/pi/	/po/
$M_p$	91,67 Kg	68,47 Kg	36,66 Kg	43,66 Kg
$f_p$	67,62 Hz	67,93 Hz	68,89 Hz	68,57 Hz
$M_s$	60 Kg	60 Kg	60 Kg	60 Kg
$f_s$	35,59 Hz	35,59 Hz	35,59 Hz	35,59 Hz

	/ta/	/tœ/	/ti/	/to/
$M_p$	10 Kg	10 Kg	10 Kg	10 Kg
$f_p$	3 000 Hz	2 500 Hz	3 000 Hz	3 000 Hz
$M_s$	2 Kg	12 Kg	2 Kg	2 Kg
$f_s$	300 Hz	100 Hz	300 Hz	300 Hz

	/ka/	/kœ/	/ki/	/ko/
$M_p$	0,2 Kg	0,2 Kg	2 Kg	2 Kg
$f_p$	1 250 Hz	1 550 Hz	2 000 Hz	650 Hz
$M_s$	0,05 Kg	0,8 Kg	2 Kg	1 Kg
$f_s$	300 Hz	100 Hz	300 Hz	300 Hz

Les résultats de la synthèse des pseudo-phonèmes sont donnés par la série des sons de (CD30) à (CD33). L'ordre des synthèses des pseudo-phonèmes est le même que pour la série sonore précédente. Les sonagrammes 9.4 et 9.5 des synthèses des pseudo-phonèmes /pa/, /ta/, /ka/ et /pœ/, /tœ/, /kœ/ montrent le lien avec les résultats de F. COOPER. Le transitoire /p/, d'après les sonagrammes, contient un partiel basse fréquence de forte énergie ; Les fréquences excitées sont inférieures pour la plupart à 2 000 Hz. On observe que les transitoires /k/ et /t/ excitent les partiels formantiques de la même manière. La différence principale résulte dans le fait que d'une part le transitoire /t/ contient des fréquences plus élevées, d'autre part que la résonance des pseudo-phonèmes commençant par /t/ est soudainement appauvrie. Cela est plus particulièrement vrai pour /tœ/ et /kœ/. On sait que la variation temporelle du cgs d'un signal sonore est un paramètre important pour la perception des timbres instrumentaux d'après [FREED, 90].

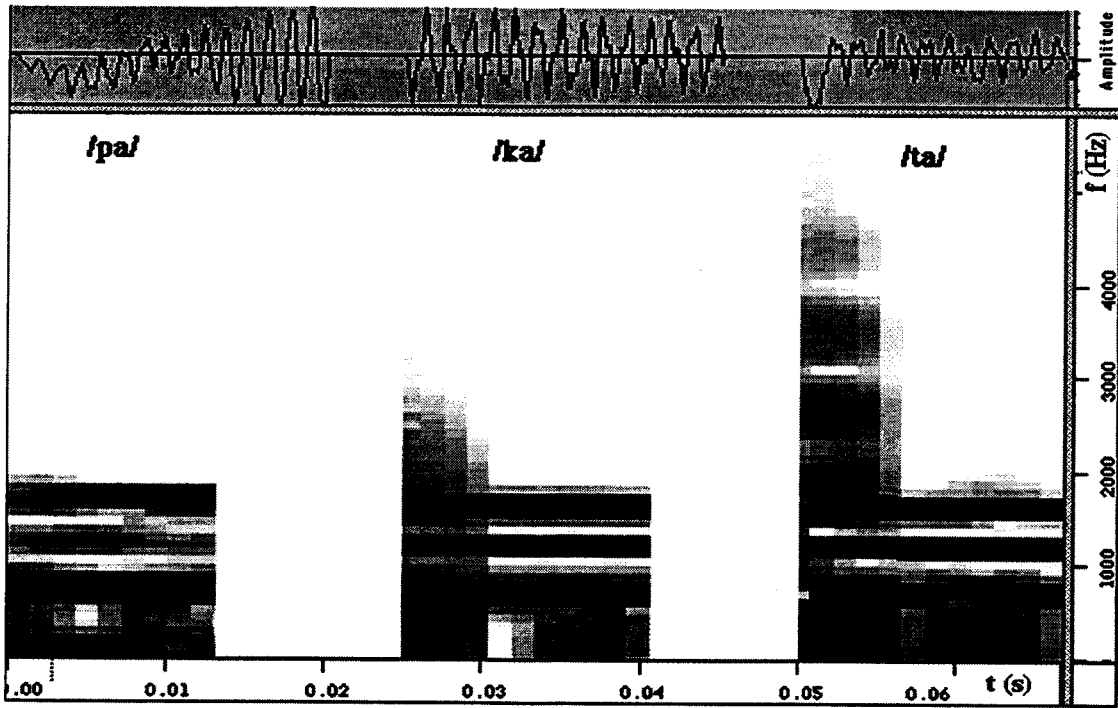


FIG. 9.4 - Signaux et sonagrammes des transitoires d'attaque des synthèses des pseudo-phonèmes /pa/, /ka/ et /ta/. Le premier transitoire se distingue par une forte énergie à basse fréquence. Le transitoire du milieu comporte un pattern au-dessus du deuxième formant. Le transitoire de droite comporte de hautes fréquences pendant un temps très court.

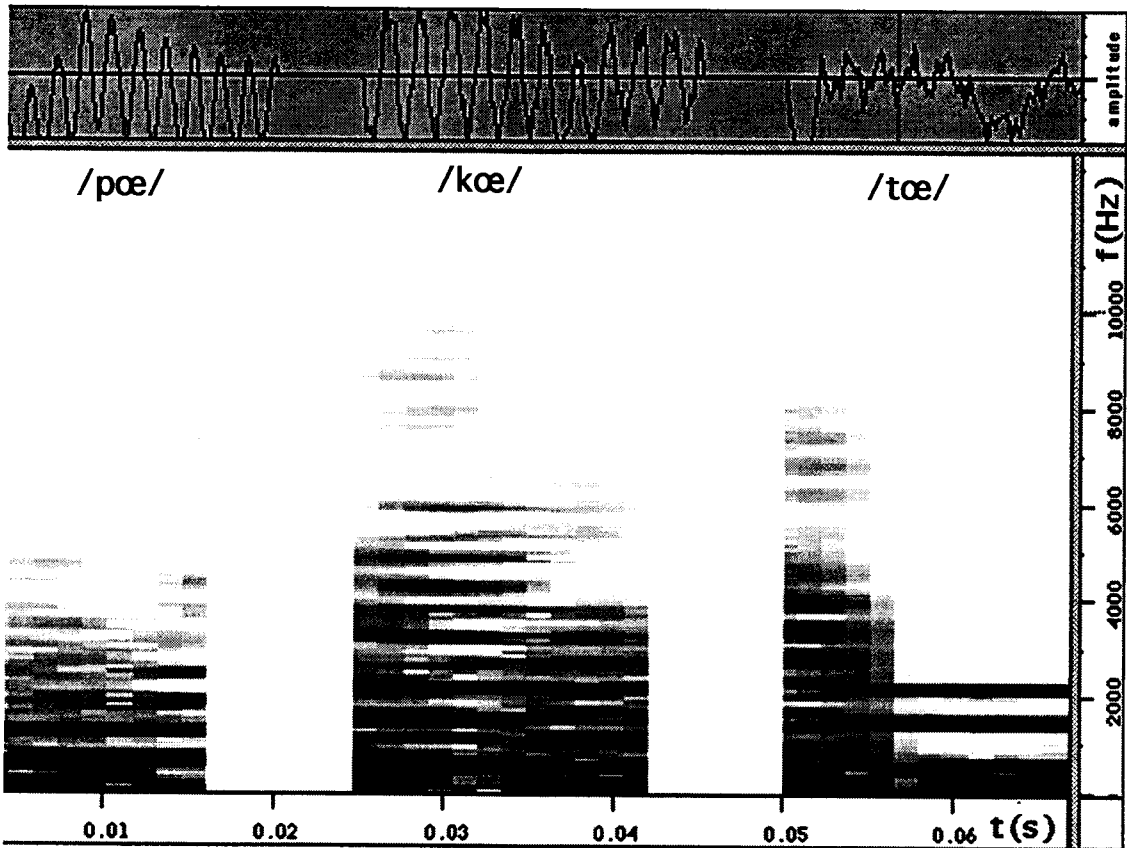


FIG. 9.5 - Signaux et sonagrammes des transitoires d'attaque des synthèses des pseudo-phonèmes /pœ/, /kœ/ et /tœ/. L'énergie du transitoire de gauche est concentré sur le premier formant. Le transitoire du milieu révèle une excitation relativement homogène. Le transitoire de droite a un cgs qui diminue subitement dans le temps.

### 3. EXPÉRIENCES PERCEPTIVES

Une première expérience consiste à présenter 12 stimuli de percussion sans l'excitation avec entretien. Trois excitateurs percussifs, ajustés respectivement par les paramètres correspondant à nos pseudo-consonnes /p/, /t/ et /k/, sont appliqués à tour de rôle sur 4 SV passives, accordées suivant les voyelles /a/, /œ/, /i/ et /o/. Pour chaque stimulus, le sujet est invité à reconnaître les consonnes synthétiques : /p/, /t/ ou /k/ et à juger de la pertinence de la synthèse de la consonne sur une échelle de 1 à 8. Dix sujets ont effectué les tests. Sur les 10 sujets, le taux de reconnaissance s'est révélé en dessous du taux aléatoire. Le modèle d'excitateur n'est pas pertinent pour évoquer, dans un contexte isolé, les consonnes /p/, /t/ et /k/.

Une deuxième expérience présente le même modèle physique de percussion mais avec l'excitation par entretien sur la SV. Le sujet est invité à reconnaître les phonèmes /pa/, /ta/, /ka/, /pœ/, /tœ/, /kœ/, /pi/, /ti/, /ki/, /po/, /to/ et /ko/. Les dix sujets précédents ont effectué les tests. Nous obtenons un taux de reconnaissance de 7/12 pour les consonnes, de 8/12 pour les voyelles et de 3/12 pour les phonèmes. Le taux aléatoire est respectivement de 4/12, 3/12 et 1/12. Les expériences sont beaucoup trop partielles et incomplètes pour tirer des conclusions fiables. Toutefois, elles sont encourageantes dans la perspective d'une utilisation musicale.

## CONCLUSION

A partir du modèle de percussion élémentaire, nous avons tenté de produire des timbres proches de percepts de sons de parole : les plosives non-voisées /p/, /t/ et /k/. Nous avons élaboré un modèle CA qui génère approximativement ces consonnes ainsi que les phonèmes correspondant.

Par ailleurs, nous avons été conduits à élaborer un modèle physique pour générer quelques voyelles. Nous avons montré que le concept de structure produit pouvait s'appliquer pertinemment à la mise en œuvre de structures acoustiques constituées de formants.

Dans l'univers sonore de CA, les consonnes plosives non-voisées peuvent être considérées dans une certaine mesure comme des percussions. Les pseudo-phonèmes construits à partir des transitoires /p/, /t/ et /k/ peuvent être considérés comme le jeu d'un instrument de musique virtuel : une structure vibrante en forme de chapelet semi-ouvert "épaissi", une excitation par percussion suivie d'une excitation par entretien.

Bien que la structure acoustique formantique soit un cas particulier des timbres instrumentaux, nous suggérons que la catégorisation en termes de consonnes plosives dépasse largement les sons à résonance formantique.

Ce rapprochement de la musique vocale et de la musique instrumentale opéré par des concepts physiques communs constitue une avancée dans la compréhension de l'expression musicale. Effectué sur le domaine restreint des plosives, il donne déjà au musicien un moyen inédit de composition sonore. Il serait passionnant et d'un grand intérêt de poursuivre ce rapprochement pour l'ensemble des consonnes : consonnes fricatives et modèle d'excitation entretenue, consonnes plosives voisées, nasales, liquides...

La deuxième partie de la thèse a traité la percussion à l'aide d'un modèle élémentaire de choc viscoélastique. Nous avons fait nos gammes au chapitre VII. Tenté par la généralisation des résultats sur les formes élémentaires de percussion, nous avons étudié la percussion multiple au chapitre VIII. Le timbre percussif du transitoire d'attaque s'est avéré moins pertinent au profit de l'attribut de hauteur dans le transitoire. Nous avons montré une application en accordant les percuteurs successifs. Au chapitre IX, la maîtrise des hauteurs et des timbres percussifs a permis d'évoquer partiellement des percepts de phonèmes.

Dans la troisième partie, nous considérons de plus près les problèmes d'absorption d'énergie dans la percussion : - A court-terme avec la dissipation dans les marteaux de piano au chapitre X, - A long-terme avec l'amortissement de peaux stressées au chapitre XII. La modélisation d'une dissipation "efficace" au cours de la percussion oblige à chercher une alternative à l'élément viscosité générique de Cordis-Anima. Nous posons le problème au chapitre XI en clarifiant les concepts en cause.

## **PARTIE 3**

**DISSIPATION ET AMORTISSEMENT  
DANS L'EXCITATION PERCUSSIVE**

---

# CHAPITRE X

## UN MODÈLE D'EXCITATEUR DISSIPATIF : LE MARTEAU FEUTRÉ

---

### INTRODUCTION

Les têtes de baguettes utilisées par les percussionnistes sont très diverses dans la matière qui les constitue. Parmi les matières utilisées, nous avons retenu le feutre, et ceci pour trois arguments.

Premièrement, le feutre est présent dans la percussion pianistique. Le feutre qui recouvre les marteaux de piano fait l'objet de grands soins dans la fabrication de l'instrument. Les études sur le piano sont nombreuses et de bonnes qualités scientifiques.

Deuxièmement, le feutre présente un comportement dynamique spécifique : la relaxation. La relaxation implique un processus de dissipation de l'énergie qui n'est pas celui d'un milieu visqueux usuel. Or les processus de dissipation dans les sons d'origine naturelle sont très importants pour la perception. Le concept d'excitateur pour l'analyse physique d'un instrument doit son existence en partie à celle des concepts de structure vibrante et de caisse de résonance ; plus spécialement il doit son existence au principe de l'invariance énergétique des structures vibrantes et des caisses de résonances : la dissipation. La question nouvelle que nous nous posons est : le processus de dissipation par relaxation au cours de l'interaction EX-SV est-il perceptible dans le sonore ?

Troisièmement, en laissant les arguments d'ordre physico-perceptif, le feutre appartient à la catégorie des matières à mémoire. La relaxation permet une forme d'intégration temporelle des contraintes et déformations subies ; aussi elle semble être une interface naturelle pour l'interaction haute-fréquence / basse-fréquence (mouvement de la SV / mouvement du percussionniste).

Néanmoins, les temps caractéristiques d'interaction sont courts. Sont-ils suffisants pour que la dissipation de l'excitateur influence le son résultant ?

Effectuant une étude bibliographique sur le rôle de l'excitateur dans la percussion, nous nous intéressons aux nombreux travaux concernant le Piano. L'article de [STULOV, 95] propose un modèle de percuteur qu'il nous semble important d'étudier.

Premièrement, le modèle prend en compte la dureté ou la souplesse de la tête du marteau excitateur. Cette propriété est mise en évidence expérimentalement par de nombreux chercheurs avec différents types de marteaux. La dureté de la tête de l'excitateur percussif constitue également un attribut perceptif dans les expériences psychoacoustiques de [FREED, 90].

Deuxièmement, ce modèle est très sensible à la vitesse initiale du marteau. Or la vitesse de frappe semble un paramètre de jeu important pour un percussionniste<sup>1</sup>. Nos modèles de percussion précédents sont linéaires vis à vis de ce paramètre.

Troisièmement, le modèle est le siège de phénomène de relaxation. Nous faisons l'hypothèse que le comportement de relaxation est un archétype de la perception écologique du sonore. En outre, la relaxation, abordée en synthèse d'image en Cordis-Anima, n'a pas été étudiée en synthèse sonore dans l'environnement CA. Elle offre également un modèle de

---

<sup>1</sup>L'augmentation de la vitesse implique l'augmentation de l'amplitude du signal acoustique mais pas seulement. Il y a des modifications dans le spectre. Une part est due à la non-linéarité de la SV, une part est due à la non-linéarité du système d'excitation (EX-SV).

dissipation plus efficace que celle de la Butée visqueuse. Nous avons noté dans l'étude de la percussion élémentaire que la Butée visqueuse n'est pas pertinente.

Dans cette étude, nous poursuivons deux objectifs. Le premier est de simuler le comportement de la matière feutrée. Pour ce faire, nous implémentons en CA un modèle de marteau isolé inspiré des travaux de STULOV. Nous appliquons ce modèle d'excitateur à des cordes CA ; STULOV dans son étude n'a pas simulé de cordes. Le deuxième objectif est de montrer que ce modèle pour d'autres valeurs de paramètres permet de réaliser des timbres variés et des actions percussives porteuses de sens pour le musicien.

Dans une première partie nous détaillons le modèle de marteau feutré proposé par STULOV. Nous le traduisons imparfaitement en CA avec une approche intégrale puis une approche différentielle. Le modèle différentiel écrit en CA est retenu pour comparer les caractéristiques expérimentales de différents marteaux de piano avec la simulation numérique. Ce modèle est appelé dans la suite modèle de « marteau feutré ».

Le langage CA et la mécanique Newtonienne donne une vision diachronique des phénomènes dynamiques. Avec le feutre, matériaux à mémoire, il y a un antagonisme. La relaxation usuellement peut se représenter par un frein et un ressort en série (liaison de MAXWELL) ; ce que le formalisme CA prohibe. Nous développons cet aspect important au chapitre XI. Ainsi, dans la deuxième partie de ce chapitre, nous proposons des modèles CA qui se rapprochent de la liaison de MAXWELL.

La troisième partie expose une étude esthétique du modèle de marteau feutré appliqué à la percussion de chapelets CA. Cette étude est une exploration empirique et systématique des paramètres en cause.

## 1. NOTATIONS

*	produit de convolution
d	distance caractéristique du système
$\delta$	pic de DIRAC
E	module de YOUNG
$E_0$	module de YOUNG instantané
$\varepsilon$	déformation mécanique
$\xi$	constante d'hystérésis
F(U)	force exercée sur le feutre
$\kappa$	dérivée de la fonction de relaxation
$K_0$	constante de raideur du feutre
m	inertie du marteau
p	puissance de la caractéristique de compression du feutre (à déformation mécanique nulle)
R(t)	fonction de relaxation
s	seuil d'interaction (butée)
t	variable temporelle (continue)
$T_e$	pas temporel de discrétisation
$T_0 = 1/f_0$	période fondamentale de la corde
$\tau_{\leftrightarrow}$	durée de l'interaction marteau-corde
$\tau_0$	constante de relaxation
U(t)	compression du feutre du marteau
$V_0$	vitesse initiale du marteau
$\omega$	pulsation
$X(t)'$	dérivée temporelle de X(t)
$\tilde{X}(t)$	transformée de LAPLACE de X(t)

$y(x,t)$	déplacement de la corde au point $x$ à l'instant $t$ (une dimension)
$y_{mart}(t)$	déplacement du marteau

## 2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MARTEAUX DE PIANO

### 2.1. BREF HISTORIQUE

H.L.F. VON HELMOLTZ<sup>2</sup> fut le premier à s'intéresser à l'action du marteau sur une corde de piano. Il proposa une force hypothétique  $F(t) = A \cdot \sin(pt/\tau_{<})$  ( $0 < t < \tau_{<}$ ) appliquée sur la corde à une distance  $l$  du sillet. Ce modèle permet d'expliquer la présence d'une fréquence de coupure  $f_c$  variant comme  $1/\tau_{<}$ . Il implique que tous les modes qui ont un nœud en  $x=l$  ne sont pas excités.

Au siècle dernier, KAUFMANN<sup>3</sup> a posé les bases de la modélisation de l'interaction marteau-corde. Il a souligné l'importance des ondes réfléchies sur le sillet ; ces dernières influent sur le mouvement du marteau. Il a considéré un marteau de métal.

Le premier modèle non linéaire a été introduit par GHOSH<sup>4</sup>. Il proposa une loi en puissance :  $F = A \cdot U^p$  ou  $A$  est une constante.

Reprenant ce modèle, [HALL&ASKENFELT, 88] ont mesuré les valeurs de  $p$  pour 16 marteaux réels. Pour une force comprise entre 0,55 N et 35 N,  $p$  est compris entre 1,5 et 3,5 sans aucune tendance définie du grave à l'aiguë. Les auteurs ont souligné que  $p=1$  n'était pas pertinent musicalement car dans ce cas la variation de la vitesse de frappe  $V$  donne une simple amplification du signal sonore.

[SUSUKI, 87] proposa une simulation par éléments finis dans laquelle la relation force-compression est de type polynomiale :  $F(U) = K_1U^2 + K_2U^3 + K_3U^4$ .

[BOUTILLON, 88] proposa un modèle par éléments finis à partir de la loi en puissance. Il introduit le comportement hystérétique du feutre dans l'interaction en considérant la loi  $F = A \cdot U^p$  valable par morceaux ( $A_i, p_i$ ).

[SUSUKI&NAKAMURA, 90] ont fait une synthèse des résultats expérimentaux sur l'interaction dynamique marteau-corde. Ils ont mis en évidence les points suivants :

- (i)  $F(U)$  est essentiellement non-linéaire ;
- (ii)  $dF/dU$  dépend fortement de  $V$  ;
- (iii) la relation entre  $F$  et  $U$  est le siège de phénomènes hystérétiques.

Enfin, [STULOV, 95] a proposé un modèle où le comportement hystérétique du feutre est pris en compte indépendamment de la relation avec la corde. Il s'est appuyé sur les mesures expérimentales effectuées par YANAGISAWA<sup>5</sup>.

### 2.2. GÉNÉRALITÉS

La percussion pianistique peut s'étudier suivant trois axes : - l'action de la touche, - le marteau, - l'interaction marteau-cordes. Nous nous focalisons sur les deux derniers axes. Nous rappelons quatre résultats et observations :

- (i) L'intensité de la note jouée est proportionnelle à la vitesse du marteau,  $V$ .
- (ii) Le son du piano est constitué d'un transitoire bruité (choc du marteau transmis à la table) et d'un son de corde frappée. L'action du pianiste pour le

<sup>2</sup>On the Sensation of Tone, 4th edn (trans. by A. J. ELLIS), 1877. (Dover, New York, 1954.) d'après [HALL, 87]

<sup>3</sup>1895 d'après [HALL, 87]

<sup>4</sup>Indian Journal of Physique, vol. 7, pp. 365-382 (1932) d'après [HALL, 87]

<sup>5</sup>Trans. Musical Acoust. Techn. Group Meeting Acoust. Soc. Jpn., vol. 1, pp. 14-18 (1982). Cette référence est donnée par STULOV. Nous n'avons pas réussi à l'obtenir.



deuxième son se limite à la communication d'une vitesse [BOUTILLON, 90].

- (iii) Il existe une non-linéarité forte dans l'action d'excitation : le spectre s'enrichit en fréquence lorsque  $V$  croît (figure AN.7, annexe C) [BOUTILLON, 90].
- (iv) L'impédance mécanique  $Z = \text{force}/\text{vitesse}$  de la table d'harmonie est très inférieure à l'impédance de la corde [BOUTILLON, 88]. Il est juste d'isoler les systèmes marteaux-cordes et cordes-table.

### 2.3. L'ACTION DE LA TOUCHE

La plupart des chercheurs s'accordent à dire que pour une touche donnée l'action du pianiste se réduit à la communication d'un seul paramètre d'excitation : la vitesse du marteau à l'impact. Dans tous les modèles de percussion de corde de piano l'excitation initiale consiste à donner une vitesse initiale au marteau ponctuel [HALL, 87], [SUSUKI, 87], [BOUTILLON, 90], [ASKENFELT&JANSSON, 93], [STULOV, 95].

Pour conforter cette idée, [BOUTILLON, 88] fait l'expérience suivante : un pianiste réalise deux sons de même intensité avec deux types de frappes : une frappe "douce" et une frappe "dure". La courbe d'accélération du marteau avant l'impact est quasi-nulle pour la première et non-nulle pour la seconde. La courbe d'accélération de la table d'harmonie présente pour la frappe "dure" un transitoire bruité avant l'impact ; ce transitoire est identique à celui de l'accélération du marteau.

L'auteur compare les transformées de FOURIER des signaux de la table d'harmonie après impact et affirme qu'elles sont égales. Il en déduit d'une part que le son après impact pour une même vitesse de marteau est identique quelle que soit la frappe du pianiste ; d'autre part que le transitoire bruité avant l'impact correspond à la propagation de l'effort du marteau sur la structure.

X. BOUTILLON note qu'un pianiste a beaucoup d'habileté pour reproduire le même  $V$ . Il note également qu'il existe des modes de flexion du manche du marteau au moment de l'échappement mais que ces derniers n'ont pas d'action sur l'interaction de percussion. Par ailleurs, [HAYASHI&al., 99] étudiant l'action de la touche du piano à queue, confirme expérimentalement l'existence d'un mode de flexion dans le mécanisme de percussion.

[SUSUKI&NAKAMURA, 90] s'inscrivent en désaccord. Citant l'article de [ASKENFELT&JANSSON, 93], les auteurs affirment qu'à vitesse du marteau identique, les courbes d'accélération du marteau avant impact, correspondant à des frappes du doigt seul, du doigt souple avec bras lourd et du doigt raide avec bras lourd, sont très différentes. Sans faire de mesures plus en aval, ils en déduisent que l'interaction marteau-cordes varie suivant le type de frappe.

En outre, dans la conclusion de l'étude de HAYASHI sur le comportement dynamique du marteau par rapport à celui de la touche ([HAYASHI&al., 99]), l'auteur avance que la raideur du feutre du marteau a un effet significatif sur les valeurs physiques fréquentielles de l'action pianistique.

### 2.4. MODÈLE DE BOUTILLON, CRITIQUES DE STULOV

Dans le cas de la modélisation de l'interaction marteau-corde, la corde est le plus couramment une corde idéale (vibration transversale uniquement), harmonique, attachée en deux points fixes. Elle peut être modélisée par un chapelet d'une centaine de masses reliées par des ressorts idéaux (les vibrations de la corde durant le temps qui nous intéresse sont considérées comme harmoniques). Les modes de la corde peuvent s'écrire suivant la formule :

$$y(x,t) = \sum_n A_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \phi_n\right)$$

Le marteau quand à lui est assimilé à une masse ponctuelle d'accélération nulle à l'impact. Le modèle de [BOUTILLON, 88] est tel que le mouvement de la tête du marteau au point d'excitation,  $y_{\text{mart}}$ , s'écrit :

$$m_{\text{mart}} \frac{d^2 y_{\text{mart}}}{dt^2} = F \text{ avec } F = A(y - y_{\text{mart}})^p \text{ si } y < y_{\text{mart}}, 0 \text{ sinon.}$$

La corde obéit à :  $m \frac{d^2 y}{dt^2} = T \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$  avec T, tension de la corde. On pose  $U = y - y_{\text{mart}}$ .

L'auteur mentionne qu'il n'y a pas de solution analytique même si  $p=1$ . Il remarque que, lors du contact, le feutre se comprime et se détend plusieurs fois avant la perte de contact. La relaxation interne n'étant pas instantanée, la raideur du marteau augmente au fur et à mesure des cycles de contraintes infligés par les réflexions de la corde sur le sillet [BOUTILLON, 90] (cf. figure 10.1). L'hystérésis est conjecturée telle que  $F = A_i \cdot U^{p_i}$  si U croît et  $F = A_d \cdot U^{p_d}$  si U décroît. Les nombres ( $p_i$ ) et ( $p_d$ ) sont des suites arithmétiques croissantes. La condition de continuité de la courbe  $F(U)$  détermine les coefficients ( $A_i$ ) et ( $A_d$ ).

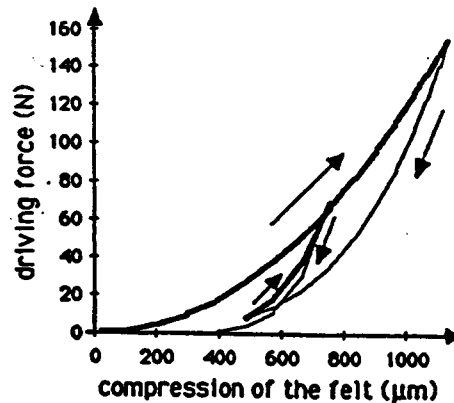


FIG. 10.1 - Simulation de l'hystérésis lorsque le marteau se comprime et se détend plusieurs fois au cours du choc avec les cordes de la note Si1 d'un piano. En abscisse, la déformation du feutre ; en ordonnée, la force appliquée (d'après [BOUTILLON, 90]).

L'auteur sait que, physiquement, si U tend vers 0, F doit tendre vers 0. Son modèle ne rendant pas compte de cela, il décide que si  $F = F_{\text{max}}/100$  alors le marteau quitte la corde.

Les changements de valeur du couple interviennent lorsque le feutre est contraint ou non contraint. L'auteur considère que ces changements s'effectuent lors des réflexions du front d'onde venant du sillet (cf figure 10.1). Il a obtenu ainsi des résultats très proches des mesures expérimentales qu'il a faites.

[STULOV, 95] met en cause le modèle de BOUTILLON sur trois points :

- (i) Si U tend vers 0, le modèle annule F de manière ad'hoc. L'hystérésis modélisée est une hystérésis fonctionnelle. Elle agit arbitrairement à chaque retour de front d'onde de la corde.
- (ii) L'expérience des Japonais montre que le feutre possède une constante de relaxation même sans la corde. Or le modèle de BOUTILLON implique la corde dans le processus d'hystérésis.
- (iii)  $\frac{dF}{dU}$  dépend de V aussi p ne peut être une constante ( $p=f(V)$ ).

STULOV fait les remarques générales suivantes :

Une qualité d'un piano à queue est d'avoir un timbre brillant pour une nuance FF et un timbre doux, calme, lisse pour une nuance PP. Quand V augmente, le spectre s'enrichit et le temps d'interaction  $\tau_{>}$  décroît.

Pour les nuances *MP* et *P* le timbre dépend fortement de la raideur du marteau<sup>6</sup>. Le feutre du marteau de piano est un matériau hystérétique. Il n'existe pas de courbe unique pour ces matériaux. Selon l'auteur, le timbre dépend essentiellement de  $\tau_{>}$  et  $\tau_{<}$  dépend essentiellement de deux paramètres : la vitesse  $V$  et la raideur  $K_{\text{mart}}$ .

STULOV simule numériquement le comportement du marteau feutré isolé. Nous détaillons la modélisation de STULOV à la section 3.

## 2.5. TESSITURE ET COMPORTEMENT DES MARTEAUX, [RUSSELL&ROSSING, 98]

Du grave à l'aiguë, les phénomènes percussifs entre le marteau et la (les) corde(s) du piano sont relativement différents. Pour simplifier l'approche, [RUSSELL&ROSSING, 98] fait correspondre à chaque marteau une fréquence  $f_{\text{max}}$ , telle qu'au voisinage de cette fréquence, la percussion du marteau sur un sol rigide provoque le maximum d'amplification. Il retient des caractéristiques des cordes la fréquence de la fondamentale,  $f_0$ , et l'ensemble des partiels. Les modes de la corde au voisinage de  $f_{\text{max}}$  sont donc les plus susceptibles d'être amplifiés.

Pour un marteau donné, quand la vitesse de frappe augmente,  $f_{\text{max}}$  augmente. Ceci peut expliquer, d'après les auteurs, le fait que plus la touche de piano est enfoncée rapidement (jeu Forte), plus le timbre du piano est brillant.

Sur les cordes graves,  $f_{\text{max}}$  est plus grand que  $f_0$ , les partiels sont amplifiés. Sur les cordes aiguës,  $f_{\text{max}}$  et  $f_0$  sont proches. seulement  $f_0$  et les deux premiers harmoniques sont amplifiés.

Les marteaux durs présentent un  $f_{\text{max}}$  plus élevé que les marteaux doux. Ceci peut expliquer, d'après les auteurs, le fait que les marteaux durs amplifient plus les harmoniques élevées.

## 2.6. SYNTHÈSE

De la recherche bibliographique sur les marteaux de piano il s'est avéré principalement que :

- (i) pour l'exécution d'une note isolée, le pianiste contrôle une seule grandeur physique : la vitesse d'enfoncement de la touche qui se traduit par la vitesse de percussion du marteau sur la(les) corde(s) ;
- (ii) le spectre obtenu s'enrichit quand la vitesse de frappe augmente ;
- (iii) les propriétés mécaniques du feutre recouvrant les têtes des marteaux expliquent en partie l'enrichissement en fréquence [STULOV, 95].
- (iv) les réflexions du front d'onde interagissent avec le marteau.

# 3. UN MODÈLE DE RELAXATION POUR LA PERCUSSION : EXPRESSION INTÉGRALE (STULOV)

## 3.1. LA FORMULATION PHYSIQUE DU PHÉNOMÈNE DE RELAXATION

<sup>6</sup>Le modèle linéaire proposé par [HALL, 87] donne des valeurs de  $f_c$  justes pour un spectre de nuance *FF* (cité dans [ASKENFELT&JANSSON, 93]).

## RAPPEL L'ORIGINE PHYSIQUE

Tout matériau soumis à des contraintes et sujet à des déformations est l'objet de mécanismes de pertes énergétiques. On distingue les dissipations externes qui sont dues à des transferts d'énergie avec le milieu extérieur et les dissipations internes qui ne le sont pas. Ces dernières opèrent à l'échelle de la structure atomique du matériau.

Pirouz DJOHARIAN rappelle la typologie des phénomènes de dissipations internes dans les matériaux :

« Dans l'étude de la déformation des matériaux sous contrainte, on distingue diverses catégories de comportements. Les quatre catégories fondamentales sont l'élasticité, la viscosité, la plasticité et la rupture. D'autres catégories sont des combinaisons de celles-ci : la viscoélasticité, l'élastoplasticité, la viscoélastoplasticité. L'élasticité est la propriété d'un matériau à regagner sa forme d'origine après une déformation ; la viscosité est la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation/écoulement, elle résiste au mouvement ; la plasticité est la propriété d'adopter une nouvelle forme et de garder la mémoire de celle-ci. Tout matériau présente, à différents degrés, chacun de ces comportements. Tout comportement autre que l'élasticité idéale est qualifié d'anélasticité et constitue une source de dissipation. » - [DJOHARIAN, 96]

Dans les matériaux viscoélastiques (c'est-à-dire, à un certain degré, tous les matériaux), la relation entre la contrainte et la déformation n'est pas une relation univoque et instantanée comme dans les cas de l'élasticité mais dépend de l'histoire de l'échantillon.

Les expériences macroscopiques mettant en évidence ces comportements différés sont le *fluage* et la *relaxation*. Par la suite, nous notons les contraintes  $\sigma$  et les déformations  $\varepsilon$ .

Dans l'essai de relaxation, on impose à l'échantillon une déformation constante  $\varepsilon_0$  entre deux instants  $t_0$  et  $t_1$ . On observe la contrainte nécessaire  $\sigma(t)$  qu'il faut appliquer pour maintenir cette déformation. Pour obtenir de manière instantanée  $\varepsilon_0$ , il faut appliquer une contrainte instantanée  $\sigma_0$ . Pour maintenir cette déformation, la contrainte nécessaire diminue avec le temps et atteint la valeur  $\sigma_1$  : il y a *relaxation de la contrainte* (cf. figure 10.2).

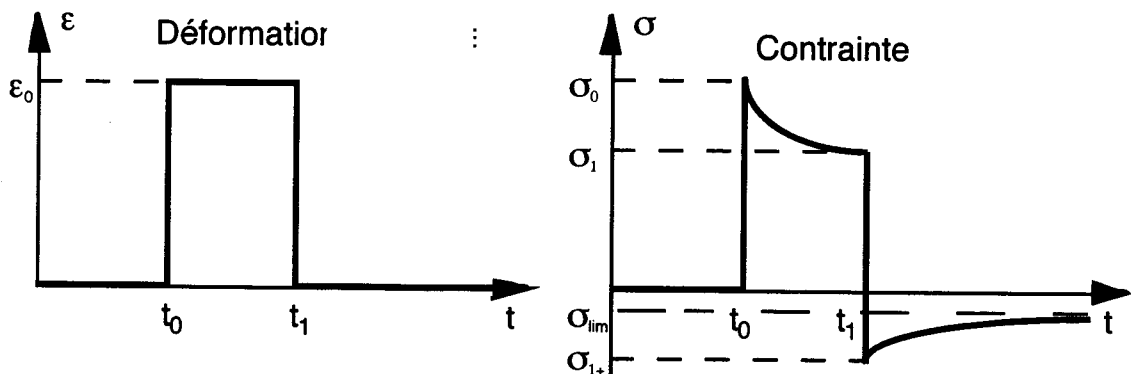


FIG. 10.2 - *Expérience de la relaxation. ;Etude la contrainte  $\sigma(t)$  nécessaire pour maintenir dans le matériau une déformation échelon.*

Ensuite, pour obtenir une déformation nulle à l'instant  $t_1$ , il faut appliquer une contrainte  $\sigma_{1+}$  telle que  $\sigma_0 = \sigma_1 - \sigma_{1+}$ . Pour maintenir l'absence de déformation, la contrainte nécessaire diminue avec le temps et atteint une valeur limite.

L'expérience duale de la relaxation est le fluage. Dans cette expérience un échantillon de matériau viscoélastique est soumis à une charge constante  $\sigma_0$  durant l'intervalle de temps  $[t_0, t_1]$ . On étudie alors la variation dans le temps de la déformation  $\varepsilon(t)$ . On observe, d'abord à l'instant  $t_0$  un comportement élastique, c'est à dire une déformation instantanée  $\varepsilon_0$  suivie d'une déformation qui continue pendant toute la durée d'application de la contrainte ; c'est le fluage (cf. figure 10.3).

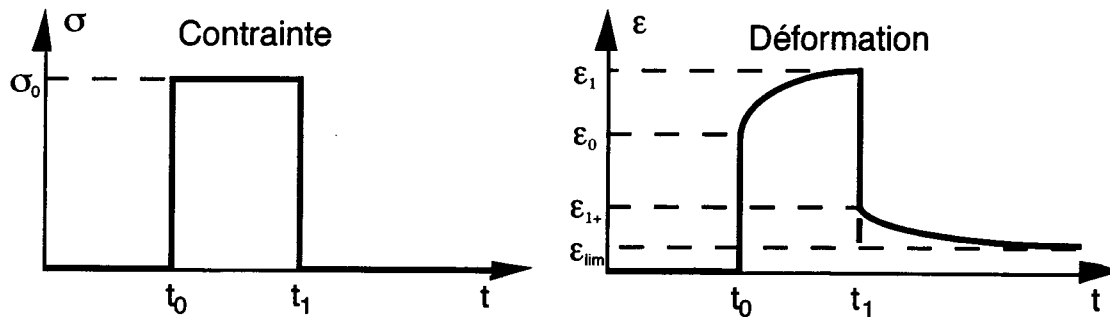


FIG. 10.3 - Expérience de fluage. Etude de la déformation  $\varepsilon(t)$  du matériau pour une contrainte échelon.

Lorsque à l'instant  $t_1$  la contrainte s'annule, il y a une décharge instantanée et la déformation décroît de  $\varepsilon_0$  suivie d'une recouvrance : la déformation continue à décroître ; soit pour atteindre sa position de départ avant l'essai, soit pour tendre vers une déformation résiduelle  $\varepsilon_{\text{lim}} \neq 0$ .

Les fonctions  $flu(t) = \varepsilon(t)/\sigma_0$  et  $rel(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0$  sont respectivement les fonctions de fluage et de relaxation de l'échantillon de matériau. Autrement dit, les fonctions  $flu$  et  $rel$  sont les réponses indicielles de l'échantillon respectivement à un échelon de contrainte et à un échantillon de déformation. On parle de viscoélasticité linéaire lorsque d'une part les fonctions  $flu$  et  $rel$  ne dépendent que de la durée de la sollicitation ( $flu(t-t_0) = \varepsilon(t)/\sigma_0$ ) et  $rel(t-t_0) = \sigma(t)/\varepsilon_0$ ) et lorsque d'autre part on peut sommer les effets dus à des sollicitations différentes (principe de superposition de BOLTZMANN).

Avec quelques précautions mathématiques usuelles et si on suppose que  $rel(t-t_0) = flu(t-t_0) = 0$  pour  $t < t_0$  (principe de causalité), la relation déformation/contrainte pour un matériau à viscoélasticité linéaire peut s'écrire :

$\sigma = \kappa * \varepsilon \text{ avec } \kappa = \frac{d}{dt}(rel) \quad (10.1)$
viscoélasticité linéaire

“\*” désigne l'opération de convolution.

#### CONSÉQUENCES À L'HYPOTHÈSE DE VISCOÉLASTICITÉ LINÉAIRE

Soit  $U$ , la compression d'un matériau à viscoélasticité linéaire,  $F$  la force agissant sur le matériau. On appelle loi de comportement la relation entre les contraintes et les déformations d'un échantillon du matériau. La loi de comportement s'écrit :

$$F(t) = \int_{t'=t_0}^t U(t') \cdot \kappa(t' - t) dt'$$

La loi de comportement tient compte de l'histoire des événements de compressions de l'échantillon. Nous précisons avec certaines hypothèses les conséquences suivantes :

**Conséquences 1 :** Si l'on se place à des conditions temporelles telles que  $\kappa(t)$  est à peu près constant, on peut noter : (i) A intensité de compression égale, une compression qui dure dans le temps impliquera un phénomène de relaxation plus grand ; (ii) une compression forte et courte et une compression faible et longue provoquent des relaxations équivalentes.

Souvent  $\kappa$  est une exponentielle décroissante.

**Conséquences 2 :** Si  $\kappa$  est une fonction décroissante, plus un événement de compression est ancien, plus son influence sur le présent est faible . Pour la relaxation, une forte compression ancienne est alors équivalente à une compression faible plus récente.

Nous renvoyons le lecteur à la théorie des filtres linéaires.

### 3.2. UN MODÈLE HYSTÉRÉTIQUE DU FEUTRE DES MARTEAUX DE PIANO : LE MODÈLE DE STULOV

[STULOV, 95] s'appuie sur des résultats expérimentaux sur la percussion de marteaux de piano réalisés par [SUSUKI&NAKAMURA, 90], YANAGISAWA<sup>7</sup> et <sup>8</sup>. Les articles de YANAGISAWA étant en japonais, nous n'avons pas réussi actuellement à obtenir une version. Pour la description qui suit nous faisons confiance à STULOV.

Les expériences consistaient à choisir des marteaux de piano correspondant à différentes notes, à les percuter sur une surface rigide et à extraire les lois de comportement du feutre des marteaux. Trois types de marteaux ont été mesurés : des marteaux doux, moyens et durs. Les auteurs selon STULOV ont montré que :

- (i) la loi de comportement est essentiellement non linéaire ;
- (ii) la pente de la caractéristique dépend fortement de la vitesse initiale du marteau ;
- (iii) il existe un comportement d'hystérésis qui différencie le processus de chargement ou de non-chargement du feutre.

[STULOV, 95] rend compte du phénomène de relaxation du feutre des marteaux de piano dans un modèle qui inclut ce processus au cœur de sa définition. Plus précisément, il obtient un modèle cohérent de marteau feutré « isolé » percutant une surface rigide avant d'envisager de modéliser le processus complexe d'interaction avec la corde pianistique<sup>9</sup>.

*« Le timbre du son produit par la corde d'un piano est fortement déterminé par la durée de contact entre le marteau et la corde. En outre, cette durée dépend de la raideur du feutre du marteau et de la vitesse du marteau. Par conséquent la durée de contact entre le marteau et la corde diminue pour une forte attaque et le nombre d'harmoniques du spectre croît. Ainsi, le timbre de la percussion pianistique dans le registre grave et le registre intermédiaire de l'instrument dépend de façon appréciable des variations moyennes de la raideur du feutre. Un phénomène caractéristique d'un piano à queue de qualité est la possibilité d'obtenir un son de plus en plus brillant ou « transparent » pour un jeu Fortissimo, et inversement un son doux pour un jeu Pianissimo. »* Extrait traduit de [STULOV, 95].

Prenant en considération la dépendance en vitesse de frappe et l'hystérésis de la dynamique du marteau recouvert de feutre, l'auteur a introduit le concept de matériau à mémoire. De tels matériaux dépendent du temps, de la fréquence caractéristique et du taux de contrainte. Selon l'auteur, le concept de courbe unique n'existe pas pour ce type de matériau.

D'après [RABOTNOV, 77] on peut rendre compte de la dépendance temporelle de ces matériaux en remplaçant le module de YOUNG  $E_0$  par un opérateur de convolution  $E(t)$  dépendant du temps. Ainsi, pour un échantillon unidimensionnel, on a  $E(t) = E_0[\delta - R(t)]^*$  ou  $\delta - R(t)$  est la dérivée de la fonction de relaxation du matériau ;  $\delta$  désigne le pic de Dirac ; on a  $\text{sign}'(x) = \delta$

D'une part STULOV fait l'hypothèse que, pour le feutre du marteau,  $R(t)$  est de la forme :

$$R(t) = \frac{\varepsilon}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \text{ si } t > 0, \text{ nulle sinon.}$$
 Les constantes  $\tau_0$  et  $\varepsilon$  sont appelées respectivement constante de relaxation et constante d'hystérésis (sans dimension).

D'autre part, l'auteur prend comme référence de comportement élastique la loi en puissance issue des travaux précédents sur les marteaux de piano, GHOSH<sup>10</sup>, [HALL&ASKENFELT, 88] soit  $F(U) = C.U^p$ , les grandeurs unidimensionnelles  $F$  et  $U$  étant respectivement la force exercée sur le feutre et la déformation réalisée par celui-ci,  $C$  étant une constante,  $p$  étant un réel positif compris entre 1,5 et 3,5.

L'auteur propose alors selon la formalisation de RABOTNOV la relation suivante :

<sup>7</sup>Trans. Musical Acoust. Techn. Group Meeting Acoust. Soc. Jpn., vol. 1, pp. 14-18 (1982)

<sup>8</sup>J. Acoust. Soc. Jpn., vol. 40, pp. 725-729 (1984) .

<sup>9</sup>Ceci constitue la critique essentielle aux travaux de BOUTILLON mais aussi son prolongement logique.

<sup>10</sup>Indian Journal of Physique, vol. 7, pp. 365-382 (1932) d'après [HALL, 87]

$$F(U(t)) = -C.E_0 \left( U^p(t) - \frac{\varepsilon}{\tau_0} \int_0^t e^{-\frac{(t-t')}{\tau_0}} U^p(t') dt' \right)$$

Pour mieux rendre compte des dimensions des grandeurs en cause, STULOV remplace  $C.E_0$  par  $F_0/d^p$  ou  $d$  est le diamètre de la corde excitée,  $F_0$  une constante de force.

Ainsi la loi de compression du modèle de STULOV s'écrit :

$m \frac{d^2}{dt^2} U(t) = F(U) = -\frac{F_0}{d^p} \left( U^p(t) - \frac{\varepsilon}{\tau_0} \int_0^t e^{-\frac{(t-t')}{\tau_0}} U^p(t') dt' \right) \quad (10.2)$
Relation force-compression de STULOV

L'investigation consiste à étudier le système dynamique ci-dessous où  $m$  est l'inertie du marteau<sup>11</sup>,  $V$  est sa vitesse initiale et  $F(U)$  est donné par (10.2). Le feutre est initialement dépourvu de contrainte.

$$\begin{cases} U(0) = 0 \\ U'(0) = V \\ m.U'' = F(U(t)) \end{cases} \quad (10.3)$$

STULOV résout numériquement ce système par la méthode d'EULER modifiée.

À partir des caractéristiques  $F(U)$  issues des expérimentations de YANAGISAWA<sup>12,13</sup> et 14 et de [SUSUKI&NAKAMURA, 90] sur le feutre et à partir des inerties des marteaux et des diamètres de corde mesurés sur un piano estonien, l'auteur cherche les meilleurs paramètres  $p$ ,  $F_0$ ,  $\varepsilon$ ,  $\tau_0$  et  $V$  permettant d'approcher les courbes expérimentales des auteurs japonais. Toutes les valeurs sont reportées dans les tableaux 10.3 et 10.4.

Les principales interpolations des courbes expérimentales sont reportées en annexe C : -1- la figure AN.5 montre les caractéristiques  $F(U)$  des trois marteaux étudiés ; -2- la figure AN.6 représente les caractéristiques  $F(U)$  du marteau A1 souple ("pliant") pour différentes vitesses de frappe. Les autres caractéristiques  $F(U)$  des marteaux (non "pliant") en fonction de la vitesse n'ont pas été présentées dans l'article car les interpolations étaient mauvaises (précision de 20 pour cent d'après l'auteur). STULOV explique cela par le fait que les valeurs de  $m$  et de  $d$  ne sont pas ceux de l'expérience japonaise mais celles d'un piano estonien arbitraire.

L'auteur conclut dans son article que le modèle de feutre à mémoire permet une description de la déformation du feutre qui s'accorde bien avec les résultats expérimentaux. Selon le même auteur ce résultat est à modérer car il n'existe pas de courbe unique d'hystérésis pour ce type de matériau.

### 3.3. TRADUCTION EN CA DU MODÈLE DE STULOV: APPROCHE INTÉGRALE

#### RELATION FORCE-COMPRESSION

Un modèle CA possible qui traduit le système dynamique (10.3) est constitué des trois éléments suivants :

- un élément MAT modélisant le comportement de l'inertie  $m$  du marteau,
- un élément LIA manifestant la relation  $F(U)$ ,

<sup>11</sup>En fait, inertie du marteau corrigée de en viron +20% compte tenu de l'inertie de la tige.

<sup>12</sup>J. Acoust. Soc. Jpn., vol. 37, pp. 627-633 (1981) d'après [STULOV, 95]

<sup>13</sup>Trans. Musical Acoust. Techn. Group Meeting Acoust. Soc. Jpn., vol. 1, pp. 14-18 (1982) d'après [STULOV, 95]

<sup>14</sup>J. Acoust. Soc. Jpn., vol. 40, pp. 725-729 (1984), d'après [STULOV, 95]

- un élément SOL modélisant le support fixe sur lequel le marteau vient percuter.

L'élément MAT est relié à l'élément SOL par l'élément LIA (cf. figure 10.3bis). La difficulté réside dans l'implémentation de l'automate LIA. Le comportement élastique du feutre non linéaire est simulable en modifiant la caractéristique d'une Butée élastique telle que  $F = K \cdot \Delta X^p$  mais la prise en compte de l'histoire de la compression nécessite quelques précautions. Est-ce que ce type de comportement est exprimable par le langage CA ?

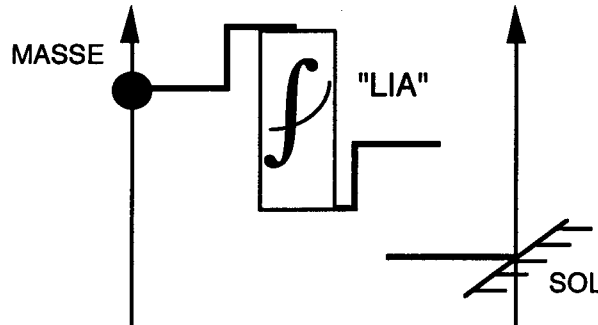


FIG. 10.3bis - Modèle ad'hoc CA qui traduit le système dynamique proposé par STULOV. Approche intégrale. Le "LIA" se comporte comme une butée. Il est non-linéaire également dans sa partie liée. Il mémorise des positions ; il joue le rôle d'intégrateur.

Notre première approche est de simuler la relation de STULOV en créant un LIA ad'hoc qui approxime l'intégrale ; il mémorise donc l'histoire des compressions. Nous verrons par la suite les conséquences théoriques.

L'échantillonnage du temps est délicat. Si nous cherchons une approximation calculable de l'intégrale de l'équation (10.2), nous nous heurtons à une difficulté. L'intégration temporelle de l'histoire de la compression ne peut pas se calculer pratiquement sur un support augmentant infiniment.

En effet, il résulterait que le temps de calcul pour un pas de simulation croîtrait considérablement au fur et à mesure de la simulation. On ne peut pas envisager cela en CA ou le temps est réel (jeux instrumental) et infini (modèle physique).

Une solution consiste à introduire une fenêtre temporelle glissante qui permet d'intégrer sur un nombre N d'échantillons raisonnables. Ceci est justifié car, la compression U étant positive et bornée (hypothèse raisonnable), le poids de l'exponentielle dans l'intégrale atténue fortement U pour des temps suffisamment lointains.

Ainsi, en notant  $T_e$  la période d'échantillonnage temporelle, la loi de compression du modèle CA-STULOV s'écrit :

$$F(nT_e) = -\frac{F_0}{d^p} \left( U^p(nT_e) - \frac{\varepsilon}{\tau_0} \sum_{n'=n-N}^n e^{-\frac{(n-n')T_e}{\tau_0}} U^p(n'T_e)T_e \right), n \geq N$$

LIA CA-STULOV ad'hoc, expression intégrale

#### CONSTANTE DE RELAXATION ET FRÉQUENCE DE SIMULATION

Remarquant que les valeurs de  $\tau_0$ , constante de relaxation proposée par STULOV, sont de l'ordre de la microseconde, il faut simuler des phénomènes de cet ordre pour donner un sens à l'intégrale d'hystérésis. En effet, le facteur d'oubli  $e^{-\frac{t}{\tau_0}}$  est négligeable pour des temps très supérieurs à  $\tau_0$ . La période temporelle d'échantillonnage du son étant à environ  $22 \mu s$ , simuler le feutre nécessite une fréquence supérieure à  $44 \text{ 100Hz}$  sous peine de réduire l'histoire de U à un échantillon voir aucun. Nous choisissons  $F_e = 12 \times 44 \text{ 100Hz}$ .



## DÉTERMINATION DE N

Si N est tel que  $NT_e = 12\tau_0$  et  $T_e = 3,7\tau_0$ , alors le dernier terme  $U(n)^p$  est pondéré par le coefficient  $e^{-12} \approx 6,15 \cdot 10^{-6}$ . Si U est constante, l'aire négligée (cas N infini) est au moins  $10^{-5}$  fois inférieure à l'aire totale.

En supposant que U n'est plus constante mais augmente d'un facteur 100 juste après la limite de l'observation  $t=NT_e$ , l'erreur relative serait seulement de  $10^{-3}$ . Nous adoptons ces valeurs pour N et  $T_e$ .

## RÉSULTATS

Les simulations ont donné des comportements d'hystérésis proches des courbes F(U) expérimentales néanmoins il n'a pas été possible de les faire tendre "à la main" vers les points expérimentaux ; les valeurs des paramètres de STULOV ne convenaient pas non plus. Nous avons abandonné cette voie au profit d'un modèle de relaxation différentiel qui est apparu moins complexe (un paramètre en moins) et qui donne des résultats très précis.

## 4 UN MODÈLE DE RELAXATION POUR LA PERCUSSION : FORMULATION DIFFÉRENTIELLE

### 4.1. LA LIAISON DE MAXWELL

La relation de STULOV (10.2) énoncée à la section 3.2. peut s'écrire pour  $p=1$  :  $F(U) = -\alpha U + \beta \int_0^t e^{-\varphi(t-t')} U(t') dt'$  ou  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\varphi$  sont des constantes réelles. On pose

$$H = \int_0^t e^{-\varphi(t-t')} U(t') dt' \text{ et on dérive par rapport au temps. On a : } F' = -\alpha U' + \beta H' \quad (10.4).$$

Étant donné que :

$$H = e^{-\varphi t} \int_0^t e^{+\varphi t'} U(t') dt', \quad H' = -\varphi H + e^{-\varphi t} \frac{d}{dt} \left( \int_0^t e^{+\varphi t'} U(t') dt' \right), \quad H' = -\varphi H + e^{-\varphi t} e^{+\varphi t} U \text{ et}$$

que par définition :  $H = \frac{1}{\beta} (F + \alpha U)$ , on a alors :  $H' = -\frac{\varphi}{\beta} F + \left( 1 - \frac{\varphi \alpha}{\beta} \right) U$ .

En substituant cette dernière expression dans (10.4) on obtient :  $F' = -\varphi F - \alpha U' + (\beta - \varphi \alpha) U$ . Ainsi il vient :  $U' = -\frac{1}{\alpha} F' - \frac{\varphi}{\alpha} F + \left( \frac{\beta}{\alpha} - \varphi \right) U \quad (10.5)$

Si on impose  $\varphi = \frac{\beta}{\alpha}$ , il vient en posant  $k = \alpha$  et  $z = \frac{\alpha^2}{\beta}$  :

$U' = -\frac{1}{k} F' - \frac{1}{z} F \quad (10.6)$
Equation de la liaison de MAXWELL

L'équation ci-dessus est l'expression de la *liaison de MAXWELL*. Elle consiste à assembler en série un frein z idéal et une élasticité k idéale. Ce modèle rhéologique à deux paramètres ne peut décrire l'expression intégrale de STULOV qui a trois paramètres indépendants.

Cependant, nous discrétisons (10.6) suivant le protocole CA soit :

$$\frac{1}{T_e} [U(n) - U(n-1)] = -\frac{1}{kT_e} [F(n) - F(n-1)] - \frac{1}{z} F(n)$$

$$F(n) \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{kT_e} \right) = \frac{1}{kT_e} F(n-1) - \frac{1}{T_e} [U(n) - U(n-1)]$$

$$F(n) \left( 1 + \frac{z}{kT_e} \right) = \frac{z}{kT_e} F(n-1) - \frac{z}{T_e} [U(n) - U(n-1)]$$

Ainsi, il vient :  $F(n) = \frac{z}{z + kT_e} F(n-1) - \frac{kz}{z + kT_e} [U(n) - U(n-1)]$  (10.7)

Cette équation aux différences a été également établie par [JIMENEZ, 93]

## 4.2. LA LIAISON DE ZENER

### 4.2.1. LIEN AVEC LE MODÈLE DE STULOV

Nous exprimons un modèle rhéologique qui rend compte dans un cas simplifié (p=1) de la relation contrainte-déformation proposé par STULOV. L'indépendance entre  $F_0$ , constante de force liée à la raideur du comportement élastique du feutre, et le paramètre d'hystérésis  $\epsilon$  du modèle de STULOV, nous suggère d'ajouter un ressort en parallèle. Un modèle à trois paramètres ajustables nécessite au moins trois éléments rhéologiques. La mise en parallèle d'une liaison ressort-frein ( $k_1, z_1$ ) et d'une liaison ressort idéal ( $k_2$ ) est appelée *liaison de ZENER*.

On montre que cette liaison conduit à l'équation différentielle de même type que (10.5). En effet, en notant U le déplacement,  $F_r$ ,  $F_f$  et F les forces s'exerçant aux extrémités respectivement du ressort  $k_1$ , du frein  $z_1$ , et de la liaison de ZENER, le système s'écrit (cf figure 10.4):

$$\begin{cases} F = -k_2 U + F_r \\ F_r = F_f \\ U' = -F_r' / k_1 - F_f / z_1 \end{cases} \quad \text{d'où: } F + \frac{z_1}{k_1} F' = -k_2 U - z_1 \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) U' \quad (10.8)$$

L'équation (10.5) se réécrit :

$$F + \frac{1}{\phi} F' = \left( \frac{\beta}{\phi} - \alpha \right) \left( U + \frac{\alpha}{\alpha\phi - \beta} U' \right).$$

En identifiant les deux dernières équations, nous exprimons l'équation de STULOV à p=1 avec les constantes  $k_1, k_2$  et  $z_1$  :

$$F = -(k_1 + k_2)U + \frac{k_1^2}{z_1} \int_0^t e^{-\frac{k_1}{z_1}(t-t')} U(t') dt' \quad (10.9)$$

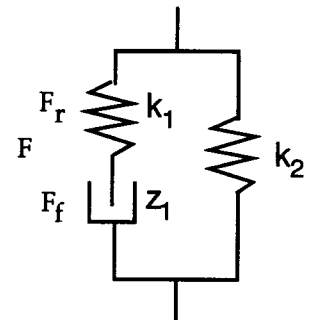


FIG. 10.4 - Liaison de ZENER : trois éléments linéaires élastiques et visqueux

$$F + \frac{z_1}{k_1} F' = -k_2 U - z_1 \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) U' \quad (10.10)$$

$$F = -(k_1 + k_2)U + \frac{k_1^2}{z_1} \int_0^t e^{-\frac{k_1}{z_1}(t-t')} U(t') dt' \quad (10.11)$$

Formulation différentielle et formulation intégrale de la liaison de ZENER

Si on souhaite exprimer (10.9) en fonction des paramètres introduits par STULOV (cf. § 3.), pour p=1 on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_0 = \frac{z_1}{k_1} \\ \frac{F_0}{d} = k_1 + k_2 \\ \varepsilon = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \end{array} \right. \quad \text{ou encore} \quad \left\{ \begin{array}{l} k_2 = \frac{F_0}{d}(1 - \varepsilon) \\ k_1 = \frac{F_0 \cdot \varepsilon}{d} \\ z_1 = \frac{F_0 \cdot \tau_0 \cdot \varepsilon}{d} \end{array} \right. \quad (10.12)$$

Ainsi, les deux systèmes dynamiques suivants sont équivalents :

$$\left\{ \begin{array}{l} F = mU'' \\ F = -(k_1 + k_2)U + \frac{k_1^2}{z_1} \int_0^t e^{-\frac{k_1}{z_1}(t-t')} U(t') dt' \\ U(0) \\ U'(0) \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} F = mU'' \\ F + \frac{z_1}{k_1} F' = -k_2 U - z_1 \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) U' \\ U(0) \\ U'(0) \\ U''(0) \end{array} \right.$$

#### 4.2.2. ÉTUDE DE LA LIAISON DE ZENER À TEMPS CONTINU

Nous nous proposons d'étudier les comportements fréquentiels de la liaison de ZENER qui traduit un phénomène mécanique de relaxation. Reformulant l'expression de la liaison de ZENER (10.8) on a :

$$k_1 F + z_1 F' = -k_2 k_1 U - (k_2 z_1 + k_1 z_1) U' \quad (10.13)$$

On applique la transformée de Laplace en considérant que le système à  $t=0$  est immobile et reçoit une force nulle. Il vient :

$$\frac{\hat{F}}{\hat{U}} = H(p) = \frac{-k_2 k_1 - (k_2 z_1 + k_1 z_1) p}{k_1 + z_1 p}$$

Le système étant linéaire et invariant par rapport au temps, cette fonction représente la fonction de transfert de la liaison de ZENER. La réponse en fréquence est obtenue pour  $p = i\omega$ .

Si  $U$  est une fonction de la forme  $U = A \sin(\omega t)$ , alors  $F = A |H(i\omega)| \sin(\omega t + \arg[H(i\omega)])$ .

À basse fréquence,  $H(i\omega) \approx -k_2$  ; la liaison se comporte comme un ressort idéal de raideur  $k_2$ .

À haute fréquence,  $H(i\omega) \approx -(k_2 + k_1)$  ; la liaison se comporte comme un ressort idéal de raideur  $k_2 + k_1$ .

La dissipation intervient donc à moyenne fréquence (cf. figure 10.5).  $H$  a un pôle en  $p = -\frac{k_1}{z_1}$  qui correspond à la fréquence caractéristique de la liaison de MAXWELL. La réponse

impulsionnelle de la liaison est (cf. annexe C pour le détail des calculs) :

$$h(t) = -(k_1 + k_2) \delta + \frac{k_1^2}{z_1} e^{-\frac{k_1}{z_1} t}$$

## 4.2.3. IMPLÉMENTATION DE LA LIAISON DE ZENER

Traduisons l'équation différentielle (10.13) en objet calculable par Cordis-Anima<sup>15</sup>:

$$k_1 F(n) + z_1 \frac{F(n) - F(n-1)}{T_e} = -k_1 k_2 U(n) - (z_1 k_2 + z_1 k_1) \frac{U(n) - U(n-1)}{T_e}$$

$$\left(k_1 + \frac{z_1}{T_e}\right) F(n) = \frac{z_1}{T_e} F(n-1) - \left(k_1 k_2 + z_1 \frac{k_1 + k_2}{T_e}\right) U(n) + z_1 \frac{k_1 + k_2}{T_e} U(n-1)$$

En notant  $\Phi$  la variable représentant la force dans CA, on a par convention  $\Phi(n) = F(n)T_e^2$  pour éviter le coût d'une division lors du calcul temps réel. En notant A, B, C les paramètres algorithmiques tels que :

$$\Phi(n) = A.U(n) + B.U(n-1) + C.\Phi(n-1)$$

, on a :

$$\begin{cases} A = -\frac{1}{F_e^2} \frac{k_1 k_2 T_e + z_1 (k_1 + k_2)}{k_1 T_e + z_1} \\ B = \frac{1}{F_e^2} \frac{z_1 (k_1 + k_2)}{k_1 T_e + z_1} \\ C = \frac{z_1}{k_1 T_e + z_1} \end{cases}$$

Les constantes de temps intervenant dans la liaison sont :  $\tau_1 = \frac{z_1}{k_1}$  et

$$\tau_2 = \frac{z_1}{k_1} + \frac{z_1}{k_2}$$

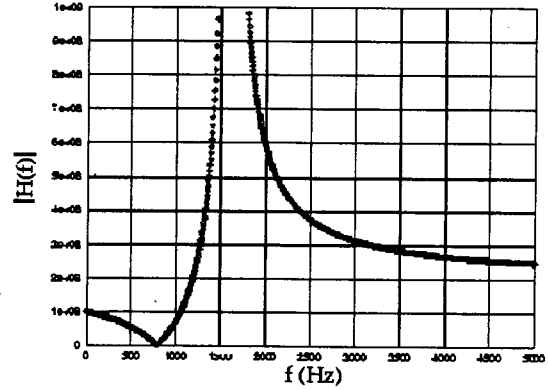


FIG. 10.5 - Fonction de transfert de la liaison de ZENER ;  $k_1 = k_2 = 10^8 \text{ Nm}^{-1}$ ,  $z_1 = 10^4 \text{ Nsm}^{-1}$ .

## 4.3. MODÈLE DE MARTEAU FEUTRÉ

## FORMULATION DIFFÉRENTIEL

Nous nous proposons d'établir l'expression différentielle de la relation de STULOV pour p quelconque (voir § 3.). On procède de la même manière qu'en § 4.1. La relation de STULOV peut s'écrire :

$$F = -\frac{\alpha}{d^{p-1}} U^p + \frac{\beta}{d^{p-1}} \int_0^t e^{-\varphi(t-t')} U^p(t') dt' \quad (10.14)$$

ou  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$  et  $d$  sont des constantes réelles.  $d$  a la dimension d'une longueur.

On pose  $H = \int_0^t e^{-\varphi(t-t')} U^p(t') dt'$  et nous dérivons par rapport au temps. Il vient

$$F' = -\frac{\alpha}{d^{p-1}} p U^{p-1} U' + \frac{\beta}{d^{p-1}} H' \quad (10.15)$$

$$\text{Étant donné que } H = e^{-\varphi \cdot t} \int_0^t e^{+\varphi \cdot t'} U^p(t') dt', \quad \begin{cases} H' = -\varphi H + e^{-\varphi t} \frac{d}{dt} \left( \int_0^t e^{+\varphi t'} U^p(t') dt' \right) \\ H' = -\varphi H + e^{-\varphi t} e^{+\varphi t} U^p \end{cases}$$

On a de plus, d'après (10.14),  $H = \frac{1}{\beta} (d^{p-1} F + \alpha U^p)$  d'où  $H' = -\frac{\varphi}{\beta} [\alpha U^p + d^{p-1} F] + U^p$ .

En substituant cette dernière expression dans (10.15) on obtient :

<sup>15</sup>Cette traduction a du sens à condition que toutes les constantes de temps caractéristiques du système «ouvert» à temps continu soient grandes par rapport à  $T_e$ , la période d'échantillonnage.

$$F = -\frac{1}{\phi} F' + \frac{U^{p-1}}{\phi d^{p-1}} [\beta U - \alpha \phi U - \alpha p U'] \quad (10.16)$$

Si on impose  $\phi = \frac{\beta}{\alpha}$  et en notant  $z_1 = \frac{\alpha^2}{\beta}$  et  $k_1 = \alpha$ , cela revient à considérer d'après la notation la loi intégrale suivante :

$$F = -\frac{k_1}{d^{p-1}} U^p + \frac{k_1^2}{z_1 d^{p-1}} \int_0^t e^{-\frac{k_1}{z_1}(t-t')} U^p(t') dt' \quad (10.17)$$

Cette loi s'exprime en une équation différentielle par :

$$F = -\frac{z_1}{k_1} F' - \frac{z_1}{d^{p-1}} p U^{p-1} U' \quad (10.18)$$

Nous appelons **liaison de MAXWELL non-linéaire** ce type de relation (cf. tableau 10.1).

TAB. 10.1 - Liaison de MAXWELL non-linéaire

formulation différentielle	$F = -\frac{z_1}{k_1} F' - \frac{z_1}{d^{p-1}} p U^{p-1} U'$ (10.19)
formulation intégrale	$F = -\frac{k_1}{d^{p-1}} U^p + \frac{k_1^2}{z_1 d^{p-1}} \int_0^t e^{-\frac{k_1}{z_1}(t-t')} U^p(t') dt'$ (10.20)

Si on n'impose rien sur les trois constantes, la relation de STULOV (10.14) se réécrit en termes de raideur et de viscosité aisément à partir de (10.20) :

$$F = -\frac{(k_1 + k_2)}{d^{p-1}} U^p + \frac{k_1^2}{z_1 d^{p-1}} \int_0^t e^{-\frac{k_1}{z_1}(t-t')} U^p(t') dt' \quad (10.21)$$

Elle s'exprime par une équation différentielle :

$$F + \frac{z_1}{k_1} F' = -\frac{z_1 (k_1 + k_2)}{k_1 d^{p-1}} p U^{p-1} U' - \frac{k_2}{d^{p-1}} U^p \quad (10.22)$$

On voit que pour  $p=1$  l'expression devient linéaire, le produit  $U^{p-1} U'$  se transforme en  $U'$ , un terme linéaire ; on retrouve la liaison de ZENER. On remarquera que contrairement à l'approche intégrale ou il suffisait d'appliquer en entrée la non-linéarité de puissance sur  $U$ , ici elle fait partie de l'expression différentielle de MAXWELL (ou de ZENER). Cette deuxième description en termes d'éléments rhéologiques offre une compréhension aussi justifiée que la description intégrale puisque le critère est d'interpoler au mieux les points expérimentaux.

Ces deux approches sont complémentaires. L'approche différentielle, moins coûteuse en information, est selon nous plus fondamentale.

#### IMPLÉMENTATION DU MARTEAU FEUTRÉ

Afin de générer une pseudo-modularité, nous avons simulé la relation de STULOV par la mise en parallèle de deux LIA. Le premier est une élasticité non-linéaire (de raideur  $k_2$  à  $p=1$ ). Le deuxième, appelé **module de MAXWELL non-linéaire** consiste à calculer une force à partir de l'équation différentielle (10.18) où  $k_1$  et  $z_1$  sont respectivement (à  $p=1$ ) la raideur et la viscosité de la liaison de MAXWELL non-linéaire.

Nous appelons **Butée feutrée** ou **module de ZENER non-linéaire** l'ensemble des deux LIA en parallèle.

Nous décrivons explicitement l'algorithme à temps discret du module de MAXWELL non-linéaire. Pour ce faire, nous discrétisons (10.18). Il vient :

$$F(n) = -\frac{z_1}{k_1} \frac{F(n) - F(n-1)}{T_e} - \frac{z_1}{d^{p-1}} p U^{p-1}(n) \cdot \frac{U(n) - U(n-1)}{T_e}$$

$$F(n) \left( 1 + \frac{z_1}{k_1 T_e} \right) = \frac{z_1}{k_1} \frac{F(n-1)}{T_e} - \frac{z_1}{d^{p-1}} p U^{p-1}(n) \cdot \frac{U(n) - U(n-1)}{T_e}$$

En notant  $\Phi$  la variable représentant la force dans CA, on a par convention  $\Phi(n) = F(n)T_e^2$  pour éviter le coût d'une division lors du calcul temps réel. En notant A, B, C les paramètres algorithmiques tels que :  $\Phi(n) = ApU^p(n) + BU(n-1)pU^{p-1}(n) + C\Phi(n-1)$ ,

on a :

$$\begin{cases} A = -\frac{z_1 k_1}{z_1 + k_1 T_e} \cdot \frac{1}{d^{p-1}} T_e^2 \\ B = -A \\ C = \frac{z_1}{z_1 + k_1 T_e} \end{cases}$$

La constante de temps intervenant dans la liaison

est :  $\tau_1 = \frac{z_1}{k_1}$ .

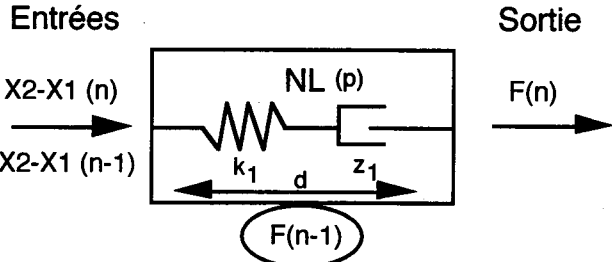


FIG. 10.6 - Module de MAXWELL non-linéaire ; il constitue un pseudo-LIA car il mémorise une variable force. Les paramètres sont au nombre de quatre :  $k_1$ ,  $z_1$ ,  $d$  et  $p$  (A, B, C et  $p$  paramètres algorithmiques).

UTILISATION : ENTRÉES, SORTIES, PARAMÈTRES ET CONDITIONS INITIALES

Le module de marteau feutré est constitué d'un MAT et de deux LIA non-linéaires. Un des LIA (module de MAXWELL) est non conforme au formalisme CA car il mémorise une force. Les conditions initiales sont la vitesse et la position du MAT (le marteau) ainsi qu'une force initiale pour le LIA de relaxation. Les possibilités de connexion se déduisent par la nature des objets CA soient : - une entrée en force sur le MAT, - deux sorties en force correspondant respectivement aux extrémités des deux LIA, - une sortie en position donnée par le MAT, - deux entrées en position pour les LIA (cf. figure 10.7).

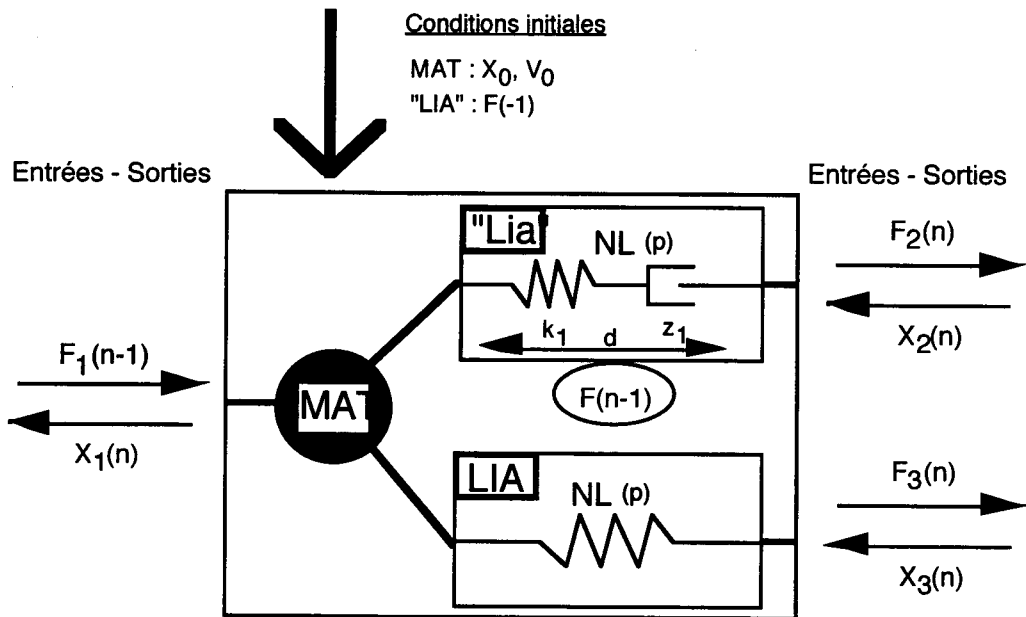


FIG. 10.7 - Module de marteau feutré ; il constitue un pseudo-objet CA car il mémorise une variable force. Les paramètres sont au nombre de 6 :  $m$ ,  $k_2$ ,  $k_1$ ,  $z_1$ ,  $d$  et  $p$ . Il y a trois conditions initiales dont une ad'hoc sur une force retardée.

Les paramètres structurels du modèle sont au nombre de 6. Nous recensons : - l'inertie du marteau  $m$ , inertie du MAT ; - la raideur  $k_2$  de l'élément élastique ; - la distance caractéristique

d, la viscosité  $z_1$ , l'élasticité  $k_1$  du module de MAXWELL ; enfin, la non-linéarité en puissance  $p$  à la fois présente dans l'élément élastique et dans le module de MAXWELL qui sont en parallèle (cf. tableau 10.2).

TAB. 10.2 - Paramètres structurels du modèle de marteau feutré en fonction des atomes qui le constituent.

paramètres	MAXWELL NL	Ressort NL	MAT (marteau)
raideur linéaire		$k_2$	
viscosité et raideur de relaxation linéaire	$z_1, k_1$		
distance caractéristique	$d$		
puissance de la NL	$p$	$p$	
inertie du marteau			$m$

#### 4.4. COMPARAISON DES MESURES EXPÉRIMENTALES DE YANAGISAWA AVEC LES SIMULATIONS CA

Dans un premier temps, nous relevons les points expérimentaux de YANAGISAWA d'après l'article de [STULOV, 95] portant sur les caractéristiques  $F(U)$  du feutre A36 correspondant à la touche A3 du piano et des caractéristiques  $F(U)$  du feutre A1 correspondant à la touche A0.

Dans l'étude YANAGISAWA, pour le feutre A36 trois types de marteaux étaient testés : doux, moyen, dur ; pour le feutre A1, deux types étaient testés : doux et flexible ; le type flexible, A1p était testé de plus pour différentes conditions de vitesse initiale. Ceci a constitué une partie des mesures reprises par STULOV pour valider son modèle intégrale.

STULOV a donné un tableau de valeurs correspondant aux paramètres optimisés pour chaque caractéristique.

Dans un deuxième temps, nous simulons chaque caractéristique  $F(U)$  avec le modèle (différentiel) de marteau feutré. Pour réaliser l'interpolation, nous traduisons les valeurs des paramètres  $F_0/d^p$ ,  $\varepsilon$ ,  $\tau$ ,  $p$  données par STULOV en termes de raideurs  $k_1$ ,  $k_2$ , de viscosité  $z_1$  et de non-linéarité  $p$  à l'aide de l'équation (10.12). L'interpolation donne de bons résultats. Les valeurs des paramètres sont reportées dans le tableau 10.3. Les résultats sont illustrés par les figures 10.8, 10.9 et 10.10.

Les caractéristiques expérimentales des marteaux A1 et A36 sont bien interpolées par le modèle du marteau feutré.

L'interpolation du marteau A1p pour différentes vitesses de frappe est un peu moins bonne mais le comportement souhaité est simulé.

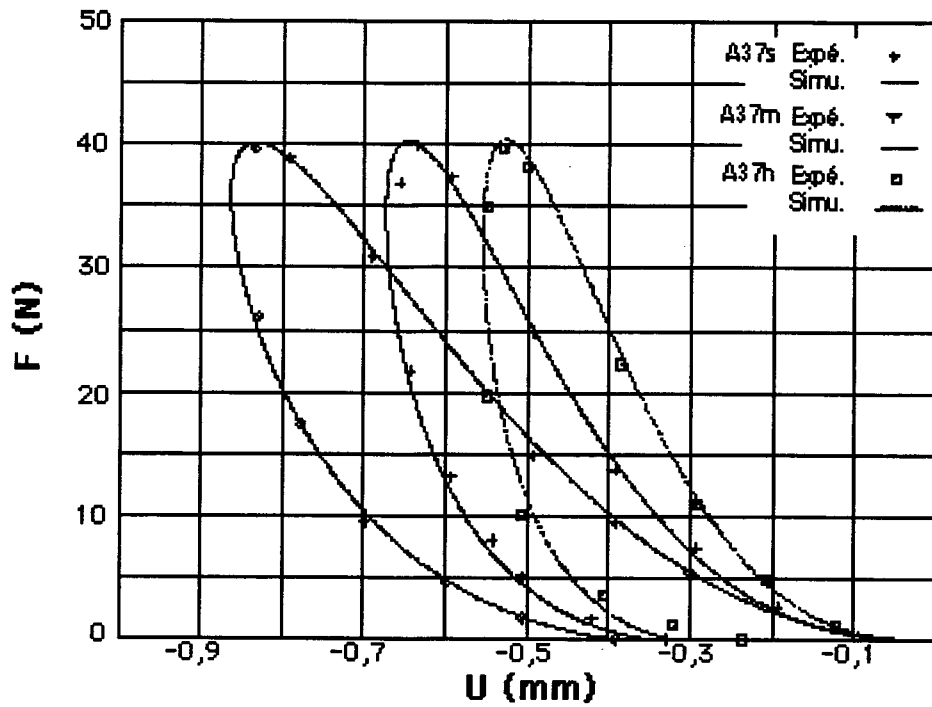


FIG. 10.8 - Comparaison des caractéristiques  $F(U)$  de marteaux A36 : A36s doux, A36m moyen, A36h dur. Simulation : modèle du marteau feutré. Expérimentation : mesures de YANAGISAWA.

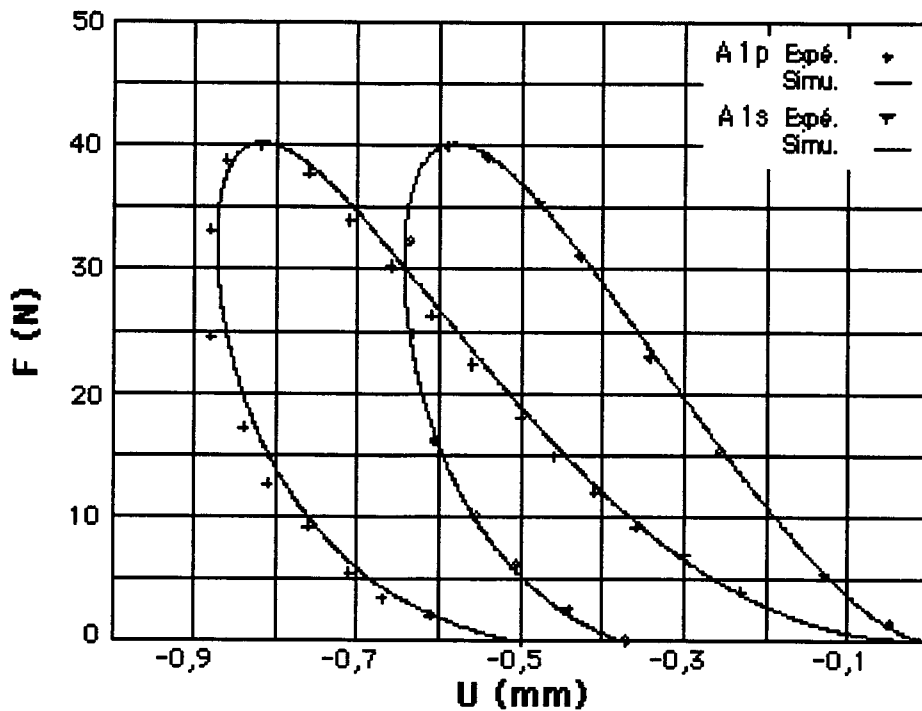


FIG. 10.9 - Comparaison des caractéristiques  $F(U)$  de marteaux A1 : A1s doux, A1p flexible. Simulation : modèle du marteau feutré. Expérimentation : mesures de YANAGISAWA.



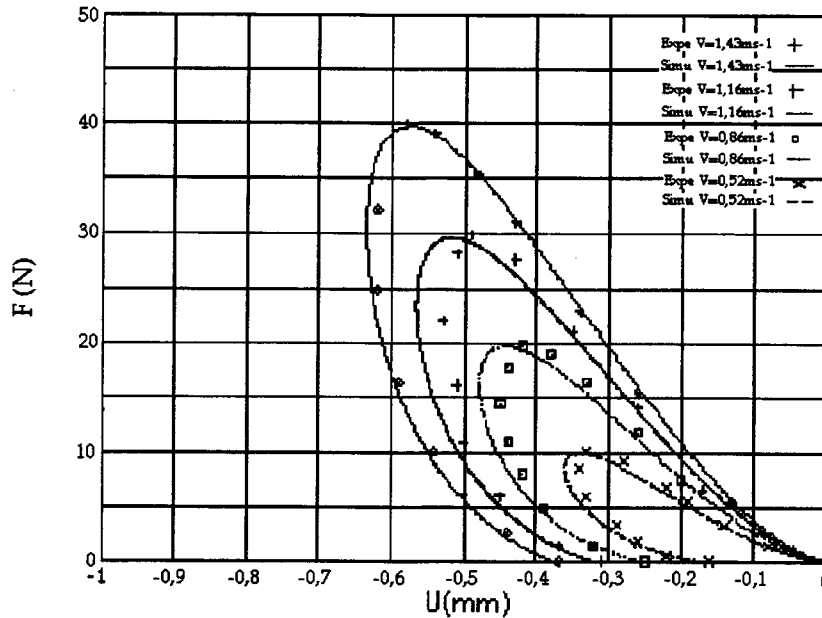


FIG. 10.10 - Comparaison des caractéristiques  $F(U)$  du marteau Alp pour différentes vitesses initiales : 0,52/0,86/1,16/1,43 ms<sup>-1</sup> ; Simulation : modèle du marteau feutrée ; Expérimentation : mesures de YANAGISAWA

TAB. 10.3 - Paramètres de simulation du marteau feutrée ou du modèle de STULOV (cf. [STULOV, 95])

	$\tau$ ( $\mu$ s)	$\epsilon$	$F_0/d^p$ (Nm <sup>-p</sup> )	$k_2$ (Nm <sup>-1</sup> )	$k_1$ (Nm <sup>-1</sup> )	$z_1$ (Nsm <sup>-1</sup> )
A36s	10	0,938	231	14,3	216	2,16E-3
A36m	7,0	0,956	2,24E4	986	2,14E4	0,150
A36h	5,50	0,968	2,17E5	3,74E3	1,13E5	0,622
Alp	20,0	0,936	4,45	0,285	4,17	8,33E-5
Als	17,0	0,940	190	11,4	3,03E-3	178

## 5. ALTERNATIVE À LA LIAISON DE MAXWELL : UNE INERTIE INTERMÉDIAIRE

### INTRODUCTION

Nous rappelons que la viscoélasticité série n'est pas compatible avec le formalisme CA (cf. chapitre XI). Nous essayons de contourner le problème de la viscoélasticité série en introduisant une inertie entre l'élément frein et l'élément ressort. L'inertie serait très petite par rapport à toutes les autres inerties de la simulation de sorte que ses effets sur les phénomènes sonores observés seraient négligeables. La simulation avec le langage CA actuel serait alors possible.

Nous allons montrer sous quelles conditions on peut assimiler le système série ressort-inertie-frein à la liaison de MAXWELL.

Nous nous plaçons à temps continu.

### 5.1. LIAISON DE MAXWELL SOUS FORME DE SCHEMA ÉLECTRIQUE

On considère le système à constantes localisées comportant un ressort idéal  $k$ , un frein idéal  $z$  et un module  $Z$  quelconque en série. L'élément ressort et l'élément frein en série est connu dans la littérature sous le nom de liaison de Maxwell (cf. figure 10.11). Nous cherchons à exprimer son comportement dynamique. Si on applique un signal de déplacement  $x$  aux bornes du système et si on capte la force  $f$  résultante aux bornes, le système par construction réagit de sorte que :

$$x' = \frac{f}{z} + \frac{f'}{k} + Zf \quad (10.23)$$

On vérifie que l'équation est linéaire stationnaire et invariante par rapport au temps<sup>16</sup>. Soit  $h$ , la réponse en force du système à une entrée impulsionnelle de déplacement ; on peut, grâce aux propriétés énoncées, écrire :

$$f(t) = h * x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-t')x(t')dt'$$

L'expression se transpose dans le domaine de la transformée de LAPLACE par :  $\hat{F}(p) = H(p)\hat{x}(p)$  ou  $H(p)$  désigne la fonction de transfert du système. En appliquant la transformée de LAPLACE à un système considéré au repos à  $t=0$  ( $f=0$  et  $x=0$ ) on a :  $p\hat{x} = \frac{1}{z}\hat{f} + \frac{p}{k}\hat{f} + Z\hat{f}$  (10.24). Ainsi, il vient :  $\frac{\hat{f}}{\hat{x}} = \frac{kp}{p + k\left(\frac{1}{z} + Z\right)}$  (10.25). On voit

facilement que la permutation frein-ressort ne modifie pas la fonction de transfert (10.25).

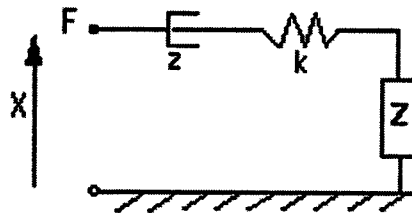


FIG. 10.11 - Représentation en réseau de KIRCHHOFF : Liaison de MAXWELL

On considère maintenant (Se), le système précédant dont le module  $Z$  est un élément d'inertie  $M$ . Nous cherchons à déterminer sa réponse impulsionnelle  $h_{Se}$ .

D'après (10.25), la fonction de transfert de (Se) peut s'écrire :

$$\frac{\hat{f}}{\hat{x}} = \frac{p^2}{\frac{p^2}{k} + \frac{p}{z} + \frac{1}{M}} \quad (10.26)$$

La réponse impulsionnelle de (Se) est donc :  $h_{Se}(t) = L^{-1}\left(\frac{p^2}{\frac{p^2}{k} + \frac{p}{z} + \frac{1}{M}}\right)$  Soient  $a_1, a_2$  les

racines complexes du polynôme du dénominateur,  $A$  et  $B$  des constantes complexes. On pose  $u(t)$  telle que :  $L(u(t)) = \frac{p}{\frac{M}{k}p^2 + \frac{M}{z}p + 1} = \frac{A}{p-a_1} + \frac{B}{p-a_2}$  On sait que  $L^{-1}\left(\frac{1}{p-a}\right) = e^{+at}$

<sup>16</sup>soient  $x, y$  deux entrées,  $a$  et  $T$  deux réels, l'équation notée  $M$  vérifie :  $M(x+y) = M(x)+M(y)$ ,  $M(ax) = aM(x)$  et  $M(x(t-T)) = (Mx)(t-T)$

d'où  $u = Ae^{+a_1 t} + Be^{+a_2 t}$  avec  $A + B = \frac{k}{M}$ ,  $-a_2 A - a_1 B = 0$ , et  $a_1 + a_2 = -\frac{k}{z}$ ,  $a_1 a_2 = \frac{k}{M}$ . On pose lorsque ces constantes ont un sens  $\eta = \sqrt{1 - \frac{4z^2}{Mk}}$  et  $\tilde{\eta} = \sqrt{\frac{4z^2}{Mk} - 1}$ .

CONDITION DE « FORTE DISSIPATION » :

$$\text{Si } z^2 \geq \frac{Mk}{4}, \quad a_{1,2} = \frac{k}{2z}(-1 \pm i\tilde{\eta}) \quad \text{et} \quad \begin{cases} A = \frac{k}{2M} \left(1 + \frac{i}{\tilde{\eta}}\right) \\ B = \frac{k}{2M} \left(1 - \frac{i}{\tilde{\eta}}\right) \end{cases} \quad \text{alors}$$

$u = \frac{k}{M} e^{-\frac{k}{2z}t} \left[ \cos\left(\frac{k\tilde{\eta}}{2z}t\right) + \frac{1}{\tilde{\eta}} \sin\left(\frac{k\tilde{\eta}}{2z}t\right) \right]$  La transformée de LAPLACE de la dérivée d'une fonction  $f(t)$  est telle que  $L(f') = pL(f) - f(0^-)$ . On a  $H_{se} = MpU(p)$  avec  $L(u) = U(p)$  donc :

$$L^{-1}\left(\frac{H_{se}}{M}\right) = L^{-1}(pL(u)) = u'(t) + L^{-1}(u(0^-)).$$

De plus,  $L^{-1}(u(0^-)) = u(0^-)\delta = \delta$ . On a :  $u' = \frac{-2z}{M} \frac{1}{\tilde{\eta}} e^{-\frac{k}{2z}t} \sin\left(\frac{k}{2z}\tilde{\eta}t\right)$  d'où en faisant l'hypothèse que  $4z^2 \geq Mk$  (forte dissipation) nous obtenons l'expression de  $h_{se}$  :

$L^{-1}(H_{se}) = M\delta - 2z \frac{1}{\tilde{\eta}} e^{-\frac{k}{2z}t} \sin\left(\frac{k}{2z}\tilde{\eta}t\right),$
$a_1 \neq a_2 \quad \text{et} \quad 4z^2 \geq Mk$
<b>Frein-ressort-inertie série, forte dissipation</b>

CONDITION DE « FAIBLE DISSIPATION » :

$$\text{Si } z^2 \leq \frac{Mk}{4}, \text{ posant } \mu = \sqrt{1 - \frac{4z^2}{Mk}}, \text{ on a : } a_{1,2} = \frac{-k}{2z}(1 \pm \mu) \text{ et } \begin{cases} A = \frac{k}{2M} \left(1 + \frac{1}{\mu}\right) \\ B = \frac{k}{2M} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \end{cases}$$

ainsi,

$$\begin{cases} u = \frac{k}{2M} e^{-\frac{k}{2z}t} \left[ \left(1 + \frac{1}{\mu}\right) e^{\frac{k}{2z}\mu t} + \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) e^{-\frac{k}{2z}\mu t} \right] \\ u' = \frac{k^2}{2zM\mu} e^{-\frac{k}{2z}t} \left[ (1 + \mu^2) \text{sh}\left(\frac{k}{2z}\mu t\right) - 2\mu \text{ch}\left(\frac{k}{2z}\mu t\right) \right] \\ u'(0) = \frac{k}{M} \end{cases}$$

En procédant de même que pour le cas des dissipations fortes, nous obtenons, en faisant l'hypothèse que  $4z^2 \leq Mk$  (faible dissipation), l'expression de  $h_{Se}$ :

$L^{-1}(H_{Se}) = k\delta + \frac{k^2}{2z\mu} e^{-\frac{k}{2z}t} \cdot \left[ (1 + \mu^2) \text{sh}\left(\frac{k}{2z}\mu t\right) - 2\mu \text{ch}\left(\frac{k}{2z}\mu t\right) \right],$ <p style="text-align: center;"><math>4z^2 \leq Mk</math></p>
Frein-ressort-inertie série, faible dissipation

## 5.2. SYSTÈME RESSORT-INERTIE-FREIN-INERTIE SOUS FORME DE SCHEMA ÉLECTRIQUE

On considère le système à constante localisée comportant un ressort idéal  $k$ , une inertie de masse  $m$ , un frein idéal  $z$  et un module  $Z$  quelconque en série. Nous cherchons à déterminer son comportement dynamique. Il constitue un dipôle à raison de l'élément  $Z$  relié au référentiel inertiel. On applique un signal de déplacement  $x$  aux bornes du système et on capte la force  $f$  résultante. Soient les forces  $g$  et  $h$  circulant respectivement dans les éléments  $m$  et  $Z$ , le système se décrit par :

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{z}f + \int \frac{g}{m} dt \\ x' = \frac{1}{z}f + \frac{1}{k}h' + Zh \\ f = g + h \end{cases}$$

On a  $x' = \frac{1}{z}f + \frac{1}{k}(f' - g') + Z(f - g)$

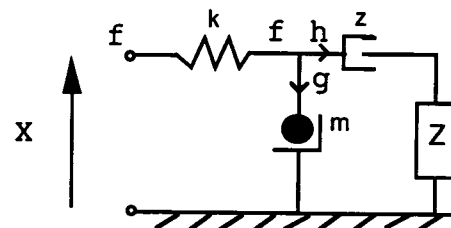


FIG. 10.12 - Analogie électrique du modèle mécanique ressort-inertie-frein-inertie en série

Or  $g' = m\left(x''' - \frac{1}{z}f''\right)$  et  $g = m\left(x'' - \frac{1}{z}f'\right)$  d'où :

$\frac{m}{k}x''' + Zmx'' + x' = \frac{m}{kz}f'' + \left(\frac{1}{k} + \frac{mZ}{z}\right)f' + \left(Z + \frac{1}{z}\right)f$ . En appliquant la transformée de LAPLACE à un système considéré au repos à  $t=0$  ( $f=0$  et  $x=0$ ) on a :

$$\frac{m}{k}p^3\hat{x} + m\hat{Z}p^2\hat{x} + p\hat{x} = \frac{m}{kz}p^2\hat{f} + \left(\frac{1}{k} + \frac{m\hat{Z}}{z}\right)p\hat{f} + \left(\hat{Z} + \frac{1}{z}\right)\hat{f};$$

d'où la fonction de transfert du système s'exprime par :

$$\frac{\hat{f}}{\hat{x}} = \frac{\frac{m}{k} p^3 + m\hat{Z}p^2 + p}{\frac{m}{kz} p^2 + \left(\frac{1}{k} + \frac{m\hat{Z}}{z}\right)p + \left(\hat{Z} + \frac{1}{z}\right)}$$

On considère maintenant (Mm), le système précédent dont le module Z est un élément d'inertie M. La fonction de transfert s'écrit alors :

$$\frac{\hat{f}}{\hat{x}} = \frac{\frac{m}{k} p^2 + \left(1 + \frac{m}{M}\right)}{\frac{m}{kz} p^3 + \frac{1}{k} p^2 + \frac{m+M}{Mz} p + \frac{1}{M}} p^2$$

En faisant l'hypothèse que m est très inférieur à M, on a :

$$\frac{\hat{f}}{\hat{x}} = \frac{\frac{m}{k} p^2 + 1}{\frac{m}{kz} p^3 + \frac{1}{k} p^2 + \frac{1}{z} p + \frac{1}{M}} p^2 \quad (10.27)$$

Ressort-inertie-frein-inertie en série pour  $\frac{m}{M} \ll 1$

### 5.3. COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES FRÉQUENTIELLES

#### EQUATIONS

En remplaçant la variable complexe p par  $i\omega$ , nous examinons les réponses en fréquence des systèmes (Se) §5.1 et (Mm) §5.2. À partir de (10.26) et (10.27), on a :

$$H_{Se}(i\omega) = \frac{-1}{-\frac{1}{k}\omega^2 + \frac{i}{z}\omega + \frac{1}{M}} \omega^2, \quad H_{Mm}(i\omega) = \frac{\frac{m}{k}\omega^2 - 1}{-\frac{im}{kz}\omega^3 - \frac{1}{k}\omega^2 + \frac{i}{z}\omega + \frac{1}{M}} \omega^2 \text{ si } \frac{m}{M} \ll 1.$$

Les modules respectifs des fonctions de transfert sont :

$$|H_{Se}(\omega)| = \sqrt{\frac{\omega^4}{\frac{1}{k^2}\omega^4 + \left(\frac{1}{z^2} - \frac{2}{Mk}\right)\omega^2 + \frac{1}{M^2}}}$$

$$|H_{Mm}(\omega)| = \sqrt{\frac{\frac{m^2}{k^2}\omega^8 - \frac{2m}{k}\omega^6 + \omega^4}{\frac{m^2}{k^2z^2}\omega^6 + \left(\frac{1}{k^2} - \frac{2m}{kz^2}\right)\omega^4 + \left(\frac{1}{z^2} - \frac{2}{Mk}\right)\omega^2 + \frac{1}{M^2}}} \text{ si } \frac{m}{M} \ll 1.$$

À basse fréquence,  $\lim_{\omega \rightarrow 0} H_{Se} = -M\omega^2$  et  $\lim_{\omega \rightarrow 0} H_{Mm} = -M\omega^2$ . Les deux systèmes se comportent comme une inertie. À haute fréquence,  $\lim_{\omega \rightarrow \infty} H_{Se} = k$  et  $\lim_{\omega \rightarrow \infty} H_{Mm} = zi\omega$ . Le premier se comporte comme un ressort de raideur k ; le deuxième se comporte comme un frein de viscosité z.

D'après la réponse en fréquence de (Mm), on peut voir que tant que le terme en  $\omega^3$  sous la fraction est très faible par rapport au terme en  $\omega^2$  et tant que le terme en  $\omega^2$  au numérateur est très faible par rapport à 1 l'influence de l'inertie intermédiaire est négligeable.

Ainsi, les deux systèmes ont des caractéristiques fréquentielles similaires si simultanément on a  $\omega \ll z/m$ ,  $\omega^2 \ll k/m$  et  $m/M \ll 1$ . On peut parler d'une borne supérieure en fréquence  $\tilde{\omega}$  en dessous duquel les deux systèmes sont similaires.

#### APPLICATION NUMÉRIQUE

Soient les valeurs de raideur, de viscosité et de masse pour la simulation du modèle de marteau feutré A36m :  $k=10^{13} \text{ Nm}^{-1}$ ,  $z=10^8 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$  et  $M=10^2 \text{ Kg}$ . En prenant  $m=M/100$ , nous avons  $z/m=10^{12}$  et  $\sqrt{k/m}=10^8$ . D'où la condition  $\omega \leq \tilde{\omega}$  avec  $\tilde{\omega}=10^6$  est suffisante. Ceci est une condition facile à réaliser dans le domaine de la simulation des vibrations sonores puisque la bande passante est nettement en dessous de  $\tilde{\omega}$ . La figure 10.13 compare les réponses en fréquence des deux systèmes.

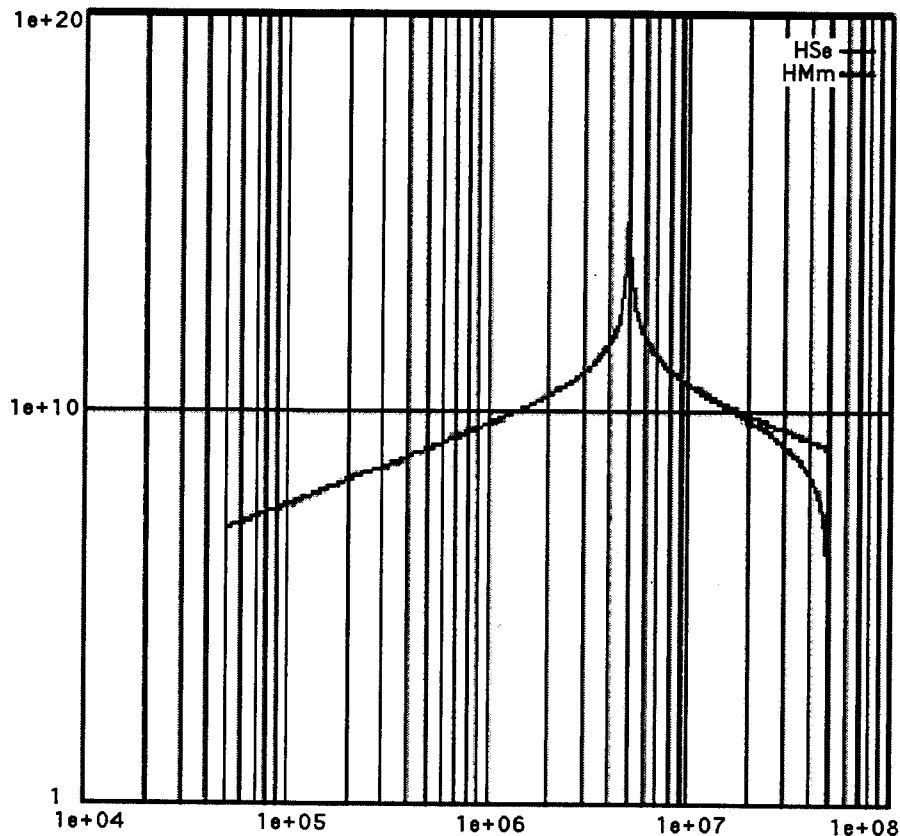


FIG. 10.13 - Comparaison des réponses en fréquence des systèmes (Se) et (Mm)

Malheureusement, la simulation de l'inertie  $m$  en CA pose un problème. En effet, la simulation de cette inertie nécessiterait une fréquence de calcul au moins deux fois supérieure à  $\sqrt{k/m}$  soit une fréquence environ 4000 fois plus grande que la fréquence audio de 44,1 KHz.

Ce résultat nous est apparu rédhitoire quand à l'espoir d'ajouter à la liaison viscoélastique série une inertie intermédiaire négligeable.

## 6. ANALYSE SONORE DU MODÈLE DE MARTEAU FEUTRÉ

### INTRODUCTION

#### OBJECTIF

Nous avons mis au point un modèle qui simule le comportement de relaxation du feutre d'un marteau de piano. Bien que l'écriture en CA de ce dernier ne soit pas réglementaire (cf. chapitre XI, on parlera de module ad'hoc), nous souhaitons explorer les potentiels esthétiques de ce modèle. Le plan de cette analyse introduit un par un les nouveaux éléments impliqués dans le modèle de marteau feutré.

Dans un premier temps nous verrons les systèmes d'excitations linéaires : butée élastique appliquée sur une Cellule puis sur un Chapelet, butée élastique avec relaxation appliquée sur une Cellule puis sur un Chapelet. Dans un deuxième temps, nous verrons la butée élastique non-linéaire sans puis avec relaxation.

Dans la thèse, nous employons le mot *Attaque* (avec un A majuscule) et le mot *Décroissance* (avec un D majuscule) pour désigner les percepts issue du début et de la fin du signal sonore. Nous employons les mots *attaque* et *résonance* d'un son pour désigner respectivement la phase d'interaction et la phase d'oscillation libre de la SV.

#### RESTRICTION

Les simulations et les analyses des sons demandant du temps, il faut restreindre le champ des SV percutées à un ensemble suffisamment petit pour être analysable et suffisamment représentatif des phénomènes intervenant dans la percussion de toutes les SV existantes. Il faut noter également que notre principale souci est la variété d'Attaque. Autrement dit le jeu de résonance des modes de la SV n'est pas pour le moment notre priorité. Pour faire une analogie dans le domaine de la parole, nous souhaitons explorer plus l'espace des consonnes, moins celui des voyelles. Ainsi nous restreignons le champs des SV percutées à deux Cordes *unidimensionnelles* et une Cellule. Nous désignons par C majuscule le Chapelet homogène fermé constitué des modules de CA. L'excitation sera ponctuelle. La sonorisation consiste à enregistrer la position d'une masse de la SV.

Deux Cordes A1 et A36 de hauteurs différentes sont simulées. Les paramètres de fréquence fondamentale et de lieux d'excitation correspondent au tableau 10.4 extrait des expérimentations de STULOV sur les cordes réelles de note A0 et A3. Les valeurs des inerties des percuteurs constituant la référence, il n'est pas possible pour la Corde A36 de reprendre la valeur de masse linéique de la corde A3 car elle est trop faible pour être simulée à des fréquences d'échantillonnage raisonnables<sup>17</sup>. Le tableau 10.5 donne les paramètres CA des Cordes A1 et A36<sup>18</sup>. Un Chapelet fermé de 100 MAS (C100) est le simulacre de la corde de piano. Le point d'excitation est fixé sur l'élément MAS n°12 soit au 1/8 ( $l/L$ ) de la Corde. Les viscosités internes sont ajustées de sorte que la durée subjective des sons soit de 5 secondes pour une excitation impulsionnelle.

La décroissance ayant tendance à être perceptivement trop importante, nous menons également une étude exhaustive sur une SV plus amortie et comprenant un nombre de masses plus petit (C10). C'est un Chapelet homogène fermé à 10 MAS (cf. tableau 10.5). Enfin pour des raisons de simplicité et pour faire le lien avec l'étude du chapitre VII sur la percussion élémentaire, le troisième type de SV est une Cellule.

<sup>17</sup>Ceci contribue certainement à diminuer la valeur esthétique du percuteur (cf. [Fourcade&Cadoz, 96b]).

<sup>18</sup>Nous choisissons de décrire les objets CA par des grandeurs physiques indépendantes de la fréquence d'échantillonnage. Toutefois, nous faisons l'hypothèse que la déviation due à la discrétisation temporelle entre les paramètres physiques de description et les paramètres effectifs dans les algorithmes est négligeable.

TAB. 10.4 - Caractéristiques des cordes A0 et A3 - cf. [STULOV, 95]

	L (mm)	l (mm)	f (Hz)	$\mu$ (gm <sup>-1</sup> )
A3	777	91	220	7,1
A0	2 016	243	28	130,7

TAB. 10.5 - Paramètres des trois SV percutées, valeurs en unité MKSA indépendante de la fréquence d'échantillonnage<sup>2</sup>.

	m <sub>i</sub> (g)	k <sub>i</sub> (Nm <sup>-1</sup> )	z <sub>i</sub> (Nm <sup>-1</sup> s)	nb de MAT	ptEX	ptEC
C100 A37	10,6	1,74e+06	3,2	100	12	97
C100 A1	2,635	9,02e03	0,3	100	12	97
C10	10,6	1,74e+06	3,2	10	2	9

Une autre limitation est donnée par la simulation numérique. Le modèle numérique correspondant au modèle à temps continu et à "matière continue" souhaité présente souvent pour des valeurs de paramètres extrêmes des divergences. Sauf exception, nous ne modifions pas la fréquence de calcul de 44 100 Hz. Une méthode pour détecter les artefacts numériques est de vérifier la condition de conservation de l'énergie du percuteur ; elle consiste à vérifier si la vitesse du percuteur après l'impact est inférieure à la vitesse du percuteur avant l'impact.

Etant donné qu'en général aux frontières du domaine de divergence, des comportements non-conformes à la physicabilité apparaissent, une méthode complémentaire de la première consiste à re-simuler les sons à une fréquence de calcul 4 à 20 fois plus grande et à vérifier l'identité des sons aux deux fréquences.

#### PARAMÈTRES EN CAUSE

Le percuteur constitue un système à cinq paramètres structurels :

- m, masse du percuteur ;
- p, puissance ;
- $\varepsilon$ , constante d'hystérésis ;
- $\tau_1$ , constante de relaxation ;
- $F_0/d^p$ , constantes élastiques de dimension Nm<sup>-p</sup>.

L'espace constitué par les trois derniers paramètres peut être décrit de façon équivalente à l'aide des raideurs  $k_1$ ,  $k_2$  et de la viscosité  $z_1$  (cf. (10.12))<sup>19</sup>.

Les conditions initiales sont telles que :

- (i) SV : au repos (positions et positions retardées ;
- (ii) EX :  $V_0$ , vitesse initiale du percuteur ;
- (iii) EX : position et accélération du percuteur nulles.

Nous commençons l'étude par les percuteurs de type linéaires.

<sup>19</sup>Le programme de simulation de feutre permet également de manier les paramètres du chapelet homogène : N, nombre de masse,  $k_i$ , raideur interne,  $z_i$ , viscosité interne, NuECD, point d'écoute voix de droite ; NuECG, point d'écoute voix de gauche.



## 6.1. LA BUTÉE ÉLASTIQUE LINÉAIRE

### 6.1.1. RAPPEL SUR LA PERCUSSION D'UNE CELLULE (CF. CHAPITRE VII)

La lettre  $m$  désigne la masse du percuteur,  $k$  l'élasticité de la butée. Nous avons identifié trois catégories :  $\delta$ , M et L. Elles apparaissent pour des configurations de masse de percuteur  $m$  et de raideur de butée  $k$  distinctes illustrées par la figure 10.14.  $\delta$  apparaît pour des  $\tau_{<}$  courts devant la période de la Cellule, c'est l'excitation impulsionnelle de Dirac par excellence. Le transitoire n'existe pas ou presque (si 2 contacts, effet de pincement, consonne évoquée : « t »). L et M apparaissent pour des  $\tau_{<}$  importants. L évoque une Attaque lourde soit un percept d'Attaque grave, consonne évoquée : « p ». M évoque des percussions de ballons sur du ciment ou encore des sons de bouteille que l'on débouche, consonne évoquée : « b ». Une modulation de fréquence à l'attaque est caractéristique de M.

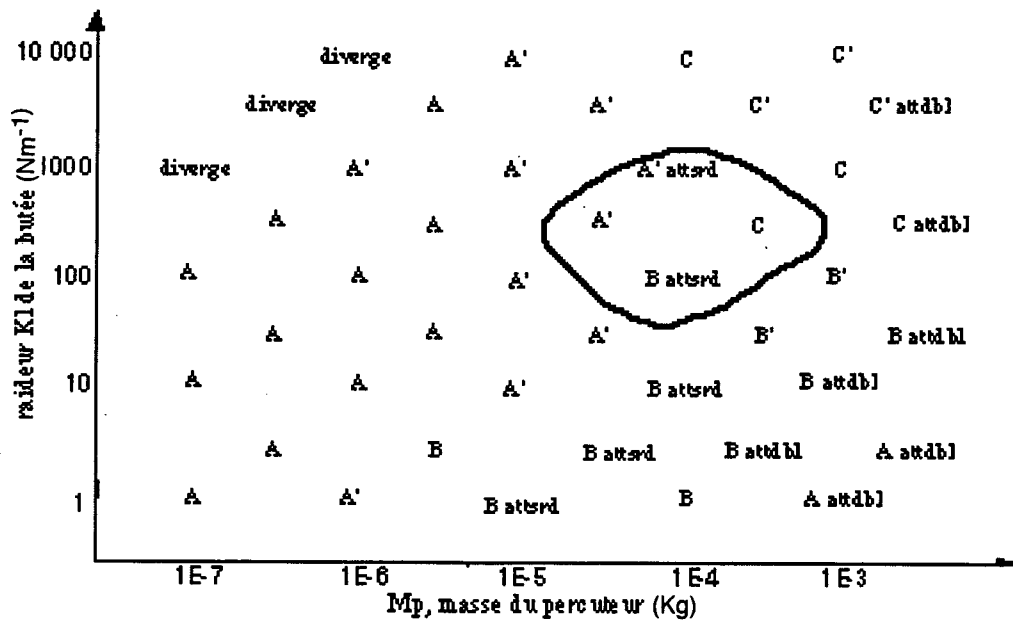


FIG. 10.14 - Correspondance poïétique-esthésique du percuteur à Cellule fixe. A: son de "sinusoïde amortie", percussion neutre, A': son A très sec, effet de pincement, B: son "massique", choc de boules de billard, B': son B au seuil de fusion de la qualité attdbl, C: labiale, évoque la consonne "P", C': labiale, évoque la consonne "B", attsrd: qualité, sensation de hauteur spectrale grave.

Nous avons remarqué que la diversité des transitoires augmente avec  $\tau_{<}$ . Lorsque  $\tau_{<}$  est suffisamment grand, on perçoit une double Attaque. Le percuteur lorsqu'il quitte la Cellule communique à nouveau de l'énergie.

Si l'on souhaite caractériser les sons de percussion par des grandeurs calculées à partir du signal acoustique, cette étude ainsi que les travaux sur les attributs perceptifs du timbre musical nous ont conduit à avancer l'hypothèse suivante. L'espace de représentation esthétique des sons de percussion serait composé de trois grandeurs :

- le temps d'interaction ou le temps de montée,
- le rapport d'attaque
- le centre de gravité spectral du transitoire (variations temporelles comprises).

Un phénomène singulier est apparu. Le son « goutte » pour lequel le percuteur vibre de concert avec la Cellule pendant un temps d'interaction grand.

On peut ouïr les sons du chapitre VII sur les séquences de (CD02) à (CD10).

### 6.1.2. INTRODUCTION À LA PERCUSSION D'UN CHAPELET HOMOGENÈ

La situation par rapport à la percussion d'une Cellule change radicalement. Dans le cas précédent, les résonances en termes de fréquences étaient identiques. Ici la résonance joue un rôle de révélateur. Elle prolonge dans la durée l'action brève d'excitation. À la limite une SV serait un outil idéal d'analyse d'Attaques.

La démarche suivie est de se focaliser sur l'aspect poétique du transitoire. Nous comparons des percussions de SV linéaires de même réponse impulsionnelle. Toutefois, l'analyse esthétique comprend les percepts d'Attaque et les percepts de Décroissance.

À ces fins, nous fixons le point d'écoute et le point d'excitation sur le Chapelet pour toutes les simulations. La réponse impulsionnelle du Chapelet est donc identique pour toutes les simulations.

Afin de bien distinguer la contribution du feutre aux variétés sonores, nous avons tout d'abord exploré le modèle de la butée élémentaire.

### 6.1.3. VARIATION DE LA VITESSE DU PERCUTEUR APPLIQUÉ À LA CORDE C10

Nous rappelons que le système étant linéaire, ce paramètre contrôle explicitement le niveau général du son.

### 6.1.4. VARIATION DE LA RAIDEUR DE BUTÉE SUR LA CORDE C10

Nous faisons varier l'élasticité  $k$  de la butée telle que le paramètre algorithmique  $D$  correspondant varie de  $1E-09$  à  $1,8E-03$  ( $F_e=5*44\ 100$  Hz); soit en MKSA de 48 à  $87E+06$  N/m, la masse du percuteur étant constante, fixée à 1,06 g. Nous avons mis en évidence trois catégories : A, B et C correspondant respectivement à  $k$  faible, moyen et fort. La catégorie A (**CD34**) se caractérise par une Attaque double. La catégorie B (**CD35**) est une Attaque qui évoque les labiales « P » ou « B », un choc « lourd » suivi d'une Décroissance. La catégorie C (**CD36**) est un son à Attaque franche et claire, évoquant une percussion de matière en bois.

### 6.1.5. VARIATION DE L'INERTIE M ET DE LA RAIDEUR K SUR LA CORDE C10

L'analyse catégorielle en fonction du domaine de variations des paramètres  $m$  et  $k$  est détaillée dans la figure 10.15. Nous avons simulé 25 sons. Une expérience de catégorisation a révélé trois catégories principales : C', G et B'. La dernière a trois sous-catégories : B',  $\bar{B}'$  et B'. Les sous-catégories évoquent un timbre caractéristique de bois percuté. G (**CD38**) sont des sons dont la hauteur du percept d'Attaque est tellement basse que cet attribut l'emporte sur tous les autres. B' (**CD39**) s'oppose au timbre C'. C' évoque la percussion d'une Cellule simple (**CD37**). B' (**CD40**) ajoute un effet de pincement caractéristique à l'attaque d'un timbre B'. B' (**CD41**) agit de même mais la hauteur du percept d'Attaque est sensiblement plus basse.

## 6.2. BUTÉE ÉLASTIQUE LINÉAIRE AVEC RELAXATION

Nous simulons désormais un percuteur à l'aide de deux LIA linéaires en parallèles : un LIA ressort idéal de raideur  $k_2$  et le LIA ad'hoc de relaxation linéaire de raideur  $k_1$  et de viscosité  $z_1$ .

### 6.2.1. PERCUSSION D'UNE CELLULE

#### CELLULE DE HAUTEUR AIGUË

La Cellule a une fréquence de 2016 Hz, une inertie de 10,6 g et une durée subjective (audible) de 0,3 s. Nous faisons varier les paramètres selon le tableau 10.6. Il est ainsi effectué

27 simulations ; 10 d'entre elles divergent. L'auteur n'a pu déduire aucune catégorie de ces 17 sons (CD42).

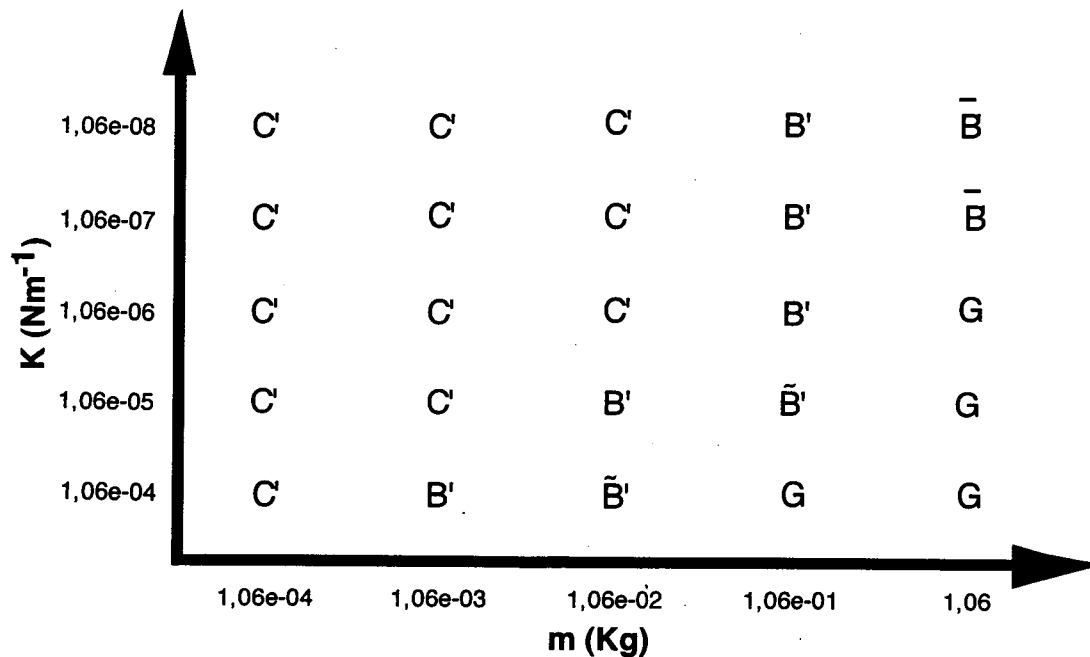


FIG. 10.15 - Analyse esthétique de l'expérimentation §6.1.5. : C'=boisé, G=grave ; B', percussion "simple" d'un Chapelet C10.

TAB. 10.6 - Domaine des variations exponentielles des simulations §6.2.1. L'ensemble des paramètres est obtenu par une combinaison  $3 \times 3 \times 3$ .

	$\epsilon$	$\tau$ ( $\mu\text{s}$ )	$F_0$ (N)
valeur minimale	0,20	1E-6	3,58E2
valeur maximale	0,99	1E-4	3,58E4
échantillons	3	3	3

#### CELLULE DE HAUTEUR GRAVE

La Cellule a une fréquence de 189 Hz, une masse de 10,6 g et une durée subjective de 1 s. Nous faisons varier les paramètres selon le même tableau 10.6. L'auteur n'a pu déduire aucune catégorie de ces 27 sons (CD43).

#### 6.2.2. PERCUSSION DE LA CORDE C10

Nous simulons les différentes combinaisons données par le tableau 10.7. Nous percevons trois catégories (A (CD44), B (CD45), C (CD46)) bien que le timbre soit relativement homogène. La hauteur d'Attaque permet de différencier ces catégories. Le résultat remarquable est que ces trois catégories correspondent aux trois valeurs du paramètre  $k_1$ , respectivement faible, moyen, et fort. Toutefois ces variations sont perceptivement très très faibles. En effet, les analyses par comparaison s'avèrent nécessaires. Souhaitant une confirmation de ces résultats, nous avons demandé à une personne qui a une formation d'ingénieur du son de catégoriser les mêmes stimuli. Les résultats se recoupent complètement. A, B et C ont une Attaque bruitée ; c'est-à-dire riche en fréquences aiguës. La Décroissance de A est grave ; celle de B est médium ; celle de C est aiguë. Le sujet parle de « marche » pour désigner la commutation d'une hauteur d'Attaque (spectrale) à une hauteur de la résonance. Ce terme désigne certainement l'attribut lié au centre de gravité spectral. La variation de ce dernier,

mentionnée par plusieurs auteurs et notamment Éric INCERTI, est perceptivement pertinente. Il faut écouter les sons singuliers de cette étude ainsi que le son « goutte » dans cette perspective.

Pour désigner A,B et C, le sujet les décrit également en termes spécifiques : C, sec ; B, comme une bouteille dans lequel on fait "ten" dans le goulot ; A, pas sec, pas bouteille.

TAB. 10.7 - *Domaine des variations exponentielles des simulations §6.2.2.*

	$k_2$ (Nm <sup>-1</sup> )	$k_1$ (Nm <sup>-1</sup> )	$z_1$ (Nm <sup>-1</sup> s)
valeur minimale	1E3	2E7	1E7
valeur maximale	1E5	2E9	1E11
échantillons	3	3	5

Nous nous intéressons maintenant aux percuteurs non-linéaires. On notera, en aparté dans cette partie dédiée aux sonores, que la plupart des articles sur les percussions introduisent la non-linéarité et que même la percussion de deux corps hookéens sphériques prévoient une non-linéarité en 1,5.

### 6.3. BUTÉE ÉLASTIQUE NON-LINÉAIRE

Nous remarquons que le jeu du paramètre  $p$  translate fortement l'espace de convergence des simulations. La variation de ce paramètre peut faire passer d'une catégorie à une autre sans lien apparent. Nous ne pouvons pas déterminer des tendances esthétiques stables.

#### 6.3.1. PERCUSSION DE C10 : VARIATION DE LA VITESSE INITIALE

La vitesse initiale  $V_0$  du percuteur du fait de la non-linéarité intervient désormais.  $V_0$  prend ici les valeurs de 0,12 à 800 ms<sup>-1</sup> d'une suite géométrique de raison 2. Pour  $V_0 < 20$  ms, il n'y a pas de variation de timbre.

Pour les valeurs supérieures le timbre s'enrichit progressivement au fur à mesure de la progression de la vitesse : nous percevons les catégories successives, décrites en §6.1.5. (variation de  $m$  et de  $k$  sur C10),  $\bar{B}'$ ,  $B'$ ,  $\bar{B}'$ ,  $B' \cap C'$ ,  $C'$ . La séquence (CD47) se compose des sons de la série sur  $V_0$ . La séquence (CD48) présente une progression plus rapide de  $V_0$ . Nous comparons les Transformées de Fourier à court-terme des percussions pour deux valeurs de vitesse initiale : 40 et 120 m/s (cf figure 10.16).

Il faut noter que les études de percussion présentées impliquant la variation de la vitesse sont légèrement biaisées par rapport à la situation de jeu instrumental car nous calibrons chaque son séparément. Une expérience intéressante serait de calibrer une série de percussions à vitesses différentes. La perception des attaques peut varier selon le niveau sonore.

#### 6.3.2. PERCUSSION D'UNE CELLULE

La Cellule est identique à la Cellule de la section 6.2. sur la butée élastique avec relaxation (fréquence de 2016 Hz, masse de 10,6 g et durée subjective de 0,3 s). Le domaine de variation en exponentielle est donné par le tableau 10.8. Sur les 27 sons (3x3x3) il est impossible d'opérer une catégorisation (CD49).

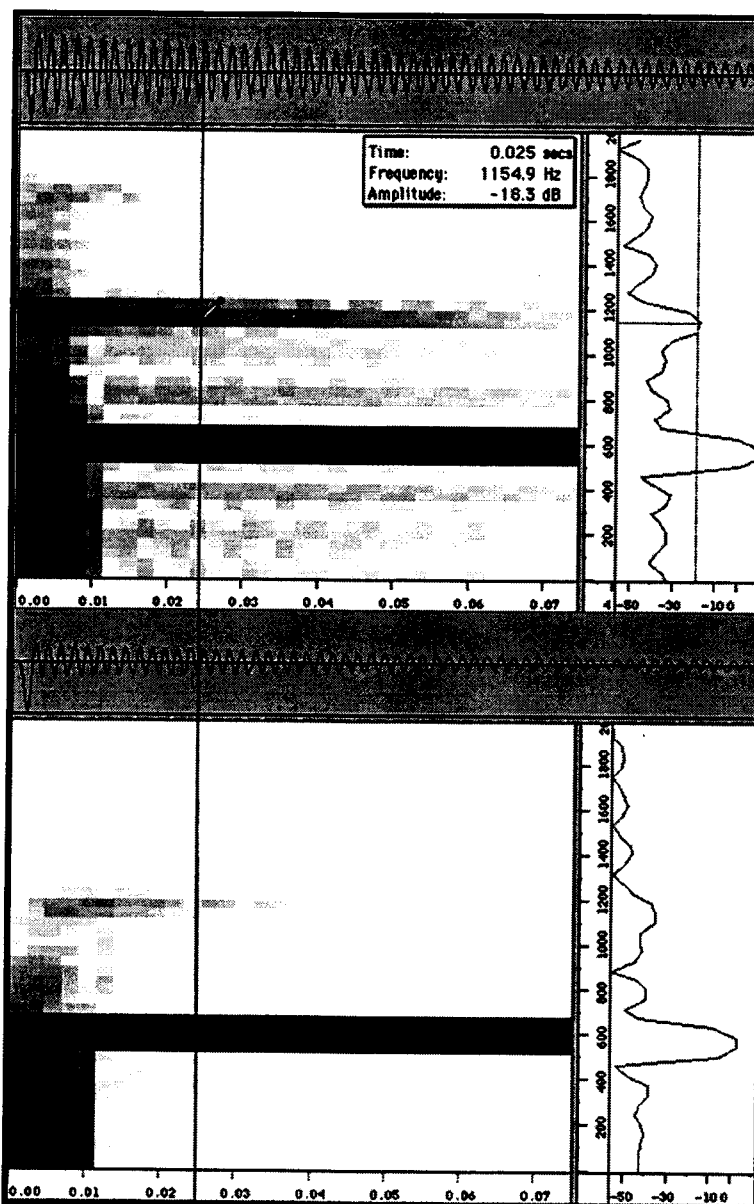


FIG. 10.16 - Comparaison des transformées de Fourier à court-terme à  $V_0 = 40\text{ms}^{-1}$  (dessus) et  $V_0 = 120\text{ms}^{-1}$  (dessous) des simulations §6.3.1. Abscisses : temps en secondes ; ordonnées : fréquence en Hertz.

TAB. 10.8 - Domaine des variations exponentielles des simulations §6.3.2.

	m (Kg)	k (Nm <sup>-1</sup> )	p
valeur minimale	1,06E-2	1,74E4	1
valeur intermédiaire	1,06	1,74E6	1,732
valeur maximale	1,06E-2	1,74E8	3

### 6.3.3. PERCUSSION DES CORDES DE RÉFÉRENCES SANS RELAXATION

Se référer à l'alinéa 6.4.6. qui suit.

#### 6.4. BUTÉE NON-LINÉAIRE AVEC RELAXATION : MARTEAU FEUTRÉ (CF. § 4.3.)

##### 6.4.1. PERCUSSION DE C10 AVEC RELAXATION : VARIATION DE LA VITESSE INITIALE

Nous simulons la percussion du marteau A36m sur le Chapelet de 10 masses (C10) pour différentes valeurs de vitesse initiale. La vitesse  $V_0$  varie de 0,1 à 800 secondes. Nous avons effectué 23 simulations (CD50). On observe bien un enrichissement du spectre quand  $V_0$  augmente. L'effet est réaliste. Cependant, on observe une stagnation de la sensation d'enrichissement du spectre pour  $V_0 > 33 \text{ m/s}$ . La séquence est à comparer avec la percussion de C10 non-linéaire sans relaxation §6.3.1. (CD47) et (CD48).

##### 6.4.2. PERCUSSION DE C10 : VARIATION DE p

Prenant le percuteur de référence A36m, nous simulons trois percussions pour  $p=3,3$  (référence),  $p=2,70$  et  $p=2,3$ . Il se produit un enrichissement spectral lorsque p diminue - séquence (CD51). [RUSSELL&ROSSING, 98] a trouvé à partir de 4 marteaux de piano des valeurs de p élevées pour les feutres doux.

##### 6.4.3. PERCUSSION DE C10 : VARIATIONS CONJUGUÉES DE $k_1$ , m ET $V_0$ AUTOUR DE A36m

Le tableau 10.9 indique l'espace de simulation. Nous obtenons 7 catégories : B1, B2, B3, B4, B5, BT et PL. B1, B2, B3 et B4 évoquent le timbre de bois percuté respectivement avec les nuances claires (CD52), sec (CD53), sombre (CD54), très sombre (CD55). BT évoque le timbre du bois percuté avec une Attaque "tranchante" (CD56). PL est une Attaque qui évoque les labiales « P » ou « B », un choc « lourd » suivi d'une Décroissance (CD57). Il n'y a pas de relation évidente excepté pour B1 (faible masse), B4 (k et m fort) et PL (vitesse faible).

TAB. 10.9 - *Domaine des variations exponentielles des simulations §6.4.3.*

	$k_1 \text{ (Nm}^{-1}\text{)}$	m (Kg)	$V_0 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$
valeur minimale	1E10	1,06E-3	0,1
valeur maximale	1E12	1,06E-1	300
échantillons	3	3	5

##### 6.4.4. PERCUSSIONS DE RÉFÉRENCES

Nous simulons la percussion des cordes A36 et A1 avec les marteaux respectifs A36h, A36m, A36s et les marteaux respectifs A1h, A1m, A1s, A1p (cf. tableau 10.3 pour les paramètres de marteaux et cf. tableau 10.5 pour les paramètres des Cordes (C100)). La séquence (CD58) se compose chronologiquement des percussions de A1h, A1m, A1s, A1p. Puis la séquence se termine par les percussions A1h et A1s (x2). La séquence (CD59) se compose chronologiquement des percussions de A36h, A36m, A36s. Puis la séquence se termine par les percussions A36h et A36s (x2). Comme nous l'avons signalé en introduction, la masse des Cordes A36 simulées ne correspond pas à la masse de la corde prise comme référence. Elle est environ 200 fois plus grande.

##### 6.4.5. PERCUSSIONS DE RÉFÉRENCES : VARIATION DE $V_0$

Étant donné le marteau A36s et sa Corde A36, nous simulons une série de percussions à des vitesses de percuteur croissantes suivant une suite géométrique de raison 2 de 0,52 m/s à 48 m/s (CD60). Nous avons procédé de même pour A36h (CD62) et A1p (CD61) (avec la Corde A1). On note que sur les séries A36s et A1p le contraste est important. Les trois

séquences sont structurées de manière identique : une première série où  $V_0$  augmente puis une seconde série plus courte que la première ou l'on a mis en onde un son sur deux dans la progression de la vitesse. L'effet musical est conforme aux attentes. Le modèle de marteau feutré prouve ici son efficacité. Mais la série A36h donne peu d'enrichissement spectral.

#### 6.4.6. PERCUSSIONS DE RÉFÉRENCES AVEC ET SANS LIA DE RELAXATION

Afin d'infirmer ou confirmer que la simulation de la relaxation a une influence sur le timbre, nous comparons les simulations de références, séries sur les vitesses, avec et sans le LIA de relaxation toutes choses étant égales par ailleurs. La séquence qui simule la percussion de la Corde A36 avec le marteau A36h se compose de deux séries de 5 sons. Elles consistent à faire varier par valeurs croissantes  $V_0$ . Dans la première série, le LIA de relaxation est présent. Dans la deuxième série, le LIA de relaxation est absent. Les séries se ressemblent. Cependant, on observe dans la première une variation de timbre plus homogène (CD63). La séquence qui simule la percussion de la Corde A1 avec le marteau A1p se compose de deux séries de 5 sons. Elles consistent à faire varier par valeurs croissantes  $V_0$ . Dans la première série, le LIA de relaxation est présent. Dans la deuxième série, le LIA de relaxation est absent. On n'observe pas de différence sensible entre les deux séries (CD64).

### 6.5. ANALYSE ESTHÉSIQUE DES ANALYSES ESTHÉSIQUES ET SYNTHÈSE

#### CAS GÉNÉRAL

À partir des expériences de catégorisation effectuées précédemment, nous avons sélectionné trois représentants de chaque catégorie tout type de simulation confondue (butée linéaire, non-linéaire, avec relaxation, sans relaxation). Sur cet ensemble ainsi formé, nous avons procédé à une nouvelle catégorisation. Il résulte 11 catégories. Aucune d'entre elles ne contient exclusivement des sons à percuteur feutré à l'exception d'une catégorie que nous avons appelé « sons singuliers ». De plus, trois d'entre elles ne sont constituées que par des sons de percuteurs à butée non feutrée. Succinctement, nous avons tenté de faire un lien avec les paramètres poïétiques et nous avons échoué.

Nous avons l'heuristique suivante à l'issue de ces résultats. Il apparaît que le rapport d'énergie attaque-résonance est important ; à la limite il est impossible de percevoir deux attaques différentes si la résonance est de forte énergie. Nous pouvons introduire de manière équivalente la notion d'*efficacité de la percussion* ; une percussion efficace transmet une énergie grande à la SV.

Compte-tenu des investigations sur des SV linéaires de type chapelet, le modèle de marteau feutré n'est pas pertinent en termes de nombre de catégories évoquées. Par contre, le contrôle du paramètre vitesse du modèle de marteau feutré donne une situation de jeu instrumentale vraisemblable. De plus la notion de feutre doux ou dur est pertinente pour des SV adéquates - des SV très peu amorties. En outre, la non-linéarité en puissance est indispensable pour le modèle de marteau feutré.

#### SINGULARITÉS

Nous avons recueilli quelques simulations donnant des timbres singuliers (14 sons). Ils se caractérisent par le fait que l'on perçoit en plus de l'excitation un phénomène d'étouffement. Ainsi, l'attaque est riche en partiels aiguës et la décroissance est faible en intensité et donne une sensation de douceur. La figure 10.17 compare la transformée de Fourier à court-terme (TFCT) des sons singuliers caractéristiques S8, S9 et d'un son « classique » de C10.

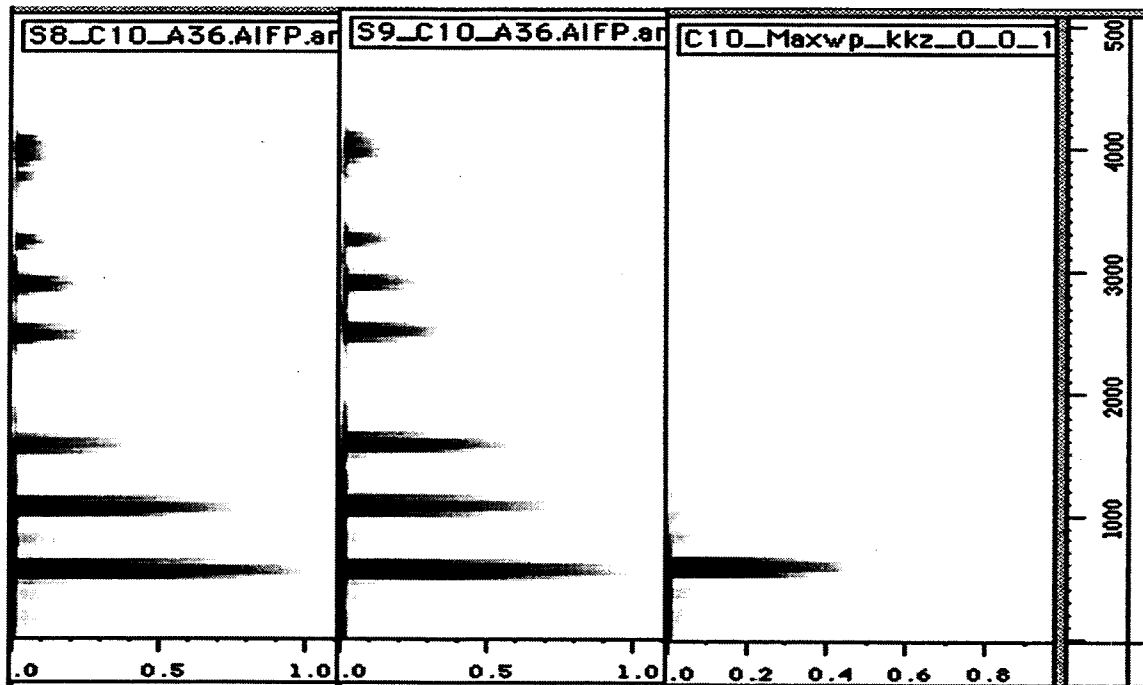


FIG. 10.17 - Transformée de FOURIER à court-terme des sons singuliers caractéristiques S8, S9 et d'un son «classique» de C10. Paramètres de S8 et S9 : masse du percuteur égale à 100 fois celle de A36m soit 1,06 Kg ; Vitesse de frappe égale à 10 fois celle de A36m soit  $10,36 \text{ ms}^{-1}$  ; constante de relaxation égale à 100 fois celle de A36m soit 0,7 ms ; constante d'hystérésis égale à 0,956 pour S8 (valeur de A36m), égale à 0,999 pour S9 ; percussion d'une Corde C10.

Nous avons obtenu ces simulations à partir de la simulation d'un timbre particulier du modèle de marteau feutré non-linéaire sur C10 (« sons singuliers »). Nous avons modifié le point d'excitation du MAS n°2 au MAS n°3. Les variations consistent pour la plupart à modifier le nombre de MAS de la Corde et le paramètre vitesse. La séquence (CD65) fait entendre d'abord trois percussions : S8, S9 et «classique» puis l'ensemble des timbres singuliers par affinités perceptives. Les deux dernières simulations de la séquence sont réalisées par un seul percuteur.

Le secret de l'excitation ne serait-il pas dans l'art de l'étouffement ? Autrement dit, l'excitation de type impulsionnel serait virtuellement présente à chaque interaction. La percussion consisterait en une approche soustractive...

## CONCLUSION

### PREMIER OBJECTIF : SIMULATION AU PLUS PRÈS DE L'ACOUSTIQUE INSTRUMENTALE

Le modèle différentiel de marteau feutré, inspiré par les travaux de STULOV, bien que non conforme à l'esprit de CA, s'avère pertinent pour interpoler les points expérimentaux des caractéristiques des marteaux de piano. Nous disposons donc : - d'un LIA ad'hoc qui simule le comportement dynamique du feutre du marteau de piano, - d'un modèle CA de marteau de piano.

Nous avons couplé ces excitateurs à des cordes CA vraisemblables. Le rendu sonore d'un marteau donné est satisfaisant lorsqu'on fait varier sa vitesse initiale. Cependant, à vitesse initiale constante, les percussions ou seule la butée non-linéaire élastique est présente (pas de relaxation) donnent des résultats esthétiques très similaires.

La perception des différents types de marteaux (dur, moyen, souple) est effective et est conforme aux attentes naïves. Mais ces différences qualitatives restent faibles.



## DEUXIÈME OBJECTIF : TESTER LE POTENTIEL ESTHÉSIQUE DU MODÈLE

Une campagne sonore a été réalisée en cherchant l'exhaustivité. Près de 3700 sons ont été calculés puis écoutés. L'exploration systématique des paramètres d'excitation appliqués à des Chapelets fermés n'a pas dégagé de catégories propres à la relaxation, catégorie « sons singuliers » exceptée.

L'analyse a montré l'importance de la non-linéarité en puissance. Il semble que le nombre de paramètres poétiques est redondant par rapport aux attributs du domaine esthétique. Le niveau neutre n'a pas fait l'objet d'étude spécifique.

## LES IMPRÉVUS

Nous n'avons pas réussi à construire un modèle CA de relaxation « non ad'hoc ». Le modèle avec inertie intermédiaire semble le plus proche mais pose le problème de la simulation d'inerties très petites.

Une réponse à ce problème a été de montrer la signification fondamentale de cette impossibilité. Cette réponse est menée au chapitre suivant.

En outre, au cours du travail expérimental, nous avons fait les remarques suivantes :

- (i) Le rapport d'attaque joue le rôle de balance perceptive entre le percept d'Attaque et le percept de Décroissance.
- (ii) Les variétés sur la Décroissance ont tendance à l'emporter sur les variations de l'Attaque.
- (iii) La perception de la percussion d'une Cellule est très différente de celle de la percussion d'une SV à plusieurs modes.
- (iv) Pour la percussion d'une Cellule, si une fréquence légèrement différente de la fréquence caractéristique est contenue dans l'Attaque alors la perception se focalise sur cette différence pour un temps d'interaction suffisamment grand.
- (v) L'attribut cgs (variation comprise) est pertinent pour décrire l'Attaque.

---

# CHAPITRE XI

## COMPARAISON DU RÉSEAU DE KIRCHHOFF ET DU RÉSEAU CA

---

### INTRODUCTION

En étudiant le comportement physique de relaxation du feutre d'un marteau de piano, nous nous sommes heurtés à une difficulté de modélisation dans le langage Cordis-Anima. On aurait souhaité assembler un élément ressort et un élément frottement en série. Ces deux éléments étant des atomes LIA, il est impossible de les connecter. Il se trouve que dans la théorie des réseaux de KIRCHHOFF (K) - utilisée entre autre pour la modélisation de circuits électroniques, qui d'un certain point de vue est proche de Cordis-Anima (CA), il est possible d'assembler en série un élément frottement et un élément ressort. Nous souhaitons dans ce document pointer du doigt les principales différences entre les réseaux K et les réseaux CA notamment les modalités de connexion.

Ce sujet a déjà été abordé à l'Acroe par [HABIBI, 97]. Nous apportons un éclairage complémentaire, à partir d'un jeu d'écriture formelle, sur le sens des concepts utilisés.

Dans un premier temps, nous proposons une formalisation des réseaux K, une formalisation des réseaux CA puis une formalisation de la mécanique Newtonienne (N). Bien entendu il existe diverses présentations d'un même formalisme. Là où le choix était possible, nous avons opté pour une économie des symboles utilisés. Dans un deuxième temps nous analysons les réseaux CA en nous plaçant dans la théorie K et réciproquement.

Pour réaliser ce chapitre nous nous sommes appuyés principalement sur [BOITE&NEIRYNCK, 83] pour les réseaux K, sur [TALPAERT, 91] pour la mécanique N et sur [CADOZ&al., 90] pour les réseaux CA.

Bien entendu il existe des autres mécaniques pour décrire le réel comme la relativité restreinte, la relativité générale et la mécanique quantique. Cependant, ces autres mécaniques dans le domaine qui nous incombe (ordre de grandeur des énergies, des événements temporelles), sont cohérentes avec la mécanique de NEWTON.

Il existe également d'autres mécaniques, comme la mécanique des fluides, en liens plus ou moins étroits avec la mécanique de NEWTON. [JIMENEZ, 93] a effectué un travail théorique sur la viscoélasticité fluide, analogue à l'objectif de ce chapitre.

### 1. UNE FORMALISATION DES RÉSEAUX DE KIRCHHOFF RESTREINTS

Nous entendons restreint au sens où nous traitons uniquement le cas des trois dipôles "résistance", "inductance" et "capacité"; dipôles passifs linéaires invariants par rapport au temps.

Soit un ensemble  $G$  d'entiers naturels distincts deux à deux.

1.1. NŒUDS

Soit  $D$  l'espace des distributions temporelles (distribution au sens de Laurent SCHWARTZ à valeurs dans l'ensemble des réels), soit  $\alpha$  une application de  $G$  dans  $D$ . On définit pour chaque élément  $n$  de  $G$  une distribution temporelle  $v=\alpha(n)$ .

DÉFINITION 1 : Un **noeud** est un couple  $(n,v)$ <sup>1</sup>.  $v$  est appelé **vitesse au noeud  $n$** .

1.2. ARCS

Soit l'ensemble  $G.G$  des couples de  $G$  doublets exclus. Soit  $A$  une partie de  $G.G$ . Soit  $\beta$  l'application de  $A$  dans  $D$ . On définit pour chaque élément  $u$  de  $A$  une distribution temporelle  $f=\beta(u)$ .

DÉFINITION 2 : Un **arc orienté** est un couple  $(u,f)$ .  $f$  est appelée **force** issue de l'arc  $(u,f)$ .

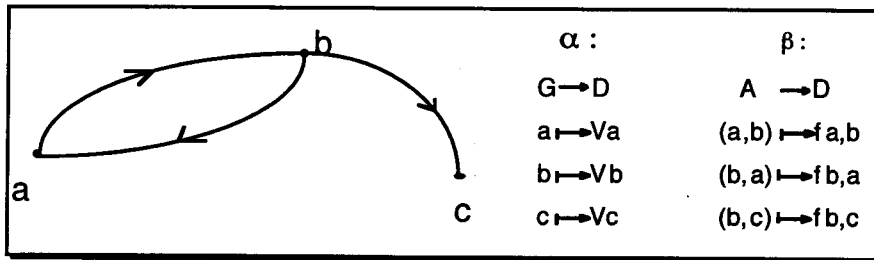


FIG. 11.1 - Un réseau de KIRCHHOFF,  $\alpha$  et  $\beta$  applications respectivement de  $G$  dans  $D$  et de  $A$  dans  $D$ .

1.3. LOI DES NŒUDS

L'ensemble des **forces entrantes pour un noeud  $n$**  est l'ensemble des forces issues des arcs  $(m,n) \forall m \in G$ .

L'ensemble des **forces sortantes pour un noeud  $n$**  est l'ensemble des forces issues des arcs  $(n,m) \forall m \in G$ .

**Axiome I (ou premier "lemme" de KIRCHHOFF ou loi des noeuds) :**  
 Pour un noeud  $n$ , la somme algébrique des forces entrantes est égale à la somme algébrique des forces sortantes.

La **topologie d'un réseau de KIRCHHOFF** est donnée par le quadruplet  $(G, A, \alpha(G), \beta(A))$  muni de l'axiome I.

Remarque :

L'axiome I constitue une contrainte sur l'application  $\beta$  (l'ensemble des forces sur les arcs).

1.4. ÉLÉMENTS

Une fois la topologie du réseau définie, on définit l'élément. Soit un arc  $(u,F)$  avec  $u=(n_i,n_j)$  ; soient  $v_{n_i}$  et  $v_{n_j}$  les vitesses respectives des noeuds  $n_i$  et  $n_j$ .

<sup>1</sup> Nous avons choisi d'attribuer à chaque noeud une vitesse (un potentiel) et non d'introduire la notion de tension pour un arc dotée alors d'un axiome supplémentaire : la loi des mailles ou deuxième "lemme" de KIRCHHOFF.

**DÉFINITION 3 :** Un élément est un arc  $((n_i, n_j), F)$  tel qu'il existe une loi  $\Phi(F(\cdot), (v_{n_j} - v_{n_i})(\cdot), t) = 0 \forall t$  (implicite ou explicite) reliant la force de l'arc et la différence de vitesse des noeuds adjacents<sup>2</sup>.

Pour alléger l'écriture, on note  $\Delta v(t)$  la grandeur  $(v_{n_j} - v_{n_i})(t)$  que l'on appellera **vitesse relative sur l'arc orienté  $((n_i, n_j), F)$** .

On définit trois types d'éléments,  $P$  désigne un réel :

1. L'élément **viscosité (VIS)** est tel que  $F(t) = P \cdot \Delta v(t)$
2. L'élément **élastique (ELA)** est tel que  $\Delta v(t) = P \cdot \frac{d}{dt} F(t)$
3. L'élément **inertie (INE)** est tel que  $F(t) = P \cdot \frac{d}{dt} \Delta v(t)$

### 1.5. RÉSEAU DE KIRCHHOFF

Soient l'ensemble  $E = \{P \in \mathfrak{R}, \Phi \in \{VIS, ELA, INE\}, (\Phi, P)\}$  et  $p$  une application de  $A$  dans  $E$ .

Un **réseau de KIRCHHOFF restreint** est un quintuplet  $(G, A, \alpha(G), \beta(A), p(A))$  muni de l'axiome I.

**DÉFINITION 4 :** Une terre est un noeud tel que sa vitesse est nulle pour tout  $t$ .

Autrement dit, un réseau  $K$ , c'est se donner :

1. un ensemble  $G$  d'entiers distincts,
2. une partie  $A$  de  $G \times G$ ,
3. une application  $\alpha$  qui, à tout entier de  $G$ , associe une vitesse  $v(t)$  de  $D$  (définition des noeuds),
4. une application  $(\beta, p)$ , qui à tout arc orienté de  $A$  associe une force  $f(t)$  de  $D$  et une loi  $\Phi$  visqueuse, élastique, ou inertielle reliant  $f(t)$  à  $\Delta v(t)$ , différences des vitesses des noeuds adjacents,
5. l'axiome I.

#### Remarques :

- Il existe un corollaire de l'axiome I : "La somme des forces d'une coupe<sup>3</sup> est nulle" [BOITE&NEIRYNCK, 83]

## 2. UNE FORMALISATION DU SYSTÈME CORDIS-ANIMA RESTREINT

Nous restreignons la formalisation au système CA unidimensionnel *complet* comprenant les *éléments* Masse, Ressort idéal et Frein idéal. Nous écartons les *modules fonctionnels*.

<sup>2</sup> Accéder à  $(v_{n_j} - v_{n_i})(\cdot)$ , c'est aussi accéder à toutes ces dérivées et intégrales.

<sup>3</sup> La notion de coupe n'est pas introduite dans ce chapitre. Elle nécessite la définition de termes supplémentaires qui sont ici superflus.

## 2.1 TOPOLOGIE D'UN RÉSEAU CA

Soit  $D$  l'espace des distributions à temps discret<sup>4</sup>. Soit  $\text{PHI}$  l'espace des fonctions unaires de  $D$  dans  $D$ .

### 2.1.1. POINTS DE COMMUNICATION

Soient  $F$  et  $X$  deux éléments de  $D$  tels que  $F$  est une grandeur intensive et  $X$  est une grandeur extensive<sup>5</sup>.

**DÉFINITION 5 :** Un **point de communication** est un couple  $(F,X)$  ou  $(X,F)$ .

**DÉFINITION 6 :** Un **PtM** est un couple  $(F,X)$ .

**DÉFINITION 7 :** Un **PtL** est un couple  $(X,F)$ .

### 2.1.2. ATOMES

**DÉFINITION 8 :** Un **atome MAT** est un PtM  $p$  de couple  $(F_p, X_p)$  muni d'une fonction  $f$  de  $\text{PHI}$  telle que  $X_p = f(F_p)$  ; soit un couple  $(p, f)$ .

**DÉFINITION 9 :** Un **atome LIA** est un triplet  $(pG, pD, g)$  ou  $pG$  et  $pD$  sont deux PtLs respectivement gauche et droit de couple  $(XG, F)$  et  $(XD, -F)$  et ou  $g$  appartient à  $\text{PHI}$  telle que  $g(XD - XG) = F$ .

### 2.1.3. CONNEXION

**DÉFINITION 10 :** **Connecter** un ensemble de PtLs  $\{L_1(X_1, F_1), L_2(X_2, F_2), L_3(X_3, F_3), \dots, L_n(X_n, F_n)\}$  à un PtM  $(F, X)$ , c'est imposer :

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (\text{il s'agit d'une sommation algébrique})$$

$$X = X_i, \forall i \in [1, n]$$

### 2.1.4. TOPOLOGIE

On désigne par  $P_m$  l'ensemble des PtMs et par  $P_l$  l'ensemble des PtLs.

Soit un ensemble  $G$  d'entiers naturels distincts deux à deux  $\{m_1, m_2, \dots, m_N\}$ . Soit l'ensemble  $G.G$  des paires de  $G$  doublets exclus. Soit une partie  $A$  de  $G.G$ .

Soient  $a$ , une application de  $G$  dans l'ensemble des MAT :  $P_m \times D$ ,  $ba$ , une application de  $A$  dans l'ensemble des LIA :  $P_l \times P_l \times D$  tel que :

<sup>4</sup>Il est possible de définir CA indépendamment des conditions de quantification du temps. Pour simplifier grandement l'exposé, nous avons délibérément choisi d'opérer dans l'espace à temps discret.

<sup>5</sup> Selon [SISI, 81], une grandeur intensive est une grandeur qui ne dépend pas de la masse du corps considéré par opposition à une grandeur extensive qui en dépend. Selon nous, une grandeur intensive est une grandeur se manifestant dans le temps et une grandeur extensive est une grandeur se manifestant dans l'espace. Cette formulation a l'avantage d'être indépendante du concept de masse.

1.  $\forall i \in [1, n]$ , l'ensemble  $\{\text{ptL gauche du LIA } ba(m_i, m_j), j \in [1, n]\}$  est connecté au PtM de  $a(m_i)$ .
2.  $\forall i \in [1, n]$ , l'ensemble  $\{\text{ptL droit du LIA } ba(m_i, m_j), i \in [1, n]\}$  est connecté au PtM de  $a(m_j)$ .

DÉFINITION 11 : La topologie d'un réseau CA est un quadruplet  $(G, a(G), A, ba(A))$ .

## 2.2. DE LA TOPOLOGIE AU RÉSEAU EFFECTIF

On restreint l'espace PHI des fonctions à l'ensemble des fonctions qui se décrivent par un algorithme causal d'ordre fini.

On appelle **algorithme causal d'ordre N**, une fonction  $f$  vérifiant :

$$\left\{ f \in \Phi, (u_n) \rightarrow v_n = f((u_n)) / \exists s \text{ explicite}, \forall n, v_n = s(v_{n-1}, v_{n-2}, \dots, v_{n-N}, u_n, u_{n-1}, u_{n-2}, \dots, u_{n-N}) \right\}.$$

On appelle algorithme **T\*-simulable** un algorithme causal qui pour calculer  $(v_n)$  au temps  $n$  nécessite la donnée de  $(u_n)$  au temps  $n$ . On appelle algorithme **T-simulable** un algorithme causal qui pour calculer  $(v_n)$  au temps  $n$  ne nécessite pas la donnée de  $(u_n)$  au temps  $n$ .

DÉFINITION 12 : Un élément CA est un atome MAT ou LIA dont la fonction est décrite par un algorithme causal et est caractéristique de l'élément.

On définit trois types d'éléments CA,  $P$  désigne un paramètre réel positif :

1. L'élément **Masse ponctuelle (MAS)** est un atome MAT  $((F, X), f)$  tel que son algorithme  $f$  est T-simulable et vérifie  $X(n) = P \cdot F(n-1) + 2X(n-1) - X(n-2)$ .
2. L'élément **Ressort (RES)** est un atome LIA  $((X_1, -F), (X_2, F), f)$  tel que son algorithme  $f$  est T\*-simulable et vérifie  $F(n) = P \cdot (X_2(n) - X_1(n))$ .
3. L'élément **Frottement (FRO)** est un atome LIA  $((X_1, -F), (X_2, F), f)$  tel que son algorithme  $f$  est T\*-simulable et vérifie  $F(n) = P \cdot (X_2(n) - X_1(n) + X_1(n-1) - X_2(n-1))$ .

Soit  $E_1$ , l'ensemble des éléments RES et FRO,  $E_1 = \{P \in \mathfrak{R}, \Phi \in \{RES, FRO\}, (\Phi, P)\}$ . Soit  $\beta$  une application qui à tout atome LIA de  $ba(A)$  associe un élément CA de  $E_1$ .

Soit  $E_2$ , l'ensemble des éléments MAS,  $E_2 = \{P \in \mathfrak{R}, \Phi \in \{MAS\}, (\Phi, P)\}$ . Soit  $\alpha$  une application qui à tout atome MAT de  $a(G)$  associe un élément MAS de  $E_2$ .

Un réseau CA restreint est un sextuplet  $\{G, a(G), \alpha(a(G)), A, ba(A), \beta(ba(A))\}$ .

Remarque :

Nous avons contracté la définition du LIA. On peut exprimer comme l'ont fait les concepteurs de CA un LIA plus général muni d'un axiome supplémentaire. Ce LIA<sup>6</sup>, de variables extensives  $X_g, X_d$ , possède deux variables intensives  $F_1$  et  $F_2$  (sorties des LIA) et deux fonctions  $\phi_1$  et  $\phi_2$  telle que  $\phi_1(X_g - X_d) = F_1$  et  $\phi_2(X_g - X_d) = F_2$ . L'axiome supplémentaire est : Soit un atome LIA de PtLs  $(X_g, F_g)$  et  $(X_d, F_d)$ , on a  $F_g = -F_d$ .

Une propriété importante du réseau ci-dessus, due à la particularité des éléments RES, FRO, MAS définis, est que les algorithmes ne sont pas seulement causaux ; ils sont aussi "instantanés". Les LIA se calculent à partir des grandeurs extensives au temps  $n$  et au temps  $n-1$  des MAT adjacents, soient des suites du premier ordre. Les MAT impliquent des suites du second ordre.

Autres définitions :

DÉFINITION 13 : Soit un MAT  $((F_p, X_p), f)$  ;  $F_p$  est la **grandeur entrante** ;  $X_p$  est la **grandeur sortante**.

DÉFINITION 14 : Soit un LIA  $((X_g, F), (X_d, -F), f)$  ;  $F$  est la **grandeur entrante** ;  $X_g$  et  $X_d$  sont les **grandeurs sortantes respectivement gauche et droite**.

### 3. UNE FORMALISATION DE LA MÉCANIQUE NEWTONIENNE DANS UN ESPACE UNIDIMENSIONNEL

#### 3.1. POINT MATÉRIEL

Soient :

1. une variable  $t$  de l'ensemble des réels  $\mathfrak{R}$  ; soit un ensemble  $G$  d'entiers naturels distincts deux à deux  $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  ;
2.  $u$ , une application de  $G$  dans  $\mathfrak{R}^+$ , on note  $m_i / u(a_i) = m_i$  ;
3.  $\Phi$ , l'ensemble des fonctions algébriques de classe  $C_2$  ;
4.  $v$ , une application de  $G$  dans  $\Phi$ ,  $v(a_i) = r_i(t)$ .

DÉFINITION 15 : Un **point matériel**  $M$  est un triplet  $(a_i, m_i, r_i(t))$ .

DÉFINITION 16 :  $m_i$  est la **masse** du point matériel  $M$ .

DÉFINITION 17 :  $r_i(t)$  est le **mouvement** du point matériel  $M$ .

#### 3.2. SYSTÈME NEWTONIEN

Soient :

5. l'ensemble  $G.G$  des paires de  $G$  doublets exclus,
6. une partie  $A$  de  $G.G$ ,

---

<sup>6</sup> Contrairement à l'énoncé du LIA page 10 dans le texte de base de Cordis-Anima [CADOZ&al., 90] nous pensons que les auteurs ont conçu l'algorithme du LIA comme une fonction de la différence des positions et non comme une fonction 2-aire des deux positions.

7.  $\Phi'$ , {l'ensemble des fonctions algébriques  $f$  de classe  $C_1, \mathfrak{R}^3 \rightarrow \mathfrak{R}$ ,  
 $(t, \Delta r(t), \Delta r'(t)) \rightarrow \hat{f}(t, \Delta r(t), \Delta r'(t))$ } (cf. développement en §4.3),
8.  $w$ , une application de  $A$  dans  $\Phi'$  tel que  $w((a_i, a_j)) = f(t, r_i - r_j, r_i' - r_j') = f_{ij}$ .

$$\text{Axiome 1 : } \sum_j f_{ij} = m_i r_i'', \quad \forall i \quad (11.01)^7$$

$$\text{Axiome 2 : } f_{ij} = -f_{ji}, \quad \forall i, j \quad (11.02)$$

Un **système Newtonien** est un quintuplet  $\{G, u, v, A, w\}$  muni de l'axiome 1 et de l'axiome 2

Plus simplement, un système newtonien est un ensemble de points matériels en interactions mutuelles deux à deux satisfaisant l'axiome 1 ou "loi du mouvement".

### 3.3. SIMULTANÉITÉ OU PRINCIPE DIFFÉRENTIEL, COMPLÉMENT SUR LA NOTION DE FORCE

#### 3.3.1. POSTULAT DES CONDITIONS INITIALES

La restriction du descripteur force exprimée par l'ensemble  $\Phi'$  est cruciale pour saisir le problème de la liaison viscoélastique série.

Nous affirmons que : *Une interaction à l'instant  $t$  entre deux points matériels  $(a_1, m_1)$ ,  $(a_2, m_2)$  de mouvement respectif  $r_1, r_2$  est Newtonienne si et seulement si l'interaction est fonction de  $r_2 - r_1$  et de  $r_2' - r_1'$ .*

Cette restriction sur la notion de force n'apparaît pas explicitement dans les postulats de Newton. Elle figure en tant que définition du descripteur force dans l'exposé de [TALPAERT 91] sur la mécanique Newtonienne. Cependant, *le postulat des conditions initiales* énoncé par Galilée en 1638 contient cette notion : « La position d'un point matériel est connue à tout instant si les positions et vitesses initiales sont données à l'instant initial. » L'accélération du point matériel est alors déterminée à tout instant [TALPAERT 91].

#### 3.3.2. CONSÉQUENCE LOCALE DU POSTULAT DES CONDITIONS INITIALES

Une hypothèse implicite faite sur la mécanique N est *l'invariance par translation temporelle*. Ainsi, bien que l'énoncé fasse référence à un temps quelconque, on peut souligner que localement ce postulat s'applique. Ainsi, de proche en proche, **l'état dynamique** d'un point matériel à l'instant  $t$  est la donnée de sa position et de sa vitesse à l'instant  $t$ . L'état dynamique contient toute l'information propre au système à l'instant  $t$ ; c'est une vision diachronique.

On généralise aisément cette proposition à un système isolé constitué d'un ensemble de points matériels.

Considérons une force  $f$  entre deux points matériels  $(a_1, m_1)$  et  $(a_2, m_2)$ . Supposons que cette force dépende d'un paramètre  $y$  qui ne soit ni la position ni la vitesse de  $(a_1, m_1)$  et ni la position ni la vitesse de  $(a_2, m_2)$ . Alors le système isolé constitué des deux points matériels ne satisfait plus le postulat des conditions initiales puisque l'accélération d'un point matériel par l'intermédiaire de l'axiome 1 ou relation fondamentale de la dynamique (RFD) ne sera plus

<sup>7</sup> Selon nous, l'axiome 1 ou le deuxième postulat de Newton contient deux propositions : (i) l'hypothèse de l'additivité des forces, (ii)  $f = mx''$ .



déterminée par la seule donnée de la position et de la vitesse de ce point. Ainsi, le postulat des conditions initiales de Galilée et le deuxième postulat de Newton (RFD) impliquent que les forces entre points matériels à l'instant  $t$  dépendent des variables position et vitesse des points matériels. Ceci, dans la mesure où l'on considère la nécessité de l'isomorphie entre N et CA, constitue l'argument principal contre l'implémentation en CA de la liaison viscoélastique série.

Une autre hypothèse implicite est l'invariance par translation spatiale de la mécanique N. Cette hypothèse implique que la force s'exerçant entre deux points matériels  $r_1$  et  $r_2$  ne peut dépendre que de la différence relative des positions et des vitesses.

### 3.4. DISGRESSION

La mécanique de Newton vise à établir les relations entre les forces et les mouvements engendrés des phénomènes naturels. La difficulté réside dans le fait que (comme toute science physique ?) les concepts de forces et de mouvements sont définis par la dite mécanique.

Ainsi, on peut rejeter toutes tentatives de construction expérimentale de la mécanique de Newton puisque basées sur les concepts de forces et de mouvements.

A contrario si l'objectif est de "coller" le mieux à la réalité, la vision de Newton a quelque chose d'universel puisque chaque jour le nombre d'expérimentations confirme les intuitions de Newton. Il s'ensuit que les quelques expériences réalisées par Newton ont induit et la relation et les concepts de forces et de mouvements.

## 4. LE RÉSEAU CA RESTREINT ET LA MÉCANIQUE DE NEWTON SONT PSEUDO-ISOMORPHES.

Si l'on néglige dans les objets l'aspect discret en temps (ou inversement continu), alors nous avons la correspondance suivante :

1. Les grandeurs intensives  $F$  de CA sont les forces de N.
2. Les grandeurs extensives  $X$  de CA sont les positions des points matériels de N.
3. L'élément MAS de CA est un point matériel sur lequel s'applique la relation fondamentale de la dynamique (Axiome 1 - cf. (11.01)).
4. Les éléments LIA à algorithme causal d'ordre 1 de CA véhiculent le concept de forces de N.

## 5. CORDIS-ANIMA DU POINT DE VUE DE KIRCHHOFF

Nous montrons dans cette section que les réseaux CA restreints sont une classe particulière de réseaux K. Nous précisons "à topologie K" car les éléments K impliquent des lois à support temporel infini et sont donc inconciliables avec CA.

Nous employons le terme "lier", respectivement "liaison", pour désigner la jonction K entre arcs et noeuds K et le terme "connecter", respectivement "connexion", pour désigner la jonction CA entre atomes CA.

En faisant abstraction de la discrétisation temporelle et de la finitude des algorithmes de CA, nous pouvons tenter de rapprocher les formalismes comme suit :

1. Les grandeurs intensives  $F$  et les dérivées par rapport au temps des grandeurs extensives  $X$  de CA sont respectivement la force et la vitesse de K.
2. Les atomes MAT et LIA sont des arcs orientés.

3. La grandeur intensive X sortante du MAT n est la vitesse au noeud n.
4. La grandeur intensive entrante d'un MAT ou la grandeur intensive sortante droite (convention) d'un LIA est la force associée à l'arc supportant le MAT ou le LIA.

Enoncés supplémentaires pour définir un réseau CA restreint :

1. Il existe deux types d'arcs : les arcs MAT et les arcs LIA.
2. Un noeud est toujours lié à un et un seul arc MAT, le noeud terre excepté.
3. Un arc MAT est nécessairement lié au noeud terre.
4. Les éléments CA sont les éléments K associés aux arcs (MAS=INE, RES=ELA, FRO=VIS).

## 6. KIRCHHOFF DU POINT DE VUE DE CORDIS-ANIMA ET DE NEWTON

Les réseaux K sont des réseaux ou l'arc INE de paramètre m, de noeuds a et b, peut être interprété comme l'application de la *Relation Fondamentale de la Dynamique* sur un point matériel (a,m) dans le référentiel où b est immobile.

Les réseaux K sont des systèmes non causaux. Leur fin est de produire des fonctions à support temporel infini.

L'axiome I de K (loi des noeuds) ou corollaire exprime la loi d'action et de réaction de deux corps (cf. Axiome 2 (11.02)).

La notion de vitesse attachée aux noeuds définit un espace de mouvement.

Les fonctions caractérisant les éléments-arcs de K sont fonctions de la différence de vitesses des noeuds adjacents et non fonction à la fois de l'une et de l'autre. Ceci illustre le *principe de relativité de Galilée* : deux systèmes quasi-identiques (même repère d'espace, même repère de temps) dont l'un est en translation rectiligne uniforme par rapport à l'autre ont même comportement mécanique.

Les forces de K comme les forces de CA et de N sont des grandeurs algébriques.

Mais,

le formalisme K ignore :

1. la notion de masse associée systématiquement aux points/noeuds en mouvement,
2. la notion de référentiel galiléen<sup>8</sup>,
3. la relation entre force et mouvement ( $F = m \cdot \ddot{x}$ ),
4. la vision différentielle d'un système de points/noeuds,
5. la discrétisation du temps,
6. la finitude des algorithmes de calcul.

<sup>8</sup> C'est une tautologie déguisée du point de vue formel : un référentiel est galiléen si les mouvements des points du référentiel sont conformes à la mécanique de N. Si on considère l'ensemble des expérimentations sur des objets réels en mouvement dans un référentiel donné, on peut déterminer si le référentiel est ou n'est pas galiléen en testant les lois de N.

## 7. UN ENSEMBLE DE PROPOSITIONS POUR UNE APPROCHE SYNTHÉTIQUE

Nous proposons dans cette section une axiomatique commune aux trois systèmes. La construction est progressive. Elle définit les réseaux  $K$  puis les réseaux  $CA$  et les systèmes  $N$ .

- 1) Soit une variable temporelle  $t$  continue ou discrète.
- 2) Soit un espace  $E$  unidimensionnel.
- 3) Soit un ensemble de points de  $E$  (on se donne une métrique, on appelle position la coordonnée d'un point).
- 4) Le mouvement d'un point est une variation de la position par rapport au temps  $t$ .
- 5) On décrit le mouvement de l'ensemble des points par une vision diachronique et causale. La cause est la force, l'effet est le mouvement. La cause-force  $f$  entre deux points à l'instant  $t$  s'exprime par une corrélation sur l'effet-mouvement à  $t+dt$  des deux points (bidirectionnalité des forces).
- 6) Les forces sont additives (principe de linéarité des causes sur les effets).
- 7) Les forces sont invariantes par translation spatiale de l'ensemble des points de  $E$  (relativité galiléenne).
- 8) Les forces sont invariantes par translation temporelle du mouvement de l'ensemble des points (reproductibilité).

*Les propositions de 1 à 8 définissent le réseau  $K$ . Un réseau  $K$  est un ensemble de points-noeuds dont la variation de leur potentiel-vitesse est induite par les forces-arcs.*

*Un réseau  $K$  restreint est tel qu'il existe au plus 3 types de force-arc : Ine, Vis et Ela.*

- 9) Tout point  $x$  est corrélé au point terre  $x_T$  quel que soit  $t$  par la force  $f = m(x'' - x_T'')$ . Autrement dit les points  $x$  sont des points matériels  $(x, m)$ .
- 10) Les forces-corrélations à  $t+dt$  entre deux points matériels, point terre exclu, dépendent de la donnée de la position à  $t$  et à  $t+dt$  des points à l'exclusion de toute autre information sur le système (postulat des conditions initiales).

[ 9) et 10) : référentiel galiléen ]

*Les propositions de 1 à 10 définissent le réseau  $CA$  et la mécanique  $N$  dans le contexte de la dynamique.*

## 8. SUR L'ÉVENTUALITÉ DE SIMULER UNE MASSE NULLE

L'objectif est de savoir si le formalisme  $CA$  peut accepter le concept de masse nulle. Il se trouve que pour les réseaux de KIRCHHOFF cela ne pose aucun problème théorique. Une masse nulle est un noeud. Ce noeud, possédant une vitesse  $v(t)$ , possède une accélération  $a(t)$  non nulle. Il vérifie à tout instant  $\sum F_{ext.} = 0$  (loi des noeuds). Étant donné la pseudo-isomorphie entre  $CA$  et  $N$ , est-il possible dans le cadre de  $N$  d'envisager la masse nulle ?

Nous avançons un argument parmi des autres possibles qui répond négativement à la question posée. Nous postulons que tout objet physique n'a de sens que si son accélération est finie. Si tel n'est pas le cas sa position a une variation infinie durant un intervalle de temps  $dt$ . Or un objet physique ne peut interagir avec un système mécanique à une distance infiniment grande. Un objet de masse nulle et d'accélération finie, si on veut garder la cohérence de la RFD<sup>9</sup>, vérifie d'après la RFD :  $\sum F_{ext.} = 0$  pour tout temps  $t$ . Il en résulte qu'un système mécanique ne peut modifier le mouvement d'un objet de masse nulle et d'accélération finie.

Le point matériel ou élément MAS de masse nulle n'est donc pas envisageable car, étant isolé du reste du système de points matériels, il n'offre aucune possibilité d'interaction. Il n'est pas physicable.

Remarque :

Le concept de masse négligeable vis à vis de toute autre masse d'un système est acceptable dans le langage CA dès lors que le coût de la simulation ne devient pas exorbitant.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous approfondissons la question de l'introduction ou non de la viscoélasticité série dans le langage CA.

Premièrement, nous donnons respectivement une formalisation des réseaux de KIRCHHOFF, une formalisation des réseaux CA et une formalisation de la mécanique Newtonienne. La méthode suivie est de réduire le plus possible le volume des descriptions.

Deuxièmement, nous concluons que CA et la mécanique N sont pseudo-isomorphes. Le terme pseudo ici signifie que CA a des contraintes supplémentaires. Le langage doit entre autres prendre en compte la discrétisation du temps et de l'espace.

Troisièmement, définissant CA à partir du langage des réseaux K, nous concluons que CA est une classe particulière de réseaux à topologie K.

Réciproquement, décrivant K avec le langage CA (ou le langage de N), nous aboutissons à mettre en lumière les principales différences. Notamment la loi inertielle postulée pour tous les points et le postulat des conditions initiales.

Enfin, nous montrons qu'il est impossible en CA d'assembler un élément frein et un élément élastique en série sous peine de contredire les conséquences de la RFD associée au postulat des conditions initiales.

De plus, nous réfutons la solution qui serait d'admettre un élément de masse nulle.

Par ailleurs, par effet de bord, ce travail de définition sur les concepts physiques utilisés, rappelle :

- (i) les problèmes de références circulaires entre théorie et expérimentation sur le réel ;
- (ii) qu'il existe dans la formulation de la mécanique N faite par l'auteur des hypothèses implicites (invariance par translation temporelle, invariance par translation spatiale) ;
- (iii) que la notion de force est associée à la notion de cause et que la notion de mouvement est associée à la notion d'effet.

---

<sup>9</sup> La masse nulle pourrait être une exception à la RFD. Serait-ce encore une masse ? Une idée gratuite serait d'introduire la notion de masse nulle presque partout par analogie avec les fonctions nulles presque partout et leur emploi dans les intégrales.



---

## CHAPITRE XII

# LA PERCUSSION DE PEAUX : PERCEPTION ET MODÉLISATION DE TIMBRES STRESSÉS

---

Nous nous intéressons à un mode de jeu spécifique aux instruments de percussion à peau : l'effet de stress. A partir de sons réels, des expériences psychoacoustiques sont menées pour déterminer dans quelle mesure un auditeur perçoit cette modification de timbre. A partir d'un modèle d'excitateur percussif, nous simulons diverses percussions qui rendent compte de l'effet de stress.

### INTRODUCTION

Un des modes de jeu du percussionniste se réalise quand le musicien maintient volontairement la tête du percuteur au contact de la surface vibrante. Ce mode de jeu est utilisé surtout pour les peaux. Pour les percussions de peaux, on parle de frappe stressée ou effet de «stress». Une illustration sonore est proposée dans la séquence (CD66). Sur un bongo, nous entendons successivement : une série stressée pris dans un contexte de jeux, un commentaire du musicien, la même série jouée non stressée, une frappe normale (x2), une frappe stressée (x2) et de nouveau un extrait pris dans un contexte de jeux, plus courts que le précédent - jeu normal puis jeu stressé (x2). De la percussion ou seule la tête du percuteur intervient de manière balistique (frappe libre), à la percussion ou le geste maintient le contact jusqu'à la fin de la résonance (frappe tenue), il est possible en principe de jouer tous les intermédiaires (frappe stressée). Notre objectif est : - de montrer que les sons stressés sont pertinents au niveau perceptif, - de construire un modèle de synthèse sonore qui puisse offrir ce type de contrôle par percussion, - d'apporter un éclairage sur les mécanismes physiques en cause.

## 1. DE LA PERCEPTION DES SONS STRESSÉS

Sur les instruments à peau, le percussionniste peut frapper la membrane avec plus ou moins de tension dans le bras. Ceci a pour effet d'exercer une contrainte sur la peau indissociable du geste d'excitation. La question que l'on se pose est : *cette contrainte est-elle un invariant perceptif ?*

### 1.1. EXPÉRIENCE I: JUGEMENT DE SIMILARITÉ SUR LES DÉBUTS D'IMPACT

#### DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE

Nous avons demandé à un musicien percussionniste, Alain LAFUENTE, de jouer sur un unique instrument, une timbale. Muni de trois baguettes de duretés ordonnées (douce, moyenne, dure), il a frappé la peau en deux endroits distincts : le bord et au deux tiers du bord. Il avait pour consigne de jouer ces différentes situations avec trois jeux de stress. A partir de l'ensemble de ces sons, égalisés en sonie par l'auteur, nous avons extrait les soixante premières millisecondes. La séquence (CD67) permet d'entendre les 21 stimuli à la suite par groupe de trois ; chaque groupe présente chronologiquement une frappe à stress fort, une frappe à stress moyen et une frappe à stress faible. Nous avons demandé à huit personnes d'effectuer un

jugement de similarité sur les paires de stimuli. Elles écoutaient les différentes paires dans un studio L.E.D.E.<sup>10</sup> (Live End, Dead End) en écoute stéréophonique. L'exercice durait environ 50 minutes par sujet. Il y avait 210 paires, les sujets donnaient leur évaluation à l'aide d'un curseur non gradué.

## RÉSULTATS

L'analyse factorielle montre qu'il n'y a pas de corrélation entre la répartition des stimuli dans l'espace des trois premiers axes significatifs et la variation du degré de stress sur la peau de la timbale. Un axe très significatif sépare les timbres produits avec la baguette à tête dure (baguette de caisse claire) des autres timbres. Le deuxième axe semble représenter le centre de gravité spectral des stimuli mais cela reste à confirmer par une analyse des signaux. En outre, cet axe n'est pas corrélé au lieu d'excitation.

Nous concluons que les 60 premières millisecondes de sons de timbale plus ou moins stressés n'ont pas permis aux sujets d'induire une perception de cette variable de jeu.

Dans la section suivante nous avons mené une expérience de catégorisation libre comprenant les timbres en entier.

TAB. 12.1 - Description des stimuli pour le jugement de similarité (expérience I) et pour la catégorisation (expérience II)

Expérience I	21 stimuli de 60 ms	trois types de baguettes : caisse claire, vibraphone, timbale	deux lieux d'excitation : bord, normale	trois frappes : stress faible, moyen, fort
Expérience II	45 stimuli	trois types de baguettes : caisse claire, vibraphone, timbale	trois lieux d'excitation : bord, normale, centre	cinq frappes : libre, stress faible, moyen, fort, tenue

## 1.2. EXPÉRIENCE II : CATÉGORISATION LIBRE SUR LES STIMULI ENTIERS

### DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE

Nous avons mené une expérience sur les stimuli sonores en gardant leur durée originale. Aux timbres précédents se rajoutait un lieu d'excitation supplémentaire, le centre de la membrane, et deux autres types de frappe : la frappe libre et la frappe tenue. Soit trois types de baguettes, trois lieux de frappe et cinq types de frappe. Le nombre de stimuli, égalisés préalablement par l'auteur, était de  $3 \times 3 \times 5 = 45$ . Nous voulions savoir s'il y avait une continuité perceptive entre la frappe tenue, puis trois types de stress de plus en plus lâches et enfin la frappe libre. Les 45 stimuli figurent dans la séquence sonore (CD68), par paquet de 5 ; chaque paquet est ordonné par le type de frappe : frappe tenue, stress fort, stress moyen, stress faible, frappe libre.

## RÉSULTATS

A partir de la tâche de catégorisation réalisée par les huit sujets, nous avons établi une matrice de distances moyennes inter-stimuli. Puis, nous avons procédé à une analyse factorielle. La variable de jeu qui permet de faire une catégorisation grossière est la variable *stress*. La variable *lieu de frappe* n'est pas pertinente pour la catégorisation. Ceci est surprenant. La figure 12.1 montre combien les stimuli sont regroupés par affinité de stress (frappe tenue, stress fort, faible et moyen, frappe libre). On remarque que l'axe 1 distribue de gauche à droite un groupe à frappe tenue (stress 4), un groupe à stress fort (stress 3) et un

<sup>10</sup>Un studio L.E.D.E., outre le rejet de tout parallélisme entre les différentes cloisons, possède un mur très absorbant et un mur complètement diffusant.

groupe à stress faible, stress moyen et frappe libre. L'axe 2 est corrélé au nombre de rebonds perçus : aucun pour les frappes tenues et libres, un grand nombre pour le stress le plus faible.

Nous n'avons pas représenté les stimuli obtenus par la baguette de type timbale car ils représentaient un groupe à part. Pour ce dernier, la variable *stress* n'avait pas de corrélation avec la catégorisation. Une hypothèse est que la tête du percuteur en feutre atténue très rapidement voir annihile les rebonds sur la membrane et que le système auditif se sert de cette propriété pour détecter l'effet de stress.

Pour répondre à la question de l'introduction : l'effet de stress est-il un invariant perceptif ? Nous répondons négativement dans le cas de la timbale stressée avec la baguette de timbale, positivement dans le cas de la timbale stressée avec la baguette de caisse claire et avec la baguette de vibraphone.

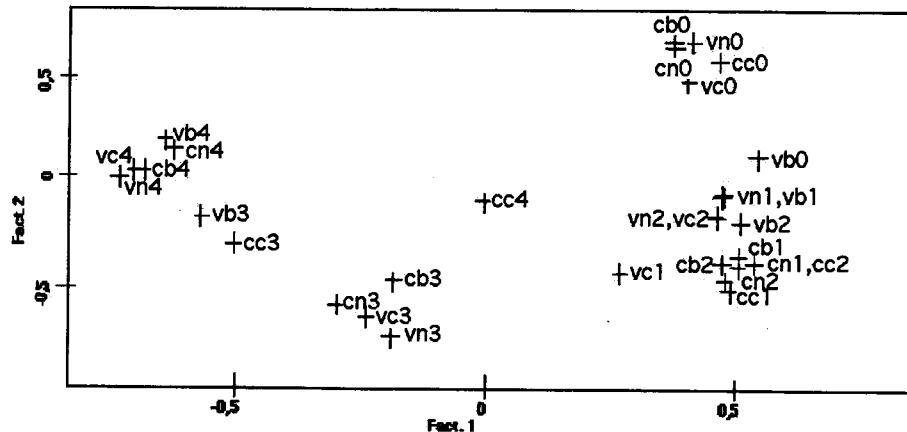


FIG. 12.1 - Proximité perceptuelle des timbres iso-stressés : xyz, x type de baguette, y lieu d'excitation, z type de frappe c=caisse claire, v=vibraphone, n=normale, b=bord, c=centre, 0=frappe libre, 1=stress faible, 2=stress moyen, 3=stress fort, 4=frappe tenue

Le résultat important est que pour une baguette de type vibraphone ou caisse claire, des lieux d'excitation bord, normale ou centre, l'attraction principale est générée par le type de frappe : tenue, libre ou stressée. Toutefois, bien que le musicien ait joué trois niveaux de stress, les sujets n'en ont perçu que deux.

L'étude portant sur les caractéristiques des signaux sonores des stimuli, comme le temps de montée et le centre de gravité spatial [KRIMPHOFF&al., 94], doit faire l'objet de travaux ultérieurs.

## 2. UN MODÈLE DE SYNTHÈSE POUR LA PERCUSSION STRESSÉE

L'objectif est de construire un modèle de synthèse qui reproduise le comportement qualitatif des percussions stressées. Nous l'appliquons à des instruments virtuels de type peaux mais aussi de type métaux et de type bois.

### 2.1. DESCRIPTION DU MODÈLE

Dans l'environnement de synthèse Cordis-Anima, nous proposons un modèle qui tente d'approcher le mode de jeu naturel d'une peau stressée.



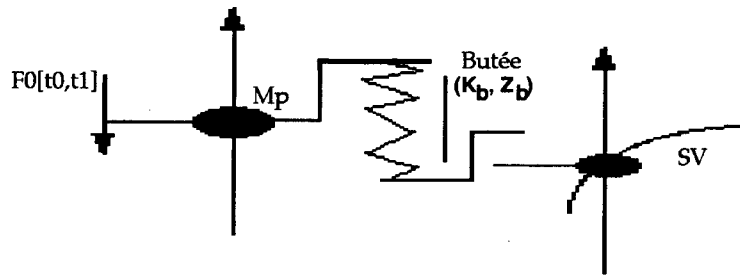


FIG. 12.2 - Modèle du percuteur en pression

Le percuteur est une masse ponctuelle  $M_p$  liée à une masse de la structure vibrante  $M_{SV}$  par une Butée viscoélastique : - ressort de raideur  $k_b$  et frein de viscosité  $z_b$  en parallèle si la position du percuteur est supérieure à celle de la structure vibrante, - rien sinon. Le son est issu de la variation d'amplitude d'une ou de deux masses vibrantes choisies dans la structure vibrante (SV). Le geste est modélisé par un créneau en force d'intensité  $F_0$ , durant un intervalle de temps  $[t_0, t_1]$ , appliqué à la masse du percuteur (cf. figure 12.2). Nous désignons par la suite ce modèle par « modèle en pression ».

On distingue trois durées caractéristiques du système.

- le temps moyen d'un contact :  $\tau$  (phase durant laquelle la butée est en action),
- la durée d'application de la force sur le système :  $T = t_1 - t_0$ ,
- le temps moyen entre la fin d'un contact et le début du contact, qui suit dans le cas où il y a des contacts multiples :  $\tau_r$ .

Avec ce modèle, pour  $T$  très petit par rapport à la période fondamentale de la structure vibrante, on a une percussion quasi-ponctuelle. Pour un  $T$  grand, il y a suivant le rapport  $\tau_r/\tau$ , soit un seul contact et un amortissement par couplage visqueux (celle de la Butée essentiellement), soit des contacts multiples et un amortissement par chocs successifs dans lequel la dissipation se fait en alternance : régime libre (dissipation interne à la SV), régime couplé (dissipation de la Butée essentiellement).

Ce dernier comportement est l'objet de la section suivante. Nous cherchons à comprendre le mécanisme caractéristique de l'amortissement en cause dans le mode de jeu stressé avec contacts multiples. Nous illustrons ce mécanisme par une application numérique sur un modèle de percussion de xylophone.

## 2.2. AMORTISSEMENT PAR CHOC VISQUEUX

### EXPLICATION DU PHÉNOMÈNE

Soit l'excitateur EX du modèle en pression percutant la SV Xylo ; pour certaine valeur de paramètres du modèle, nous obtenons une percussion perçue avec un étouffement caractéristique très abrupte. Nous cherchons à expliquer ce mécanisme de dissipation singulier par une démarche analytique.

Soit  $m$  la masse de l'EX. On désigne par l'indice  $i$  le  $i$ ème contact EX-SV. Nous faisons l'hypothèse que les durées des contacts sont identiques, égalent à une constante arbitraire<sup>11</sup>  $\tau$  (hyp 12.a).

On rappelle qu'une masse libre  $M$  soumise à une force  $F_0$  de vitesse  $v$  de signe opposé et d'altitude  $x$  rejoint de nouveau l'altitude  $x$  au bout du temps  $2MV/F_0$ . Cette masse rejoint l'altitude  $x$  avec la vitesse  $-v$ .

<sup>11</sup>Expérimentalement, pour le cas du Xylo, on observe sur 100 contacts une constante de temps en moyenne deux fois plus petite que celle lors d'une percussion sans pression. Il reste à trouver une formule théorique acceptable pour évaluer cette constante. En-est-il de même pour les autres SV ?

Nous faisons l'hypothèse que l'altitude de la masse de la SV lors du contact a peu d'influence sur le comportement du système (hyp 12.b). On note  $V(i)$  la vitesse de l'EX en début de contact  $i$  (incidence). Compte tenu de l'hypothèse 12.b et du rappel précédent,  $-V(i)$  est également la vitesse de l'EX en fin de contact  $i-1$  (réflexion). On note  $u(i)$  la durée entre la réflexion du contact  $i$  et l'incidence du contact  $i+1$ .  $u(i) = 2m.V(i+1)/F_0$ ,  $i \geq 0$  (cf. figure 12.3). L'hypothèse émise revient à considérer que le transfert d'énergie de l'EX vers la SV se fait de façon régulière.

Soit  $E(i)$ , l'énergie cinétique du percuteur à l'incidence du contact  $i$ ; l'énergie du percuteur est conservée durant la phase libre. Soit  $\lambda$  le facteur d'amortissement correspondant à la phase liée, on a  $E(i+1) = E(i)e^{-\lambda\tau}$  ou encore  $E(i) = E_0e^{-\lambda \cdot \tau \cdot i}$  avec  $E_0$ , énergie cinétique du percuteur à la première incidence.

Le facteur d'amortissement  $\lambda$  est évalué en négligeant le mouvement de la SV vis-à-vis de l'EX (et donc son mécanisme interne de dissipation). Ainsi, on a  $\lambda = z_b/m$  ou  $z_b$  est la viscosité linéaire qui relie EX-SV<sup>12</sup>.

or on a  $E(i) = mV(i)^2/2$ . Ainsi, il vient  $u(i) = \frac{2m}{F_0} \cdot \sqrt{\frac{2E_0}{m}} \cdot e^{-\lambda\tau(i+1)/2}$ ,  $i \geq 0$ .

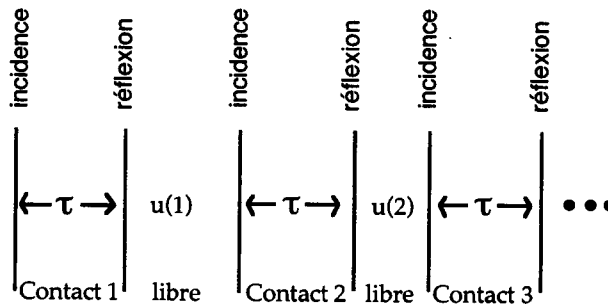


FIG. 12.3 - Réduction du phénomène de dissipation linéaire

Soit la variable temporelle continue  $t$ , on a :  $t = i\tau + \sum_{j=1}^i u(j)$ ,  $i \geq 1$  ou encore  $t = i\tau + \sum_{j=1}^i \alpha \cdot (e^{-\lambda\tau/2})^{j+1}$ ,  $i \geq 1$  avec  $\alpha = \frac{2\sqrt{2mE_0}}{F_0}$ . En posant  $q = e^{-\lambda\tau/2}$  et en considérant la somme de la suite géométrique, on a :  $t = i\tau + \alpha \cdot q^2 \frac{1-q^i}{1-q}$

Pour  $i$  grand, la somme de la suite géométrique de raison  $q$  inférieure à 1 tend vers  $\frac{q^2}{1-q}$  et l'expression de  $t$  devient :  $t = i\tau + \alpha \frac{q^2}{1-q}$ . Nous retrouvons formellement, à un retard temporel près, le régime de dissipation par viscosité linéaire

$$E(t) = E_0 e^{-\frac{z}{m} \left( t - \left( \frac{2\sqrt{2mE_0}}{F_0} \frac{e^{-\lambda\tau}}{1-e^{-\lambda\tau/2}} \right) \right)}$$

<sup>12</sup>Il suffit de résoudre le système linéaire  $mx'' + zx' + k = 0$  et de considérer l'énergie potentielle  $1/2 \cdot kx^2$ .

Pour  $i$  faible tel que  $i\tau \ll \alpha \frac{q^2(1-q^i)}{1-q}$  (hyp. 12.c), on a  $t = \frac{1-q^i}{\beta}$  avec  $\beta = \frac{1-q}{\alpha q^2}$ . Il vient :  $i = \frac{-2\ln(1-\beta t)}{\lambda\tau}$ . Dans cette hypothèse, l'énergie cinétique moyenne de l'EX en fonction du temps s'exprime par :  $E(t) = E_0 e^{-\lambda \cdot \tau \cdot i} = E_0 e^{2 \cdot \ln(1-\beta t)}$ .

Il vient moyennant hyp 12.c,

$$E(t) = E_0 (1 - \beta t)^2 \quad (12.1)$$

$$\text{avec : } \beta = \frac{F_0}{2\sqrt{2mE_0}} \frac{(1 - e^{-\lambda\tau/2})}{e^{-\lambda\tau}}$$

On appellera régime de dissipation par choc visqueux ce type d'évolution.

Le point important est que, la vitesse moyenne du percuteur se comportant comme  $\sqrt{E}$ , la vitesse du percuteur diminue linéairement en moyenne. Ainsi, au cours du transitoire d'une percussion stressée, le système percuteur plus structure vibrante perd de l'énergie de façon brutale, linéairement par rapport à la vitesse moyenne du mouvement du système. Puis, après un nombre de contacts suffisant ( $i$  grand), le système regagne un processus de dissipation en exponentielle décroissante.

#### APPLICATION NUMÉRIQUE : SIMULATION DE LA PERCUSSION D'UN XYLOPHONE

A partir d'un modèle de structure vibrante de xylophone détaillée dans la section suivante, nous simulons une percussion illustrant l'atténuation caractéristique de l'excitation pour un timbre stressé. Le résultat sonore se trouve en (CD69) (x2).

Le percuteur, modèle en pression, a pour paramètre :  $m = 6 \text{ Kg}$  ;  $z_b = 400 \text{ Nsm}^{-1}$  ;  $F_0 = 1\,600 \text{ N}$  ;  $v(0) = 1 \text{ ms}^{-1}$  ;  $E(0) = 3,109 \text{ J}$ .

A partir de ces données,  $\alpha = 0,003\,82 \text{ s}$ . On détermine  $\tau$  expérimentalement en moyennant les durées des contacts simulés sur l'ensemble des 80 premiers contacts (100 au total) (on a retiré les valeurs très grandes dans le calcul de la moyenne afin d'obtenir in fine une meilleure interpolation - c'est là le maillon faible de notre démonstration) :  $\tau = 0,626 \text{ ms}$  (on notera que la durée de l'unique contact de la percussion à  $F_0=0$ , toutes choses étant égales par ailleurs, est 1,54 ms.).

On a par ailleurs  $\lambda = z_b/m = 66,67 \text{ s}^{-1}$ . On a donc  $q=0,979\,4$  et  $\beta = 2,820 \text{ s}^{-1}$ . A partir de l'équation (12.1), on obtient numériquement l'expression de  $E$  en fonction du temps. On a accès également à la vitesse équivalente  $\sqrt{2E/m}$ .

La figure 12.4 présente les variations de la position et de la vitesse de l'EX au cours d'une percussion de Xylo à frappe tenue et juxtapose respectivement l'énergie  $E$  et la vitesse équivalente prédit par notre raisonnement sur le mécanisme de dissipation en cause.

Représenter la trajectoire du percuteur a un intérêt car en supposant que l'énergie cinétique de la SV ne varie pas d'un état de réflexion à l'état d'incidence qui succède, l'altitude des maximaux locaux indique l'énergie du percuteur en phase libre à un facteur  $F_0$  près. Les maximaux locaux sont bien interpolés (courbe du haut).

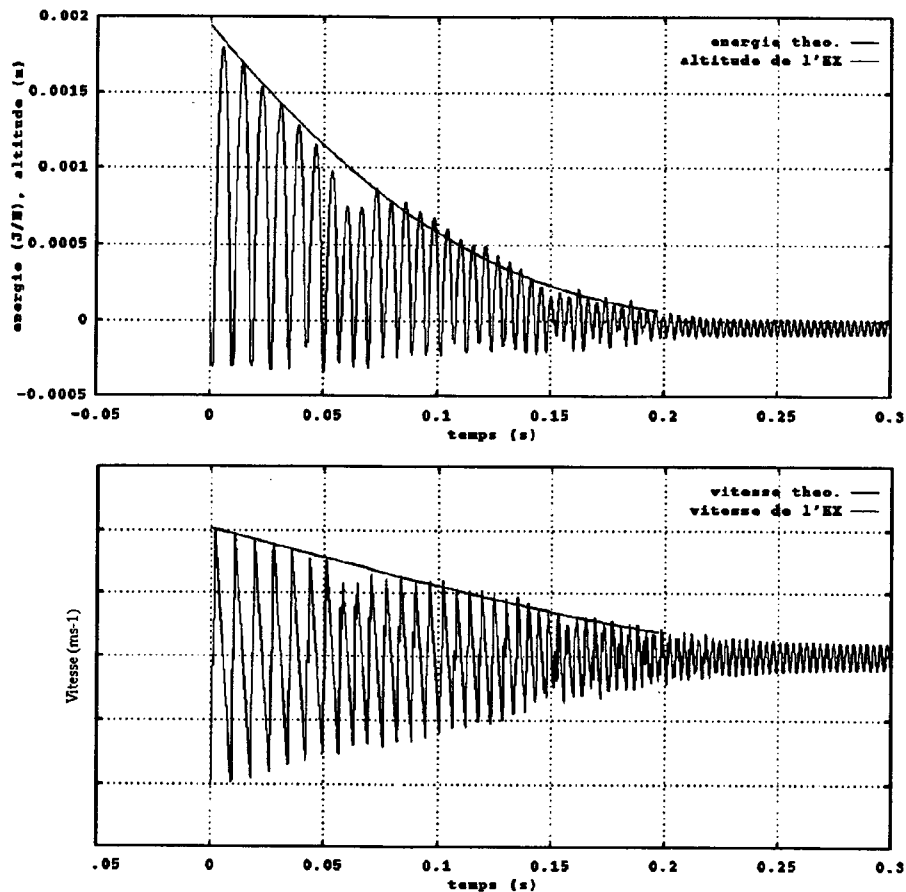


FIG. 12.4 - Comparaison des courbes théoriques et simulées d'une percussion stressée sur le Xylo. En bas, expression des vitesses théoriques et simulées de l' EX; en haut, expression de  $E/F_0$  théorique et de la trajectoire simulée de l'EX.

De plus, nous voyons que dans la limite de l'hypothèse d'un transfert d'énergie régulier à la SV, l'enveloppe temporelle de la vitesse du percuteur est bien décrite par le système (12.1) (courbe du bas).

Ce type de percussion revient à soumettre à la SV une fréquence d'excitation qui varie dans le temps. On balaye une certaine plage de fréquence. Les « trous » que l'on peut observer correspondent à un transfert d'énergie très important de l'excitateur à la SV. Il y a alors collision momentanée entre la fréquence des rebonds et une fréquence propre de la SV. Ce processus se poursuit jusqu'à l'oscillation en phase de l'EX et de la SV.

### 3. QUELQUES SIMULATIONS

On se propose d'étudier la percussion stressée sur trois structures vibrantes en Cordis-Anima. Pourquoi trois ? Un classement usuel pour les instruments à percussion est de considérer le type de matière mise en vibration. Ainsi, on distingue les bois, les métaux et les peaux. Nous prenons comme référence au monde réel un représentant de chaque famille : respectivement une lame de xylophone, un gong symphonique et un tom de batterie.

#### 3.1. LES INSTRUMENTS

Les instruments virtuels proposés ne représentent que certains aspects des instruments traditionnels. Seule la partie vibrante est modélisée. Toutes les masses sont ponctuelles et se meuvent dans un espace unidimensionnel.

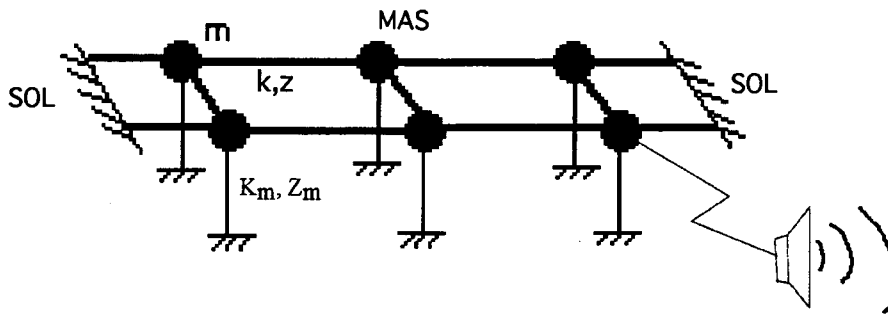


FIG. 12.5 - Modèle CA de xylophone, les sphères représentent des masses ponctuelles, les traits des liaisons viscoélastiques linéaires, les barres hachurées le point fixe. La sphère de droite au premier plan est le point d'écoute.

### LE XYLOPHONE

Les caractéristiques du Xylo sont telles que la structure est constituée de six éléments MAS en réseau (liaison viscoélastique linéaire de raideur  $k$  et de viscosité  $z$ ). La structure est homogène. Elle est fixée à ses extrémités par l'élément SOL, le point fixe. Un deuxième type de liaison viscoélastique ( $k_m, z_m$ ) relie chaque élément MAS à l'élément SOL (cf. figure 12.5). Les paramètres de la structure sont donnés dans le tableau 12.2.

La construction de cette SV et des suivantes en CA s'appuie sur les travaux de thèse d'Éric INCERTI [INCERTI, 96] : «Synthèse de sons par modélisation physique de structures vibrantes». Le premier mode a une fréquence de 520 Hz, un temps d'amortissement de 0,9 s. Le deuxième mode a une fréquence de 2 098 Hz, un temps d'amortissement de 0,48 s. Les caractéristiques de ces deux premiers modes ont été imposées à partir de l'analyse d'un son réel de xylophone. Le Xylo est excité par percussion sur un élément MAS situé en son extrémité.

TAB. 12.2 - Caractéristiques du Xylo

masse de la SV	1+1+1+1+1+1 Kg
raideur interne	6,041e+08 Nm <sup>-1</sup>
viscosité interne	2,173e+01 Nm <sup>-1</sup> s
raideur de milieu	1,067e+07 Nm <sup>-1</sup>
viscosité de milieu	6,657e+00 Nm <sup>-1</sup> s

### TOM DE BATTERIE : LE BONGO

Construit sur le même principe que le Xylo, le Bongo est un réseau carré homogène de  $8 \times 8 = 64$  éléments matériels. La structure est attachée en son contour à l'élément SOL. Les deux premiers modes, fréquences et amortissements, ont été imposés à partir d'un spectre de Fourier d'un timbre de bongo réel. Les paramètres du Bongo CA sont donnés dans le tableau 12.3. Le Bongo est percuté à un tiers du bord.

### LE GONG

Les caractéristiques du Gong sont données dans le tableau 12.3. La structure est un réseau à 81 masses sous forme de disque de symétrie circulaire, dense en son centre, moins dense au bord. Une de ses extrémités est reliée à l'élément SOL. Il n'y a pas de viscosité et de raideur de milieu. Le Gong est percuté en son centre.

TAB. 12.3 - *Caractéristiques du Bongo et du Gong*

Nom	Bongo	Gong
genre	membrane carrée	disque à symétrie circulaire
nombre d'éléments MAS	8x8	57
inertie SV (Kg)	64=1+1+...+1	83
raideur interne (Nm <sup>-1</sup> )	5,431e+06	5,261e+07
viscosité interne (Nm-1s)	1,797e+01	2,205e+00
raideur de milieu (Nm-1)	1,004e+06	0
viscosité de milieu (Nm-1s)	1,577e+00	0

TAB. 12.4 - *Lieu d'excitation des SV*

SV	Lieu d'excitation
Bongo	1/3 du bord
Gong	centre
Xylo	extrémité

Les paramètres des SV décrites précédemment sont récapitulés de manière exhaustive en annexe.

Les percussions respectivement du Xylo (x2), du Bongo (x2) et du Gong (x2) composent la séquence (CD70).

### 3.2. EFFET DE STRESS SUR LE BONGO, LE XYLO ET LE GONG

Nous utilisons pour toutes les simulations une vitesse initiale du percuteur de  $V_0=1 \text{ ms}^{-1}$ .

#### SUR LE BONGO

Nous avons simulé des percussions sur le Bongo avec le modèle en pression. La percussion de référence (frappe libre) est celle obtenue pour un percuteur de masse 64 Kg et de raideur de butée telle que la fréquence propre soit de 150 Hz. Nous mesurons par simulation le temps d'interaction :  $\tau = 7,5 \text{ ms}$ .

Nous avons choisi par essai/erreur une valeur  $\tau_r = \tau$  qui est suffisamment grande pour permettre des contacts multiples mais qui est suffisamment petite pour conserver une unité perceptive au timbre. En admettant que la vitesse initiale du percuteur en fin de contact est sensiblement égale à la vitesse initiale  $V_0 = 1 \text{ ms}^{-1}$ , que le mouvement de la SV perturbe peu la durée du rebond du percuteur, on a  $F_0 = 2mV_0/\tau_r$ ; soit  $F_0 = -17\,067 \text{ N}$ . Le paramètre viscosité de la butée a été fixé à  $85\,330 \text{ Nms}^{-1}$ ; soit un temps d'amortissement égale à  $\tau/10$  afin de diminuer le nombre de rebonds dû au phénomène d'entretien.

On produit par synthèse une série de percussions sur le Bongo dans lequel  $F_0$  varie. Cette variation modifie la fréquence de rappel du percuteur vers la SV. Les impacts successifs sont perçus ou non suivant le seuil de fusion. Une autre série de percussions est obtenue en faisant varier la durée  $T$  du créneau en force. On tente de rendre compte ainsi des intermédiaires de jeux stressés : du son à percussion plaquée (frappe tenue) au son ou seule l'inertie de l'excitateur intervient (frappe libre). Cette dernière série est un échec, car au moment où la force s'annule (discontinuité), le Bongo reçoit de l'énergie de la part du percuteur. Il en résulte un percept d'attaque secondaire d'intensité trop forte.

La séquence (CD71) se compose chronologiquement des sons du Bongo issus : - d'une frappe normale, - d'une frappe tenue, - de la série ou la force en pression,  $F_0$ , varie par valeurs décroissantes (donc la fréquence de rappel décroît), - de la série ou la durée de la force en pression,  $T$ , varie par valeurs croissantes.

### SUR LE GONG

Le Gong a fait l'objet du même travail.

Souhaitant utiliser un percuteur d'inertie plus importante (de 150 Kg) parce que la SV est plus massique<sup>13</sup>, nous n'avons pas réussi

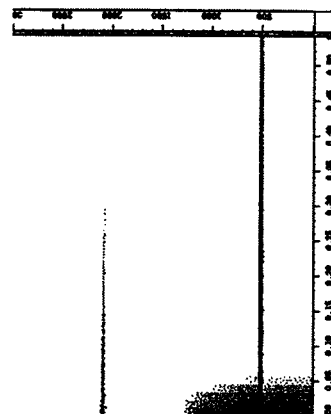
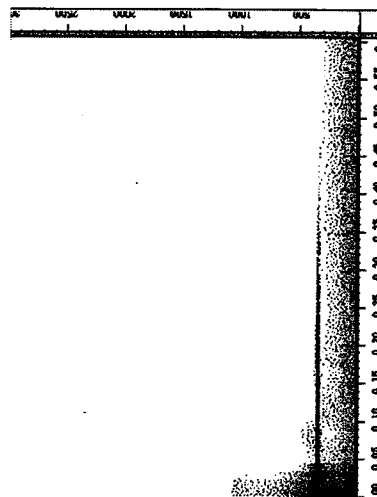
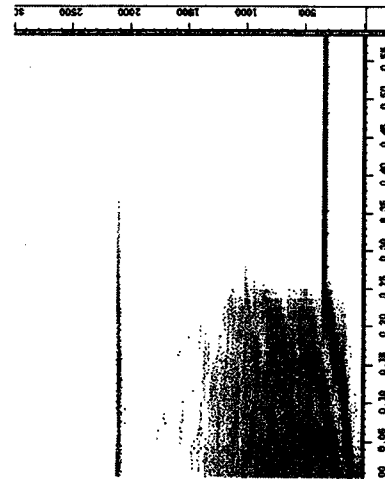


FIG. 12.7 - Sonogrammes des percussions sur le Xylo. De gauche à droite : simple ; pression à un contact ; pression avec contacts multiples. Le temps figure en abscisse ; la fréquence en ordonnée.

<sup>13</sup>Loi empirique des percussionnistes : pour faire bien sonner un instrument à percussion, plus ce dernier est dense, plus le percuteur doit être dense.

à amortir suffisamment les rebonds. Les valeurs importantes de viscosité génèrent des divergences numériques, elles donnent des constantes de temps qui nécessitent une fréquence d'échantillonnage très supérieure à 44 100 Hz. En prenant un percuteur d'inertie plus petite (7 Kg), de fréquence propre 700 Hz, de viscosité  $8\,600\text{ Nms}^{-1}$ , de pression 180 N, nous avons réussi à produire un percept d'attaque stressée.

En outre, même avec cette inertie plus petite, il n'a pas été possible de produire un percept de frappe tenue. La qualité de l'amortissement par frappe tenue du modèle en pression est mauvaise.

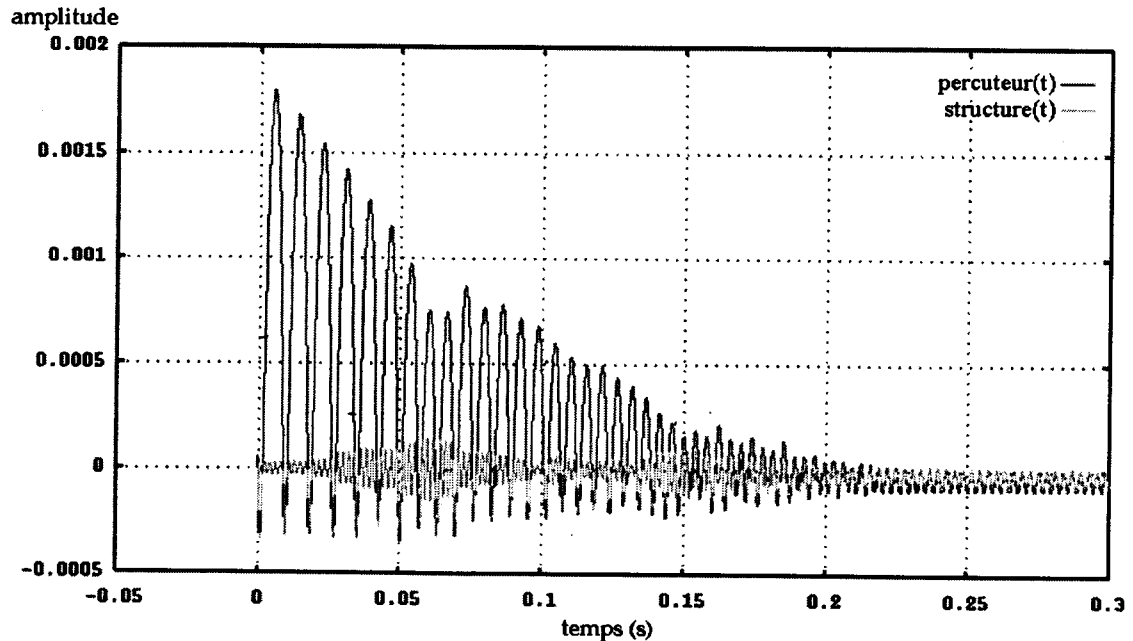


FIG. 12.6 - Amortissement par contacts multiples sur le Xylo : trajectoire du percuteur ( $\text{percuteur}(t)$ ) et trajectoire de la masse percutee de la SV ( $\text{structure}(t)$ ) au cours du temps.

Les gongs sont en général joués avec des têtes lourdes et feutrées. Le feutre a un comportement mécanique bien particulier de relaxation. Nous l'avons montré dans cet ouvrage en y consacrant le chapitre X.

Reprenant un excitateur de masse dense (150 Kg), nous lui avons affecté la liaison d'interaction feutrée (la formulation rhéologique dite liaison de MAXWELL : un ressort en parallèle avec une liaison série frein-ressort). Nous appliquons l'échelon en force. Le son résultant est très convaincant. Nous obtenons un effet de frappe tenue. De plus, on ne perçoit plus l'excitation lors de l'annulation de la force appliquée.



TAB. 12.5 - Sons stressés par contacts multiples : récapitulation

SV	Percussion	$M_p$	$f_p$	$Z_b$	$F_0$	T	$\tau_{\diamond}$ (ms)	$\tau_s$ (ms)	$\tau_a$ (ms)
Bongo	simple	64	150	0	$\emptyset$	$\emptyset$	7,5	0	0
Bongo	tendue	64	150	85 330	-17 067	2	7,5	7,5	0,75
Bongo	interpolation	64	150	85 330	-17 067	de 0,007 à 1,5	7,5	7,5	0,75
Gong	simple	7	700	0	$\emptyset$	$\emptyset$	1,63	0	0
Gong	tendue	7	700	8 600	-180	$\infty$	1,63	78	0,81
Gong	feutrée	7	700	8 600	-180	$\infty$			
Xylo	simple	6	700	0	$\emptyset$	$\emptyset$	1,54	0	0
Xylo	tendue	6	700	2 000	-1 600	2	1,54	7,5	3
Xylo	interpolation	6	700	2 000	-1 600	de 0,005 à 1,5			

Mais, nous nous sommes rendu compte que pour une pression nulle, le timbre était identique ! Le percuteur ne rebondit pas avec ce type d'élément de liaison pour les paramètres proposés.

Le modèle de feutre offre une solution pour obtenir l'effet de frappe tenue sur le Gong, là où le modèle en pression échoue, mais le modèle de feutre ne décrit pas la causalité de la frappe tenue car il est insensible à l'application d'un créneau de force extérieure.

La séquence (CD72) met en jeu quatre simulations. Les trois premières sont issues du modèle en pression : - frappe normale, - frappe stressée, - frappe tenue. La quatrième simulation à frappe tenue est issue du modèle de feutre. L'effet de "frappe tenue" par le modèle en pression est insuffisant. L'effet de "frappe tenue" est bien réalisé dans la quatrième simulation par le modèle de feutre.

## SUR LE XYLO

Le Xylo a fait l'objet du même travail. Partant de la référence du percuteur de raideur médium d'inertie 6 Kg, nous proposons les valeurs suivantes pour obtenir un son stressé :  $F_0=1600$  N,  $Z_b=2000$  Nms<sup>-1</sup>. Les maxima locaux de la trajectoire de la vitesse du percuteur (cf. figure 12.4) décroissent linéairement par rapport au temps.

Deux séries de sons correspondent respectivement à la variation de l'intensité du paramètre  $F_0$  et à la variation du temps T. Deux autres séries montrent l'influence de la viscosité de la butée,  $Z_b$  : - sur la percussion du Xylo avec une frappe tenue (un contact), - sur la percussion du Xylo avec une frappe stressée à contacts multiples.

Nous pouvons ouïr dans la séquence (CD73) différentes percussions sur le Xylo selon l'ordre suivant : - frappe libre, - une série dans laquelle  $F_0$  varie par valeurs décroissantes (donc la fréquence de rappelle), - une série de simulations de frappes stressées à contacts multiples dans laquelle  $Z_b$  varie par valeurs croissantes, - une série de simulations de frappes tenues à un seul contact dans laquelle  $Z_b$  varie par valeurs croissantes, - une série dans laquelle varie T par valeurs décroissantes ; la série est une interpolation de la frappe tenue à la frappe libre.

Reprenant les mêmes paramètres pour la percussion du Xylo ci-dessus, nous avons simulé une percussion à frappe tenue (un contact) pour une valeur de  $F_0$  suffisamment importante. La figure 12.7 est une comparaison entre les sonagrammes des sons : - à percussion simple, -

à percussion en pression à un contact, - à percussion en pression avec contacts multiples sur le Xylo.

On remarque que pour les deux derniers sonagrammes, le mode le plus grave est abaissé. Dans le cas de la pression à un contact, le deuxième mode est très peu excité (non visualisé ici). Dans le cas de la pression à contacts multiples, le deuxième mode est plus excité que pour la percussion simple et il apparaît un transitoire riche en fréquences intermédiaires. On relève également un glissando du fondamental dans les 200 premières millisecondes : à pression constante, la fréquence des chocs augmente.

## CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés au mode de jeu qui consiste à appliquer sur les instruments de percussion à peau une tension sur la membrane par le geste d'excitation (effet de stress).

La variation induite sur le timbre d'une timbale est perçue par l'auditeur et peut constituer un facteur prioritaire de catégorisation. L'information dans le signal qui permet la perception des différents stress n'est pas contenue dans les 60 premières millisecondes de l'attaque.

Nous avons proposé *le modèle en pression*, un modèle simple reproduisant les comportements de timbres stressés. Il s'avère pertinent pour quelques cas. Il a été appliqué à trois instruments virtuels de percussion de type peaux, métaux et bois. Les paramètres des modèles de sons stressés sont récapitulés dans le tableau 12.5. En outre, nous avons donné une démonstration du phénomène d'amortissement brutal dû à la frappe stressée. Une application numérique effectuée sur le Xylo (CA) a confirmé la démonstration. Ce modèle souligne l'importance du modèle de dissipation en cause dans le cas des contacts multiples. Il suggère en amont un modèle de baguette qui puisse faire le lien entre les mouvements basses fréquences de la main et les mouvements hautes fréquences de la structure vibrante.



## **CONCLUSION**

Lorsque ce travail de thèse a débuté en 1996, les recherches menées à l'ACROE sur la chaîne causale de production du son s'étaient développées essentiellement autour :

- (i) de l'interaction gestuelle,
- (ii) de la simulation temps réel synchrone,
- (iii) de modèles de frottement d'archet temps réel,
- (iv) d'analyse mathématique et de modélisation de la structure vibrante (thèse soutenue fin 1996).

Les excitateurs percussifs avaient fait l'objet de quelques investigations mais légères. Un vaste champ à défricher s'offrait.

En outre, nous nous sommes rendu compte que dans la littérature scientifique, les articles concernant la thèse étaient peu nombreux. Nous avons prospecté des articles touchant des domaines divers et traitant indirectement les problématiques de notre sujet.

Appliquant la méthodologie tripartite, signal acoustique, physique des instruments, perception, la difficulté était de créer des jonctions entre des disciplines voisines mais distinctes. Nous avons projeté le phénomène percussif suivant trois directions privilégiées pour tenter d'en extraire la science (l'art ?) de sa genèse : le "génomène".

Dans les sections 1, 2 et 3 de la conclusion, nous établissons un bilan détaillé partie par partie des résultats obtenus. A la section 4, nous donnons des éléments de réponses aux questions et requêtes initiales. Dans la dernière section, nous dégagons quelques perspectives.

## 1. BILAN DE LA PREMIÈRE PARTIE : UN CHAMP D'INVESTIGATION PEU FRÉQUENTÉ

Dans la première partie de la thèse, nous avons porté un regard sur les connaissances actuelles. Nous avons montré comment s'insérait ce travail de recherche dans une problématique plus large : l'ordinateur pour faire de la musique. Nous avons insisté sur la richesse de la relation instrumentale. Nous avons souligné l'importance de la confrontation de l'expressivité de la relation instrumentale avec l'univers de représentation de l'ordinateur. Pour résumer, nous revendiquons :

- (i) une démarche conservatrice (de conservatoire ?) pour retrouver un lien kinesthésique, lien rapidement évincé par les premières technologies audio ;
- (ii) une démarche d'avant-garde pour "virtualiser" l'instrument : ancrer le son dans un univers "sensé", c'est-à-dire régi par des lois physico-perceptives pour mieux modeler et façonner des sons imaginaires (insensés ?).

Nous soulignons la possibilité inédite qui s'ouvre à l'homme : - donner une représentation de l'expression instrumentale, - développer l'expression d'une représentation instrumentale.

Présentant les travaux réalisés à l'Acroe, nous avons rappelé les principes du transducteur gestuel rétroactif. Nous avons montré, en exposant Cordis-Anima, un langage qui donne un cadre formel cohérent à la simulation et la modélisation de l'instrument ; à la simulation et la modélisation de la relation instrumentale au sein de l'ordinateur expansé<sup>14</sup>.

Une étude bibliographique sur la perception des sons percussifs a conduit d'une part :

- à retenir deux attributs sur la notion de timbre : la qualité d'attaque et le degré de brillance corrélés respectivement aux grandeurs acoustiques *logarithme du temps de montée* et *centre de gravité spectral* ;
- à distinguer les sons percussifs résonants et les sons percussifs brefs.

D'autre part, l'étude a pointé la capacité du système auditif pour les sons d'applaudissements :

- à reconnaître une signature individuelle,

<sup>14</sup>étendu à ses périphériques

- à reconnaître le type d'articulation (paume-paume, paume-doigts, doigts- doigts)
- à corrélérer l'image de l'articulation avec le timbre correspondant.

Enfin, sur un ensemble de casseroles percutees par des maillets de différentes raideurs, le système auditif a révélé l'existence d'un attribut perceptif "dureté" corréler avec la raideur des maillets utilisés. Le système auditif a eu également la capacité d'abstraire de l'analyse la variance due à la taille des casseroles alors qu'il n'a pas été trouvé de paramètres acoustiques corréler à la raideur.

L'étude sur les techniques de synthèse a montré de bonnes méthodes pour synthétiser des sons de percussion (table d'ondes aléatoire suivi d'une récurrence atténuant les harmoniques, somme de sinusoïdes exponentiellement amorties, partie déterministe et enveloppe d'amplitude pour la partie résiduelle). Mais elle a montré également des lacunes concernant la prise en compte des transitoires percussifs. Les premières synthèses par modèle physique résumant l'interaction du percuteur à un signal temporel ; le signal est convolué avec la réponse impulsionnelle de la SV. Le percuteur est assimilé à un filtre passe-bas.

Enfin des modèles physiques plus élaborés proposent des interactions similaires aux modèles d'excitateurs de la thèse mais ne proposent pas une simulation "totale" de l'interaction non linéaire.

A partir d'un inventaire des instruments à percussion usuels et des excitateurs correspondants, et suite à une rencontre avec un percussionniste professionnel, nous avons abouti au choix d'une catégorisation fonctionnelle : les instruments à peaux, les bois et les métaux. Les percussionnistes ont une prédilection pour les percussions à peaux, parce qu'elles autorisent l'usage des mains et une variété de timbres plus grande. Les excitateurs en usage sont des baguettes (nom générique) constituée d'une tige et d'une tête. Les principaux paramètres des baguettes sont l'inertie et la raideur ; leurs combinaisons permettent d'exciter avec un volume sonore plus ou moins important soit la fréquence fondamentale, soit les partiels aigus, soit l'ensemble du spectre. Un instrument a en général un type de baguette attitré. Cinq niveaux de duretés de baguette sont en usage chez les musiciens.

## 2. BILAN DE LA DEUXIÈME PARTIE : DES CHOCS VISCOÉLASTIQUES TRÈS BAVARDS

L'oscillateur libre amorti, objet mécanique le plus simple qui donne du son, est une composante importante pour comprendre l'univers des structures vibrantes. Aussi, il semblait intéressant d'étudier l'objet le plus simple qui donne à percuter l'oscillateur libre amorti.

Une masse libre en mouvement rectiligne uniforme, dotée d'un élément butée viscoélastique, en interaction avec la masse de l'oscillateur, tel a été le premier modèle étudié. Nous avons analysé les signaux produits, les percepts émergents et les mécanismes physiques. Cette première investigation a permis également de roder la méthodologie, de bien saisir l'importance des trois domaines de représentation du phénomène sonore. Les domaines ont été mis en correspondance deux-à-deux puis considérés ensemble. Cela fait au total 7 investigations (3 pour chaque domaine, 3 pour l'étude des correspondances deux-à-deux, 1 pour l'ensemble).

De cette étude, travail préliminaire nécessaire, nous avons dégagé 4 formes percussives  $\delta$ ,  $\delta p$ , L, M qui se déclinent dans chaque domaine. L'Attaque peut être un "pic de DIRAC" (imperceptible) ( $\delta$ ), une Attaque "pincée" ( $\delta p$ ), un "choc" basse fréquence (L) ou bien un "choc" avec "modulation fréquentielle en arche" (M). Les transitoires sont bien décrits acoustiquement par le temps de montée, le nombre de contacts et le rapport d'attaque. Les paramètres physiques, rapport des inerties et raideur de liaison, décrivent pertinemment les 4 formes percussives.

Nous avons des formes percussives, un début d'alphabet ; notre désir fut alors de composer des mots. C'est ainsi que nous avons abordé la percussion multiple : appliquer à l'oscillateur libre amorti une succession de percussions élémentaires. C'était oublier la mise en garde de

Pierre SCHAEFFER : « La qualité qui résiste le mieux à l'atomisation est la hauteur. Celle qui résiste le moins est le timbre » [SCHAEFFER 67 (p. 30)].

Tout d'abord, nous avons étudié différentes fréquences d'impacts de percuteurs homogènes et inhomogènes. Lorsque la fréquence d'impact augmente, nous percevons respectivement sur des SV à plusieurs modes : - les impacts un à un, - une granulation d'amplitude, - une granulation de timbre (de hauteur pour une SV unimodale), - une attaque timbrée (fusion).

Ensuite, la question des hauteurs perçues dans le transitoire a été soulevée. Revenant sur le modèle élémentaire, nous avons tiré partie de la ductilité de la synthèse par modèle physique pour établir la faisabilité de percept de hauteur dans un transitoire percussif. Sommes-nous en présence de sons inouïs, d'un cas limite qui n'a pas de référent réel ? Est-il possible avec un instrument réel, ou un ensemble orchestral de créer de telles formes sonores ? Nous avons ici un aperçu de la richesse de la relation bidirectionnelle entre analyse et synthèse, entre musique acousmatique et musique classique. Des motifs mélodiques dans le transitoire percussif d'une SV à un mode ont été réalisés par l' "accordage" des masse et raideur des percuteurs élémentaires successifs.

Enfin, la méthode employée s'est inspirée de la synthèse granulaire. Elle révèle la généralité des réseaux particuliers. La percussion multiple offre une alternative intéressante à la dichotomie entre excitateurs par entretien et excitateurs percussifs. Les racles semblent constituer l'ancrage réel de cette catégorie d'excitation. Puisse cette étude apporter un nouvel éclairage sur les sons entretenus.

La maîtrise du modèle élémentaire de percussion associée à celle de la percussion multiple fournissait alors des éléments tangibles pour l'élaboration de modèles de phonèmes.

A force d'écouter de nombreux transitoires percussifs, force fut de constater que parfois nous tombions sur des figures phonémiques connues. De plus, l'usage des consonnes venait naturellement lorsque l'exercice consistait à communiquer nos travaux à autrui. Les consonnes, qui par excellence sont des transitoires, sont de bonnes candidates pour décrire les transitoires percussifs. Parmi les consonnes, nous avons étudié les consonnes plosives /p/, /t/ et /k/. Dans ce chapitre, nous avons jeté un pont entre la musique vocale et la musique instrumentale. Depuis des siècles, de nombreux musiciens ont dépensé des trésors d'ingéniosité pour imiter la voix humaine, tant par la confection d'instruments, que par l'orchestration ; quelques chanteurs notamment Bobby MCFERRIN ont démontré avec élégance la grande capacité de la voix humaine à imiter les timbres instrumentaux (cf. le cédé remarquable [MCFERRIN et COREA 92]).

Dans ce travail, le rapprochement de l'univers vocal avec l'univers de synthèse instrumental s'est réalisé à trois niveaux. D'une part, nous avons associé des transitoires de percussion à des pseudo-consonnes plosives. D'autre part, nous avons réalisé des percepts de voyelles avec les SV produits, excités par percussions multiples. Ainsi, le formalisme des structures produits est bien adapté aux trames fréquentielles formantiques. Enfin, nous avons montré que des pseudo-phonèmes issus des plosives s'obtenaient par la combinaison : percussion simple, percussion multiple sur une SV produit.

Le rapprochement est inégal suivant les niveaux en cause.

L'étude sur les plosives a permis de corréliser la représentation grossière en terme de sonagramme et la représentation physique causale mais en revanche l'auditeur s'est montré incapable de reconnaître les consonnes de synthèse en contexte isolé.

Le modèle de voyelles et le modèle de pseudo-phonèmes se sont avérés intéressants dans un contexte de création musicale.

La perspective de ces travaux est d'étendre le "répertoire" des instruments CA aux autres catégories de consonnes : fricatives, voisées, nasales, liquides...Il faudra pour cela d'autres systèmes d'excitation comme le frottement d'archet ou l'excitation d'un tube acoustique par une anche.

### 3. BILAN DE LA TROISIÈME PARTIE : EFFETS INSTRUMENTAUX

Si les études jusqu'à présent montraient une certaine richesse d'application des paramètres d'élasticité et d'inertie du percuteur, le paramètre viscosité de liaison avait peu d'influence voire aucune. Or on sait que dans les structures vibrantes la viscosité de liaison a une grande importance. Nous avons donc cherché une liaison dissipative interne au percuteur, mieux adaptée et efficace durant la phase de percussion.

Nous avons été inspirés par le comportement mécanique du feutre : la relaxation. L'aboutissement de ce travail a débouché sur 4 types de résultats.

Premièrement, nous avons accompli des simulations au plus près de l'acoustique instrumentale du piano. Un modèle de marteau de piano incluant la relaxation du feutre, isolé, donne de très bon résultat (interpolation des courbes expérimentales de STULOV, marteaux doux, moyen et dur), plus particulièrement quand la vitesse de frappe varie. La travail a consisté essentiellement à adopter une vision différentielle.

Appliquant ce modèle à des cordes unidimensionnelles, ce qui constituait une nouveauté dans le domaine de la synthèse de sons de piano, nous n'avons pas pu toutefois démontrer la validité perceptive du LIA de relaxation. En revanche, les timbres obtenus, en particulier quand la vitesse de frappe augmente, sont satisfaisants. La présence de la non-linéarité en puissance dans l'interaction est fondamentale.

Nous suggérons que l'étude se poursuive sur des cordes non-linéaires ; l'effet sonore du LIA de relaxation, outre l'effet sur le contrôle gestuelle, devrait alors apparaître.

Deuxièmement, nous avons de façon empirique exploré les paramètres du percuteur "marteau de piano" à travers la percussion de plusieurs structures vibrantes. Cette investigation a montré l'importance de la non-linéarité en puissance. Nous n'avons pas trouvé de catégorie dédiée à la relaxation exceptée une catégorie singulière : lors du deuxième contact sont étouffés les partiels excités par le premier contact. Ceci a suggéré le chapitre sur l'amortissement par pression.

Troisièmement, la viscoélasticité série, pièce maîtresse de la relaxation, a soulevé un problème à deux faces :

- (i) une face technique : simuler une masse d'inertie très faible, augmenter considérablement la fréquence d'échantillonnage,
- (ii) une face théorique au sein du langage CA : assembler deux LIA, mémoriser un état au sein d'un LIA.

Le deuxième aspect a fait l'objet d'un chapitre de la thèse. C'est dire son importance.

Quatrièmement, à partir de l'ensemble des investigations sonores du modèle de marteau de piano, nous avons dégagé les heuristiques suivantes : (i) le rapport d'attaque joue un rôle de balance perceptive entre transitoire et résonance ; (ii) le cgs et la variation temporelle du cgs liés respectivement à la brillance et à la variation de la brillance sont de bons concepts pour caractériser l'attaque percussive.

Dans le chapitre suivant, nous avons conclu à l'impossibilité de représenter la viscoélasticité série dans le langage CA. Pour ce faire, nous avons pointé les différences entre le formalisme des réseaux de KIRCHHOFF et des réseaux de CA. Chaque réseau a été défini formellement, ainsi que la mécanique de Newton. Puis CA est décrit à partir du langage des réseaux de K et réciproquement. Nous avons proposé un langage commun et une présentation unifiée des formalismes K, CA et N. Nous avons montré en quoi la viscoélasticité série était en contradiction avec le formalisme actuel de CA : mémorisation dans un LIA alors que seuls les MAT contiennent l'information sur l'état du système dynamique.



Après la dissipation par relaxation, nous avons porté notre attention sur une forme de dissipation à une échelle de temps plus grande : l'effet de stress. Les instruments à peaux constituent un riche répertoire de gestes percussifs. Les percussionnistes accordent de l'importance à ces types d'instruments. Comme nous recherchions des mécanismes d'absorption énergétique, les timbres stressés ont fait l'objet d'une attention particulière dans le dernier chapitre.

Dans un premier temps, ayant constitué un corpus de sons réels stressés sur une timbale avec plusieurs types de baguettes, nous avons réalisé une expérience psychoacoustique qui a montré :

- (i) d'une part que malgré la variation du lieu de frappe, la variable "stress" est un facteur prioritaire de catégorisation ;
- (ii) d'autre part que l'audition des 60 premières millisecondes de timbre stressé ne permet pas d'induire le degré de stress.

Dans un deuxième temps, un modèle de percussion stressée a été proposé (modèle en pression). Appliqué à trois SV virtuels, Xylo, Bongo et Gong, il s'est révélé pertinent pour quelques cas. Des artefacts sont apparus et suggèrent l'utilité d'un modèle plus complet intégrant la fonction "tige".

Dans un troisième temps, nous avons donné une démonstration du phénomène d'amortissement brutal par chocs visqueux successifs. Une simulation effectuée sur le Xylo avec le modèle en pression a conforté la démonstration.

## 4. ELÉMENTS DE RÉPONSE AUX OBJECTIFS DE LA THÈSE

La thèse comportait principalement deux objectifs. Premièrement, il s'agissait de contribuer à une meilleure connaissance des excitateurs percussifs, déclinée suivant les domaines respectifs de la physique des instruments, des signaux sonores et de la psychoacoustique. Nous avons mis l'accent sur la représentation de la physique des instruments en termes d'éléments rhéologiques physicaux (CA). Deuxièmement, le travail devait déboucher sur des excitateurs virtuels certes mais bien réels quand à leurs possibilités de jeu : un outil pour la création musicale.

Le premier objectif de la thèse posait trois questions :

- (i) l'existence d'attributs perceptifs dédiés aux sons percussifs ;
- (ii) l'existence de corrélation entre représentation physique et représentation perceptive d'un phénomène percussif ;
- (iii) l'existence d'invariants liés à la nature de l'excitateur percussif indépendamment de la SV percutée, en outre la reconnaissance de l'excitateur à travers plusieurs SV percutées.

### 4.1. L'EXISTENCE D'ATTRIBUTS PERCEPTIFS DÉDIÉS AUX SONS PERCUSSIFS

A partir des attributs *brillance* et *qualité d'attaque*, valable pour les timbres instrumentaux, les articles mentionnés dans la thèse sur la synthèse de timbre de percussion suggèrent que le timbre (partie résonance) puisse s'obtenir par décroissance de la brillance au cours du temps et par décroissance exponentielle des intensités des composantes du son.

Au cours de nos expériences, nous avons utilisé avec bonheur l'attribut *brillance* et l'attribut *qualité d'attaque*. Cependant, d'autres attributs spécifiques aux transitoires percussifs sont nécessaires. Notamment, la prise en compte de la *brillance* du transitoire et de son rapport avec la *brillance* de la résonance (ce qui distingue les percepts /p/,/t/ et /k/). Un attribut lié au paramètre *rapport d'attaque* est également important. Ce dernier joue un rôle de balance perceptive. L'Attaque peut être ainsi noyée par l'amplitude de la résonance ou à l'autre extrême amplifiée jusqu'à la dissociation perceptive de l'Attaque et de la Résonance.

Dans le cas particulier où la fréquence d'un mode de la SV est inférieure à la fréquence du mode le plus grave du système percuteur-SV couplé, il peut se produire plusieurs contacts. L'attribut lié aux nombres de contacts est dans ce cas important.

Les plosives /p/, /t/, /k/ puisque non reconnues isolément ne constituent pas semble-t-il des attributs dédiés aux sons percussifs. Cependant, nous n'excluons pas qu'avec un peu d'apprentissage les sujets reconnaissent dans un contexte isolé les plosives comme des formes de transitoires percussifs.

#### 4.2. L'EXISTENCE DE CORRÉLATIONS ENTRE REPRÉSENTATION PHYSIQUE ET REPRÉSENTATION PERCEPTIVE D'UN PHÉNOMÈNE PERCUSSIF.

Les corrélations de ce type se retrouvent très naturellement dans le langage des percussionnistes. Nous avons décrit quelques principes : A inertie similaire, le volume sonore est plus important pour une vitesse de frappe plus élevée. A tête de raideur importante, le son contient plus d'aiguës...

A la limite, tous les modèles présentés dans la thèse, puisque construits suivant les contraintes de la physique de Newton, sont des exemples de corrélations entre représentation physique et représentation perceptive. Relevons les plus convaincants :

- (i) Concernant la percussion élémentaire, les formes  $\delta$ ,  $\delta p$ , L et M assurent une bonne correspondance entre percept d'attaque et paramètres de production.
- (ii) Le modèle physique de production des consonnes plosives est intéressant car il apporte une alternative au modèle physique de l'articulation phonatoire.
- (iii) Quelques timbres stressés ont été synthétisés par le modèle en pression. La dissipation dans la relation d'interaction devient alors un paramètre sensible.
- (iv) Des exemples de racles ont été générés par les modèles de percussion multiple.

#### 4.3. L'EXISTENCE D'INVARIANTS LIÉS À LA NATURE DE L'EXCITATEUR PERCUSSIF INDÉPENDAMMENT DE LA SV PERCUTÉE, LA RECONNAISSANCE DE L'EXCITATEUR À TRAVERS PLUSIEURS SV PERCUTÉES.

Nous n'avons pas ou peu réalisé d'études dans lesquelles la SV variait par rapport à un EX fixe. Aussi, nous avons peu d'éléments de réponses à cette troisième question.

De la littérature, une expérience a montré l'existence d'un invariant dureté indépendamment de la taille des casseroles percutees. Les auditeurs ont eu la capacité de reconnaître à travers plusieurs casseroles la raideur du maillet utilisé. De même, dans une plus faible mesure, les auditeurs ont induit des configurations de frappe dans les applaudissements.

Pour notre part, nous avons montré que les timbres stressés de timbale ont été catégorisés indépendamment de la variation du lieu d'excitation.

Dans une approche simple des consonnes plosives (travaux de Cooper), les percepts /p/, /t/ et /k/ synthétisés par notre modèle sont liés à la nature de l'EX et non des SV voyelles sollicitées. On objectera que les SV doivent être excitées ensuite par une percussion multiple.

Le deuxième objectif de la thèse comportait quatre requêtes ; obtenir :

- (i) des modèles en référence au monde instrumental réel.
- (ii) des modèles qui offrent une relation instrumentale cohérente ; qui assurent une médiation entre le geste humain et la structure vibrante.
- (iii) des modèles qui s'intègrent dans la perspective du temps réel.
- (iv) des modèles de percuteurs qui développent toutes les potentialités sonores d'une SV.

#### 4.4. DES MODÈLES EN RÉFÉRENCE AU MONDE INSTRUMENTAL RÉEL

En termes de timbres de sons de percussion, nous avons construit trois modèles de SV, Xylo, Gong, et Bongo, évoquant respectivement le bois, le métal et la peau percusés.

Les pseudo-phonèmes synthétisés au chapitre IX ne sont pas des références instrumentales mais ils constituent des références vocales.

Le modèle de marteau de piano élaboré a été calibré en fonction de courbes expérimentales bien précises. Il est possible de l'utiliser à des fins de simulation du "roi des instruments". Il inclut le comportement de relaxation du feutre ainsi que le comportement de réflexion du front d'onde sur le marteau.

Il est possible également de simuler avec ce modèle des baguettes dont la tête est feutrée.

Enfin, nous avons montré comment simuler l'effet instrumental de stress à l'aide du modèle en pression.

#### 4.5. DES MODÈLES QUI OFFRENT UNE RELATION INSTRUMENTALE COHÉRENTE ; QUI ASSURENT UNE MÉDIATION ENTRE LE GESTE HUMAIN ET LA STRUCTURE VIBRANTE.

Le modèle en pression permet de simuler tous les intermédiaires de frappe, de la frappe tenue à la frappe libre telle qu'il est en usage chez les percussionnistes sur les instruments à peau. Ce modèle s'étend à d'autre type de percussions. Même si actuellement il fait appel à un fichier geste, nous espérons un usage de ce modèle en temps réel.

#### 4.6. DES MODÈLES QUI S'INTÈGRENT DANS LA PERSPECTIVE DU TEMPS RÉEL.

La plupart des modèles décrits sont peu coûteux en temps de calcul. Le coût du module ad'hoc de relaxation ne dépasse pas le coût de calcul de deux MAT. Par contre, la simulation d'un module de relaxation non-ad'hoc est un échec de ce point de vue. Les ordres de grandeur impliquent une fréquence d'échantillonnage trop importante.

#### 4.7. DES MODÈLES DE PERCUTEURS QUI DÉVELOPPENT TOUTES LES POTENTIALITÉS SONORES D'UNE SV.

A partir de l'étude de la percussion d'un oscillateur par une butée plus une masse, nous avons exploré de manière exhaustive toutes les potentialités sonores de cet instrument.

De même, le modèle de marteau de piano appliqué à différentes cordes unidimensionnelles a fait l'objet de nombreuses expérimentations visant l'exhaustivité.

Dans ce cadre, l'étude sur l'isorésonance reportée en annexe apporte un espoir pour systématiser ce type de démarche. La constitution de classes de sons isorésonants fait ressortir par contraste la variété des transitoires du modèle étudié.

### 5. PERSPECTIVES

#### 5.1. EN AMONT, LA RELATION AVEC LE GESTE

Travaillant sur l'excitateur et sur la relation entre excitateur et structure vibrante, nous avons négligé, plus précisément éludé la relation geste-excitateur. Le travail sur les excitateurs modélisés avec labeur suivant les lois de la physique élémentaire révélera toute sa portée lorsque

ces modèles seront utilisés en temps réel à l'aide du transducteur gestuel rétroactif. Le prolongement le plus logique de ce travail est d'expérimenter les modèles de percuteurs en situation instrumentale multisensorielle (interface mécanique et son). Le lien kinesthésique apportera certainement des contraintes supplémentaires sur les paramètres physiques. Cependant, le contrôle gestuel en situation instrumentale, c'est-à-dire avec un synchronisme rigoureux du son produit, est une prospection très efficace.

Si le temps réel s'impose pour la suite de l'investigation sur les excitateurs percussifs, l'investigation à temps différé peut être grandement facilitée par un outil d'édition du geste. Jusqu'à présent, le geste se réduisait à la donnée d'une vitesse initiale sur un MAT (Percuteur élémentaire), soit à l'application d'un créneau en force (modèle en pression). Une nouvelle version du modèleur-simulateur est en cours dans laquelle des fichiers "gestes" alimentent les LIA dégénérés : entrée en force et entrée en position. Nous espérons avec ce nouvel outil aboutir à des frappes stressées plus réalistes.

Comme le suggère l'investigation sur les timbres stressés, le modèle d'excitateur à un seul MAT est insuffisant lorsque l'on souhaite agir avec un geste sur l'excitateur. L'abîme fréquentiel entre le geste et la SV exige un médiateur : un système de tige. Aussi, nous aurions aimé étudier le modèle suivant échafaudé à partir de la métaphore de la baguette : un modèle unidimensionnel à trois MAT. Le premier MAT dispose d'une entrée gestuelle en position ; le deuxième MAT d'une entrée gestuelle en force ; le troisième MAT agit sur la SV par l'intermédiaire d'un LIA de type viscoélastique non-linéaire (en puissance) avec relaxation. Les trois MAT reliés deux à deux par des LIA viscoélastiques, il se distingue ainsi une partie tige sur lequel l'opérateur intervient en position et en force simultanément et une partie tête dédiée à l'interaction avec la structure vibrante.

## 5.2. POURSUITE DU TRAVAIL SUR L'EXCITATEUR

En s'appuyant sur le répertoire traditionnel des excitateurs percussifs, l'effort de transposer dans l'univers de synthèse un excitateur réel original est toujours constructif. Notamment, un sujet de recherche intéressant serait d'étudier les balais. Le comportement statistique des différents éléments du balai éclairera certainement les rapports entre processus d'entretien et processus percussif.

De même, nous en sommes convaincus, le travail sur les corrélations entre consonnes et modèles d'excitations devrait être riche d'enseignement : fricatives, voisées, nasales, liquides... L'étude portera sur des systèmes d'excitation divers comme le frottement d'archet ou l'excitation d'un tube acoustique par une anche. De plus, les compositeurs seront certainement intéressés par ces modèles notamment pour la création d'œuvres lyriques.

## 5.3. EN AVAL, LA RELATION AVEC LA STRUCTURE VIBRANTE

Jusqu'à présent, la plupart des recherches de l'Acroe en synthèse sonore ont opéré dans un espace de mouvements unidimensionnels. Les modèles d'excitateur de la thèse sont eux-aussi circonscrits à cette espace. Ils bénéficient d'une simplification des comportements. Cependant, les aspects géométriques sont mis un peu de côté. Nous savons que les baguettes de caisse claire, les baguettes en bois, ont des formes d'olives plus ou moins allongées et plus ou moins volumineuses. La baguette de timbale est très volumineuse. La non-linéarité de la butée en 1,5 d'après la théorie de HERTZ provient de considérations géométriques simples sur les surfaces en contact. La prise en compte d'un espace des mouvements à deux ou trois dimensions devrait permettre d'étudier l'influence des caractéristiques géométriques de la tête des percuteurs.

Sur le terrain, il s'est avéré pertinent de restreindre l'espace des mouvements à une seule dimension dans une première phase exploratoire de CA, aussi bien pour les chercheurs que pour les compositeurs d'ailleurs. Cela ne doit pas exclure non plus dans le futur de dépasser les

trois dimensions de l'espace courant ou bien d'envisager des dimensions intermédiaires comme nous le trouvons dans des formes fractales de la nature.

Toutefois, le saut qualitatif entre une dimension pour le mouvement et plusieurs est important. Les LIA élastiques ont alors une longueur au repos et un comportement non-linéaire.

Nous regrettons que le temps nous ait manqué pour explorer le modèle de marteau feutré sur des SV non-linéaires qui offrent une résistance à l'allongement, fonction de la quantité d'énergie vibratoire de la SV.

Une autre perspective est donnée dans la complexification de l'instrument. La prise en compte de la partie résonateur (environnement local) permettrait d'analyser et de simuler l'effet "rimshot", percussion d'un instrument à peau à l'aide d'une baguette. La baguette percute deux endroits simultanés : le lieu de frappe usuel et le bord de l'instrument. ■



# ANNEXES

## Sommaire des annexes

A. Bibliographie.....	159
B. Isorésonance.....	165
C. Suppléments divers.....	171
D. Table des illustrations et des tableaux.....	177
E. Index des mots clés.....	179
F. Table des matières.....	180
G. Livret du cédé audionumérique.....	187

---

# ANNEXE A

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [APPELMAN, 67] Appelman, D-R. *The Science of Vocal Pedagogy*. Bloomington (Indiana) : Indiana University Press, 1967.
- [ASKENFELT&JANSSON, 93] Askenfelt, Anders, et Erik Jansson. "From touch to string vibrations. III: String motion and spectra." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93(4), 1993, pp. 2181-2195.
- [BOITE&NEIRYNCK, 83] Boite, R., et J. Neiryck. "Théorie des réseaux de Kirchhoff." Dans *Traité d'Electricité, d'Electronique et d'Electrotechnique*, édité par Dunod, pp 1-25. : Presses polytechniques romandes, 1983.
- [BOUTILLON, 88] Boutillon, Xavier. "Model for piano hammers: Experimental determination and digital simulation." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83(2), 1988, pp. 746-754.
- [BOUTILLON, 90] Boutillon, Xavier. "Apperçu général sur les modèles physiques de piano." Article présenté au colloque *Modèles physiques, création musicale et ordinateur*, Grenoble, septembre 1990, pp. 41-59.
- [CADOZ, 79] Cadoz, Claude. "Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, application aux sons musicaux." - Grenoble, Thèse d'état : Electronique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979.
- [CADOZ&al., 81] Cadoz, Claude, Annie Luciani, et Jean-Loup Florens. "Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental." *Revue d'acoustique*, vol. 59, 1981, pp. 279-292.
- [CADOZ&al., 88] Cadoz, Claude, Leczek Lisowski, et Jean-Loup Florens. Clavier rétroactif modulaire et actionneur modulaire plat - Brevet Français n°88 14064 - déposé le 13/10/88. Extension Brevet International - 1989.
- [CADOZ&al., 90] Cadoz, Claude, Annie Luciani, et Jean-Loup Florens. "Cordis-Anima : Système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée." Article présenté au colloque *Modèle physique, création musicale et ordinateur*, Grenoble 1990, pp. 585-628.



- [CADOZ&al., 93] Cadoz, Claude, Annie Luciani, et Jean-Loup Florens. "Cordis-Anima : a Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis - The General Formalism." *Computer Music Journal*, vol. 17(4), 1993.
- [CADOZ, 94] Cadoz, Claude. "Simuler pour connaître, connaître pour simuler. Réflexion sur la représentation, la modélisation, la simulation et la création avec l'ordinateur." Article présenté au colloque *Modèle physique, création musicale et ordinateur*, Grenoble 1990, pp. 661-708.
- [CADOZ, 99] Cadoz, Claude. "Musique, geste, technologie." Dans *Les nouveaux gestes de la musique*, édité par Hugues Genevois et Raphaël de Vivo, pp. 47-92. Marseille : Parenthèses, 1999.
- [CHAIGNE&ASKENFELT, 94] Chaigne, Antoine, et A. Askenfelt. "Numerical simulations of piano strings. Part I. A physical model for struck string using finite difference methods." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 2, 1994, pp. 1112-1118.
- [CHAIGNE&DOUTAUT, 97] Chaigne, Antoine, et Vincent Doutaut. "Numerical simulations of xylophones. I. Time-domain modeling of the vibrating bars." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101(1), 1997, pp. 539-557.
- [CHEN&DONOHO, 95] Chen, S., et D. L. Donoho. "Atomic decomposition by basis pursuit.", Stanford University, Statistics Department, Stanford, 1995.
- [COOPER&al., 52] Cooper, Franklin, Delattre, Liberman, Borst, et Gerstman. "Some Experiments on the Perception of Synthetic Speech Sounds." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 24(6), 1952, pp. 597-606.
- [DELATTRE&al., 55] Delattre, P-C, A. M. Liberman, et F. S. Cooper. "Acoustic loci and transitional cues for consonants." *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 27, 1955, pp. 769-773.
- [DJOHARIAN, 93] Djoharian, Pirouz. "Generating Models for Modal Synthesis." *Computer Music Journal*, vol. 17(1), 1993, pp. 57-65.
- [DJOHARIAN, 96] Djoharian, Pirouz. "Amortissement dans les phénomènes vibratoires.", rapport interne, ACROE, Grenoble, 1996.
- [DONNADIEU&al., 94] Donnadieu, Sophie, Steve McAdams, et S. Winsberg. "Caractérisation du timbre des sons complexes. Analyse multidimensionnelle." *Journal de physique IV*, vol. 4, 1994, pp. C5-593, C5-596.
- [DOUTAUT, 94] Doutaut, Vincent, et Antoine Chaigne. "Numerical simulations of bar percussion instruments." Article présenté à *Journal of physique IV*, 1994.
- [DOUTAUT, 96] Doutaut, Vincent. "Etude expérimentale et simulations numériques d'instruments de percussion à clavier." - Paris, Spécialité Signal et Image, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 1996.

- [FLORENS, 78] Florens, Jean-Loup. "Coupleur gestuel interactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés en temps réel." - Grenoble, Thèse de docteur ingénieur : Electronique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1978.
- [FONTANA&ROCCHESO, 98] Fontana, Federico, et David Rocchesso. "Physical Modeling of Membranes for Percussion Instruments." *Acustica, acta acustica*, vol. 84(3), 1998, pp. 529-542.
- [FOURCADE, 95] Fourcade, Patrick. "Synthèse sonore par modèle physique - étude de la percussion.", Rapport de DEA, ATIAM - ACROE, Grenoble, 1995.
- [FOURCADE&CADOZ, 96a] Fourcade, Patrick, et Claude Cadoz. "Sound Synthesis by Physical Modelling: an Elementary Striker." Article présenté au *Forum Acusticum*, Antwerpen (Belgium) 1996.
- [FOURCADE&CADOZ, 96b] Fourcade, Patrick, et Claude Cadoz. "Synthèse sonore par modèle physique : étude d'un percuteur élémentaire." Article présenté aux *Journées d'Informatique Musicale*, Caen 1996, pp. 301-312.
- [FOURCADE&al., 99] Fourcade, Patrick, Sylvain Mangiarotti, et Claude Cadoz. "Generating pitches transients by a percussive excitation." Article présenté à *The International Computer Music Conference*, Beijing (China), 22-27 octobre 1999, pp. 82-84.
- [FOURCADE&CADOZ 99] Fourcade, Patrick, et Claude Cadoz. "Generating /p/, /t/, /k/ consonants by a physical modelling of musical percussion." Article présenté au *Eight International Workshop on the Cognitive Science of Natural Language*, Galway (Irland), 9-11 August 1999.
- [FREED, 90] Freed, Daniel. "Auditory correlates of perceived mallet hardness for a set of recorded percussive sound events." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87(1), 1990, pp. 311-322.
- [GIBSON, 66] Gibson, J.J. *The senses considered as perceptual systems*. Boston : Houghton Mifflin, 1966.
- [GREY, 77] Grey, J-M. "Multidimensional perceptual scaling of musical timbres." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, 1977, pp. 1270-1277.
- [GRIBONVAL, 96] Gribonval, Rémi. "Sound Signals Decomposition Using a High Resolution Matching Pursuit." Article présenté à *The International Computer Music Conference*, Hong Kong (Japan), August 1996, pp. 293-296.
- [GROSSER, 0000] Grosser, Anne-Marie. *Le geste instrumental*. Paris : Alphonse Leduc, 0000.

- [HABIBI, 97] Habibi, Arash. "Modèles physiques pour la visualisation d'objets très déformables : Relation, mouvement - forme - image." - Grenoble, Thèse de docteur ingénieur : Informatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.
- [HALL&ASKENFELT, 88] Hall. "Piano string excitation II: General solution for a hard narrow hammer." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 81(2), 1987, pp. 535-539.
- [HALL, 87] Hall, Donald E., et Anders Askenfelt. "Piano string excitation V: Spectra for real hammers and strings." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83(4), 1988, pp. 1627-1638.
- [HAYASHI&al., 99] Hayashi, Eiji, Masami Yamane, et Hajime Mori. "Behavior of piano-action in a grand piano. I. Analysis of the motion of the hammer prior to string contact." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105(6), 1999, pp. 3534-3544.
- [INCERTI&CADOZ, 95] Incerti, Eric, et Claude Cadoz. "Topology, Geometry, Matter of Vibrating Structures Simulated with Cordis-Anima Sound Synthesis Methods." Article présenté à The International Computer Music Conference, Banff (Canada), 1995, pp. 96-103.
- [INCERTI, 96] Incerti, Eric. "Synthèse de sons par modélisation physique de structures vibrantes : application pour la création musicale par ordinateur." - Grenoble, Thèse de docteur ingénieur : informatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [JIMENEZ, 93] Jimenez, Stéphane. "Modélisation et simulation physique d'objets volumiques déformables complexes." - Grenoble, Thèse de docteur ingénieur : Informatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993.
- [KARPLUS&STRONG, 83] Karplus, Kevin , et Alex Strong. "Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres." *Computer Music Journal*, vol. 7(2), 1983, pp. 43-55.
- [KRIMPHOFF&al., 94] Krimphoff, J., Steve McAdams, et Winsberg. "Caractérisation du timbre des sons complexes: II Analyses acoustiques et quantification psychophysique." *Journal de physique IV*, vol. 4 (Suppl. JP III, Colloque C5), 1994.
- [KRUMHANSL, 89] Krumhansl, C. L. "Why is musical timbre so hard to understand ?" *Structure and perception of electroacoustic sound and music*, vol. 846, 1989, pp. 43-53.
- [LAROUCHE, 89] Laroche, Jean. "The use of PRONY's method for the analysis of musical sounds. Application to percussive sounds." Article présenté à *The International Computer Music Conference*, San Francisco (USA), 1989.

- [LAROCHÉ, 94] Laroche, Jean. "The use of the matrix pencil method for the spectrum analysis of musical signals." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 4, 1994, pp. 1958-1965.
- [LINDBLOM, 63] Lindblom, B. "On vowel reduction." Technical Report 29, Speech Transmission Laboratory - Department of Speech Communication and Music Acoustics - KTH, Stockholm - Sweden, 1963.
- [MALLAT&SHANG, 93] Mallat, S., et Z. Shang. "Matching Pursuit with time-frequency dictionaries." Article présenté à IEEE Trans. Signal Process., Décembre 1993, pp. 3397-3415.
- [MANGIAROTTI, 97] Mangiarotti, Sylvain. "Etude de l'attaque d'un son non-entrenu à partir d'excitateurs multi-percussionnels." Rapport de stage, ACROE, Grenoble, 1997.
- [MCFERRIN&COREA, 92] McFerrin, Bobby, et Chick Corea. Play, Capitol Records, disque de musique, Blue Note, Réf. : CDP 7 95477 2.
- [NATTIEZ, 76] Nattiez, Jean-Jacques. Fondements d'une sémiologie de la musique. Edité par l'Union Générale d'Editions, 1976.
- [NEAGU, 1998] Neagu, Adrian. "Représentations phonétiques et identifications des syllabes occlusives-voyelle en français." - Grenoble, Thèse de docteur ingénieur : signal-image-parole, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.
- [NOURI, 95] Nouri, Jamel. "Etude pour la conception de transducteurs gestuels à retour d'effort et de modèles de systèmes mécaniques pour leur contrôle." - Grenoble, Thèse de docteur ingénieur : signal-image-parole, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1995.
- [PARTCH, 49] Partch, Harry. Genesis of a Music. new york : Da Capo Press, 1949.
- [RABOTNOV, 77] Rabotnov, J-N. Elements of Hereditary Mechanics of Solids. Moscow : Nauka, 1977.
- [RAMDANE, 91] Ramdane, Abdessamed. "Modèles numériques de structures vibrantes mono- et bidimensionnelles pour la synthèse sonore par modèle physique." - Paris, Thèse de docteur ingénieur : Signal et Images, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 1991.
- [RAOULT, 91] Raoult, Olivier. "Etude des oscillateurs numériques", Rapport de recherche, ACROE, Grenoble, 1991.
- [REPP, 87] Repp, Bruno. "The sound of two hands clapping: An exploratory study." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 81(4), 1987, pp. .
- [RHAOUTI&al., 99] Rhaouti, Leïla, Antoine Chaigne, et Patrick Joly. "Time-domain modeling and numerical simulation of a kettledrum." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105(6), 1999, pp. 3545-3562.

- [RUSSELL&ROSSING, 98] Russell, D., et T. Rossing. "Testing the Nonlinearity of Piano Hammer Using Residual Shock Spectra." *Acustica - acta acustica*, vol. 84, 1998, pp. 967-975.
- [SCHAEFFER, 66] Schaeffer, Pierre. *Traité des objets musicaux*. Aux éditions Seuil. Paris, 1966.
- [SCHAEFFER, 67] Schaeffer, Pierre. *Solfège de l'objet sonore*. Édité par Bayle-Tanguy-Ducarne. nouvelle édition, 1998 éd. Paris : Ina-GRM, 1967.
- [SCHAEFFNER, 68] Schaeffner, André. *Origine des instruments de musique, Introduction ethnologique à l'histoire de la musique instrumentale*. deuxième édition, 1994 éd. Paris : Ecole des hautes-études en sciences sociales, 1968.
- [SERRA&SMITH, 90] Serra, Xavier, et Julius Smith. "Spectral Modeling Synthesis: A Sound Analysis/Synthesis System Based on a deterministic plus Stochastic Decomposition." *Computer Music Journal*, vol. 14(4), 1990, pp. 12-24.
- [SISI, 81] Sisi, Jean-Charles. *principes de thermodynamique*. Aux éditions McGraw-Hill. Québec (Canada), 1981.
- [STULOV, 95] Stulov, Anatoli. "Hysteretic model of the grand piano hammer felt." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97(4), 1995, pp. 2577-2585.
- [SUSUKI, 87] Susuki, Hideo. "Model analysis of a hammer-string interaction." *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 82(4), 1987, pp. 1145-1151.
- [SUSUKI&NAKAMURA, 90] Susuki, Hideo, et Isao Nakamura. "Acoustics of Pianos" *Applied Acoustics*, vol. 30, 1990, pp. 147-205.
- [TALPAERT, 91] Talpaert, Yves. "Principes fondamentaux de la dynamique du point" Dans *Mécanique générale et analytique*, aux éditions Cepadues, chap. , pp. 21-38. Toulouse, 1991.

# METHODE D'ANALYSE DES EXCITATEURS PERCUSSIFS PAR ISORESONANCE

---

## INTRODUCTION

Nous décrivons une méthode d'analyse des excitateurs percussifs adaptée à la synthèse par modèle physique. La question qui permet d'élaborer cette méthode est la suivante : Etant donné un instrument à percussion, est-il possible de produire deux sons qui ne diffèrent que par leur transitoire d'attaque, les parties *résonances* restant identiques ?

Les motivations au départ sont de natures psychoacoustiques. Dans le but d'étudier l'influence de l'Attaque par percussion il est intéressant de constituer un corpus de stimuli qui neutralise la variance de la partie *résonance* des stimuli. Nous rappelons que la résonance est la partie vibrante passive après l'interaction percussive. Nous qualifions d'*isorésonants* deux sons percussifs qui présentent les mêmes signaux acoustiques de résonance. Au niveau perceptif, nous qualifions d'Isorésonants avec un I majuscule deux sons percussifs qui ont le même percept de résonance.

Le travail sur l'isorésonance est le fruit d'une collaboration avec Sylvain BRAUD, stagiaire à l'Acroe durant l'été 1998.

Dans un premier temps, nous relevons quelques difficultés pour constituer un corpus de sons isorésonants et notons les possibilités qu'offrent la synthèse par modèle physique. Dans un deuxième temps, nous exposons la méthode pas à pas. Puis, nous montrons une application réalisée sur le Xylo en explorant trois paramètres du modèle de percuteur élémentaire. Enfin nous concluons sur les suites à donner à ce travail.

## 1. ISOLER LE TRANSITOIRE SANS DESTRUCTURER/DENATURER LA PERCUSSION : AVANTAGE DE LA SYNTHÈSE PAR MODÈLE PHYSIQUE

L'étude des phénomènes percussifs dans les instruments de percussion conduit aux interrogations suivantes :

- (i) Comment le système perceptif appréhende les transitoires percussifs ?
- (ii) Quels attributs sont spécifiques aux transitoires (nous posons l'hypothèse de leur existence) ?
- (iii) Quelles informations sur la nature de l'excitateur ou du geste excitateur l'auditeur peut-il extraire à partir de ces attributs ?

Répondre à ces questions n'est pas facile. La perception sonore procède tantôt d'une démarche intégrale, tantôt d'une démarche analytique. Souvent, le psychoacousticien est partagé entre deux méthodes. Soit il constitue un corpus de sons réels dans lequel il peut

exister des facteurs cachés qui biaisent l'expérience ; soit il constitue un corpus de sons synthétiques qui présentent une meilleure caractérisation objective mais présentent le risque de supprimer des traits pertinents ou de sortir du contexte environnemental de l'homme.

### 1.1. OBSTACLES A LA CONSTITUTION DE CORPUS ISORESONANT DANS LES INSTRUMENTS REELS

La réalisation de sons Isorésonants ou inversement de sons à Attaque identique, toutes choses variant par ailleurs, est difficile dans le monde réel. Enonçons quelques arguments :

- (i) L'existence de facteurs ou paramètres cachés.  
L'instrumentiste ne maîtrise pas tous les paramètres de jeux. Pour deux exécutions identiques d'après l'instrumentiste, les sons peuvent être différents et cette différence peut jouer un rôle dans la perception des transitoires.
- (ii) Une reproduction difficile.  
L'instrumentiste a des difficultés à produire le même geste d'excitation. Il en résulte des attaques ou des résonances non identiques.
- (iii) Des non-linéarités dans l'instrument et dans le système de traitement de l'information auditive.  
Il est possible qu'il existe des comportements non-linéaires dans l'instrument percuté. Dans ce cas, les différences de jeux peuvent se traduire physiquement par de grands écarts au niveau acoustique. Nous savons également que le système auditif ne fonctionne pas de manière linéaire.
- (iv) La disparité des excitateurs percussifs.  
Il est difficile de trouver des excitateurs percussifs qui ont des caractéristiques physiques bien distribuées.

### 1.2. L'ISORESONANCE EN CORDIS-ANIMA

Le langage de modélisation physique CA a l'avantage de conserver les propriétés des sons synthétiques dans la caractérisation objective de leurs composants. De plus, il conserve une part des propriétés des sons d'origine naturelle dans la cohérence transitoire-résonance ; CA conserve une certaine organicité du son.

La cohérence du mécanisme excitatoire et le contrôle rigoureux de la variance de la résonance permettent de générer des classes de sons isorésonants.

## 2. REALISATION DE CLASSE DE SONS ISORESONANTS

Pour réaliser des sons isorésonants, nous procédons suivant les étapes données dans la figure AN.1. Nous restreignons la méthode à une seule structure vibrante SV linéaire. Le nombre d'excitateurs ou le nombre de paramètres pour un modèle n'est pas limité par la méthode. L'excitateur ou les excitateurs sont notés EX.

Après avoir déterminé un jeu de paramètres pour EX, nous effectuons la simulation de la percussion. La boucle  $n=n+1$  de la figure désigne le processus de simulation qui s'effectue temporellement pas à pas. La simulation est stoppée quand il n'y a plus de possibilité pour l'EX de rentrer en contact de nouveau avec la SV. La détection de la fin de l'interaction n'est pas évidente. En effet, suivant le comportement de l'excitateur, la structure vibrante peut de nouveau heurter le percuteur. Dans les modèles d'excitateur simple à une masse, on considère qu'il n'y a plus d'interaction possible quand les deux conditions suivantes sont remplies :

- (i) l'EX a une altitude supérieure à l'amplitude maximale de la SV ;
- (ii) la vitesse de l'EX est positive.

La structure vibrante étant linéaire, nous savons d'après le postulat des conditions initiales (cf. chapitre 11, § 3.3.1.) que l'information sur la vitesse et la position des MAT de la structure vibrante suffit pour caractériser la résonance de la structure vibrante : son mouvement est déterministe. Cette information prise au temps  $n$  appelée *état dynamique de la structure au temps  $n$*  est enregistrée dès que la fin de l'interaction est détectée. La simulation de l'instrument est alors stoppée.

On réitère ensuite les étapes précédentes avec un EX modifié ou différent. On conserve toujours la même structure vibrante SV. Une autre simulation est lancée ; nous recueillons de nouveau l'état dynamique après la fin de l'interaction. L'objectif est de balayer l'espace des paramètres de l'EX de manière exhaustive.

Il est clair que, même pour l'univers synthétique de CA, trouver deux EX distincts qui produisent rigoureusement la même résonance d'une SV est très peu probable. Il faut donc recourir à une notion de distance inter-résonance ou plus précisément une distance inter-état dynamique.

Nous choisissons de représenter l'état dynamique dans un espace à deux dimensions. L'abscisse est l'axe des positions (toujours monodimensionnelles). L'ordonnée est l'axe des vitesses. L'état dynamique d'une SV de  $N$  MAT sera représenté par une suite de  $N$  termes placés dans le plan. Le terme  $i$  est un point d'abscisse *position du MAT  $i$*  et d'ordonnée *vitesse du MAT  $i$* . Un exemple de ce type de représentation est illustré dans la section suivante §3.1..

Nous prenons comme norme de distance la norme euclidienne. Soient deux états dynamiques de SV représentés par leurs suites respectives  $(M_i)$  et  $(N_i)$ , la distance inter-résonance entre les deux états s'écrit :

$$d_{inter-résonance} = \left( \sum_{i=1}^N (M_i N_i)^2 \right)^{1/2}$$

On calcule à partir de l'ensemble des états dynamiques les distances deux à deux.

La dernière étape, à partir de la matrice symétrique des distances (de taille  $L \times L$  si  $L$  est le nombre de simulations), consiste à effectuer une analyse factorielle. Le résultat de l'analyse permet de former des groupes de configurations d'excitateurs qui produisent des résonances très voisines.

Le parcours décrit permet ainsi de constituer à partir du langage CA des classes d'excitation de sons percussifs quasi-isorésonants.

### 3. APPLICATIONS

#### 3.1. PERCUSSION D'UN CHAPELET C9: REPRESENTATION DE LA RESONANCE

La figure AN.2 représente deux états dynamiques d'un chapelet à 9 MAT (C9). En abscisse figure la position des MAT en mètres. En ordonnée figure la vitesse des MAT en mètres par seconde. Ces états dynamiques sont enregistrés juste après la fin de l'interaction du percuteur avec le chapelet. Un état dynamique est représenté par une suite de points numérotés de 0 à 8 reliés par des segments. Les numéros correspondent aux numéros des MAT de C9. Le percuteur est une masse ponctuelle dotée d'une butée viscoélastique. Le premier état (graphe en bas à gauche) correspond à une vitesse de frappe de  $2 \text{ ms}^{-1}$ . Le deuxième état (graphe en haut à droite) correspond à une vitesse de frappe de  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Nous vérifions que, le système étant linéaire, le deuxième graphe est homothétique de facteur 5 par rapport au premier graphe.



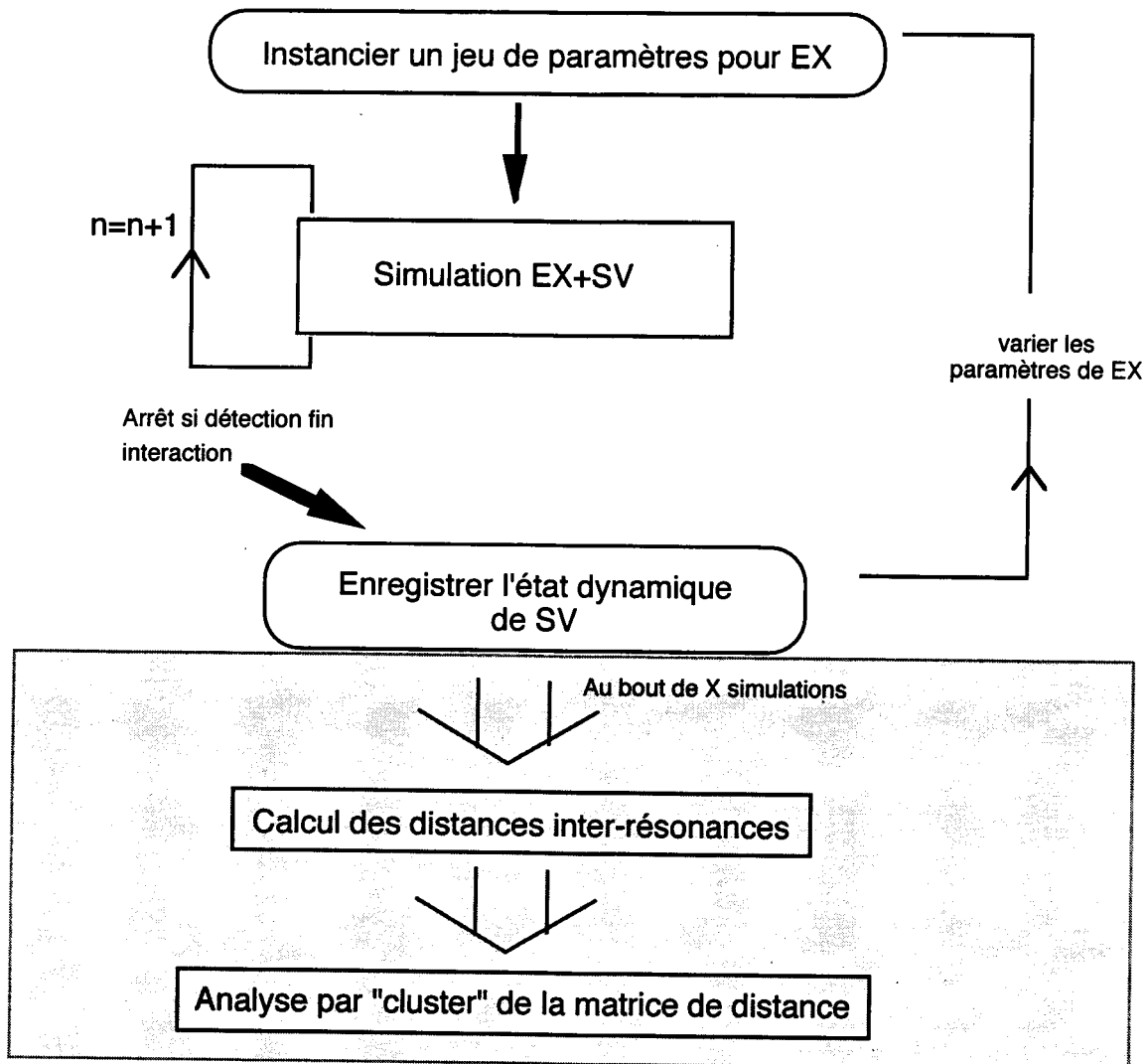


FIG. AN.1 - Méthode pour générer des classes de sons isorésonants en CA à partir d'un modèle de SV. EX désigne un modèle d'excitateur dont on fait varier les paramètres structurels et les paramètres de contrôle. EX peut être également une collection d'excitateurs distincts.

### 3.2. ÉTUDE D'UN PERCUTEUR A TROIS PARAMETRES SUR LA SV XYLO

Souhaitant valider la méthode sur un instrument CA, nous choisissons un modèle d'excitateur à explorer : le modèle de percussion élémentaire (un Mat, une butée à deux LIA en parallèles) décrit au chapitre VII. La structure vibrante réquisitionnée est le Xylo décrit dans le chapitre XIII (effet de stress). Trois cents simulations sont réalisées. Elles balayent l'espace paramétrique constitué de : - l'inertie de l'excitateur, - la fréquence d'élasticité du percuteur (racine du rapport de la raideur de butée sur l'inertie), - la viscosité de la butée. Le tableau AN.1 donne plus de précision sur cette espace.

Les simulations sont rapides car il suffit de calculer uniquement les transitoires. Un état dynamique est enregistré sous la forme d'un vecteur à 12 dimensions (6 pour les positions des MAT du Xylo, 6 pour leur vitesse). A partir des 300 états dynamiques de résonance, nous calculons la matrice des distances inter-résonances (300x300). A l'aide d'un logiciel d'analyse de distances inter-individus, nous obtenons des ensembles de simulations à isorésonance. Quatre groupes de sons isorésonants sont mis en évidence, numérotés de 1 à 4. Les séquences (CD74), (CD75), (CD76) et (CD77) sont constituées respectivement de quelques représentants des groupes 1, 2, 3 et 4.

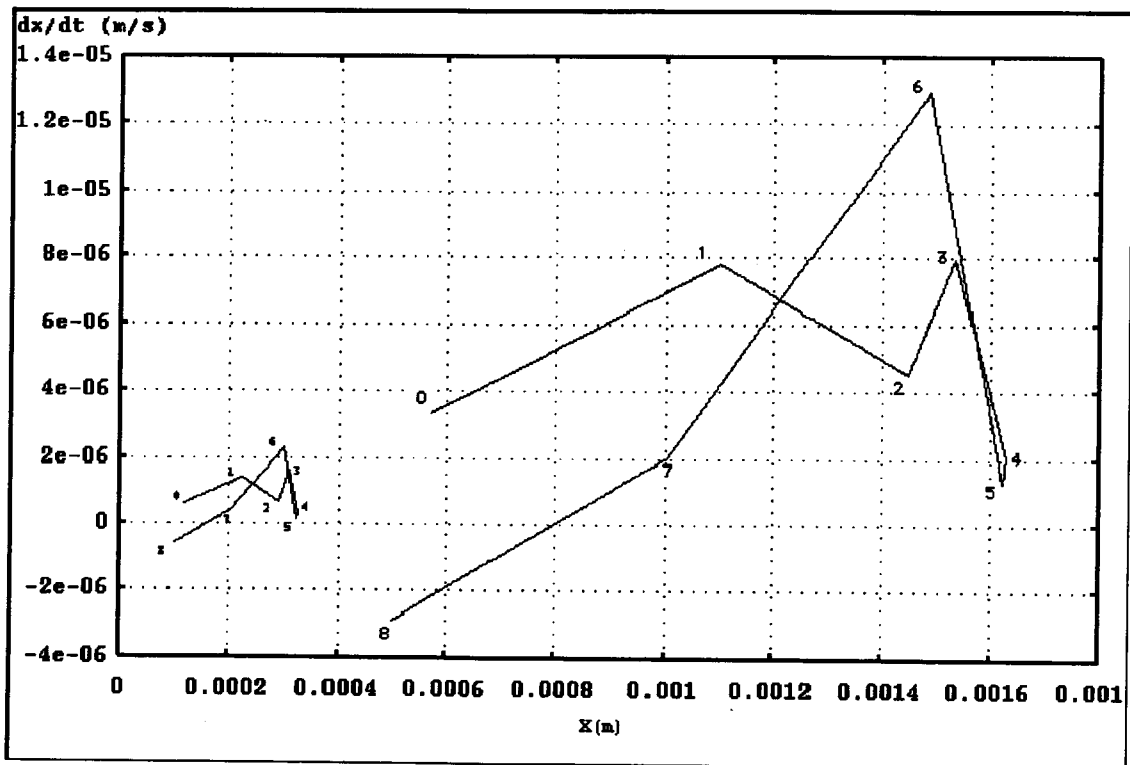


FIG. AN.2 - Représentation de deux états dynamiques d'un Chapelet à 9 MAT. Un état est représenté par une suite de points numérotés de 0 à 8 dans le plan (position en abscisse, vitesse en ordonnée) Les points sont reliés par des segments. Le grand graphique se déduit du petit graphique par homotétie de facteur 5.

TAB. AN.1 - Trois cent simulations de percussions sur le Xylo

Variable	Domaine de variation	Type de variation	Nombre de valeurs
Inertie du percuteur	De 1 à 12 Kg	Exponentielle	12
Fréquence d'élasticité	De 150 à 2 000 Hz	Linéaire	5
Viscosité de butée	De 1 à 120 000 Nsm <sup>-1</sup>	Par choix	5

A l'intérieur de chaque groupe, il est ainsi possible de comparer des sons percussifs à transitoires d'attaques différents mais de résonance semblable. A travers la variété des attaques au sein d'un même groupe, nous évaluons le potentiel esthétique du modèle de percussion appliqué au Xylo.

## CONCLUSION

La méthode originale décrite dans cette section est relativement pertinente pour l'analyse d'un modèle excitateur. Cependant, les classes isorésonantes constituées doivent être confrontées en dernier lieu à l'audition avec des rajustements si nécessaire. L'avantage est qu'il s'agit d'un traitement automatique : il permet d'explorer un modèle excitateur exhaustivement sans le recours systématique à l'audition humaine. Cette étude doit être poursuivie. Notamment, l'information sur les classes ainsi formées devrait pouvoir être injectée dans le processus de balayage des paramètres d'excitation qui, pour l'instant, se fait de manière naïve.

Une première application concerne l'étude des percepts d'attaque des sons de percussion. Un matériau sonore suffisamment riche comportant des classes de sons isorésonants peut être constitué avec cette méthode. Des expériences psychoacoustiques sur la perception des transitoires percussifs pourraient alors tirer partie de ce matériau « mi-naturel mi-artificiel » mais physiquement cohérent.

Une autre application est dans l'élaboration des critères pour qualifier un bon modèle d'excitateur percussif indépendamment de toutes références instrumentales. Ainsi, on peut : -

associer à un modèle donné un nombre de classes de résonance, - analyser la correspondance entre l'espace des paramètres poétiques et l'ensemble des classes de résonance.

---

# ANNEXE C

---

## SUPPLEMENTS DIVERS

---

### 1. CALCULS SUPPLEMENTAIRES DU CHAPITRE X

On cherche à déterminer  $h(t)$ , la transformée de LAPLACE inverse de  $H(p)$ .

$$H(p) = H_1(p) + H_2(p) = \frac{-\frac{k_1 k_2}{z_1}}{\frac{k_1}{z_1} + p} - \frac{(k_1 + k_2)p}{\frac{k_1}{z_1} + p}$$

Sachant que  $L(e^{at}) = \frac{1}{p-a}$ ,  $L^{-1}(H_1) = -\frac{k_1 k_2}{z_1} e^{-\frac{k_1}{z_1} t}$ .

On sait par ailleurs qu'étant donnée une fonction  $f(t)$ ,  $L(f'(t)) = pL(f(t)) - f(0^-)$ ; ainsi  $L^{-1}(pL(f)) = L^{-1}L(f') + L^{-1}(f(0^-))$ .

En posant  $f(t) = -(k_1 + k_2)e^{-\frac{k_1}{z_1} t}$ , on a  $H_2 = pL(f) = L(f') + f(0^-)$ ,  
 $f'(t) = (k_1 + k_2)\frac{k_1}{z_1} e^{-\frac{k_1}{z_1} t}$  et  $f(0^-) = -(k_1 + k_2)$ .

Ainsi,  $L^{-1}(pL(f)) = f' - (k_1 + k_2)\delta$ ,  $L^{-1}(H_2) = -(k_1 + k_2)\delta + (k_1 + k_2)\frac{k_1}{z_1} e^{-\frac{k_1}{z_1} t}$ .

Il vient finalement :

$$h(t) = L^{-1}(H) = -(k_1 + k_2)\delta + \frac{k_1^2}{z_1} e^{-\frac{k_1}{z_1} t}$$

## 2. FIGURES ET GRAPHES SUPPLEMENTAIRES

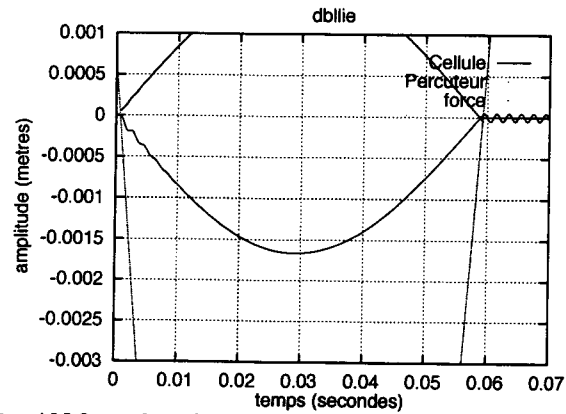


FIG. AN.3 - Simulation du modèle de percussion minimal décrit au chapitre VII. Percussion de forme L, sensation d'une attaque double. En haut à gauche on observe une oscillation de la trajectoire de la Cellule qui s'atténue rapidement au cours du transitoire.

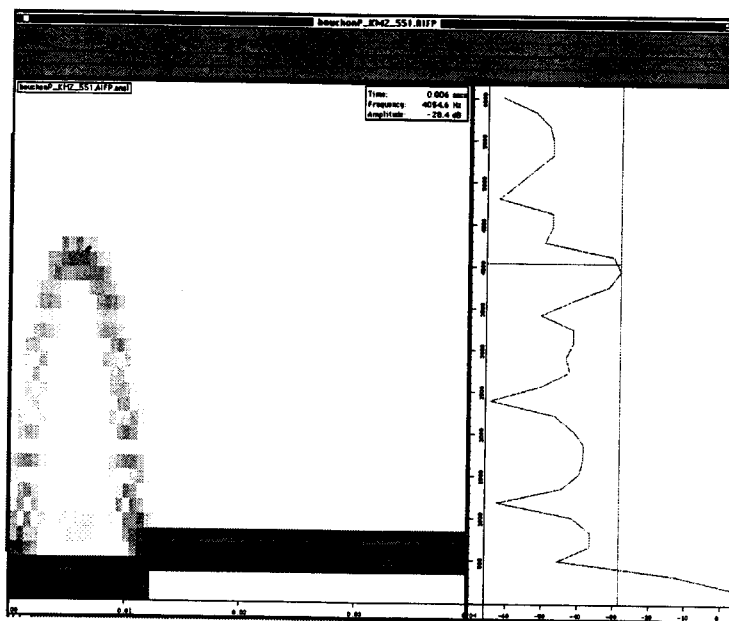


FIG. AN.4 - Simulation du modèle de percussion minimal décrit au chapitre VII. Sonagramme. Les sons M sont le siège d'une modulation de fréquence durant l'attaque. abscisse : échelle des temps en secondes, ordonnée : échelle des fréquences en Hz.

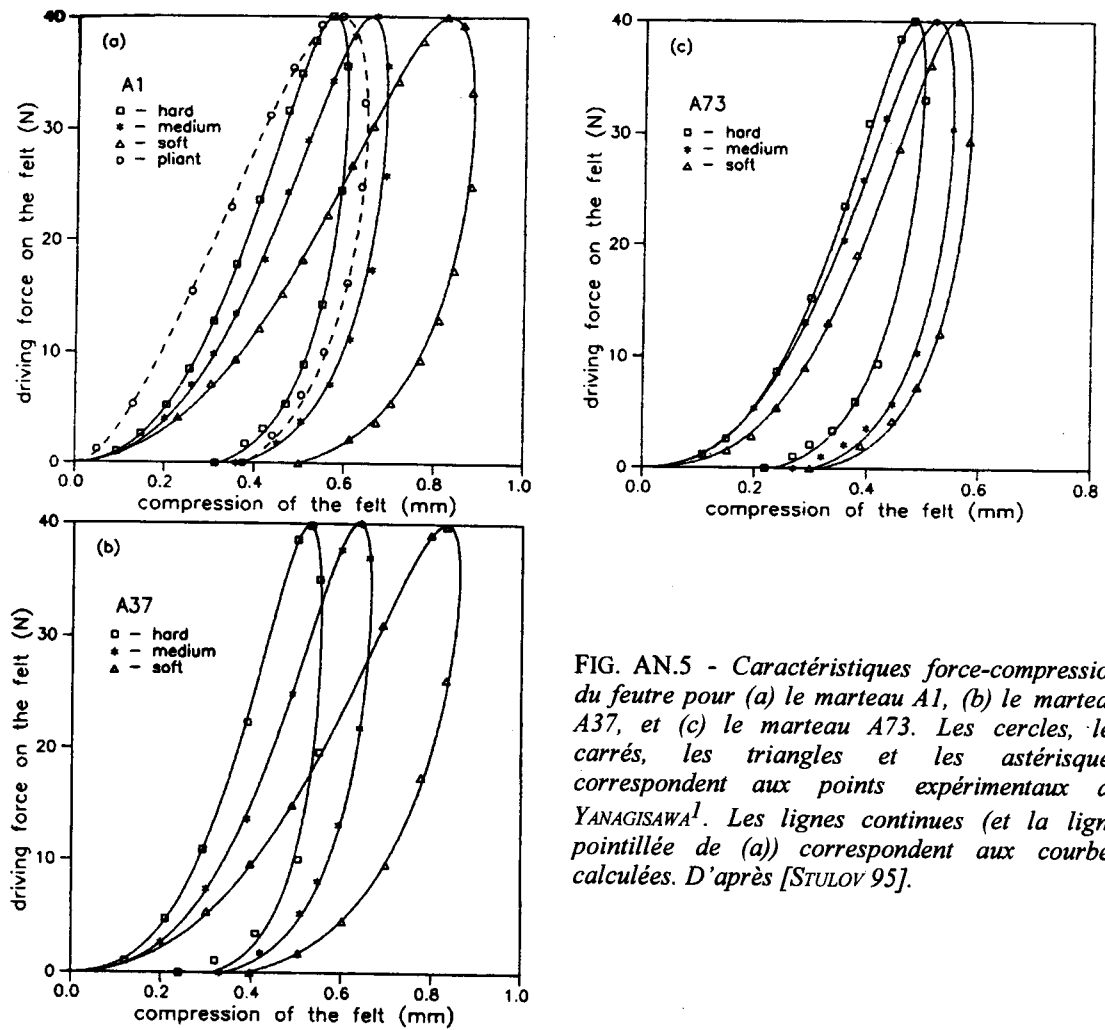


FIG. AN.5 - Caractéristiques force-compression du feutre pour (a) le marteau A1, (b) le marteau A37, et (c) le marteau A73. Les cercles, les carrés, les triangles et les astérisques correspondent aux points expérimentaux de YANAGISAWA<sup>1</sup>. Les lignes continues (et la ligne pointillée de (a)) correspondent aux courbes calculées. D'après [STULOV 95].

<sup>1</sup>Trans. Musical Acoust. Techn. Group Meeting Acoust. Soc. Jpn., vol. 1, pp. 14-18 (1982)

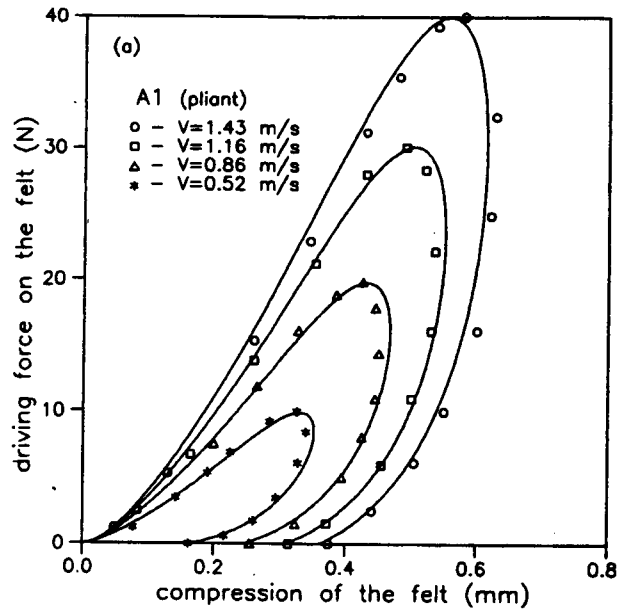


FIG. AN.6 - Caractéristiques force-compression du feutre du marteau A1 ("pliant" i-e souple) pour différentes valeurs de vitesses initiales. Les cercles, les carrés, les triangles et les astérisques correspondent aux points expérimentaux de YANAGISAWA<sup>2</sup>. Les lignes continues correspondent aux courbes calculées. D'après [STULOV 95].

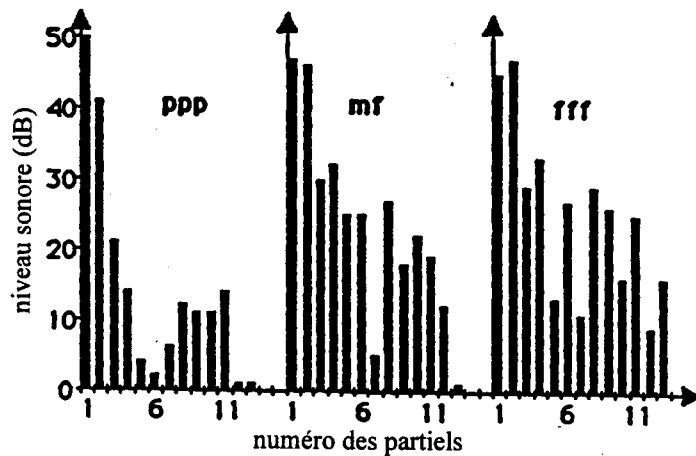


FIG. AN.7 - Spectres de la pression acoustique, à environ 50 cm de la table d'harmonie, pour trois nuances de jeu. La note est un Sol<sub>2</sub> et les niveaux globaux sont tous normalisés à la même valeur. Le renforcement des partiels supérieurs est dû à la non-linéarité du feutre du marteau. D'après [BOUTILLON 88].

<sup>2</sup>Trans. Musical Acoust. Techn. Group Meeting Acoust. Soc. Jpn., vol. 1, pp. 14-18 (1982).

### 3. CARACTERISTIQUES DE TROIS INSTRUMENTS VIRTUELS DE PERCUSSION

TAB. AN.2 - *Caractéristiques du Xylo*

nom	Xylo
genre	spirale homogène
nombre de masse	3x2
masse de la SV (Kg)	6
raideur interne	6,041e+08 Nm-1
viscosité interne	2,173e+01 Nm-1s
raideur de milieu	1,067e+07 Nm-1
viscosité de milieu	6,657e+00 Nm-1s
fréquence du 1er mode	520 Hz
fréquence du 2ème mode	2 098 Hz
amortissement du 1er mode	0,9 s
amortissement du 2ème mode	0,48 s
nombre de points d'attache	4
point d'écoute droit	2
point d'écoute gauche	2

TAB. AN.4 - *Caractéristiques du Gong*

nom	Gong
genre	membrane circulaire - 12
nombre de MAS	57
masse (Kg)	83
raideur interne	5,261e+07 Nm-1
viscosité interne	2,205e+00 Nm-1s
raideur de milieu	0 Nm-1
viscosité de milieu	0 Nm-1s
point d'écoute droit	2
point d'écoute gauche	-3

TAB. AN.3 - *Caractéristiques du Bongo*

nom	Bongo
genre	membrane homogène - 1x1
nombre de masse	8x8
masse de la SV (Kg)	64
raideur interne	5,431e+06 Nm-1
viscosité interne	1,797e+01 Nm-1s
raideur de milieu	1,004e+06 Nm-1
viscosité de milieu	1,577e+00 Nm-1s
fréquence du 1er mode	205 Hz
fréquence du 2ème mode	299,7 Hz
amortissement du 1er mode	1,6 s
amortissement du 2ème mode	0,6 s
nombre de points d'attache	2x8+2x7
point d'écoute droit	2
point d'écoute gauche	2





---

# ANNEXE D

---

## TABLE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

---

### 1. TABLE DES ILLUSTRATIONS

IMA. 1.1 - Transducteur gestuel rétroactif.....	18
FIG. 1.1 - Le transducteur gestuel rétroactif.....	19
FIG. 1.2 - Point M et point L.....	20
FIG. 1.3 - Exemple d'un objet Cordis-Anima.....	20
FIG. 1.4 - Les deux atomes de Cordis-Anima.....	21
FIG. 1.5 - Exemple d'un objet CA, aspect algorithmique.....	23
FIG. 1.6 - Butée élastique.....	24
FIG. 2.1 - Chaîne causale du geste au son.....	28
FIG. 2.2 - Objectifs de la thèse.....	29
FIG. 3.1 - Huit configurations pour produire des claquements dans l'expérience de Repp.....	35
FIG. 4.1 - Un exemple d'atome temps-fréquence de la méthode de poursuite adaptative.....	39
FIG. 5.1 - Comparaison des sonagrammes respectifs de la percussion d'un bongo, d'un xylophone et d'un gong.....	45
FIG. 5.2 - Quelques baguettes et mailloches d'après [Grosser, 0000].....	47
FIG. 6.1 - Vecteur d'état et représentation des points de communication en machine.....	49
FIG. 6.2 - Principe de simulation d'un objet CA.....	50
FIG. 7.1 - Modèle élémentaire de percussion.....	56
FIG. 7.2 - Quatre configurations de signal.....	59
FIG. 7.3 - Correspondance poétique-esthétique du percuteur à Cellule fixe.....	59
FIG. 7.4 - Correspondance poétique-neutre-esthétique du percuteur à Cellule fixe.....	60
FIG. 7.5 - Variation du temps de montée et du nombre de contacts par rapport aux formes percussives.....	61
FIG. 7.6 - Forte viscosité, faible raideur de la Butée viscoélastique et percuteur léger.....	62
FIG. 7.7 - Continuité poétique d'une forme liée vers une forme maillage.....	64
FIG. 7.8 - Forme LM, $Kl = 100 \text{ N.m}^{-1}$ , $Mp = 10\text{-}3 \text{ Kg}$ , $Mc = 10\text{-}5 \text{ Kg}$ .....	64
FIG. 8.1 - Couplage du percuteur et de la structure vibrante.....	66
FIG. 8.2 - Exemple d'un grain d'attaque percussive sur un oscillateur harmonique.....	67
FIG. 8.3 - Exemple d'une série d'attaque percussive sur un oscillateur harmonique.....	68
FIG. 9.1 - Exemple du produit d'un chapelet semi-ouvert par un agglomérat à quatre masses.....	72
FIG. 9.2 - Transformées de Fourier des réponses des SV /a/ et /e/ à une impulsion.....	73
FIG. 9.3 - Configurations des stimuli pour la production des sons /t/, /k/, et /p/ sur la table à sonagramme de Cooper.....	76
FIG. 9.4 - Signaux et sonagrammes des transitoires d'attaque des synthèses de phonèmes /pa/, /ka/ et /ta/.....	78
FIG. 9.5 - Signaux et sonagrammes des transitoires d'attaque des synthèses de phonèmes /pœ/, /kœ/ et /tœ/.....	78
FIG. 10.1 - Simulation de l'hystérésis.....	87
FIG. 10.2 - Expérience de la relaxation.....	89
FIG. 10.3 - Expérience de fluage.....	90
FIG. 10.3bis - Modèle ad'hoc CA du système dynamique proposé par Stulov.....	93
FIG. 10.4 - Liaison de Zener.....	95
FIG. 10.5 - Fonction de transfert de la liaison de Zener.....	97
FIG. 10.6 - Module de Maxwell non-linéaire.....	99
FIG. 10.7 - Module de marteau feutré.....	99
FIG. 10.8 - Comparaison des caractéristiques F(U) de marteaux.....	101
FIG. 10.9 - Comparaison des caractéristiques F(U) de marteaux.....	101

FIG. 10.10 - Comparaison des caractéristiques F(U) du marteaux Alp pour différentes vitesses initiales.....	102
FIG. 10.11 - Représentation en réseau de Kirchhoff.....	103
FIG. 10.12 - Analogie électrique du modèle mécanique ressort-inertie-frein-inertie en série.....	105
FIG. 10.13 - Comparaison des réponses en fréquence des systèmes (Se) et (Mm).....	107
FIG. 10.14 - Correspondance poïétique-esthésique du percuteur à Cellule fixe.....	110
FIG. 10.15 - Analyse esthésique de l'expérimentation §6.1.5.....	112
FIG. 10.16 - Comparaison des transformées de Fourier à court-terme.....	114
FIG. 10.17 - Transformée de Fourier à court-terme des sons singuliers caractéristiques.....	117
FIG. 11.1 - Un réseau de Kirchhoff.....	120
FIG. 12.1 - Proximité perceptive des timbres iso-stressés.....	133
FIG. 12.2 - Modèle du percuteur en pression.....	134
FIG. 12.3 - Réduction du phénomène de dissipation linéaire.....	135
FIG. 12.4 - Comparaison des courbes théoriques et simulées d'une percussion stressée.....	137
FIG. 12.5 - Modèle CA de xylophone.....	138
FIG. 12.7 - Percussions de Xylo.....	140
FIG. 12.6 - Amortissement par contacts multiples sur le Xylo.....	141
FIG. AN.1 - Méthode pour générer des classes de sons isorésonants.....	168
FIG. AN.2 - Représentation de deux états dynamiques d'un Chapelet à 9 MAT.....	169
FIG. AN.3 - Percussion de forme L, sensation d'une attaque double.....	172
FIG. AN.4 - Les sons M sont le siège d'une modulation de fréquence durant l'attaque.....	172
FIG. AN.5 - Caractéristiques force-compression du feutre : A36, A73 et A1.....	173
FIG. AN.6 - Caractéristiques force-compression du feutre du marteau A1 ("pliant" i-e souple) pour différentes valeurs de vitesses initiales.....	174
FIG. AN.7 - Spectres de la pression acoustique, à environ 50 cm de la table d'harmonie.....	174

## 2. TABLE DES TABLEAUX

TAB. 1.1 - Caractéristiques techniques du Clavier Rétroactif Modulaire.....	18
TAB. 2.1 - Analyse de quelques instruments en termes d'éléments catégoriels.....	28
TAB. 3.1 - Descripteurs acoustico-esthésique dans l'expérience de Freed sur le DPA.....	33
TAB. 4.1 - Paramètres de l'excitateur pour le modèle de percussion de membrane de Fontana.....	41
TAB. 4.2 - Valeurs types des paramètres de la mailloche.....	41
TAB. 5.1 - Classification des principaux instruments à percussion.....	45
TAB. 7.1 - Caractéristiques des formes percussives génératives.....	61
TAB. 9.1 - Paramètres modaux des structures produits.....	74
TAB. 9.2 - Les deux premiers formants de voyelles.....	74
TAB. 9.3 - Paramètres de l'excitateur percussif et de l'excitateur par entretien.....	77
TAB. 10.1 - Liaison de Maxwell non-linéaire.....	98
TAB. 10.2 - Paramètres structurels du modèle de marteau feutré.....	100
TAB. 10.3 - Paramètres de simulation du marteau feutré ou du modèle de Stulov.....	102
TAB. 10.4 - Caractéristiques des cordes A0 et A3 - cf. [Stulov, 95].....	109
TAB. 10.5 - Paramètres des trois SV percutées.....	109
TAB. 10.6 - Domaine des variations exponentielles des simulations.....	112
TAB. 10.7 - Domaine des variations exponentielles des simulations.....	113
TAB. 10.8 - Domaine des variations exponentielles des simulations.....	113
TAB. 10.9 - Domaine des variations exponentielles des simulations §6.3.2.....	114
TAB. 12.1 - Description des stimuli pour le jugement de similarité et pour la catégorisation.....	115
TAB. 12.2 - Caractéristiques du Xylo.....	132
TAB. 12.3 - Caractéristiques du Bongo et du Gong.....	138
TAB. 12.4 - Lieu d'excitation des SV.....	139
TAB. 12.5 - Sons stressés par contacts multiples.....	139
TAB. AN.1 - Trois cent simulations de percussions sur le Xylo.....	142
TAB. AN.2 - Caractéristiques du Xylo.....	169
TAB. AN.3 - Caractéristiques du Bongo.....	175
TAB. AN.4 - Caractéristiques du Gong.....	175

---

## ANNEXE E

---

## INDEX DES MOTS CLES

---

- action de la touche; 86  
aérophones; 45  
approche instrumentale; 17  
Attaque; 108  
baguettes; 45  
bois; 44  
bongo; 44  
Butée feutrée; 98  
butée viscoélastique; 56  
centre de gravité spectrale; 58  
consonnes plosives; 71  
constante d'hystérésis; 91  
constante de relaxation; 91  
contraintes; 89  
Cordis-Anima, CA; 19, 92  
Cordis-off; 49  
cordophones; 44  
déformation; 89  
dissipation par choc visqueux; 136  
dissipation par viscosité linéaire; 135  
dissipations; 89  
efficacité de la percussion; 116  
élément de liaison; 21  
éléments rhéologiques; 98  
énergie transmise; 57  
environnement global; 28  
environnement local; 28  
espace de timbre; 31  
esthésiques; 30  
états dynamiques; 169  
expressivité; 17  
extensive; 122  
fluage; 89  
fonction de transfert; 103  
fonctions de fluage et de relaxation; 90  
fréquence caractéristique; 91  
geste; 28  
hauteur spectrale; 63  
idiophones; 43  
incidence; 135  
intensive; 122  
isorésonance; 165  
interface; 18  
liaison de Maxwell; 103  
liaison de Maxwell non-linéaire; 98  
liaison de Maxwell .; 94  
liaison de Zener; 95  
liaison de Zener.; 95  
Logarithme du temps de montée; 32  
loi de comportement; 90  
marteau feutré; 99  
membranophones; 44  
métaux; 43  
module: de Zener non-linéaire; 98  
module CA; 21  
module de Maxwell non-linéaire; 98  
neutre; 33  
nombre de contacts; 57  
objet Cordis-Anima; 22  
paramètres algorithmiques; 97; 99  
peaux; 44  
Percussions multiples; 65  
physicabilité; 109  
poiétiques; 60  
point matériel; 21  
points L; 20  
points M; 20  
Postulat des conditions initiales; 125  
poursuite adaptative; 38  
Prony; 37  
rapport d'attaque.; 57  
réflexion; 135  
relaxation; 88; 89  
représentation; 17  
réseaux de Kirchhoff; 119  
Rimshot; 46  
roulement; 46  
structure vibrante, SV; 28  
structures produits; 72  
T-simulation; 22  
table d'onde; 37  
taux d'amortissement; 57  
temps de montée; 32, 57  
timbale; 41  
timbre; 31  
transducteur gestuel rétroactif, TGR; 18  
transformée de Fourier à court-terme;  
TFCT; 116  
Vecteur d'état; 49  
voyelles; 72



---

# ANNEXE F

---

## TABLE DES MATIERES

---

<b>Sommaire</b> .....	<b>6</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>11</b>
Dans les instruments.....	11
de musique,.....	11
les phénomènes percussifs : .....	12
Etude.....	12
et simulation. ....	13

### PREMIERE PARTIE TRAVAUX PASSES ET PRESENTS, MOTIVATIONS

<b>Chapitre I : L'ordinateur pour faire de la musique</b> .....	<b>17</b>
1. L'approche instrumentale.....	17
2. Le transducteur gestuel rétroactif.....	18
3. Cordis-Anima.....	19
3.1. Présentation.....	19
3.2. Les points de communication de type M et de type L.....	20
3.3. Le point matériel et l'élément de liaison.....	21
3.4. Modules élémentaires CA.....	21
3.5. Un objet Cordis-Anima.....	22
3.6. Le langage informatique.....	22
3.6.1. Dimension de l'espace modélisé/simulé : topologie et géométrie.....	22
3.6.2. Matière discrète.....	22
3.6.3. Temps discret.....	22
3.6.4. Autres modules.....	24
<b>Chapitre II : Problématique de la thèse</b> .....	<b>27</b>
1. Finalité .....	27
2. L'excitateur percussif .....	27
3. Reformulation de la problématique : connaître et simuler.....	30
<b>Chapitre III : La perception des sons percussifs</b> .....	<b>31</b>
1. Espace de timbres.....	31
1.1. Analyse multidimensionnelle [Donnadieu&al., 94].....	31
1.2. Corrélats physiques des axes perceptifs [Krimphoff&al., 94].....	32
2. Des casseroles percutees par des maillets de différentes raideurs [Freed, 90] .....	32
3. Étude sur les applaudissements [Repp, 87] .....	33
3.1. Analyse acoustique.....	34
3.2. Etude sur la perception.....	34
3.3. Conclusion.....	36
4. Conclusion sur la perception des sons percussifs.....	36
4.1. Sons percussifs brefs.....	36
4.2. Sons percussifs avec résonance.....	36
<b>Chapitre IV : Quelques techniques de synthèse de percussions</b> .....	<b>37</b>
1. Un modèle empirique à partir des tables d'onde.....	37

2. Synthèse par modèle spectral.....	37
3. Analyse par poursuite adaptative .....	38
4. Synthèse par modèle physique.....	39
4.1. Modèle d'excitateur pour la percussion d'instruments à clavier.....	40
4.2. Modèle d'excitateur pour la percussion d'instruments à membrane.....	40
4.3. Modèle d'excitateur pour la timbale.....	41

## **Chapitre V : Les instruments à percussion usuels ..... 43**

1. Les métaux.....	43
2. Les bois .....	44
3. Les peaux.....	44
4. Les cordophones.....	44
5. Les aérophones.....	45
6. Les excitateurs percussifs.....	45

## **Chapitre VI : Contexte d'expérimentation : l'outil**

<b>Cordis-off .....</b>	<b>49</b>
1. Le vecteur d'état.....	49
2. Représentation des Points M et des Points L.....	50
3. Représentation d'un module.....	50
4. Schéma d'une simulation Cordis-off.....	50

### DEUXIEME PARTIE EXCITATION PAR CHOCS VISCO-ELASTIQUES

## **Chapitre VII : Un modèle élémentaire de percussion ..... 55**

1. Description du modèle .....	55
2. Investigation.....	57
3. Expérimentations et résultats.....	57
3.1. Variation de $M_p$ , $K_I$ , $Z_I$ à Cellule fixe.....	57
3.1.1. Variations de l'inertie $M_p$ du percuteur et de la raideur $K_I$ : résultats.....	58
3.1.2. Effet de la viscosité de liaison ( $Z_I$ ).....	62
3.2. Variation de la Cellule ( $M_c$ , $K_c$ , $Z_c$ ) à percuteur ( $M_p$ , $K_I$ , $Z_I$ ) fixe.....	62
3.3. Percussion de Cellule à fréquence et amortissement communs mais de masses différentes.....	63
Conclusion.....	64

## **Chapitre VIII : Percussions multiples ..... 65**

Introduction.....	65
1. Percussions successives sur un oscillateur harmonique [Fourcade&al., 99].....	66
1.1. Considérations sur les hauteurs.....	66
1.1.1. Equations.....	66
1.1.2. Applications.....	67
1.2. Expérimentations sur la Cellule.....	67
1.2.1. Jeux de hauteurs.....	67
1.2.2. Variations du nombre de percuteurs.....	68
1.2.3. Variations de la fréquence des percussions successives.....	68
1.2.4. Jeux divers.....	68
2. Percussions successives sur des structures vibrantes riches.....	69
2.1. Série d'une succession de percuteurs différents.....	69
2.2. Variation du nombre de percuteurs.....	69
2.3. Variation de la fréquence des percuteurs.....	69
Conclusion.....	69

## **Chapitre IX : Une passerelle vers les consonnes /p/, /t/ et /k/ ..... 71**

Introduction.....	71
1. Construction des voyelles.....	72
1.1. Produit de deux structures vibrantes.....	72
1.2. Produit d'une structure porteuse et d'une structure diffusante.....	73
1.3. Application au produit d'un chapelet semi-ouvert par un agglomérat.....	73
1.4. Paramètres des structures CA de voyelles.....	74
1.5. Le système excitateur pour générer les voyelles : une série de percussions.....	75

2. Modèle physique de percussion pour la synthèse des consonnes plosives /p/, /t/ et /k/ .....	75
2.1. L'expérience de Cooper : une caractérisation acoustique des plosives /p/, /t/ et /k/ .....	75
2.2. Synthèse de phonèmes utilisant /p/, /t/ et /k/ .....	76
2.2.1. La consonne, un transitoire d'attaque percussif .....	76
2.2.2. Réalisation des phonèmes : excitation par percussion suivi d'une excitation par entretien .....	77
3. Reconnaissance des percepts de synthèse /p/, /t/ et /k/ .....	79
Conclusion .....	79

TROISIEME PARTIE  
DISSIPATION ET AMORTISSEMENT

<b>Chapitre X : Un modèle d'excitateur dissipatif : le marteau feutré .....</b>	<b>83</b>
Introduction .....	83
1. Notations .....	84
2. Etude bibliographique sur les marteaux de piano .....	85
2.1. Bref historique .....	85
2.2. Généralités .....	85
2.3. L'action de la touche .....	86
2.4. Modèle de Boutillon, Critiques de Stulov .....	86
2.5. Tessiture et comportement des marteaux, [Russell&Rossing, 98] .....	88
2.6. Synthèse .....	88
3. Un modèle de relaxation pour la percussion : expression intégrale (Stulov) .....	88
3.1. la formulation physique du phénomène de relaxation .....	88
Rappel sur l'origine physique .....	89
Conséquences à l'hypothèse de viscoélasticité linéaire .....	90
3.2. Un modèle hystérique du feutre des marteaux de piano : le modèle de Stulov .....	91
3.3. Traduction en CA du modèle de Stulov: approche intégrale .....	92
Relation force-compression .....	92
Constante de relaxation et fréquence de simulation .....	93
Détermination de N .....	94
Résultats .....	94
4. Un modèle de relaxation pour la percussion : formulation différentielle .....	94
4.1. La liaison de Maxwell .....	94
4.2. La liaison de Zener .....	95
4.2.1. Lien avec le modèle de Stulov .....	95
4.2.2. Étude de la liaison de Zener à temps continu .....	96
4.2.3. Implémentation de la liaison de Zener .....	97
4.3. Modèle de Marteau feutré .....	97
Formulation différentiel .....	97
Implémentation du Marteau feutré .....	98
Utilisation : entrées, sorties, paramètres et conditions initiales .....	99
4.4. Comparaison des mesures expérimentales de Yanagisawa avec les simulations CA .....	100
5. Alternative à la liaison de Maxwell : une inertie intermédiaire .....	102
Introduction .....	102
5.1. Liaison de Maxwell sous forme de schéma électrique .....	103
Condition de « forte dissipation » .....	104
Condition de « faible dissipation » .....	104
5.2. Système ressort-inertie-frein-inertie sous forme de schéma électrique .....	105
5.3. Comparaison des caractéristiques fréquentielles .....	106
Equations .....	106
Application numérique .....	107
6. Analyse sonore du modèle de marteau feutré .....	108
Introduction .....	108
Objectif .....	108
Restriction .....	108
Paramètres en cause .....	108
6.1. La butée élastique linéaire .....	109
6.1.1. Rappel sur la percussion d'une Cellule(cf. chapitre VII) .....	110
6.1.2. Introduction à la percussion d'un Chapelet homogène .....	110
6.1.3. Variation de la vitesse du percuteur appliqué à la Corde C10 .....	111
6.1.4. Variation de la raideur de butée sur la Corde C10 .....	111
6.1.5. Variation de l'inertie m et de la raideur k sur la Corde C10 .....	111
6.2. Butée élastique linéaire avec relaxation .....	111
6.2.1. Percussion d'une Cellule .....	111
6.2.2. Percussion de la Corde C10 .....	111
6.3. Butée élastique non-linéaire .....	112
6.3.1. Percussion de C10 : variation de la vitesse initiale .....	113
6.3.2. Percussion d'une Cellule .....	113



6.3.3. Percussion des cordes de références sans relaxation.....	114
6.4. Butée non-linéaire avec relaxation : Marteau feutré (cf. § 4.3.).....	115
6.4.1. Percussion de C10 avec relaxation : variation de la vitesse initiale.....	115
6.4.2. Percussion de C10 : variation de p.....	115
6.4.3. Percussion de C10 : variations conjuguées de $k_1$ , $m$ et $V_0$ autour de A36m.....	115
6.4.4. Percussions de références.....	115
6.4.5. Percussions de références : variation de $V_0$ .....	115
6.4.6. Percussions de références avec et sans LIA de relaxation.....	116
6.5. Analyse esthétique des analyses esthétiques et synthèse.....	116
Cas général.....	116
Singularités.....	116
Conclusion.....	117
Premier objectif : simulation au plus près de l'acoustique instrumentale.....	117
Deuxième objectif : tester le potentiel esthétique du modèle.....	118
Les imprévus.....	118

## Chapitre XI : Comparaison du réseau de Kirchhoff et du réseau CA ..... 119

Introduction.....	119
1. Une formalisation des réseaux de Kirchhoff restreints.....	119
1.1. Nœuds.....	120
1.2. Arcs.....	120
1.3. Loi des nœuds.....	120
1.4. Éléments.....	120
1.5. Réseau de Kirchhoff.....	121
2. Une formalisation du système Cordis-Anima restreint.....	121
2.1 Topologie d'un réseau CA.....	122
2.1.1. Points de communication.....	122
2.1.2. Atomes.....	122
2.1.3. Connexion.....	122
2.1.4. Topologie.....	122
2.2. De la topologie au réseau effectif.....	123
3. Une formalisation de la mécanique Newtonienne dans un espace unidimensionnel.....	124
3.1. Point matériel.....	124
3.2. Système newtonien.....	124
3.3. Simultanéité ou principe différentiel, complément sur la notion de force.....	125
3.3.1. Postulat des conditions initiales.....	125
3.3.2. Conséquence locale du postulat des conditions initiales.....	125
3.4. Digression.....	126
4. Le réseau CA restreint et la mécanique de Newton sont pseudo-isomorphes.....	126
5. Cordis-Anima du point de vue de Kirchhoff.....	126
6. Kirchhoff du point de vue de Cordis-Anima et de Newton.....	127
7. Un ensemble de propositions pour une approche synthétique.....	128
8. Sur l'éventualité de simuler une masse nulle.....	128
Conclusion.....	129

## Chapitre XII : Percussion de peaux : perception et modélisation de timbres stressés..... 131

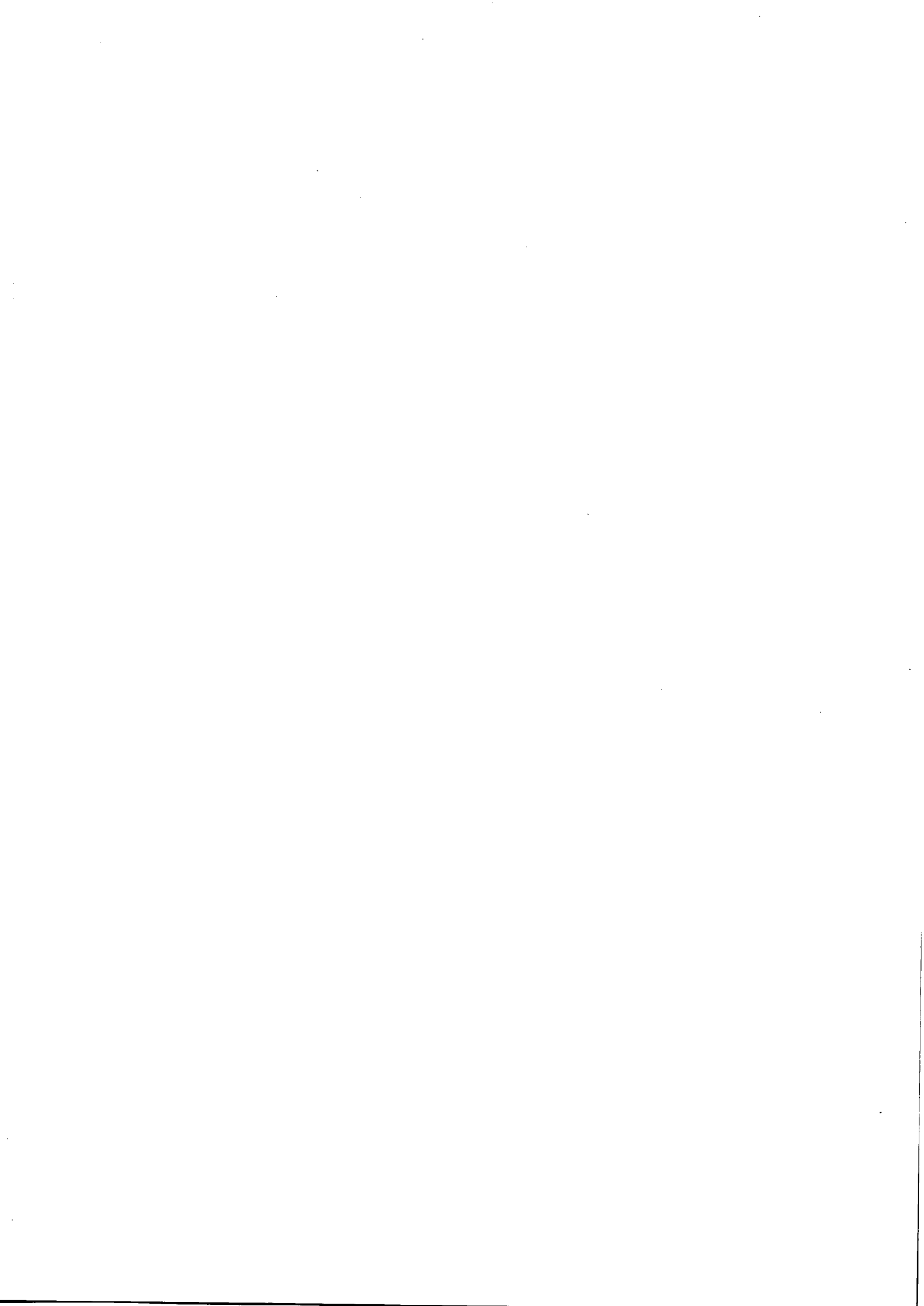
Introduction.....	131
1. De la perception des sons stressés.....	131
1.1. Expérience I : Jugement de similarité sur les débuts d'impact.....	131
Description de l'expérience.....	131
Résultats.....	131
1.2. Expérience II : Catégorisation libre sur les stimuli entiers.....	132
Description de l'expérience.....	132
Résultats.....	132
2. Un modèle de synthèse pour la percussion stressée.....	132
2.1. Description du modèle.....	133
2.2. Amortissement par choc visqueux.....	133
Explication du phénomène.....	134
Application numérique : Simulation de la percussion d'un xylophone.....	134
3. Quelques simulations.....	136
3.1. Les instruments.....	137
Le Xylophone.....	137
Tom de batterie : le Bongo.....	138
Le Gong.....	138
3.2. Effet de stress sur le Bongo, le Xylo et le Gong.....	138
	139

Sur le Bongo.....	139
Sur le Gong.....	140
Sur le Xylo.....	142

<b>Conclusion .....</b>	<b>143</b>
1. Bilan de la première partie :.....	147
2. Bilan de la deuxième partie :.....	148
3. Bilan de la troisième partie :.....	150
4. Eléments de réponse aux objectifs de la thèse .....	151
4.1. L'existence d'attributs perceptifs dédiés aux sons percussifs.....	151
4.2. L'existence de corrélations entre représentation physique et représentation perceptive d'un phénomène percussif .....	152
4.3. L'existence d'invariants liés à la nature de l'excitateur percussif indépendamment de la SV percutée, la reconnaissance de l'excitateur à travers plusieurs SV percutées. ....	152
4.4. Des modèles en référence au monde instrumental réel.....	153
4.5. Des modèles qui offrent une relation instrumentale cohérente .....	153
4.6. Des modèles qui s'intègrent dans la perspective du temps réel. ....	153
4.7. Des modèles de percuteurs qui développent toutes les potentialités sonores d'une SV. ....	153
5. Perspectives.....	154
5.1. En amont, la relation avec le geste.....	154
5.2. Poursuite du travail sur l'excitateur.....	154
5.3. En aval, la relation avec la structure vibrante.....	154

## ANNEXES

<b>Annexe A : Bibliographie.....</b>	<b>159</b>
<b>Annexe B : Méthode d'analyse des excitateurs percussifs par isorésonance .....</b>	<b>165</b>
Introduction.....	165
1. Isoler le transitoire sans déstructurer/dénaturer la percussion : avantage de la synthèse par modèle physique.....	165
1.1. Obstacles à la constitution de corpus isorésonant dans les instruments réels.....	166
1.2. L'isorésonance en Cordis-Anima.....	166
2. Réalisation de classe de sons isorésonants .....	166
3. Applications.....	167
3.1. Percussion d'un chapelet C9 : représentation de la résonance .....	167
3.2. Étude d'un percuteur à trois paramètres sur la SV Xylo.....	167
Conclusion .....	168
<b>Annexe C : Suppléments divers .....</b>	<b>171</b>
1. Calculs supplémentaires du chapitre X.....	171
2. Figures et graphes supplémentaires .....	172
3. Caractéristiques de trois instruments virtuels de percussion .....	175
<b>Annexe D : Tables des figures et des tableaux .....</b>	<b>177</b>
1. Table des illustrations.....	177
2. Table des tableaux .....	178
<b>Annexe E : Index des mots clés .....</b>	<b>179</b>
<b>Annexe F : Table des matières .....</b>	<b>180</b>
<b>Annexe G : Livret du cédé audionumérique .....</b>	<b>187</b>



---

## ANNEXE G

---

### LIVRET DU CEDE AUDIONUMERIQUE

---

**01** Les instruments à percussion usuels - C5, S. 3.

Percussion d'un bongo (x2), d'un xylophone (x2) et d'un gong (x2).

---

**02** Variations de l'inertie  $M_p$  du percuteur et de la raideur  $K_1$  : résultats - C7, S. 3.1.1.

Catégorie A. Son de "sinusoïde amortie" sans identité d'attaque perceptible.

**03** Variations de l'inertie  $M_p$  du percuteur et de la raideur  $K_1$  : résultats - C7, S. 3.1.1.

Catégorie A'. Sons A avec une attaque plus sèche ; on remarque un léger effet de pincement

**04** Variations de l'inertie  $M_p$  du percuteur et de la raideur  $K_1$  : résultats - C7, S. 3.1.1.

Catégories B et B'. Choc "massique" comme la percussion de deux boules de billard. On a l'impression que les objets percutés sont lourds. Parfois, sensation d'attaque double se situant au seuil de l'acuité temporelle.

**05** Variations de l'inertie  $M_p$  du percuteur et de la raideur  $K_1$  : résultats - C7, S. 3.1.1.

Catégorie C. Les attaques s'apparentent aux consonnes labiales comme le "B" ou le "P". Les sons peuvent évoquer le bruit que fait un bouchon de liège au sortir d'une bouteille ou encore celui d'un ballon sous-gonflé percutant un sol en ciment.

**06** Variation de la Cellule ( $M_c, K_c, Z_c$ ) à percuteur ( $M_p, K_1, Z_1$ ) fixe - C7, S. 3.2.

Extrait des simulations : Quatre séries de sons ordonnées suivant les formes percussives  $\delta, \delta_p, L$  et  $M$ , constituées respectivement de 5, 4, 6 et 2 sons.

**07** Percussion de Cellules à fréquence et amortissement communs mais de masses différentes - C7, S. 3.3

Passage de la forme M à la forme d ; augmentation des inerties, les grandeurs suivantes sont fixées : - fréquence de résonance de la Cellule  $f_c$ , - constante d'amortissement de la Cellule  $\tau$ , - rapport des inerties  $M_p/M_c$ , - raideur du percuteur  $K_1$ .

- |   |   |
|---|---|
| 08  | Cellules à fréquence et amortissement communs mais de masses différentes - C7, S. 3.3                   |
| <p>Passage de la forme <math>\delta p</math> à la forme L ; augmentation des inerties, les grandeurs suivantes sont fixent : - fréquence de résonance de la Cellule <math>f_c</math>, - constante d'amortissement de la Cellule <math>\tau</math>, - rapport des inerties <math>M_p/M_c</math>, - raideur du percuteur <math>K_l</math>.</p>              |   |
| 09  | Cellules à fréquence et amortissement communs mais de masses différentes - C7, S. 3.3                   |
| <p>Passage de la forme L à la forme M ; augmentation des inerties, les grandeurs suivantes sont fixent : - fréquence de résonance de la Cellule <math>f_c</math>, - constante d'amortissement de la Cellule <math>\tau</math>, - rapport des inerties <math>M_p/M_c</math>, - raideur du percuteur <math>K_l</math> . <math>M_p/M_c</math> est grand.</p> |   |
| 10  | Effet de la viscosité de liaison ( $Z_l$ ) - C7, S. 3.1.2.  |
| <p>Forte viscosité, faible raideur de la Butée viscoélastique et percuteur léger : le percuteur vibre de concert avec la Cellule durant 50 ms. Le timbre évoque le son d'une goutte d'eau.</p>  |   |
| 11  | Percussions successives sur un oscillateur : considération sur les hauteurs - C8, S. 1.1.2..            |
| <p>Transitoire percussif à la quinte supérieure. Percussion sur une Cellule. Attaque qui génère une sensation d'intervalle de hauteur : mi5-la4.</p>  |   |
| 12  | Percussions successives sur un oscillateur harmonique : Expérimentations sur la Cellule - C8, S. 1.2.1. |
| <p>Attaque percussive arpégée. On entend successivement SI3, SOL#3, MI3. Il y a deux percuteurs qui se succèdent sur une Cellule.</p>   |   |
| 13  | Percussions successives sur un oscillateur harmonique : Expérimentations sur la Cellule - C8, S. 1.2.1. |
| <p>Attaque percussive : mélodie en arche. On perçoit une mélodie en arche à l'attaque ; on entend successivement à l'octave 3 : SOL#, LA, LA#, SI, LA#, LA, SOL#, MI.</p>   |   |
| 14  | Percussions successives sur un oscillateur harmonique : Expérimentations sur la Cellule - C8, S. 1.2.2. |
| <p>Variations du nombre de percuteurs. N varie comme suit : 1, 2, 4, 8 et 16. On impose une durée du transitoire d'attaque constante : 100 ms. Les raideurs des percuteurs sont modifiées.</p>  |   |
| 15  | Percussions successives sur un oscillateur harmonique : Expérimentations sur la Cellule - C8, S. 1.2.3. |
| <p>Variations de la fréquence des percussions successives. Du premier son au dernier la fréquence augmente : impacts séparés, granulation de hauteur, granulation d'amplitude, fusion-accumulation.</p>   |   |

- |           |   |
|-----------|---|
| <b>16</b> | <b>Percussions successives sur un oscillateur harmonique : Expérimentations sur la Cellule - C8, S. 1.2.3.</b>  |
|           | Variations de la fréquence des percussions successives sur un motif mélodique. Trois séquences se succèdent avec une fréquence respectivement élevée, moyenne et faible.  |
| <b>17</b> | <b>Percussions successives sur un oscillateur harmonique : Expérimentations sur la Cellule - C8, S. 1.2.4.</b>  |
|           | Jeux divers. La Cellule est mise en mouvement par une série de percuteurs. Le dernier percuteur arrête complètement le mouvement de la Cellule.   |
| <b>18</b> | <b>Percussions successives sur des SV riches : Série d'une succession de percuteurs différents - C8, S. 2.1.</b>  |
|           | Sur deux cordes CA. On applique la série des percuteurs (qui donnait la forme en arche sur la Cellule) dans un premier temps à deux cordes CA de 18 éléments, l'une grave, l'autre aiguë. La hauteur fondamentale est stable. Le timbre perçu lors de la phase transitoire est peu différent du timbre en phase de résonance.   |
| <b>19</b> | <b>Percussions successives sur des SV riches : Série d'une succession de percuteurs différents - C8, S. 2.1.</b>  |
|           | Sur une plaque CA. On applique le même système d'excitation à une "plaque" inharmonique (membrane carrée, de 49 éléments, produit de deux chapelets). Premier son, lieu d'excitation (a), la fondamentale est stable. Deuxième son, lieu d'excitation spécifique (b), on perçoit des jeux de hauteurs ; la fondamentale est instable.   |
| <b>20</b> | <b>Percussions successives sur des SV riches : Variation de la fréquence des percuteurs - C8, S. 2.3.</b>   |
|           | Sur une plaque CA à grand nombre de MAT. On retrouve les mêmes effets sonores que pour la Cellule : impacts indépendants, granulation de hauteur, granulation d'amplitude, fusion. La granulation de hauteur est ici une granulation de timbre. Cette dernière est accentuée par la proximité des percussions successives. Une série de 7 percuteurs montrent l'effet de la variation de l'intervalle de temps entre deux impacts successifs, de 800 ms à 12 ms |
| <b>21</b> | <b>Percussions successives sur des SV riches : Variation de la fréquence des percuteurs - C8, S. 2.3.</b>   |
|           | Sur une corde CA à grand nombre de MAT. Idem  |
| <b>22</b> | <b>Une passerelle vers les consonnes /P/, /T/ et /K/ : Introduction - C9, S. Introduction.</b>  |
|           | Percussion indienne et sons parlés. Chatur-Lal commentant le jeu du tabla. Solfiage ou effet artistique ? La prononciation simultanée à la frappe peut faire l'objet d'un effet musical.  |

**23** Construction des voyelles : Application au produit d'un chapelet semi-ouvert par un agglomérat - C9, S. 1.3.

Excitation continue, chapelet semi-ouvert ("Tubes") accordé suivant les voyelles /a/, /ε/, /i/, /y/ et /u/

**24** Construction des voyelles : Application au produit d'un chapelet semi-ouvert par un agglomérat - C9, S. 1.3.

Chapelet "épaissi". Excitation continue, la SV résulte du produit d'un agglomérat par le chapelet semi-ouvert. Accordage suivant les voyelles /a/, /ε/, /i/, /y/ et /u/.

**25** Construction des voyelles : Application au produit d'un chapelet semi-ouvert par un agglomérat - C9, S. 1.3.

Deux SV-voyelle sans excitation continue. Excitation : Pic de DIRAC. Nous entendons successivement l'excitation de la structure produit accordée suivant la voyelle /a/ et l'excitation de la structure produit accordée suivant la voyelle /ε/.

**26** Synthèse de phonèmes : La consonne, un transitoire d'attaque percussif - C9, S. 2.2.1.

à  
**29**

Synthèse des phonèmes issus des plosives /p/, /t/ et /k/ sans la partie excitatrice continue. On entend successivement les phonèmes suivant : [pa], [ta], [ka], [pœ], [tœ], [kœ], [pi], [ti], [ki], [po], [to], [ko]. Le corps de la voyelle est peu audible car la partie excitatrice entretenue est absente.

**30** Réalisation des phonèmes : excitation par percussion suivi d'une excitation par entretien - C9, S. 2.2.2.

à  
**33**

Synthèse des phonèmes issus des plosives /p/, /t/ et /k/ avec la partie excitatrice entretenue. On entend successivement les phonèmes suivant : [pa], [ta], [ka], [pœ], [tœ], [kœ], [pi], [ti], [ki], [po], [to], [ko]. Excitation par percussion suivi d'une excitation par entretien.

**34** Butée élastique linéaire : Variation de la raideur de butée sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.4.

Série de sons de la catégorie A. La catégorie A se caractérise par une Attaque double. Elle correspond à une raideur de butée faible.

**35** Butée élastique linéaire : Variation de la raideur de butée sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.4.

Série de sons de la catégorie B. La catégorie B est une Attaque qui évoque les labiales « P » ou « B », un choc « lourd » suivi d'une Décroissance.

**36** Butée élastique linéaire : Variation de la raideur de butée sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.4.

Série de sons de la catégorie C. La catégorie C est un son à Attaque franche et claire, évoquant une percussion de matière en bois.

- |   |  |
|---|--|
| 37  | Butée élastique linéaire : Variation de l'inertie $m$ et de la raideur $k$ sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.5. |
| Série de sons de la catégorie C'. C' évoque la percussion d'une Cellule simple.   |  |
| 38  | Butée élastique linéaire : Variation de l'inertie $m$ et de la raideur $k$ sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.5. |
| Série de sons de la catégorie G. G sont des sons dont la hauteur du percept d'Attaque est tellement basse que cet attribut l'emporte sur tous les autres.   |  |
| 39  | Butée élastique linéaire : Variation de l'inertie $m$ et de la raideur $k$ sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.5. |
| Série de sons de la catégorie B'. B' évoque un timbre caractéristique de bois percuté.  |  |
| 40  | Butée élastique linéaire : Variation de l'inertie $m$ et de la raideur $k$ sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.5. |
| Série de sons de la catégorie $\bar{B}'$ . $\bar{B}'$ évoque un timbre caractéristique de bois percuté avec un effet de pincement.  |  |
| 41  | Butée élastique linéaire : Variation de l'inertie $m$ et de la raideur $k$ sur la Corde C10 - C10, S. 6.1.5. |
| Série de sons de la catégorie $\tilde{B}'$ . $\tilde{B}'$ évoque un timbre caractéristique de bois percuté avec un effet de pincement et avec une hauteur du percept d'Attaque sensiblement plus basse que B' et $\bar{B}'$ . |  |
| 42  | Butée élastique linéaire avec relaxation : Percussion d'une Cellule - C10, S. 6.2.1.                         |
| Sur une Cellule de hauteur aiguë : pas de catégorisation possible.  |  |
| 43  | Butée élastique linéaire avec relaxation : Percussion d'une Cellule - C10, S. 6.2.1.                         |
| Sur une Cellule de hauteur grave : pas de catégorisation possible.  |  |
| 44  | Butée élastique linéaire avec relaxation : Percussion de la Corde C10 - C10, S. 6.2.2.                       |
| Série de sons de la catégorie A. Une Attaque bruitée ; c'est-à-dire riche en fréquence aiguë suivie d'une Décroissance grave. La raideur $k_1$ de butée est faible.   |  |
| 45  | Butée élastique linéaire avec relaxation : Percussion de la Corde C10 - C10, S. 6.2.2.                       |
| Série de sons de la catégorie B. Une Attaque bruitée ; c'est-à-dire riche en fréquences aiguës suivie d'une Décroissance médium. La raideur $k_1$ de butée est moyenne.   |  |



- |    |   |
|----|---|
| 46 | Butée élastique linéaire avec relaxation : Percussion de la Corde C10 - C10, S. 6.2.2.  |
|    | Série de sons de la catégorie C. Une Attaque bruitée ; c'est-à-dire riche en fréquence aiguë suivie d'une Décroissance aiguë. La raideur $k_1$ de butée est forte.  |
| 47 | Butée élastique non-linéaire : Percussion de C10 : variation de la vitesse initiale - C10, S. 6.3.1.  |
|    | $V_0$ prend les valeurs de 0,12 à 800 $\text{ms}^{-1}$ d'une suite géométrique de raison 2. Pour $V_0 < 20$ ms, il n'y a pas de variation de timbre. Pour les valeurs supérieures le timbre s'enrichit progressivement au fur à mesure de la progression de la vitesse. Progression paramétrique lente.   |
| 48 | Butée élastique non-linéaire : Percussion de C10 : variation de la vitesse initiale - C10, S. 6.3.1.  |
|    | $V_0$ prend les valeurs de 0,12 à 800 $\text{ms}^{-1}$ d'une suite géométrique de raison 2. Pour $V_0 < 20$ ms, il n'y a pas de variation de timbre. Pour les valeurs supérieures le timbre s'enrichit progressivement au fur à mesure de la progression de la vitesse. Progression paramétrique rapide.  |
| 49 | Butée élastique non-linéaire : Percussion d'une Cellule - C10, S. 6.3.2.  |
|    | Pas de catégorisation possible.   |
| 50 | Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 avec relaxation : variation de la vitesse initiale - C10, S. 6.4.1.  |
|    | Percussion du marteau A36m sur le Chapelet de 10 masses (C10). $V_0$ varie de 0,1 à 800 secondes. Vingt-trois simulations ont été effectuées. On observe bien un enrichissement du spectre quand $V_0$ augmente. L'effet est réaliste. Cependant, on observe une stagnation de la sensation d'enrichissement du spectre pour $V_0 > 33$ m/s . La séquence est à comparer avec (CD47) et (CD48). |
| 51 | Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variation de p - C10, S. 6.4.2.  |
|    | Prenant le percuteur de référence A36m, nous simulons trois percussions pour $p=3,3$ (référence), $p=2,70$ et $p=2,3$ . Il se produit un enrichissement spectral lorsque p diminue.   |
| 52 | Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variations conjuguées de $\kappa_1$ , m et $V_0$ autour de A36m - C10, S. 6.4.3.   |
|    | Série de sons de la catégorie B1. B1 évoque le timbre de bois percuté. Le timbre est <i>brillant</i> ou clair. Le paramètre m correspondant aux simulations est faible.   |

**53** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variations conjuguées de  $\kappa_1$ ,  $m$  et  $V_0$  autour de A36m - C10, S. 6.4.3.

Série de sons de la catégorie B2. B2 évoque le timbre de bois percuté. L'Attaque est sèche.

**54** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variations conjuguées de  $\kappa_1$ ,  $m$  et  $V_0$  autour de A36m - C10, S. 6.4.3.

Série de sons de la catégorie B3. B3 évoque le timbre de bois percuté. Le timbre est peu *brillant* (sombre).

**55** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variations conjuguées de  $\kappa_1$ ,  $m$  et  $V_0$  autour de A36m - C10, S. 6.4.3.

Série de sons de la catégorie B4. B4 évoque le timbre de bois percuté. Le timbre est très peu *brillant* (très sombre). Les paramètres  $m$  et  $k$  sont élevés.

**56** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variations conjuguées de  $\kappa_1$ ,  $m$  et  $V_0$  autour de A36m - C10, S. 6.4.3.

Série de sons de la catégorie BT. BT évoque le timbre du bois percuté avec une Attaque sèche ("tranchante").

**57** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussion de C10 : variations conjuguées de  $\kappa_1$ ,  $m$  et  $V_0$  autour de A36M - C10, S. 6.4.3.

Série de sons de la catégorie PL. PL a pour Attaque une Attaque qui évoque les labiales « P » ou « B », un choc « lourd » suivi d'une Décroissance. Le paramètre  $V_0$  est faible.

**58** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références - C10, S. 6.4.4.

La séquence se compose chronologiquement des percussions A1h, A1m, A1s, A1p. Puis la séquence se termine par les percussions A1h et A1s (x2). La SV percütée est la Corde A1 (C100).

**59** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références - C10, S. 6.4.4.

La séquence se compose chronologiquement des percussions A36h, A36m, A36s. Puis la séquence se termine par les percussions A36h et A36s (x2). La SV percütée est la Corde A36 (C100).

**60** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références : variation de  $V_0$  - C10, S. 6.4.5.

Percussion du marteau A36s sur la Corde A36. Deux séries à  $V_0$  croissant. La courbe de croissance pour la deuxième série est deux fois plus forte. Le contraste est important. L'effet musical est conforme aux attentes.

**61** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références : variation de  $V_0$  - C10, S. 6.4.5.

Percussion du marteau A1p sur la Corde A1. Deux séries à  $V_0$  croissant. La courbe de croissance pour la deuxième série est deux fois plus forte. Le contraste est important. L'effet musical est conforme aux attentes.

**62** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références : variation de  $V_0$  - C10, S. 6.4.5.

Percussion du marteau A36h sur la Corde A36. Deux séries à  $V_0$  croissant. La courbe de croissance pour la deuxième série est deux fois plus forte. L'effet musical est conforme aux attentes toutefois le marteau donne peu d'enrichissement spectral.

**63** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références avec et sans LIA de relaxation - C10, S. 6.4.6.

Percussion du marteau A36h sur la Corde A36. La séquence se compose de deux séries de 5 sons. Elles consistent à faire varier par valeurs croissantes  $V_0$ . Dans la première série, le LIA de relaxation est présent. Dans la deuxième série, le LIA de relaxation est absent. Les séries se ressemblent. Cependant, on observe dans la première une variation de timbre plus homogène.

**64** Butée non-linéaire avec relaxation : Percussions de références avec et sans LIA de relaxation - C10, S. 6.4.6.

Percussion du marteau A1p sur la Corde A1. La séquence se compose de deux séries de 5 sons. Elles consistent à faire varier par valeurs croissantes  $V_0$ . Dans la première série, le LIA de relaxation est présent. Dans la deuxième série, le LIA de relaxation est absent. On n'observe pas de différence sensible entre les deux séries.

**65** Synthèse : Singularités - C10, S. 6.5.

Recueil de timbres singuliers (14 sons) « sons singuliers ». Ils se caractérisent pour la plupart par le fait que l'on perçoit en plus de l'excitation un phénomène d'étouffement. Nous avons obtenu ces simulations à partir de paramètres spécifiques du modèle de marteau feutré non-linéaire sur C10. La séquence fait entendre d'abord trois percussions : S8, S9 et "classique" puis l'ensemble des autres sons par affinités perceptives. Les deux dernières simulations de la séquence sont réalisées par un seul percuteur.

**66** Timbres stressés - C12, S. Introduction

Illustration sur un instrument à peaux réel de l'effet de stress. Sur un bongo, on entend successivement : une série stressée pris dans un contexte de jeux, un commentaire du musicien, la même série jouée non stressée, une frappe normale (x2), une frappe stressée (x2) et de nouveau un extrait pris dans un contexte de jeux, plus courts que le précédent - jeu normal puis jeu stressé (x2).

**67** Expérience I : Jugement de similarité sur les débuts d'impact - C12, S. 1.1.

Timbres stressés de timbale. La séquence permet d'entendre les 21 stimuli à la suite par groupe de trois ; chaque groupe présente chronologiquement une frappe à stress fort, une frappe à stress moyen et une frappe à stress faible.

**68** Expérience II : Catégorisation libre sur les stimuli entiers - C12, S. 1.2.

Timbres stressés de timbale. Les 45 stimuli figurent dans la séquence sonore, par paquet de 5 ; chaque paquet est ordonné par le type de frappe : frappe tenue, stress fort, stress moyen, stress faible, frappe libre.

**69** Application numérique du phénomène d'amortissement par choc visqueux : Simulation de la percussion d'un xylophone - C12, S. 2.2.

A partir d'un modèle de SV de xylophone détaillée dans la section 5.1 (chapitre XII), une percussion illustrant l'atténuation caractéristique d'un timbre stressé a été simulée. Le son résultant est répété une fois.

**70** Les instruments - C12, S. 3.1.

Percussion de synthèse de trois modèles de référence pour les instruments à percussion : Xylo, Bongo, Gong. La séquence est composée respectivement de la percussion du Xylo (x2), du Bongo (x2) et du Gong (x2).

**71** Effet de stress : sur le Bongo - C12, S. 3.2.

Application du modèle en pression. La séquence se compose chronologiquement des sons du Bongo issus : - d'une frappe normale, - d'une frappe tenue, - de la série ou la force en pression,  $F_0$ , varie par valeurs décroissantes (donc la fréquence de rappel décroît), - de la série ou la durée de la force en pression,  $T$ , varie par valeurs croissantes.

**72** Effet de stress : sur le Gong - C12, S. 3.2.

Application du modèle en pression. La séquence met en jeu quatre simulations de percussions de gong. Les trois premières sont issues du modèle en pression : - frappe normale, - frappe stressée, - frappe tenue. La quatrième simulation à frappe tenue est issue du modèle de marteau feutré. L'effet de "frappe tenue" dans la troisième simulation du modèle en pression est insuffisant. Dans la quatrième simulation, l'effet de "frappe tenue" est bien réalisé par le modèle de marteau feutré mais ce dernier se comporte indifféremment suivant qu'il y ait ou non une force extérieure appliquée.

**73** Effet de stress : sur le Xylo - C12, S. 3.2.

Application du modèle en pression. Nous pouvons ouïr dans la séquence différentes percussions sur le Xylo selon l'ordre suivant : - frappe libre, - une série dans laquelle  $F_0$  varie par valeurs décroissantes (donc la fréquence de rappel décroît), - une série de simulations en pression à contacts multiples dans laquelle  $Z_b$  varie par valeurs croissantes, - une série de simulations en pression à un seul contact dans laquelle  $Z_b$  varie par valeurs croissantes, - une série dans laquelle varie  $T$  par valeurs décroissantes ; la série est une interpolation de la frappe tenue à la frappe libre.

**74** Isorésonance, catégorie I - Annexe B, S. 3.2.

Un ensemble de sons isorésonants sur le Xylo

**75** Isorésonance, catégorie II - Annexe B, S. 3.2.

Un ensemble de sons isorésonants sur le Xylo

**76** Isorésonance, catégorie III - Annexe B, S. 3.2.

Un ensemble de sons isorésonants sur le Xylo

**77** Isorésonance, catégorie IV - Annexe B, S. 3.2.

Un ensemble de sons isorésonants sur le Xylo

**RESUME** L'étude et la simulation des phénomènes percussifs est abordée dans le contexte de la création musicale par ordinateur. Il s'agit d'une part d'apporter une meilleure connaissance sur les mécanismes physiques et perceptifs en cause dans la percussion. Il s'agit d'autre part de construire des éléments logiciels pour une exploitation artistique.

La méthode requise est de confronter trois domaines de représentation du son : la description par modélisation physique, la description du signal acoustique et la description en termes de perception. L'attention est portée plus particulièrement sur les modèles physiques. Ces derniers sont réalisés et approfondis à l'aide d'un langage de synthèse sonore adapté à la simulation temps-réel.

Dans la première partie, nous effectuons une synthèse des travaux antécédents notamment sur la percussion pianistique et sur les sons percussifs non-instrumentaux. Le langage de synthèse est décrit également.

Dans la deuxième partie, "chocs viscoélastiques", nous étudions exhaustivement un modèle minimal de reproduction du son percussif. Quatre formes percussives sont mises en évidence. A partir de ce modèle, nous étudions des séries de percussions rapprochées dans le temps. Certaines séries génèrent sur un oscillateur simple des transitoires percussifs contenant des modulations de hauteurs. Un système d'équations permet d'accorder ces modulations. En outre, des synthèses de phonèmes à consonnes plosives sont réalisées à partir de modèles de percussion.

Dans la troisième partie, "dissipation et amortissement", un modèle différentiel de marteau de piano, incluant le comportement dissipatif du feutre, est calibré à partir de courbes expérimentales. Des simulations de sons de cordes percutees donnent de bons résultats quand la vitesse de frappe augmente. Nous explorons empiriquement les potentiels sonores du modèle. Une difficulté théorique sur le feutre conduit à préciser les différences entre le formalisme des réseaux électriques et le formalisme des systèmes mécaniques particulières. L'amortissement dans la percussion est abordé par une expérience psychoacoustique sur des sons réels de timbale stressée. Un modèle de percussion par "effet de stress" produit des sons stressés de gongs, de bongos et de xylophones virtuels. Un raisonnement mathématique démontre l'amortissement caractéristique par effet de stress.

### **Study and simulation of percussion phenomena in musical instruments**

**RESUME** The study and the simulation of the percussion phenomena are approached in the context of musical creation by computer. The goal is on the one hand to bring a better knowledge on the physical and perceptive mechanisms in the percussion, on the other hand to build software elements for an artistic use.

The necessary method is to confront three fields of sound representation: the description by physical model, the description of the acoustic signal and the description in terms of perception. The attention is related more particularly to the physical models. The latter are carried out and deepened using a sound language for synthesis adapted to real-time simulation.

In the first part, we make a synthesis of previous works in particular on the pianistic percussion and the non-instrumental percussion sounds. The synthesis language is also described.

In the second part, " viscoelastic shocks ", we exhaustively study a minimal model of percussion sound. Four percussives forms are highlighted. From this model, we study series of percussions brought closer in time. On a simple oscillator, certain series generate percussive transients containing modulations pitch. A system of equations makes it possible to tune these modulations. Moreover, syntheses of phonemes are done starting from models of percussion.

In the third part, " dissipation and damping ", a differential model of piano hammer, including the dissipative behavior of the felt, is fitted starting from experimental curves. Simulations of struck cords sounds give good results when the hammer velocity increases. We empirically explore the sound potentials of the model. A theoretical difficulty on the felt led to specify the differences between the electrical supply networks formalism and the formalism of the particulate mechanical systems. Damping in the percussion is approached by an experiment psychoacoustics on real sounds of stressed timpani. A model of percussion per " effect of stress " produces stressed sounds of virtual gongs, bongos and xylophones. A mathematical reasoning shows characteristic damping by effect of stress.

#### **DISCIPLINE**

ATIAM (Acoustique, Traitement du signal, Informatique Appliqués à la Musique)

#### **MOTS-CLES**

Sound synthesis, physical modelling, percussion, musical instrument, excitation, computer music

#### **INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE**

ACROE - INPG (Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression)  
46, Avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble cedex